



00521  
139

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**



**EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA**

**“ANÁLISIS DE RIESGOS DEL CIRCUITO  
DE REACCIÓN DE UNA PLANTA DE ALQUILACIÓN  
DE MEZCLAS DE BUTANOS Y BUTENOS”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**P R E S E N T A:**

**VÍCTOR EMMANUEL RODRÍGUEZ MARTÍNEZ**

**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2003**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# **PAGINACION DISCONTINUA**


JURADO ASIGNADO:

Presidente	Prof. Jaime Medina Oropeza
Vocal	Prof. Celestino Montiel Maldonado
Secretario	Prof. Modesto Javier Cruz Gómez
1er. Suplente	Prof. Néstor Noe López Castillo
2do. Suplente	Prof. Martín Rivera Toledo


**Sitio en donde se desarrolló el tema:**

Refinería "Ing. Antonio Dovalí Jaime", Salina Cruz, Oaxaca  
Laboratorio E-212, Edificio E, Facultad de Química, U.N.A.M.

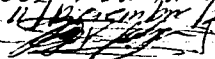
Asesor

  
Dr. M. Javier Cruz Gómez

Sustentante

  
Víctor E. Rodríguez Martínez

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la  
UNAM a difundir en formato electrónico o impreso el  
contenido de este trabajo académico.

NOMBRE: Vic. E. Rodríguez Martínez  
FECHA: 14 de febrero 2008  
FIRMA: 

## DEDICATORIAS

*En primer lugar, dedico este trabajo a Zaira, mi esposa, y a mi hijo Axel ya que ellos son mi pilar y mi fuerza; a ellos, porque me apoyaron y me alentaron a la obtención de este logro.*

*A mis padres, ya que sin ellos no hubiera podido terminar mi carrera y mucho menos titularme. Su apoyo fue fundamental para mí en los momentos más difíciles de mi vida.*

*A mis hermanos Natalia y Néstor, por estar siempre a mi lado y por el afecto que me tienen.*

*Y a todas aquellas personas que de algún modo contribuyeron para que obtuviera este triunfo; mencionarlos a todos requeriría de mucho espacio y pecaría de omisión si me faltara alguno.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*Doy gracias a Dios, por ayudarme a lo largo de este difícil camino y lograr una de mis grandes metas; también doy gracias a Él por darme todas las facultades necesarias para estudiar y terminar esta carrera.*

*A mi "alma mater", a mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, por acogerme en sus aulas y darme la magnífica oportunidad de estudiar una carrera.*

*A la Facultad de Química, por darme mediante sus profesores, los conocimientos necesarios para ser un ingeniero químico y por ser parte importante de mi vida.*

*Doy gracias a mis padres, Víctor y Guadalupe, por apoyarme en todo momento y sobre todo en los momentos más difíciles de mi vida.*

*Doy gracias a Zaira, mi esposa, por ser mi brazo derecho y mi principal apoyo; por estar siempre a mi lado en los momentos buenos y no tan buenos, por el cariño que me ha dado. Te amo, Zaira.*

*Doy gracias a Axel, mi hijo, por ser mi principal motivación ya que sin él no hubiera podido llegar hasta donde estoy.*

*Doy gracias también al Dr. Javier Cruz por haberme dado la oportunidad de ingresar a su equipo de trabajo y por ayudarme en la consecución de esta meta.*

*Doy gracias a todos los compañeros de la facultad por compartir muchos momentos de su vida conmigo y en especial, a aquellos que convivieron conmigo a lo largo de la carrera.*

*Y finalmente agradezco a la Ref. Antonio Dovalí Jaime y a PEMEX Refinación por haberme permitido estar en sus instalaciones y por la información que me proporcionaron para la realización de este trabajo.*

## PRÓLOGO

El desarrollo tecnológico experimentado por los países industrializados ha llevado consigo una mejora en el nivel de vida. Sin embargo, la proliferación de instalaciones industriales y el transporte de determinados materiales han implicado asimismo la aparición de nuevos riesgos, que pueden originar accidentes graves con un fuerte impacto sobre la población y sobre el entorno. Esta situación hace patente la necesidad de dedicar mayores esfuerzos a la reducción de estos riesgos a un nivel tolerable, compatibles con los objetivos de desarrollo sostenible actualmente perseguidos.

Sólo aquello que es conocido puede ser controlado. Por ello, se ha de ser capaz de identificar las situaciones de peligro y analizar y evaluar el riesgo asociado. El objetivo del presente trabajo es mostrar todos los aspectos relacionados en la realización del análisis de riesgo de la sección de reacción de la planta de alquilación, de la Refinería "Ing. Antonio Dovalí Jaime".

Desde una breve reseña histórica de la seguridad industrial y el riesgo hasta la aplicación práctica de las técnicas de análisis de riesgo escogidas, este trabajo pretende dar a conocer lo que es el riesgo así como sus técnicas de análisis; de las técnicas de análisis de riesgos, se escogen cuatro que se van a usar para el presente trabajo, por lo que se da una explicación a fondo de cada una de ellas para entender su fin, su procedimiento y aspectos relevantes de éstas.

Se da una explicación lo suficientemente detallada de la reacción de alquilación así como de sus procesos a nivel industrial y una breve descripción del proceso de alquilación con HF que tiene la planta de alquilación de la que se hizo el análisis de riesgos.

Por último y como parte fundamental de este trabajo, se muestran los resultados de la aplicación de las técnicas de análisis de riesgos a la sección de reacción de la planta de alquilación así como las conclusiones y las recomendaciones que surgen del análisis.



# CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Justificación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4. Técnicas de análisis de riesgos utilizadas.....</b>	<b>6</b>
<b>2. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. PRIMERA PARTE EL RIESGO: CONCEPTOS Y ESTUDIO.....</b>	<b>8</b>
2.1.1. Breve visión histórica del riesgo.....	9
2.1.2. Nociones preliminares sobre el riesgo.....	10
2.1.2.1. Definición de riesgo.....	10
2.1.2.2. Clasificación del riesgo.....	11
2.1.2.3. Tolerabilidad del riesgo.....	12
2.1.2.4. Criterios de tolerabilidad y cuantificación del nivel de riesgo.....	14
2.1.3. El análisis de riesgos.....	16
2.1.3.1. Conceptos previos sobre el análisis de riesgos.....	16
2.1.3.2. Etapas del análisis de riesgos.....	16
2.1.3.2.1. Identificación de riesgos.....	18
2.1.3.2.2. Análisis de las causas de los riesgos identificados.....	18
2.1.3.2.3. Análisis de consecuencias.....	19
2.1.3.2.4. Caracterización del medio.....	20
2.1.3.3. Administración del riesgo.....	20
2.1.3.3.1. Eliminación de riesgos.....	21
2.1.3.3.2. Aceptación de riesgos.....	21
2.1.3.3.3. Transferencia de riesgos.....	22
2.1.3.3.4. Tratamiento de riesgos.....	23
2.1.3.4. Técnicas de análisis de riesgos.....	23
2.1.3.4.1. Técnicas de identificación y análisis de causas de riesgos.....	23
2.1.3.4.1.1. Métodos comparativos.....	26
2.1.3.4.1.2. Índices de riesgo.....	28
2.1.3.4.1.3. Métodos generalizados.....	28
2.1.3.4.2. Técnicas de análisis de consecuencias.....	30
2.1.3.4.2.1. Los accidentes mayores.....	31
2.1.3.4.2.2. Tipificación de los accidentes mayores.....	32
2.1.3.4.2.3. Escenarios de accidentes mayores.....	34
2.1.3.4.2.4. Consecuencias de los accidentes mayores y modelos de vulnerabilidad.....	38
2.1.3.4.2.5. Factores determinantes de la magnitud de las consecuencias.....	45
<b>2.2. SEGUNDA PARTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RIESGOS.....</b>	<b>46</b>
2.2.1. Introducción.....	47
2.2.2. Análisis de riesgos y operabilidad HazOp.....	47
2.2.2.1. Introducción al análisis HazOp.....	47
2.2.2.1.1. Riesgo potencial y problemas de operación.....	48
2.2.2.1.2. Desviaciones del intento de diseño.....	48
2.2.2.2. Nociones preliminares sobre el análisis HazOp.....	49
2.2.2.2.1. Palabras guía.....	50
2.2.2.2.1.1. Palabras primarias.....	50
2.2.2.2.1.2. Palabras secundarias.....	51
2.2.2.3. Metodología del análisis HazOp.....	54
2.2.2.4. El grupo de trabajo.....	60

2.2.2.5.	Trabajo de preparación.....	61
2.2.2.5.1.	Recopilación de datos.....	62
2.2.2.5.2.	Comprensión del tema.....	63
2.2.2.5.3.	Subdivisión de la planta y planeación de la secuencia.....	63
2.2.2.5.4.	Marcaación de los planos.....	64
2.2.2.5.5.	Selección de palabras guía adecuadas.....	64
2.2.2.5.6.	Preparación de la agenda de trabajo diaria.....	65
2.2.2.5.7.	Preparación del calendario de actividades.....	65
2.2.2.5.8.	Selección del grupo de trabajo.....	66
2.2.2.6.	El reporte final.....	66
<b>2.2.3.</b>	<b>Índice DOW.....</b>	<b>67</b>
2.2.3.1.	Introducción al índice DOW.....	67
2.2.3.2.	Información necesaria para el índice DOW.....	68
2.2.3.3.	Descripción del método del índice DOW.....	69
2.2.3.3.1.	División y selección de las unidades de proceso.....	71
2.2.3.3.2.	Determinación del factor material (FM).....	72
2.2.3.3.3.	Determinación de factores de riesgo.....	73
2.2.3.3.4.	Evaluación del factor de riesgo (F3) y el factor de daño (FD).....	76
2.2.3.3.5.	Evaluación del Índice de Fuego y Explosión (IF&E).....	76
2.2.3.3.6.	Evaluación del valor de sustitución del equipo (VS).....	78
2.2.3.3.7.	Evaluación del "Daño Máximo Probable a la Propiedad" base (MPPD).....	78
2.2.3.3.8.	Evaluación y aplicación de los factores de bonificación.....	79
2.2.3.3.9.	Evaluación del "Daño Máximo Probable a la Propiedad" efectivo (MPPD).....	81
2.2.3.3.10.	Determinación de los "Máximos Días Probables de Disponibilidad" (MPDO) y los costos por "Interrupción de Negocios" (BI).....	81
2.2.3.4.	Formato de registro del índice DOW.....	82
<b>2.2.4.</b>	<b>Análisis de árbol de fallas (FTA).....</b>	<b>85</b>
2.2.4.1.	Introducción al análisis de árbol de fallas.....	85
2.2.4.2.	Conceptos previos.....	85
2.2.4.3.	Metodología del FTA.....	86
2.2.4.3.1.	Definición del problema.....	87
2.2.4.3.2.	Construcción del árbol de fallas.....	87
2.2.4.3.2.1.	Causas comunes de fallas.....	90
2.2.4.3.3.	Análisis del árbol de fallas.....	92
2.2.4.3.3.1.	Análisis cualitativo del árbol de fallas.....	93
2.2.4.3.3.1.1.	Obtención de los MCS.....	95
2.2.4.3.3.2.	Análisis cuantitativo del árbol de fallas.....	96
2.2.4.3.3.2.1.	Análisis de MCS.....	97
<b>2.2.5.</b>	<b>Análisis de consecuencias.....</b>	<b>99</b>
<b>2.3.</b>	<b>Planta de alquilación.....</b>	<b>100</b>
<b>2.3.1.</b>	<b>Conceptos previos de la alquilación.....</b>	<b>101</b>
2.3.1.1.	Antecedentes.....	101
2.3.1.2.	Reacciones de alquilación.....	101
2.3.1.3.	Variables de reacción.....	105
2.3.1.4.	Catalizadores.....	108
2.3.1.5.	Procesos industriales de alquilación.....	108
<b>2.3.2.</b>	<b>Proceso de alquilación con HF.....</b>	<b>112</b>
2.3.2.1.	Introducción.....	112
2.3.2.2.	Principales sustancias involucradas en el proceso de alquilación.....	114
2.3.2.3.	Descripción del proceso de la planta de alquilación.....	114
2.3.2.3.1.	Sección de preparación de la alimentación.....	114
2.3.2.3.2.	Sección de reacción, regeneración de HF y tratamiento de ASA's.....	117
2.3.2.3.3.	Sección de fraccionamiento y de tratamiento de productos (purificación).....	118
2.3.2.4.	Variables de operación de la planta de alquilación.....	120
<b>2.3.3.</b>	<b>Justificación del análisis de riesgos de la planta de alquilación.....</b>	<b>123</b>

<b>3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGOS.....</b>	<b>124</b>
3.1. Metodología para el análisis de riesgos de la planta de alquilación.....	125
3.2. Resultados del análisis HazOp.....	125
3.3. Resultados del índice DOW.....	126
3.4. Resultados del análisis de árbol de fallas.....	127
3.4.1. Selección de escenarios para el análisis de árbol de fallas.....	130
3.4.2. Construcción y análisis del árbol de fallas.....	131
3.5. Resultados del análisis de consecuencias.....	135
3.5.1. Estimación de la rapidez de descarga de la fuga.....	139
3.5.2. Evaluación de la dispersión de una nube de alquilado.....	140
3.5.3. Evaluación de un dardo de fuego o "jet fire".....	140
3.5.4. Evaluación del incendio y explosión de una nube de vapor no confinada.....	141
3.5.5. Evaluación de la explosión de alquilado descargado.....	143
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>145</b>
4.1. Conclusiones y recomendaciones del análisis HazOp.....	146
4.2. Conclusiones y recomendaciones del índice DOW.....	148
4.3. Conclusiones y recomendaciones del análisis de árbol de fallas.....	149
4.4. Conclusiones y recomendaciones del análisis de consecuencias.....	154
4.5. Conclusiones generales.....	155
<b>ANEXOS.....</b>	<b>157</b>
Anexo I. Diagrama de flujo de proceso. Hydrisom process (eor case) & HF alkylation process.....	158
Anexo II.A. Diagrama de tubería e instrumentación. Acid settler and acid rerun column. Parte I.....	159
Anexo II.B. Diagrama de tubería e instrumentación. Acid settler and acid rerun column. Parte II.....	160
Anexo II.C. Actas resultantes del análisis HazOp.....	161
Anexo II.D. Lista jerarquizada de escenarios.....	186
Anexo III. Índice DOW. Asentador de ácido fluorhídrico DA-302. Radio de exposición y área de exposición.....	187
Anexo IV.A. Árbol de fallas sin protecciones.....	188
Anexo IV.B. Árbol de fallas con recomendaciones aplicadas.....	189
Anexo V.A. Evaluación de la dispersión de una nube de alquilado.....	190
Anexo V.B. Evaluación de un dardo de fuego o "jet fire".....	191
Anexo V.C. Evaluación del incendio de una nube de vapor no confinado.....	192
Anexo V.D. Evaluación de la explosión de una nube de vapor no confinado.....	193

<b>APÉNDICES.....</b>	<b>194</b>
<b>Apéndice A. Principales accidentes de la industria química.....</b>	<b>195</b>
<b>Apéndice B. Factores de riesgo y bonificación del Índice DOW.....</b>	<b>197</b>
<b>Apéndice C. Conceptos básicos de álgebra booleana.....</b>	<b>200</b>
<b>Apéndice D. Hojas de seguridad de sustancias y generalidades del HF.....</b>	<b>202</b>
<b>Apéndice E. Estabilidad ambiental.....</b>	<b>208</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>211</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>219</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Fig. 2.1 Factores que afectan a la percepción del riesgo.....	13
Fig. 2.2 Etapas en la realización de un análisis de riesgos.....	17
Fig. 2.3 Clasificación de las principales técnicas de identificación y análisis de causas de los riesgos.....	25
Fig. 2.4 Esquema simplificado de los posibles accidentes que se pueden producir en caso de escape accidental de un producto tóxico o inflamable.....	32
Fig. 2.5 Distintas posibilidades de un incendio.....	37
Fig. 2.6 Distintas posibilidades de una explosión.....	37
Fig. 2.7 Esquema de las consecuencias de los accidentes mayores.....	38
Fig. 2.8 Esquema de ejecución del análisis HazOp.....	57
Fig. 2.9 Procedimiento de ejecución del índice DOW.....	70
Fig. 2.10 Factor de daño (FD) de la unidad de proceso en función de F3 y FM.....	76
Fig. 2.11 Radio de exposición (RE) en función del IF&E.....	78
Fig. 2.12 Factor de bonificación efectivo (FBE) a partir del factor de bonificación (FB).....	81
Fig. 2.13 Máximos días probables de indisponibilidad (MPDO) en función del MPPD efectivo.....	82
Fig. 2.14 Estructura de un árbol de fallas.....	88
Fig. 2.15 Causas comunes de fallas.....	91
Fig. 2.16 Reactor Phillips de HF.....	110
Fig. 2.17 Unidad de alquilación en cascada con ácido sulfúrico.....	111
Fig. 2.18 Esquema básico del proceso Effluent Refrigeration.....	112

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1 Datos de uso común para la identificación del peligro de las sustancias.....	19
Tabla 2.2 Aplicación de las técnicas de identificación y análisis de las causas de los riesgos de cada una de las etapas de vida de una planta.....	26
Tabla 2.3 Clasificación de las consecuencias de un accidente mayor según el programa APELL de la ONU.....	39
Tabla 2.4 Consecuencias para diversos flujos térmicos.....	41
Tabla 2.5 Daños a edificios y equipos por sobrepresión.....	42
Tabla 2.6 Estimación del alcance de magnitudes físicas peligrosas.....	44
Tabla 2.7 Definición de las palabras guía secundarias.....	52
Tabla 2.8 Matriz de desviaciones para el análisis HazOp.....	53
Tabla 2.9 Formato de registro de las sesiones HazOp.....	55
Tabla 2.10 Niveles de frecuencia.....	58
Tabla 2.11 Niveles de gravedad.....	58
Tabla 2.12 Matriz de riesgos. y Tabla 2.13 Matriz de riesgos modificada.....	59
Tabla 2.14 Clases de riesgos.....	59
Tabla 2.15 Categorías de riesgo en función del IF&E.....	77
Tabla 2.16 Formato de registro para el IF&E.....	83
Tabla 2.16 Formato de registro para el IF&E (continuación).....	84
Tabla 2.17 Simbología para la elaboración de un árbol de fallas.....	86
Tabla 2.18 Criterios para la asignación de probabilidades.....	98
Tabla 3.1 Registro de cálculo del índice DOW.....	128
Tabla 3.1 Registro de cálculo del índice DOW (continuación).....	129
Tabla 3.2 Probabilidad de ocurrencia de los eventos básicos (provenientes del diagrama del anexo IV.A.).....	132
Tabla 3.3 Cálculo de conjuntos mínimos y de sus porcentajes de contribución y cálculo de la probabilidad del evento tope (anexo IV.A.).....	134
Tabla 3.3 Cálculo de conjuntos mínimos y de sus porcentajes de contribución y cálculo de la probabilidad del evento tope (continuación).....	135
Tabla 3.4 Propiedades de la corriente de alquilado.....	137
Tabla 3.5 Niveles de radiación.....	139
Tabla 3.6 Niveles de sobrepresión.....	139
Tabla 3.7 Resultados obtenidos de la dispersión de una nube tóxica.....	140
Tabla 3.8 Resultados obtenidos de un dardo de fuego.....	141

Tabla 3.9 Resultados obtenidos del incendio de una nube de vapor no confinada.....	141
Tabla 3.10 Resultados obtenidos de la explosión de una nube de vapor no confinada.....	142
Tabla 3.11a Daños esperados para la explosión de una nube de vapor no confinada.....	142
Tabla 3.11b Daños esperados para la explosión de una nube de vapor no confinada.....	143
Tabla 3.11c Daños esperados para la explosión de una nube de vapor no confinada.....	143
Tabla 3.12 Resultados obtenidos de la explosión del alquilado descargado.....	143
Tabla 3.13 Daños esperados de la explosión del alquilado descargado.....	144
Tabla 4.1 Lista jerarquizada de recomendaciones para la mitigación de riesgos.....	147
Tabla 4.2 Probabilidad de ocurrencia de los eventos básicos (provenientes del diagrama del anexo IV.B.).....	152
Tabla 4.3 Cálculo de conjuntos mínimos y de sus porcentajes de contribución y cálculo de la probabilidad del evento tope (anexo IV.B.).....	153
Tabla AE.1 Definición del tipo de estabilidad atmosférica.....	208
Tabla AE.2 Clase de estabilidad según el gradiente térmico vertical.....	209
Tabla AE.3 Clase de estabilidad según la oscilación horaria de la dirección del viento.....	209
Tabla AE.4 Determinación de la clase de estabilidad atmosférica según la velocidad del viento y la radiación solar.....	210
Tabla AE.5 Nivel de insolación según la radiación solar recibida.....	210
Tabla AE.6 Nivel de insolación según la altura del sol.....	210

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**





## 1.1. Antecedentes. (3, 28)

La rápida evolución tecnológica que ha experimentado la industria en general y la industria química en particular, su gran crecimiento y, consecuentemente, el incremento de inventarios de productos químicos en las instalaciones y en diversos medios de transporte, han provocado un aumento de la probabilidad de que ocurran grandes accidentes con un notable impacto sobre personas, medio ambiente y equipo.

Hoy día, existen plantas químicas de gran tamaño, por lo que su capacidad de trabajo es mayor que la que tenían las plantas de hace veinte años. Es lógico pensar que este crecimiento, tanto en número de industrias como en su capacidad, ha aumentado el número de personas –tanto las que están en las plantas como las que se encuentran fuera de ellas– que están expuestas a las consecuencias de un accidente industrial.

Estos riesgos se han puesto de actualidad en las últimas décadas desgraciadamente a causa de algunos accidentes –por citar unos ejemplos, en Bhopal, India, en diciembre de 1984 ocurrió la fuga de un gas venenoso (isocianato de metilo) en una planta de Union Carbide que abarcó una superficie de 40 km<sup>2</sup>, ocasionando la muerte de 2,500 personas por envenenamiento directo; en San Juan Ixhuatepec, México, en noviembre de 1984 se produjo la explosión de varios contenedores de gas L.P. ocasionando la muerte de cerca de 450 personas, para más información ver apéndice A– de graves consecuencias.

Por lo anterior, se ha tomado conciencia de la posibilidad de que suceda un accidente industrial que, por su magnitud, provoque daños de importancia tanto a las instalaciones como al medio ambiente o a las personas.

La sociedad ya no sólo demanda calidad en los productos químicos, sino también seguridad en las industrias que los producen. A su vez, las industrias han respondido ante tales demandas realizando esfuerzos importantes para reglamentar las actividades de la industria en general, y sobretodo en aquellas industrias que pueden representar un mayor riesgo.

Por todo lo que se ha planteado hasta ahora, es que se han desarrollado diversas técnicas que genéricamente se llaman de “análisis de riesgos”, las cuales permiten estimar de forma cualitativa y



cuantitativa los riesgos que existen dentro de un proceso, para posteriormente buscar la forma de reducirlos.

En pocas palabras, podemos decir que el análisis de riesgos permite prever los accidentes y sus consecuencias en las plantas industriales.

Este es el marco inicial de un tema que ha repercutido, en las últimas décadas, a que la industria se encamine a procesos de mínimo riesgo para el medio ambiente y sus instalaciones, pero sobretodo para las personas.

## **1.2. Justificación.** (9, 19)

PEMEX, siendo la empresa petrolera más importante de nuestro país debido a su carácter estratégico, busca ser una empresa líder en materia de seguridad industrial y de protección ambiental. Para ello, PEMEX lanzó a mediados de 1998 una Política de Seguridad Industrial y Protección Ambiental que incluye una visión y once puntos rectores.

La visión de la Política de Seguridad Industrial y Protección Ambiental contempla los siguientes aspectos:

- La seguridad industrial y la protección ambiental son responsabilidad de cada trabajador y empleado de PEMEX.
- PEMEX deberá ser líder nacional en todos los aspectos relativos a la seguridad industrial y protección ambiental.
- El buen desempeño en seguridad industrial y protección ambiental debe ser motivo de orgullo para quienes trabajan en PEMEX y para todos los mexicanos.
- La administración de la seguridad industrial y la protección ambiental es básica para asegurar la productividad de la empresa y la armonía con la sociedad.

Para poder cumplir con la Política establecida y tener un mejor desempeño en estas materias, PEMEX estableció en todo el ámbito de la industria petrolera, el Sistema Integral de Administración de la Seguridad Industrial y la Protección Ambiental (SIASPA). Este sistema es una herramienta administrativa que facilita el diagnóstico, la evaluación y la planeación de la seguridad industrial y la



protección ambiental integradas en las operaciones productivas y en los planes de negocios de los Organismos Subsidiarios.

Los criterios de diseño del SIASPA son:

- Ser uno de los apoyos fundamentales para la aplicación de la política de seguridad y protección ambiental.
- Ser un sistema corporativo apropiado para todas las instalaciones.
- Establecer las funciones de seguridad y protección ambiental al mismo nivel que la producción y como responsabilidad de la línea de mando.
- Considerar la cultura que existe en PEMEX y orientarla a la prevención en los aspectos de seguridad y protección ambiental.
- Apoyarse en el capital más valioso de la empresa, que es el personal.
- Considerar el liderazgo como principal promotor para el establecimiento y el éxito del propio sistema.
- Basarse en la autoevaluación y el diagnóstico para la preparación de mejora en las instalaciones.
- Incluir un proceso de mejora continua.
- Ser consistente con las normas internacionales y con las mejores prácticas.

El SIASPA se compone de 18 elementos relacionados con el factor humano, los métodos y las instalaciones. Dentro de los métodos encontramos el elemento número 12 que se refiere al “análisis de riesgos” y tiene como objetivos:

- Identificar riesgos a la salud, integridad física, al medio ambiente y a la propiedad.
- Reducir los riesgos a los trabajadores y población circunvecina a las instalaciones, mediante técnicas adecuadas (medidas de prevención, protección y control).
- Reducción significativa de incidentes e impactos ambientales, así como sus consecuencias y costos asociados.
- Lograr que el personal lleve a cabo sus actividades con plena conciencia de los riesgos que implica la operación.
- Mejorar la operabilidad y confiabilidad de los equipos de proceso.
- Establecer planes de emergencia y medidas de protección.



Es así como se ve que, en nuestro caso, PEMEX Refinación debe seguir la Política de Seguridad Industrial y Protección Ambiental mediante la aplicación del SIASPA. En el caso de sus refinerías, PEMEX Refinación aplica el elemento 12 del SIASPA que se refiere al Análisis de Riesgos de sus instalaciones, para lo cual realizó un convenio con la Facultad de Química de la U.N.A.M. en el cual se acordó llevar a cabo cinco análisis de riesgos en la Refinería "Antonio Dovalí Jaime" en Salina Cruz, Oaxaca.

El análisis de riesgos del cual trata esta tesis es el del circuito de reacción de la planta de alquilación de la Refinería antes mencionada. En el capítulo correspondiente se detallará un poco más la justificación de realizar un análisis de riesgos en esta planta.

### 1.3. Objetivos.

Los objetivos a alcanzar son los siguientes:

- Identificar y evaluar los escenarios potenciales de riesgo en la sección de reacción de la planta de alquilación así como su nivel de riesgo aplicando la técnica de análisis HazOp.
- Establecer las medidas para controlar y/o reducir el nivel de riesgo encontrado en la sección de reacción de la planta de alquilación, con el fin de mejorar la operabilidad y seguridad de la sección.
- Aplicar el índice DOW a la unidad de proceso DA-302 (asentador de ácido fluorhídrico) para evaluar el nivel de riesgo de incendio o explosión y determinar el área de afectación, así como, una serie de valores de tipo monetario que nos indican la pérdida o daño a la sección en estudio.
- Aplicando la técnica de análisis de árbol de fallas (FTA) al escenario "Fuga e incendio de alquilado en las bombas GA-307 A/B de carga a la fraccionadora DA-304", evaluar y cuantificar la probabilidad de ocurrencia del evento para decidir si se acepta o no el riesgo.
- Aplicando la técnica de análisis de consecuencias en el escenario "Fuga e incendio de alquilado en las bombas GA-307 A/B de carga a la fraccionadora DA-304", determinar los posibles daños ocasionados por la sucesión del evento.
- Divulgar y fomentar los principios de seguridad e higiene a todo el personal de la planta de alquilación mediante actividades de información.



#### **1.4. Técnicas de análisis de riesgos utilizadas.**

El análisis de riesgos nos permite la obtención de índices de riesgo, la identificación de áreas potenciales de riesgo, la proposición de acciones de mitigación y la cuantificación del impacto sobre los niveles de riesgo de las acciones propuestas. Para ello, se realiza una minuciosa evaluación del diseño del proceso, su operación, así como, las políticas de mantenimiento e inspección y los planes de emergencia. Para lograr lo anterior, es que se utilizan las técnicas de análisis de riesgos, que son herramientas de análisis que nos permiten identificar, evaluar y mitigar riesgos.

Las técnicas de análisis de riesgos que se utilizarán para el presente trabajo son la técnica de análisis HazOp (Hazard and Operability Studies), el índice DOW, la técnica de análisis de árbol de fallas y por último la técnica de análisis de consecuencias. En la segunda parte del capítulo II, se explicarán más a fondo cada una de las técnicas antes mencionadas.

**CAPÍTULO II**  
**ANTECEDENTES TEÓRICOS**

**PRIMERA PARTE**  
**EL RIESGO:**  
**CONCEPTOS Y ESTUDIO**



### 2.1.1. Breve visión histórica del riesgo. (26)

Desde la Edad Media, en la que surgen las primeras acciones positivas de corporaciones profesionales o gremios, hasta la segunda mitad del siglo XIX puede decirse que son los sentimientos humanitarios, casi siempre como resultado de graves accidentes sucedidos, el argumento permanente para poner mayor o menor énfasis en las medidas proteccionistas.

El trabajo organizado y el objetivo de producir a los máximos niveles, tienen una componente de deseo generalizado: CANTIDAD en la producción. Parecía que con ella estaba asegurado un amplio beneficio, como resultado o contrapartida a la inversión / prestación de servicio, en el mundo del trabajo.

En esta época, las preocupaciones preventivas basan sus soluciones en la adecuación de condiciones físicas de las instalaciones y equipos, es decir, en los llamados factores técnicos de la producción.

Es en 1931 cuando H.W. Heinrich hace su gran aportación a la seguridad en el trabajo con la publicación del *Industrial Accident Prevention*. Pero el cambio conceptual va por otros planteamientos; la competencia hace aparecer gran cantidad de productos similares para un mismo fin. Se hace necesario pensar en CALIDAD de la producción, para diferenciarse. La consecuencia para la prevención es que se cuida prioritariamente la formación y otros aspectos incidentes en los factores humanos de la seguridad en el trabajo.

El equilibrio CANTIDAD-CALIDAD se dice que asegurará las ventas necesarias para conseguir el beneficio. Estamos ya en unas fechas en las que la variedad y cantidad de aportaciones al problema de la prevención son tan extensas que resultarían muy difíciles de enumerar.

Cabe recordar que el 31 de enero de 1940 aparece el *Reglamento General de Seguridad e Higiene del Trabajo*, antesala de la Ordenanza General del 9 de marzo de 1971.

La clásica ley de la oferta y la demanda potencia una gran dedicación a los COSTOS de producción, ya que no es suficiente una buena calidad del producto, sino el poder ofrecerlo a unos precios más bajos. Esto conlleva un problema en los márgenes de beneficio, ya que éstos se ven afectados. Por ello, se busca la inversión óptima en seguridad y se profundiza en el control de lesiones por accidentes.





Los diferentes progresos en cuanto a PRODUCCIÓN, CALIDAD y COSTOS de producción, conducen a un replanteamiento global para la producción industrial. Es necesario profundizar en el concepto de PRODUCTIVIDAD como un todo en el que incide la economía de movimientos, tiempos, esfuerzos, dinero y accidentes con pérdidas. Y así se llega a definir que, para que cualquier acto productivo elemental se realice con la máxima productividad es necesario que el sistema de trabajo empleado tienda a estas condiciones: ser el más sencillo y rápido, el menos fatigoso y costoso, y el más seguro.

Es así que nace la seguridad e higiene para el factor trabajo, al ver claramente que constituye un medio decisivo en la productividad. Sin embargo, el haber interpretado el concepto de seguridad en el trabajo como una necesidad de acción directa y exclusiva sobre los accidentes que daban lugar a lesiones, provocó unos planteamientos muy parciales en las acciones de seguridad e higiene.

Es por esas fechas que se inicia una sensibilización generalizada por los problemas que plantea la falta de higiene industrial y cuando comienzan a establecerse las estructuras organizativas adecuadas para ir fijando las responsabilidades de la seguridad en los diferentes niveles naturales del proceso productivo, de explotación y servicios.

Esta evolución, que hemos reflejado dentro de un lento desarrollo, ha sufrido —como la propia tecnología— una aceleración en las últimas décadas, y se puede pronosticar que seguirá ese ritmo en los años venideros.

Todo ello ha de ser de gran beneficio para el mundo del trabajo, siempre y cuando la seguridad e higiene no sean utilizadas como un medio para el logro de otros fines distintos a los que le son propios.

## **2.1.2. Nociones preliminares sobre el riesgo.**

### **2.1.2.1. Definición de riesgo.** (3, 26, 28)

El concepto de riesgo debemos identificarlo como la posibilidad de sufrir una pérdida, pero diferenciando entre el llamado “riesgo especulativo”, que puede tener como consecuencia una ganancia o una pérdida, y el “riesgo puro”, que sólo puede dar como resultado una pérdida o no. En inglés corresponde al término “risk”.



Para cuantificar el riesgo, se requiere de una definición más precisa. Una definición que cumple este requisito y que es ampliamente utilizada por los profesionales de la seguridad industrial es el producto de la frecuencia para un determinado evento por la magnitud de las consecuencias probables:

$$\text{Riesgo} = [\text{frecuencia del evento}] \times [\text{magnitud de las consecuencias}]$$

Íntimamente relacionado con el riesgo se encuentra el peligro que se define como una condición que puede producir efectos adversos a las personas, al medio ambiente o a la propiedad.

Cabe destacar que en nuestro idioma, se hace un uso indistinto de las palabras "riesgo" y "peligro" siendo que en las definiciones antes mencionadas se muestra una clara distinción entre ambos conceptos.

#### **2.1.2.2. Clasificación del riesgo.** (3, 16, 21)

Debido a la gran variedad de riesgos, se han propuesto diversas clasificaciones; desde un punto de vista general, se pueden clasificar en las tres categorías siguientes:

- Riesgos de categoría A: son los inevitables y aceptados, sin compensación (por ejemplo, morir fulminado por un rayo).
- Riesgos de categoría B: evitables, en principio, pero que deben considerarse inevitables si uno quiere integrarse plenamente en la sociedad moderna (por ejemplo, manejar un automóvil).
- Riesgos de categoría C: normalmente evitables, voluntarios y con compensación (por ejemplo, practicar un deporte extremo).

Desde el punto de vista más concreto de las actividades industriales, los riesgos pueden clasificarse en otras tres categorías:

- Riesgos convencionales: relacionados con la actividad y el equipo existentes en cualquier sector (electrocución, caídas).
- Riesgos específicos: asociados a la manipulación o utilización de productos que, por su naturaleza, pueden ocasionar daños (productos tóxicos, radioactivos).



- Riesgos mayores: relacionados con accidentes y situaciones excepcionales. Sus consecuencias pueden presentar una especial gravedad ya que la rápida expulsión de productos peligrosos o de energía podría afectar áreas considerables (escape de gases, explosiones).

Los dos primeros tipos de riesgo corresponden al tratamiento clásico de la seguridad e higiene en el trabajo, y por su naturaleza son, en general, fáciles de prevenir. En cambio, las características de los riesgos mayores los convierten probablemente en la contingencia más temible. Este tipo de riesgos tiene una característica muy importante: la posibilidad de traspasar los límites de la instalación e incidir sobre la población externa y sobre el medio ambiente.

### 2.1.2.3. Tolerabilidad del riesgo. (3, 28)

Cualquier actividad humana, por beneficiosa que sea, conlleva ciertos riesgos. En especial, para la industria química, queda claro que, por muchas que sean las salvaguardas que se apliquen, su actividad implica un riesgo, que sólo puede eliminarse a expensas de eliminar la industria.

Es evidente que en el mundo actual, la industria química es indispensable dada la diversidad de productos que de ella se obtienen, por lo que la cuestión se reduce a decidir cuál es el nivel de riesgo aceptable en una instalación o proceso determinado. La decisión se puede tornar un tanto difícil si consideramos una serie de factores que se dan con frecuencia, de los cuales dos juegan un papel fundamental: el nivel de conocimiento de las características del riesgo en cuestión, y el hecho de que el riesgo sea asumido voluntariamente o no.

Es importante distinguir entre el riesgo que objetivamente existe y el riesgo percibido por las personas. Se sabe bien que la familiarización con una actividad peligrosa determinada reduce el nivel de riesgo percibido. Esto beneficia a industrias tradicionales (agricultura, construcción, etc.) frente a industrias nuevas (química, nuclear, etc.), en las que la aceptación social es menor, a pesar de que la accidentabilidad es mucho mayor en las primeras.

Se puede ver que hay un factor adicional a esta percepción, ya que sea cual sea el número de víctimas en actividades, por ejemplo, agrícolas, sabemos que raramente afectan a personas distintas de las que



están directamente involucradas. En cambio, en industrias como la química o la industrial, el potencial de daño puede exceder considerablemente los límites físicos de la planta.

Muchos de los riesgos industriales no son del todo conocidos por la mayoría de la gente; así, el riesgo que puede tener una industria química, un vertedero de residuos industriales o un oleoducto es a menudo mal percibido y a veces magnificado por la ignorancia o la mala información. Por otro lado, la mayoría de estos riesgos pueden considerarse impuestos a la población, que no ha escogido voluntariamente –la elección se ha hecho sin conocimiento o bien forzadas por las circunstancias– vivir o trabajar cerca de una determinada instalación.

De acuerdo con lo planteado hasta este punto, podemos clasificar los riesgos –de manera un tanto esquemática– en cuatro categorías, según la percepción social, y que son los riesgos voluntarios conocidos, los voluntarios desconocidos, los involuntarios conocidos y los involuntarios desconocidos.

Los riesgos pertenecientes a estas cuatro categorías son muy distintos entre sí y, por lo tanto, compararlos no tiene ningún sentido. Desafortunadamente, muchos de los riesgos industriales se encuentran en el peor cuadrante de la figura 2.1, es decir, se corren involuntariamente y total o parcialmente desconocidos.

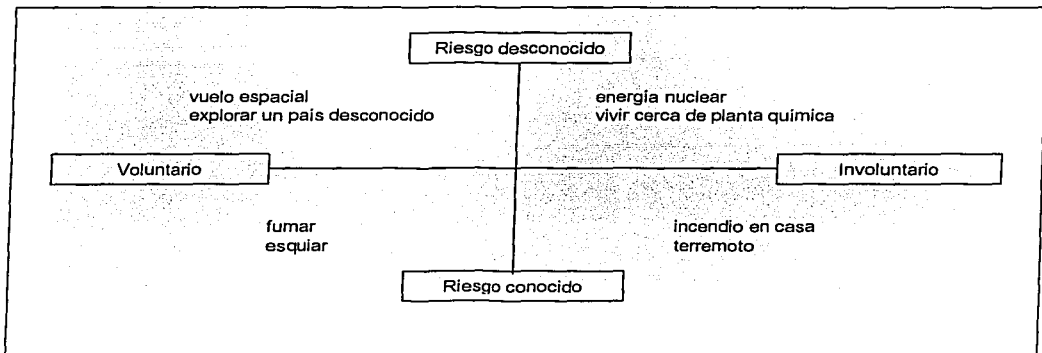


Fig. 2.1 Factores que afectan a la percepción del riesgo. (3)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Esto dificulta la tolerabilidad por parte de la sociedad por lo que hace necesaria una buena gestión del riesgo en todos sus aspectos.



Por otra parte, hay que tener en cuenta que la sociedad se fija más por los accidentes que representan un impacto social –la muerte simultánea de un grupo de personas– que por los que afectan de forma directa a un individuo o a un colectivo más pequeño. Y esto sucede aunque el riesgo individual sea relativamente mayor al riesgo grupal.

El rechazo o la aceptación de la actividad industrial química está supeditada a la imagen que ésta ha adquirido a los ojos de la sociedad, aunque sus beneficios no sean tan obvios para el público en general. Y es que el mercado primario de la industria química son otras industrias antes de llegar al consumidor final. La gente no identifica los productos que utiliza en la vida diaria con la industria química, lo que dificulta la percepción del beneficio de esta actividad industrial.

#### **2.1.2.4. Criterios de tolerabilidad y cuantificación del nivel de riesgo.** (3, 28)

Con todo lo que se ha planteado hasta ahora, se asume que es imposible la eliminación total del riesgo; por lo tanto, debemos asumir ciertos riesgos ante determinadas situaciones. En ocasiones, la sociedad acepta cierto número de riesgos a cambio de determinadas compensaciones. Incluso, se aceptan riesgos con una tasa de mortalidad relativamente alta (por ejemplo, fumar o deportes extremos). Así pues, en muchos casos el riesgo se acepta voluntariamente y, en muchos casos, se trata de riesgos bien conocidos o, en su defecto, con los que se está familiarizado.

La situación se complica, como se ha mencionado antes, cuando el riesgo es involuntario y desconocido. No obstante, los miembros de una sociedad industrializada reconocen las ventajas que representa la actividad industrial, y en nuestro caso, de la industria química.

Esto nos lleva a pensar que la sociedad está dispuesta a tolerar un cierto riesgo extra a cambio de disfrutar de los beneficios de la actividad industrial.

El problema surge cuando el riesgo es demasiado alto o cuando un determinado sector de la sociedad considera que la cuota de riesgo que le corresponde es demasiado alta. Y aquí tenemos que considerar dos aspectos. En primer lugar, que es prácticamente imposible que el riesgo de una determinada instalación –que en principio beneficia a un amplio sector de la sociedad– se reparta por igual entre todos los individuos, por razones evidentes de proximidad geográfica, etc. En segundo lugar, que en un



número determinado de casos, esta percepción de la sociedad esté correctamente fundamentada y el riesgo sea, ciertamente, elevado.

Es evidente que el control del riesgo y su mantenimiento dentro de límites "tolerables" tiene que ser uno de los objetivos principales tanto de la industria como del gobierno de cualquier país, teniendo en cuenta que no se puede aspirar a tener determinadas instalaciones sin aceptar un margen de riesgo, y que a final de cuentas, quedan algunos factores de difícil o imposible control.

Si bien es difícil y complejo, se han realizado intentos para establecer valores para el riesgo tolerable. Éste es un terreno delicado, en que la principal unidad de medida —la vida humana— origina la intervención simultánea de factores no sólo de orden práctico sino también de orden ético y social. Por ello, casi ningún estado ha fijado oficialmente una escala de valores para el riesgo "tolerable", y no parece que la tendencia futura vaya por esa línea.

A pesar de ello, el Estado ha de emitir normas para la protección del público, autorizar o no nuevos productos y plantas industriales, etc.

Ahora bien, para poder decidir sobre si un riesgo es aceptable o no, se requiere analizar de alguna forma su magnitud, lo que nos lleva a realizar un análisis previo.

Es aquí donde entra en juego el análisis de riesgos ya que nos permite, dentro de los niveles de incertidumbre asociados a cada tipo de análisis empleado y a los datos disponibles, cuantificar el potencial de accidentes existentes en una determinada instalación o proceso y, supuesto que éste se considere demasiado elevado, comparar las distintas alternativas de solución. Cada una de ellas implicará un costo económico diferente que se debe considerar en la decisión final.

El análisis de riesgos no nos dice si un riesgo es aceptable o no. Lo que nos da es una medida del nivel de riesgo existente y que podemos modificar añadiendo medidas suplementarias de seguridad. Puesto que hay que aceptar un nivel de riesgo, el análisis de riesgos nos permite jerarquizar las inversiones en seguridad, distribuyendo el financiamiento disponible de la manera más eficaz.



### **2.1.3. El análisis de riesgos.**

#### **2.1.3.1. Conceptos previos sobre el análisis de riesgos.** (3, 4, 14, 23, 24, 28)

Analizar riesgos significa desarrollar una estimación cuantitativa del nivel de peligro potencial de una actividad, referido tanto a personas como a bienes materiales, en función de la magnitud del daño y la probabilidad de que tenga lugar.

Se puede definir el análisis de riesgos como la disciplina que combina la evaluación ingenieril del proceso con técnicas matemáticas que permiten realizar estimaciones de frecuencias y consecuencias de accidentes.

El análisis de riesgos en sí, es un esfuerzo organizado para identificar, por medio de una serie de técnicas sistemáticas, las debilidades asociadas con el diseño u operación del proceso que podrían conducir a consecuencias indeseables (lesiones personales, daños al medio ambiente o daños catastróficos a equipos) y determinar las medidas para controlar estos riesgos y eliminar o al menos mitigar sus consecuencias.

El análisis de riesgos tiene como objetivo identificar y evaluar los riesgos que se presentan en un determinado proceso así como sus posibles causas, y generar la información necesaria para la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas y correctivas, que permiten mejorar la seguridad, tomando en cuenta la relación costo-beneficio asociada con estas medidas.

#### **2.1.3.2. Etapas del análisis de riesgos.** <sup>(28)</sup>

El análisis de riesgos consta básicamente de las siguientes etapas:

1. Identificación de sucesos no deseados que pueden llevar a la materialización de un peligro.
2. Análisis de los mecanismos por los que estos sucesos tienen lugar.
3. Estimación de los efectos no deseados y de la frecuencia con que pueden producirse.

De forma más detallada, se muestran las etapas de la realización de un análisis de riesgos en la figura 2.2. A continuación detallaremos un poco más cada una de las etapas del análisis de riesgos.

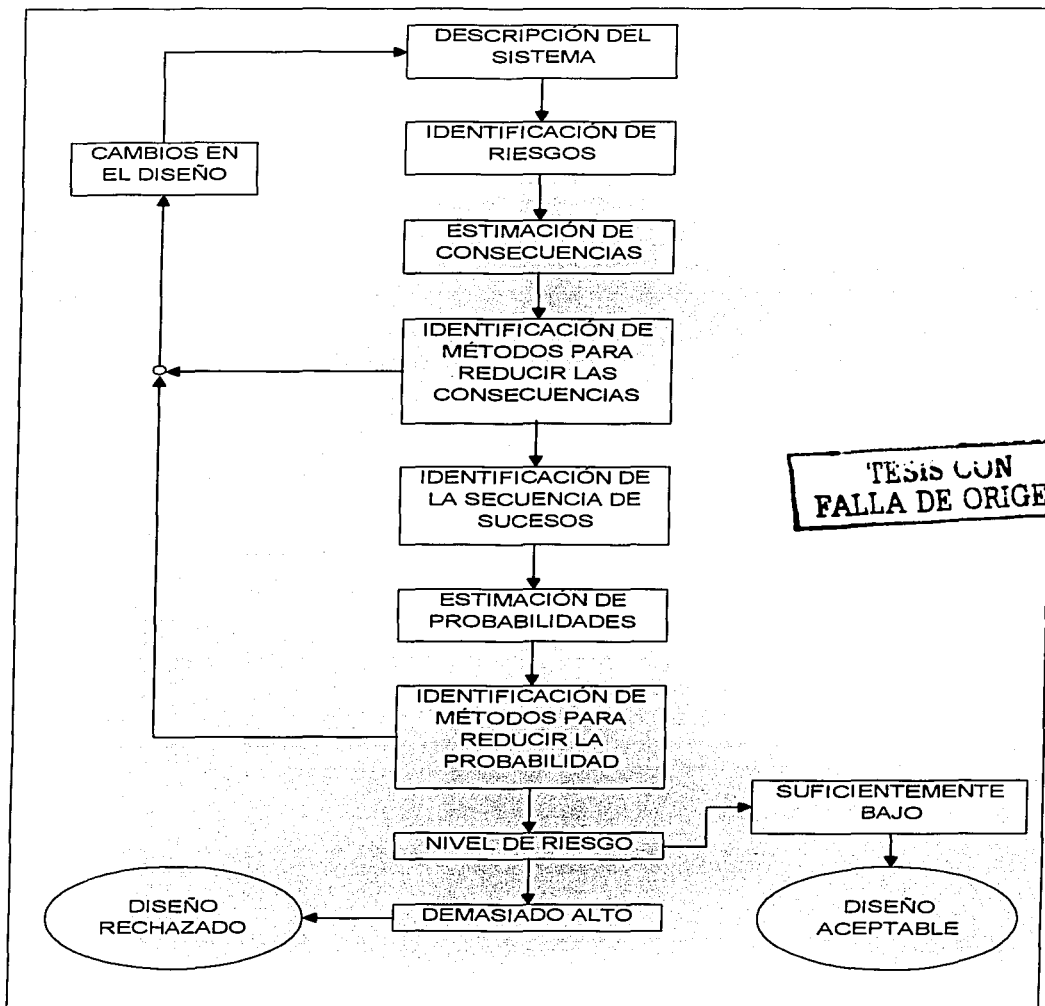


Fig. 2.2 Etapas en la realización de un análisis de riesgos. (28)





### 2.1.3.2.1. Identificación de riesgos. <sup>(3, 28)</sup>

Este primer paso consiste en encontrar todas las circunstancias que pueden dar origen a efectos adversos. En esta parte del análisis se pretende, de manera exhaustiva dentro de los límites del mismo, obtener una lista de todas las desviaciones que cumplan con dos condiciones básicas: que puedan producir un efecto adverso significativo y que tengan una probabilidad razonable de producirse.

En una primera fase, se deben descartar todas aquellas desviaciones que tengan una alta improbabilidad. Aquí entran en juego la experiencia y el sentido común ya que nos facilitarán descartar las desviaciones más improbables sin tener que utilizar un tratamiento matemático previo.

En esta etapa del análisis hay que tener muy en cuenta que un riesgo que no es identificado, es un riesgo que no será considerado en posteriores análisis y por lo tanto no se tomarán las medidas necesarias para disminuir dicho riesgo.

En el caso de la industria química, se debe incluir una identificación del riesgo asociado a las sustancias. El primer paso para una identificación correcta del riesgo de una instalación industrial es la identificación y caracterización de las sustancias involucradas en el proceso. Los datos de interés para los análisis posteriores son básicamente las propiedades de las sustancias presentadas en la tabla 2.1.

El interés de estos datos radica principalmente en el efecto que las condiciones de operación producen sobre las sustancias involucradas en el proceso. El conocimiento de las posibles condiciones de operación normales y anormales, permite considerar y eliminar diferentes sustancias como susceptibles de provocar un accidente mayor.

Para identificar estas relaciones entre sustancias y condiciones de proceso, se puede utilizar el sentido común, la experiencia y técnicas más sistemáticas.

### 2.1.3.2.2. Análisis de las causas de los riesgos identificados. <sup>(28)</sup>

Una vez que se han identificado todas las desviaciones que tienen una probabilidad considerable de llevarse a cabo, es importante determinar todas las causas posibles que pudieran derivar en dichas



desviaciones así como estimar las frecuencias y probabilidades de éstas.

Se pueden obtener estimaciones semicuantitativas de la probabilidad y la frecuencia de un incidente a partir de los registros históricos. Desafortunadamente, dichos registros no contienen toda la información que se requiere para el análisis o, simplemente, no existe un registro confiable que nos pudiera aportar datos debido a diferentes circunstancias. Para solventar este problema, se suele recurrir a métodos más estructurados como el análisis de árbol de fallas (FTA), en los que se asignan probabilidades a los distintos sucesos en las cadenas de evolución de acontecimientos, haciendo uso de la información disponible en bases de datos sobre frecuencias de fallas de equipos y componentes.

Tabla 2.1 Datos de uso común para la identificación del peligro de las sustancias. (3)

<p><b>Etiquetado:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>— Etiquetado de peligro (F+, F, T+, T, O, C, Xi, Xn, N)</li><li>— Frases R y S</li></ul> <p><b>Toxicidad:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>— Aguda por inhalación, ingestión o contacto</li><li>— Crónica por inhalación, ingestión y contacto</li></ul> <p><b>Límites de exposición:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>— TLUV</li><li>— IPUVS</li></ul> <p><b>Propiedades físicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>— Punto de congelación</li><li>— Coeficiente de expansión</li><li>— Punto de ebullición</li><li>— Solubilidad</li><li>— Presión de vapor</li><li>— Densidad</li><li>— Corrosión</li><li>— Capacidad calorífica</li></ul>	<p><b>Propiedades químicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>— Reacción principal y reacciones secundarias</li><li>— Cinética de reacción</li><li>— Contaminantes</li><li>— Reacciones de descomposición</li><li>— Estabilidad</li></ul> <p><b>Inflamabilidad y explosividad:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>— Límite inferior de inflamabilidad</li><li>— Límite superior de inflamabilidad</li><li>— Límite inferior de explosividad</li><li>— Límite superior de explosividad</li><li>— Temperatura de autoignición</li><li>— Temperatura de inflamación</li><li>— Energía mínima de ignición</li></ul> <p><b>Biodegradabilidad</b></p> <p>Otras</p>
---	---

#### 2.1.3.2.3. Análisis de consecuencias. (27, 28)

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

En este último paso del análisis, lo que se pretende es estimar las consecuencias más probables que pueden suceder de acuerdo a las condiciones del medio en las que se desarrollarían los eventos no deseados. Para ello se disponen de modelos que relacionan la causa original identificada con los



efectos previstos, de manera que puedan ser cuantificados. Cabe señalar que previamente se deben seleccionar qué modelos se adecuan más a un mismo incidente.

Las diferentes posibilidades deben ser analizadas con los modelos apropiados, que en cada caso proporcionarán una estimación de las consecuencias que cabe esperar sobre el personal o las instalaciones. Las acciones evasivas y/o las medidas de protección que se consideren pueden incluirse en el modelo, modificando así los resultados del análisis.

#### **2.1.3.2.4. Caracterización del medio. <sup>(27)</sup>**

Un paso que no se considera dentro del análisis de riesgos pero que es fundamental para el desarrollo de éste es la caracterización del lugar donde se desarrolla el análisis de riesgos. Básicamente se consideran tres aspectos para la caracterización del medio:

- a) Aspectos fisiográficos: ubicación del lugar donde se lleva a cabo el análisis de riesgos, cuerpos próximos a las instalaciones, descripción de las poblaciones más cercanas, medios de comunicación y de transporte con que se cuentan, etc.
- b) Características meteorológicas: temperatura, índices pluviométricos, humedad, velocidad y dirección de los vientos, etc.
- c) Características de las instalaciones: disposición física, especificaciones de los equipos, descripción de las operaciones y de los procedimientos de seguridad, identificación y caracterización de las fuentes de ignición, sustancias involucradas y sus características fisicoquímicas y toxicológicas, condiciones de almacenamiento, diagramas de tubería e instrumentación y de proceso, instrumentación, datos operacionales y sistemas de seguridad.

Los aspectos antes mencionados nos serán de mucha utilidad sobretodo para el análisis de consecuencias.

#### **2.1.3.3. Administración del riesgo. <sup>(26)</sup>**

Aunque no es de nuestro interés este tema, es importante saber en que consiste ya que es un paso después del análisis de riesgos, es decir, cuando el objetivo del análisis de riesgos se ha cumplido satisfactoriamente.



Llegado a este punto, se deberá decidir cuál será la mejor solución que se adopte para evitar las pérdidas que se pudieran presentar con los diferentes riesgos ya identificados y evaluados.

Básicamente existen 4 métodos para la administración de riesgos y que son: la eliminación, la aceptación, la transferencia y el tratamiento.

#### **2.1.3.3.1. Eliminación de riesgos.** <sup>(14, 26)</sup>

La eliminación de los riesgos es una alternativa poco probable. Si bien es cierto que no es una opción que pueda utilizarse con frecuencia ante riesgos con un carácter genérico, porque la única manera de evitar todos los riesgos de una industria es que no existiera la industria. No obstante, se contempla esta posibilidad porque hay ocasiones concretas en que, de forma parcial, los riesgos pueden ser evitados.

Cuando la fabricación de un artículo o producto concreto, que lleva implícitos unos riesgos puros, nos proporciona unas pérdidas de tal naturaleza que compromete todas las posibles ganancias por las que fue concebido, y eso es todo lo que puede esperarse de él para el futuro, por lo que está claro que deberá plantearse su eliminación como método alternativo.

Se reitera que, desde el punto de vista técnico, la eliminación del riesgo es una posibilidad esporádica, ya que la industria no existe sin riesgos por ser éstos inherentes a ella.

Cabe recordar que no debe confundirse la prevención de riesgos con la eliminación de riesgos. La prevención es una actitud y la eliminación es un método de administrar riesgos.

#### **2.1.3.3.2. Aceptación de riesgos.** <sup>(14, 26)</sup>

El método de aceptación implica correr con ciertos riesgos de forma consciente tras un buen trabajo de análisis y toma de decisiones. Este método resulta difícilmente aplicable con responsabilidad sin una rigurosa evaluación del riesgo.

Normalmente las decisiones de "aceptar" recaen en riesgos con muy bajos valores de gravedad y/o frecuencia, lo que equivale a decir que las pérdidas potenciales pueden causar pocos problemas, y que



el grado de corrección necesario daría lugar a unos costos desproporcionados en relación con aquellas consecuencias.

El mantenimiento de este método ante ciertos riesgos hace necesaria una permanente y total atención a los parámetros de probabilidad de que existan pérdidas, tiempos de exposición o presencia de esos riesgos y posibles consecuencias. Cualquier variación sustancial en estos factores puede aconsejar una decisión diferente a la de aceptar el riesgo.

En ocasiones puede ser aplicada una variante a este método. Es la que se podría llamar "seguro propio" o retención de fondos para absorber las pérdidas si éstas aparecen. Puede tener su justificación en casos contados para una determinada empresa o sociedad.

Antes de decidir tomar este método, es conveniente considerar las siguientes reglas:

1. No arriesgar más de lo que pueda permitirse perder.
2. No arriesgar mucho a cambio de poco.
3. No decidir sin considerar las posibilidades.

#### **2.1.3.3.3. Transferencia de riesgos.** <sup>(14, 26)</sup>

La forma más común de transferencia de riesgos es el contrato de seguro. Este método de administración de riesgos es la forma más cara de gestionar un riesgo, si se considera de forma aislada; el seguro no evita la consecuencia, pero puede paliar en muchos casos la gravedad de las mismas.

La transferencia del riesgo es indispensable en muchas ocasiones (hasta obligatoria a veces) porque son muy escasas las posibilidades de aplicación del método de eliminación de riesgos y porque aceptarlos, como ya se ha visto, es una solución muy limitada. Además, no todas las medidas de control a nuestro alcance son eficaces al cien por ciento.

Como ya se ha dicho, es un método caro, y lo será más cuanto mayor sea el grado de gravedad del riesgo. De ahí la conveniencia de actuar simultáneamente con otros métodos, en busca de la mayor rentabilidad del conjunto de acciones.



Son típicos riesgos transferibles los propios de fenómenos naturales, los de vida y responsabilidad civil.

#### **2.1.3.3.4. Tratamiento de riesgos.** (14. 26)

La prevención de riesgos y consiguiente reducción de pérdidas es el método más eficaz de administrar los riesgos. Consiste en adoptar los medios y los sistemas para tener un adecuado control de riesgos.

La planificación, organización, dirección y control, así como las correspondientes actividades asociadas a cada una de estas funciones, tienen su aplicación práctica en el desarrollo del método de tratar los riesgos donde, de forma específica, se incluyen las técnicas para el tratamiento de los riesgos.

#### **2.1.3.4. Técnicas de análisis de riesgos.**

Actualmente existe una gran variedad de técnicas de análisis de riesgos que se pueden aplicar a una gran variedad de situaciones, ello dependerá de las características que tenga dichas situaciones y cuál de las técnicas es la más apropiada para cada una de ellas.

Básicamente, las técnicas de análisis de riesgos se dividen en técnicas de identificación y análisis de causas de los riesgos y técnicas de análisis de consecuencias.

#### **2.1.3.4.1. Técnicas de identificación y análisis de causas de riesgos.** (3. 8. 26)

Las técnicas que existen para la identificación y análisis de causas de los riesgos varían, tanto en su carácter cualitativo o cuantitativo como en su grado de sistematización.

Cabe recordar que la identificación de riesgos es el paso más importante del análisis de riesgos, ya que cualquier riesgo no identificado no puede ser objeto de estudio. De forma opuesta, un riesgo identificado podrá ser disminuido porque se tomarán medidas para dicho propósito.

Existen cinco limitaciones a todas las técnicas de identificación y análisis de las causas de los riesgos que a continuación se numeran:



1. *La exhaustividad del estudio:* no hay posibilidad de verificar que todas las posibles desviaciones y fallas del sistema hayan sido identificados. Tampoco puede verificarse que todas las causas y efectos de los accidentes potenciales hayan sido considerados. Y, finalmente, tampoco puede asegurarse que la valoración de los incidentes y sucesos identificados sea la más conveniente.
2. *La reproducibilidad de los resultados:* el mismo estudio llevado a cabo en idénticas condiciones por diferentes especialistas da resultados distintos. La carga subjetiva de los estudios hace que éstos sean difícilmente reproducibles.
3. *Lo complejo de las conclusiones:* la cantidad de documentación generada por el estudio y la falta de detalles importantes que sólo se materializan en la comunicación verbal de las sesiones de trabajo, hacen los análisis relativamente difíciles de interpretar.
4. *La importancia de la experiencia:* todas las técnicas que se presentan están basadas en mayor o menor grado en la experiencia adquirida y en la creatividad del analista.
5. *El nivel de confianza generado por el estudio:* la subjetividad introducida en la valoración de los sucesos identificados puede generar cierto escepticismo respecto a los resultados del estudio.

Pese a las limitaciones aparentes de las técnicas de análisis que aquí se presentan, debe señalarse su versatilidad y su amplia utilización. En realidad, la experiencia demuestra que en una gestión del riesgo adecuada, basada siempre en una identificación correcta, el número de accidentes tiende a disminuir paralelamente a la disminución de la magnitud de sus consecuencias.

Los métodos de identificación y análisis de causas de los riesgos se pueden dividir en tres apartados que se ilustran en la figura 2.3.

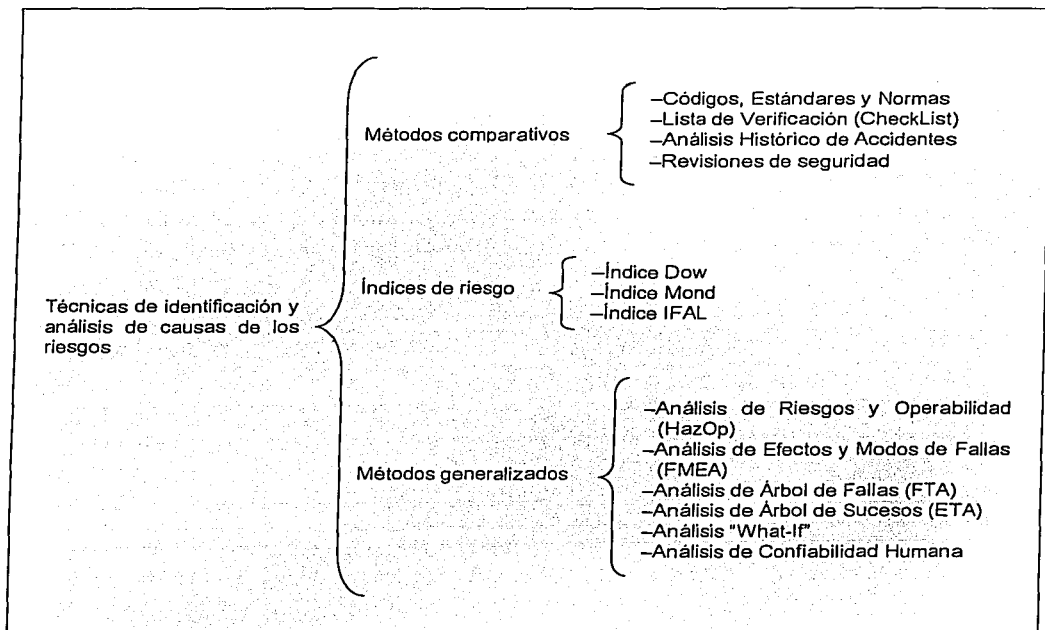
Las técnicas mencionadas en la figura 2.3 son aplicadas a distintas etapas de la vida de una planta: diseño, construcción, puesta en marcha y funcionamiento de una operación normal, modificaciones del proceso y desmantelamiento o abandono de las instalaciones. En las distintas etapas del proyecto, el nivel de detalle e inclusive los objetivos de la identificación de riesgos varían.

Las técnicas tienen características distintas, lo que las hace apropiadas para ser aplicadas a diferentes etapas de la vida de una instalación como se muestra en la tabla 2.2.

Haciendo una breve descripción, se puede decir que los métodos comparativos se basan en la



experiencia previa acumulada en un campo determinado, bien como registro de accidentes previos o compilada en forma de códigos o listas de verificación.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.3 Clasificación de las principales técnicas de identificación y análisis de causas de los riesgos. (6)



Los índices de riesgo, aunque no suelen identificar peligros concretos, son útiles para señalar las áreas de mayor concentración de riesgo, que requieren un análisis más profundo o medidas suplementarias de seguridad.

Los métodos generalizados proporcionan esquemas de razonamiento aplicables en principio a cualquier situación, lo que los convierte en herramientas de análisis, versátiles y de gran utilidad.





Tabla 2.2 Aplicación de las técnicas de identificación y análisis de las causas de los riesgos de cada una de las etapas de vida de una planta. (3, 8)

		Etapas de vida de una planta	Definición y diseño del proceso	Experimentación planta piloto	Ingeniería básica y de detalle	Ejecución de obra e inicio	Operación normal de la planta	Modificaciones	Estudio de incidentes	Abandono del proceso
 Poco utilizado  Normalmente utilizado										
Técnicas de identificación y análisis de causas de los	Códigos, Estándares y Normas									
	Lista de Comprobación, Checklist									
	Análisis Histórico de Accidentes									
	Revisiones de seguridad									
	Índices de riesgo									
	Análisis de Riesgos y Operabilidad (HazOp)									
	Análisis de Efectos y Modos de Fallas (FMEA)									
	Análisis de Árbol de Fallas (FTA)									
	Análisis de Árbol de Sucesos (ETA)									
	Análisis "What if"									
Análisis de Confiabilidad Humana										

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

#### 2.1.3.4.1.1. Métodos comparativos. (27, 28)

Como ya se mencionó anteriormente, los métodos comparativos se utilizan para evaluar la seguridad de una instalación con base en la experiencia adquirida. A continuación, describiremos brevemente los métodos comparativos.

##### *Códigos, estándares y normas.*

Consiste en la evaluación de la seguridad de una planta con la guía de códigos, estándares y normas (ASME, ASTM, API, NFPA, etc.) y que se complementa con la experiencia previa acumulada.



### *Lista de verificación, checklist.*

Este método es un recordatorio útil que permite comparar el estado de un sistema con una referencia externa, identificando directamente carencias de seguridad en algunos casos o las áreas que requieren un estudio más profundo en otros. Las listas de verificación pueden aplicarse a la evaluación de equipos, materiales o procedimientos, y el grado de detalle varía considerablemente desde aspectos muy generales a las que se elaboran para equipos, procesos o procedimientos muy específicos.

### *Análisis histórico de accidentes.*

Este método hace uso de los datos recopilados en el pasado sobre accidentes industriales. Un aspecto a destacar de este método es que se refiere a accidentes ya ocurridos, por lo que los peligros identificados con su uso son indudablemente reales. A pesar de ser una gran ventaja, también es su principal limitación, ya que solamente se refiere a accidentes de los cuales se tiene información. Por tanto, el número de casos a analizar es finito y no cubre todas las posibilidades existentes, y sobretodo las importantes.

A pesar de lo anterior, es una técnica útil ya que permite la identificación de riesgos concretos. Es, además, un medio muy valioso para una verificación *a posteriori* de los modelos que se disponen en la actualidad en cuanto a la predicción de las consecuencias de accidentes.

La información sobre accidentes ocurridos en el pasado puede proceder de fuentes muy diversas, tales como datos propios de la compañía, informaciones de prensa, entrevistas con testigos del accidente e informes de las comisiones de investigación.

### *Revisiones de seguridad.*

Es un examen periódico para plantas de alto riesgo, para métodos constructivos, críticos de construcción y montaje, y de procedimientos de puesta en marcha que pudieran provocar un accidente. Además, es aplicable para verificar el cumplimiento de las especificaciones y normas de seguridad en las etapas de diseño. Estas revisiones las realiza un equipo con experiencia, que audita los estándares de diseño y que visita la planta en construcción para entrevistar a determinadas personas y verificar el cumplimiento de los procedimientos y estándares de seguridad.



#### 2.1.3.4.1.2. Índices de riesgo. <sup>(28)</sup>

Los índices de riesgo proporcionan un método directo y relativamente simple de estimar el riesgo global asociado con una unidad de proceso, así como de jerarquizar las unidades en cuanto a su nivel general de riesgo. No son, por lo tanto, sistemas que se utilicen para señalar riesgos individuales, sino que proporcionan un valor numérico que permite identificar áreas en las que el riesgo potencial alcanza un nivel determinado. Sobre estas áreas puede, en caso necesario, aplicarse un análisis de riesgo más detallado, por lo que el valor obtenido para el índice de riesgo puede ser de utilidad a la hora de decidir la profundidad del estudio. En todo caso, los índices de riesgo son útiles, porque proporcionan una estimación rápida y bastante fiable del orden de magnitud de determinados riesgos en una unidad. A continuación, se presenta una breve descripción de los índices de riesgo más utilizados.

##### *Índice Dow.*

Este índice toma en cuenta aspectos relacionados con los riesgos intrínsecos del material, las cantidades manejadas, condiciones de operación, etc. Estos factores son contabilizados sucesivamente para obtener una estimación del valor del índice, del área que puede ver se afectada por un accidente, el daño a la propiedad dentro de la misma y los días de operación perdidos por causa del accidente. Este índice se detallará en la segunda parte de este capítulo.

##### *Índice Mond.*

Este índice es similar en muchos aspectos al índice Dow, pero toma en cuenta de manera específica aspectos de toxicidad de materiales.

#### 2.1.3.4.1.3. Métodos generalizados. <sup>(3, 6, 28)</sup>

Los métodos generalizados, como ya se mencionó, son esquemas estructurados que permiten identificar todos los riesgos posibles de una planta. Tomando como base la relación causa y efecto, los métodos generalizados analizan todas las posibles situaciones que pudieran provocar un suceso no deseado, así como sus consecuencias y se estiman las probabilidades de ocurrencia de los mismos.

##### *Análisis de riesgos y operabilidad (HazOp).*

El análisis HazOp (HAZard and OPerability) es un método inductivo de análisis que ha sido desarrollado



en Inglaterra por la empresa Imperial Chemical Industries en el estudio de procesos químicos. Su objetivo es la búsqueda de relaciones entre las causas y sus consecuencias o, en otras palabras, busca las desviaciones de la planta con relación a la intención del proyectista. El análisis HazOp requiere información detallada del diseño y operación del proceso. En la segunda parte de este capítulo se tratará más a fondo esta técnica.

Cabe aclarar que la traducción del término Hazard and Operability es Peligros y Operabilidad por lo que el análisis HazOp en español se debería llamar análisis de peligros y operabilidad, pero por costumbre, se le suele llamar análisis de riesgos y operabilidad.

#### *Análisis de efectos y modos de fallas (FMEA).*

El análisis FMEA (por sus siglas en inglés, Failure Modes and Effects Analysis) consiste en un examen de componentes individuales con el objetivo de evaluar el efecto que una falla de los mismos puede tener en el comportamiento del sistema. Esta técnica se usa fundamentalmente en los equipos, analiza las consecuencias en el sistema de todas las posibles fallas que pueden afectar a un componente del sistema, identifica los tipos de fallas que tienen consecuencias importantes, y determina los medios de detección para cada tipo de falla.

#### *Análisis de árbol de fallas (FTA).*

El análisis de árbol de fallas (por sus siglas en inglés, Fault Tree Analysis) es la representación o desarrollo gráfico deductivo desde el evento principal o suceso final no deseado o peligroso, denominado "Top Event", y pasando por todas sus combinaciones de eventos o sucesos intermedios, hasta llegar a sus causas o eventos básicos, que representan el límite de resolución del árbol. En la segunda parte de este capítulo se detallará más a fondo sobre esta técnica.

#### *Análisis de árbol de sucesos (ETA).*

El análisis de árbol de sucesos (por sus siglas en inglés, Event Tree Analysis) estudia la posibilidad de un accidente potencial como resultado de un suceso o evento iniciador. A partir de esta falla de inicio, analiza "hacia adelante" la secuencia de eventos cronológicos que van a producirse según cuáles sean los sistemas de seguridad existentes.



### *Análisis "What if".*

El análisis "What if" tiene como objetivo considerar las consecuencias negativas de posibles sucesos inesperados. Esta técnica utiliza la pregunta "¿Qué pasaría si...?", aplicada a desviaciones en el diseño, construcción, modificación y operación de instalaciones industriales. Las preguntas se realizan sobre áreas concretas (por ejemplo, instrumentación de un equipo determinado, etc.) por un equipo de dos o tres expertos que poseen documentación detallada de la instalación, procedimientos de operación y acceso a personal de la planta para proveerse de información complementaria. Por lo general, de la aplicación de la pregunta "¿Qué pasaría si...?" se obtienen sugerencias de sucesos iniciadores y fallas posibles, a partir de los cuales puede producirse una desviación peligrosa.

### *Análisis de confiabilidad humana.*

Esta técnica de análisis lo que busca es identificar la contribución al riesgo por parte del hombre debido a su interacción con los equipos que se hallan en las instalaciones. El procedimiento que sigue es el análisis de los diagramas de flujo y de los procedimientos de la planta en busca de los eventos iniciados e influidos por el hombre. Como resultado final, se obtiene una lista de todos los eventos en los que la interacción del hombre causa un riesgo significativo.

#### **2.1.3.4.2. Técnicas de análisis de consecuencias. <sup>(4)</sup>**

No basta con nombrar los posibles accidentes provocados por los peligros existentes ya que solo estaríamos diciendo cómo son afectados los objetos amenazados sin entrar a valorar objetivamente la gravedad del accidente, o bien podemos ser más exhaustivos y estimar cuál es la población afectada directamente, delimitar las zonas de riesgo, etc. Para ello se usan modelos matemáticos que estiman las variables físicas y químicas derivadas de un hipotético accidente, y en función de ellas calcular el perímetro de las zonas de intervención y alerta.

Se establece así el mapa de riesgo, que es la zona en que las variables físicas y químicas sobrepasan cierto umbral. Si superponemos el mapa de riesgos con el mapa de vulnerabilidad (en el que se señalan todos los elementos vulnerables), quedan perfectamente definidas las áreas de intervención y de alerta.

Una vez que hemos establecido los elementos vulnerables, es necesario hacer una estimación de las consecuencias, es decir, cómo afectan a estos elementos las variables físicas y químicas originadas por el accidente. Esto es esencial a la hora de determinar las acciones a tomar ante una emergencia.



En este apartado solo trataremos de forma general algunos aspectos de las técnicas de análisis de consecuencias sin entrar a fondo en cuestiones de tipo matemático. Solamente se hará una breve descripción de los modelos que existen.

#### **2.1.3.4.2.1. Los accidentes mayores.** (3 16, 21)

Los accidentes de gran magnitud que pueden tener lugar en una industria química están casi siempre asociados a la pérdida de contención de un producto tóxico o inflamable, generalmente un fluido. En función del estado del mismo y de sus características, puede producirse un incendio, una explosión, una nube tóxica o inflamable, etc. Las diversas posibilidades se han representado de forma simplificada en la figura 2.4.

Si la situación generada se puede calificar como de grave riesgo para las personas, el medio ambiente y los bienes, se le denomina "accidente mayor".

La definición anterior de accidente mayor es tan extensa, desde el punto de vista técnico, que debe ser matizada con elementos adicionales que permitan una clasificación objetiva de cualquier situación de esta clase.

Se pueden establecer tres tipos de categorías para los accidentes mayores:

- Categoría 1. Aquellos accidentes en los que se prevé que habrá, como única consecuencia, daños materiales en la instalación industrial afectada. Los daños asociados a la emisión, el escape, el vertido y la explosión quedan, pues, limitados a los límites de la propiedad de la instalación industrial; no se producen víctimas ni heridos.
- Categoría 2. Aquellos accidentes en los que se prevé que habrá, como consecuencia, posibles víctimas y daños materiales en la instalación industrial. Las repercusiones en el exterior se limitan a daños leves o efectos adversos sobre el medio ambiente en zonas limitadas.
- Categoría 3. Aquellos accidentes en los que se prevé que habrá, como consecuencia, posibles víctimas, daños materiales o alteraciones graves del medio ambiente en zonas extensas, en el exterior de la instalación industrial.



Los accidentes de las categorías 2 y 3 son considerados accidentes mayores.

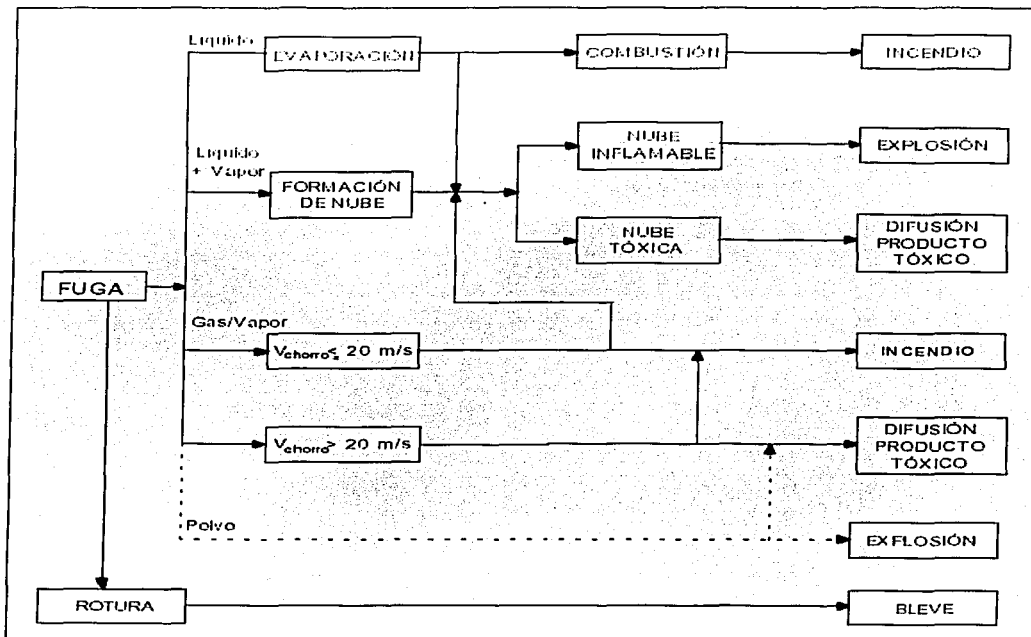


Fig. 2.4 Esquema simplificado de los posibles accidentes que se pueden producir en caso de escape accidental de un producto tóxico o inflamable. (16)

#### 2.1.3.4.2.2.

#### Tipificación de los accidentes mayores. (3, 21)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Como ya se mencionó, los accidentes mayores casi siempre están asociados a la pérdida de contención de un producto tóxico o inflamable, por lo regular un fluido. En pocas palabras, cuando se refiere a un accidente mayor en la industria química, se habla de fugas.

Se puede clasificar a los accidentes mayores, de acuerdo a los fenómenos que producen, en los siguientes tipos:



- Tipo térmico: radiación térmica.
- Tipo mecánico: ondas de presión y proyección de fragmentos.
- Tipo químico: emisión a la atmósfera o vertido incontrolado de sustancias contaminantes tóxicas.

De acuerdo a estos tipos de accidentes mayores y en función de la distancia, se pueden establecer valores límites peligrosos para cada uno de estos fenómenos. A continuación se muestran las magnitudes físicas que determinan el daño y los valores límites que se deben respetar:

- Para fenómenos de tipo térmico:
  - Radiación térmica emitida por llamas y cuerpos incandescentes en incendios y deflagraciones. Valores límite: 5 kW/m<sup>2</sup> durante un tiempo máximo de exposición de 3 minutos para la zona de intervención y 3 kW/m<sup>2</sup> para la zona de alerta.
- Para fenómenos de tipo mecánico producidos por explosiones y deflagraciones:
  - Valor local integrado del impulso de la onda de presión. Se trata de la integral en el tiempo de evolución de la sobrepresión, que por el hecho de tratarse de un pico con forma triangular puede ser estimado como  $\frac{1}{2} \cdot \Delta T \cdot \Delta P$ . Valores límite: 150 mbar para la zona de intervención y 100 mbar para la zona de alerta.
  - Sobrepresión estática de la onda de presión (pico máximo de la onda de presión). Valores límite: 125 mbar para la zona de intervención y 50 mbar para la zona de alerta.
  - Alcance máximo de los proyectiles con un impulso superior a los 10 mbar producidos por la explosión, ya sea a causa del estallido de determinadas instalaciones industriales, o bien, originados en otras sucesivas, como consecuencia de estos fenómenos o por desprendimiento de fragmentos debido a una onda de presión. Valores límite: alcance del 95% de los proyectiles en la zona de intervención y alcance del 99.9% de los proyectiles en la zona de influencia.
- Para fenómenos de tipo químico:
  - Concentración de sustancias peligrosas superior al equivalente del límite inmediatamente peligroso para la vida y la salud (IPVS), habitualmente expresado en ppm o mg/m<sup>3</sup>. Este límite depende de la naturaleza tóxica de cada sustancia.

Las zonas de intervención y alerta mencionadas son representadas mediante círculos centrados en el





lugar del accidente y cubren el área en la que se esperan determinados niveles de daño o afectación. Dichos conceptos se definen a continuación:

- Zona de intervención: en esta zona, las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifican la aplicación inmediata de medidas de protección.
- Zona de alerta: en esta zona, las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, a pesar de que no son perceptibles por la población, no justifican la intervención, a excepción de grupos críticos.

#### 2.1.3.4.2.3. Escenarios de accidentes mayores. <sup>(3)</sup>

A continuación se presentan los diferentes escenarios que se pueden presentar, de acuerdo al tipo de fenómeno que caracteriza al accidente, y que se pueden agrupar de la manera siguiente:

- Escenarios que determinan accidentes mayores de tipo térmico:
  - *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.
  - *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.
  - *Llamarada (flash fire)*. Llama progresiva de difusión, de baja velocidad. No produce ondas de presión significativas. Suele estar asociada a la dispersión de vapores inflamables a ras de suelo. Este fenómeno sucede cuando material volátil e inflamable es descargado a la atmósfera, formando una nube de vapor que se dispersa. Si el vapor resultante se encuentra con una fuente de ignición antes de que la dilución de la nube sea menor al límite inferior de inflamabilidad, ocurre el flash fire. Las consecuencias primarias de un flash fire son las radiaciones térmicas generadas durante el proceso de combustión. Este proceso de combustión tiene una corta duración y los daños son de baja intensidad.
  - *BLEVE – Bola de fuego (fireball)*. BLEVE es el acrónimo de la expresión *Boiling Liquid*



*Expanding Vapor Explosión.* Este fenómeno se produce por el estallido súbito y total, por calentamiento externo, de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado a presión o un líquido inflamable, cuando el material de la pared pierde resistencia mecánica y no puede resistir la presión interior. El calentamiento extremo es generalmente producido por un incendio de charco o dardo de fuego, y la probabilidad de que estalle es especialmente elevada en los casos en los que hay un contacto directo de la llama con la superficie del recipiente.

— Escenarios que determinan accidentes mayores de tipo mecánico:

- *Explosión.* Es una descarga de energía que causa un cambio transitorio en la densidad, presión y velocidad del aire alrededor del punto de descarga de energía. Si la energía necesaria para la expansión de los gases procede de una reacción química, se dice que la explosión es química (por ejemplo, explosiones derivadas de reacciones incontroladas). Si la energía procede de la liberación repentina de un gas comprimido o de la expansión rápida de vapores, se trata de una explosión física.
- *Explosión de una nube de vapor inflamable no confinada (UVCE, acrónimo de la expresión en inglés Unconfined Vapor Cloud Explosion).* Tipo de explosión química que involucra una cantidad importante de gas o vapor en condiciones de inflamabilidad, que se dispersa por el ambiente. Para que esto ocurra, a grandes rasgos, la cantidad de gas tiene que superar el valor de algunas toneladas. Cuando no es así, normalmente la ignición de la masa de vapor deriva una llamarada sin efectos mecánicos importantes. En general, este tipo de accidentes se asocia a situaciones que determinan el escape masivo de gases licuados, gases refrigerados y líquidos inflamables muy volátiles (con una intensa vaporación), ya que en estas circunstancias se pueden generar una gran cantidad de vapores inflamables en un breve periodo de tiempo.
- *Explosión de vapor confinado (CVE, acrónimo de la expresión en inglés Confined Vapor Explosion).* Puede definirse simplemente como una explosión que ocurre en el aire y causa daños de sobrepresión. Comienza con una descarga de una gran cantidad de líquido volátil o gas licuado de un tanque o tubería y se dispersa en la atmósfera; de toda la masa de gas que se dispersa, sólo una parte de esta, se encuentra dentro de los límites superior e inferior de explosividad, y esa masa es la que después de



encontrar una fuente de ignición genera sobrepresiones por la explosión. Este evento se puede generar tanto en lugares confinados como en no confinados.

- *Estallido de contenedor a presión.* Explosión física derivada de la ruptura repentina de un recipiente a presión, causada por la presión interior y por falla de la resistencia mecánica del contenedor, que provoca una dispersión violenta del fluido interior, una onda de presión y proyectiles.
  - *BLEVE.* Ocurre cuando en forma repentina se pierde el confinamiento de un recipiente que contiene un líquido sobrecalentado o un gas licuado a presión. La causa inicial de un BLEVE es usualmente un fuego externo que está impactando sobre las paredes del recipiente que contiene el líquido o el gas licuado; esto hace fallar al material de las paredes, permitiendo la repentina ruptura de las paredes del recipiente. Cuando está asociado al fenómeno bola de fuego, el alcance de la magnitud física peligrosa que caracteriza al efecto mecánico (sobrepresión) suele ser inferior al alcance de la magnitud peligrosa de naturaleza térmica (radiación).
- Escenarios que determinan accidentes mayores asociados a la concentración de una sustancia emitida al ambiente (de tipo térmico para sustancias inflamables y de tipo químico para sustancias tóxicas). Un escape de un producto tóxico o inflamable en forma gaseosa, o bien en forma líquida en condiciones de ser vaporizada, produce una nube de gas. Esta nube, según sea la velocidad de salida del producto, puede presentar los siguientes comportamientos:
- *Chorro gaseoso (turbulent free jet).* En este caso, la dispersión del producto depende de la velocidad y de la presión de salida. Cuando el gas o vapor está suficientemente diluido y su velocidad es menor que la velocidad del viento, se dispersará a corta distancia en función de las condiciones meteorológicas.
  - *Dispersión atmosférica.* La nube, en función de las condiciones meteorológicas, se extiende y se desplaza mientras se va diluyendo. Las áreas de terreno que quedan bajo el efecto de esta nube sufrirán las consecuencias del producto contaminante, que en algunas ocasiones, pueden ser muy graves. Ahora bien, este tipo de comportamiento se subdivide a la vez en:
    - Según la evolución del fenómeno en el tiempo, las emisiones pueden ser instantáneas (soplo), continuas (emisiones prolongadas en el tiempo) y en



régimen transitorio (emisiones limitadas en el tiempo y a menudo de caudal variable).

- Según la densidad de la sustancia que se escapa, la dispersión puede ser neutra o gaussiana (gases o vapores con densidad similar a la densidad del aire) o de gases pesados (gases o vapores más densos que el aire, de manera que la gravedad ejerce una influencia significativa en los primeros momentos de la evolución de la nube).

Las diferentes posibilidades, respecto a los incendios, se muestran en la figura 2.5, mientras que en la figura 2.6 se muestran las diversas posibilidades para una explosión.

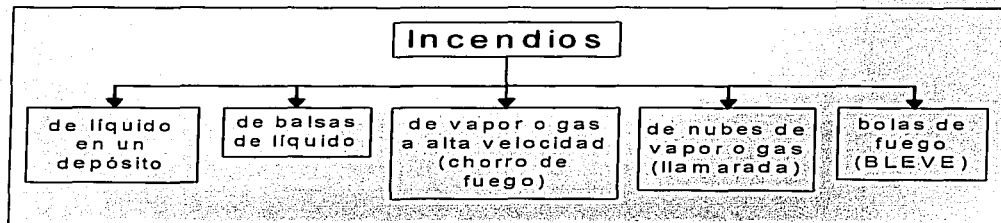


Fig. 2.5 Distintas posibilidades de un incendio. (3)

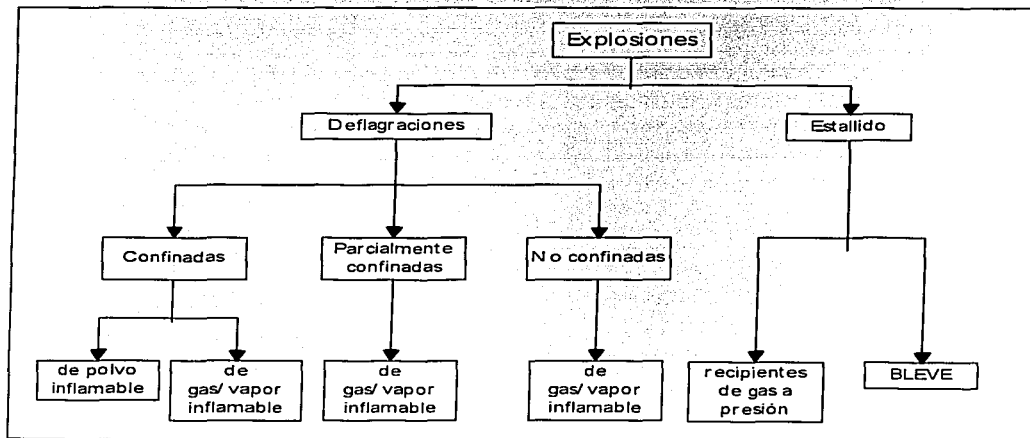


Fig. 2.6 Distintas posibilidades de una explosión. (3)

TESIS CON  
... DE ORIGEN



#### 2.1.3.4.2.4. Consecuencias de los accidentes mayores y modelos de vulnerabilidad. (3 4)

Los accidentes de gran magnitud que pueden ocurrir en instalaciones industriales pueden tener consecuencias tanto sobre las personas como sobre el medio ambiente y, desde luego, sobre la propia instalación donde se han originado (ver figura 2.7).

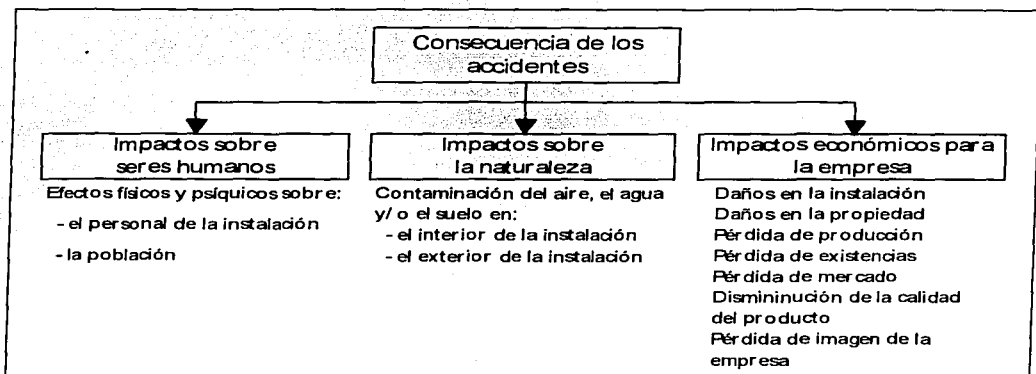


Fig. 2.7 Esquema de las consecuencias de los accidentes mayores. (3)

Para establecer la gravedad de un accidente en función de sus consecuencias, lo primero que se tiene en cuenta son las consecuencias para las personas, a continuación para el medio ambiente y en último lugar para la propiedad.

La legislación de la mayoría de los países respecto a los accidentes mayores está centrada, básicamente, en los efectos que puedan provocar a los seres humanos. Para evaluar tales efectos, se realizan estimaciones cuantitativas de las zonas de influencia. Los impactos sobre el medio ambiente y la naturaleza, aunque son tenidos en cuenta, son tratados a un nivel mucho más cualitativo, mientras que las repercusiones económicas son aspectos que las empresas tienen en consideración al diseñar una política global de seguridad.

Una forma de establecer la gravedad de un accidente es mediante una clasificación de este aspecto en función de las consecuencias para las personas, medio ambiente y propiedad. En el programa APELL

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



(Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level) de las Naciones Unidas existen unas tablas para realizar esta clasificación (ver tabla 2.3).

Tabla 2.3 Clasificación de las consecuencias de un accidente mayor según el programa APELL de la ONU. (4)

Consecuencias para la vida y la salud	
Clase	Característica
1. No importante	Pequeña incomodidad temporal
2. Limitado	Algunas heridas, incomodidad por un gran periodo de tiempo
3. Grave	Algunas heridas graves, incomodidad seria
4. Muy Grave	Algunas (más de 5) muertes, varios heridos de gravedad (20), heridas graves, hasta 500 personas evacuadas
5. Catastrófico	Varias muertes (más de 20), cientos de heridos graves, más de 500 personas evacuadas
Consecuencias para el medio ambiente	
Clase	Característica
1. No importante	No hay contaminación, efectos localizados
2. Limitado	Contaminación sencilla, efectos localizados
3. Grave	Contaminación sencilla, efectos dispersos
4. Muy Grave	Contaminación severa, efectos localizados
5. Catastrófico	Contaminación muy severa, efectos dispersos
Consecuencias para los bienes materiales	
Clase	Costo total del daño (dólares, toneladas, etc.)
1. No importante	< 0.5
2. Limitado	0.5 – 1
3. Grave	1 – 5
4. Muy Grave	5 – 20
5. Catastrófico	> 20

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Otra forma de establecer las consecuencias de un accidente mayor es mediante el uso de los modelos de vulnerabilidad, que se pueden clasificar, de acuerdo a los fenómenos que producen, en los siguientes tipos:



a) *Vulnerabilidad a los fenómenos de tipo térmico.*

Tanto las personas como las instalaciones van a sufrir las consecuencias del fuego y de las radiaciones térmicas cuando reciban calor a una velocidad mayor de lo que pueden disipar.

La transmisión del calor desde el punto de origen va a ser por conducción, convección y radiación; pero a medida que nos alejamos del punto de origen, la transmisión del calor se llevará a cabo principalmente por radiación. El estudio del fuego es un campo complejo, y en la industria se pueden dar distintos tipos de fuegos, pero en este caso vamos a ver exclusivamente los efectos de las radiaciones térmicas que se medirán en  $\text{kW/m}^2$ .

a.1) *Vulnerabilidad de las personas.* Va a variar fuertemente en función de las circunstancias, el tipo de fuego, las protecciones personales, etc. Así, por ejemplo, en un incendio tipo flash la posibilidad de que las personas huyan es mínima, ya que se produce de una manera instantánea. El principal efecto de los fenómenos de tipo térmico sobre las personas será la producción de quemaduras de distinta consideración según sus características.

a.2) *Vulnerabilidad de las instalaciones.* Las radiaciones térmicas van a tener un efecto sobre las instalaciones, debilitando las estructuras de éstas (principalmente por acción directa de la llama), pudiendo provocar derrumbamientos, por lo que aumentarían así los daños sobre las personas. El tipo de material también puede favorecer la expansión de las llamas. Además, el calor puede debilitar tanques que almacenen productos inflamables a presión, disminuyendo su resistencia y provocando una explosión, que en este caso sería de tipo físico, con el consiguiente daño que ésta va a producir en otras instalaciones y en las personas. En el caso de derrumbe de instalaciones como efecto del calor el patrón de lesiones en las personas será el de politraumatizados.

La tabla siguiente da cuenta, en forma aproximada, de los niveles de daño en función de los flujos térmicos por unidad de área.



Tabla 2.4 Consecuencias para diversos flujos térmicos. (3)

<b>Radiación térmica en kW/m<sup>2</sup></b>	<b>Efectos</b>
1.4	Se considera inofensivo para personas sin ninguna protección especial
1.7	Mínimo necesario para causar dolor
2.1	Mínimo necesario para causar dolor después de un minuto
4.0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 segundos; quemaduras de primer grado
4.7	Causa dolor en 15-20 segundos, heridas después de 30 segundos
11.7	El acero delgado, parcialmente aislado, puede perder su integridad mecánica
12.5	La madera puede prender después de una larga exposición; fusión de recubrimientos plásticos en cables eléctricos; 100% de letalidad
25.0	El acero delgado aislado puede perder su integridad mecánica
37.5	Suficiente para causar daños a equipos de proceso, colapso de estructuras

b) *Vulnerabilidad a los fenómenos de tipo mecánico.*

Las consecuencias inmediatas de una explosión son, por un lado, la generación de ondas de presión que crean compresiones y expansiones alternativas del aire y, por otro lado, la formación de objetos acelerados que actúan como proyectiles. A veces las explosiones pueden ir acompañadas de fenómenos de tipo térmico según sus características (por ejemplo las explosiones físicas pueden originarse por un incendio, y una explosión química puede afectar a un almacenamiento de un gas inflamable).

Los daños ocasionados por las explosiones pueden clasificarse en dos grupos:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

b.1) *Daños directos.* Estos pueden provocar daños sobre:

- las instalaciones, según la sobrepresión que se origine, puede ocasionar desde rotura de cristales hasta destrucción de edificios. Además, se formarán fragmentos acelerados que actuarán como proyectiles,
- las personas, las ondas de presión van a afectar principalmente a los órganos que contienen aire en su interior, como los pulmones, el estómago o el oído medio entre otros. Así, el daño variará desde una ruptura timpánica hasta la muerte por hemorragia pulmonar. También puede producir el desplazamiento de los afectados, proyectándolos contra otros objetos fijos o móviles, produciéndose de esta manera traumatismos múltiples.





- b.2) *Daños indirectos.* Estos pueden provocar:
- desplazamiento del cuerpo, es decir, la sobrepresión puede provocar que el cuerpo sea desplazado y posteriormente colisione contra el suelo o contra algún obstáculo, lo que evidentemente resultará en daños,
  - impactos contra el cuerpo de fragmentos; éstos pueden ser desprendidos por la propia explosión o bien puede tratarse de cuerpos desplazados por la onda de presión. Comúnmente se puede considerar dos tipos de fragmentos: los que pueden cortar y punzar y los que sólo golpean.

Se incluye la tabla 2.5 en la que se muestra los daños ocasionados por sobrepresión.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGE

Tabla 2.5 Daños a edificios y equipos por sobrepresión. (3)

<b>Presión en bar</b>	<b>Daños</b>
0.0014	Ruido molesto (137 dB) si es de baja frecuencia (10-15 Hz)
0.0021	Posible rotura de vidrios grandes sometidos a tensión
0.0028	Ruido fuerte (143 dB), rotura de vidrios a causa del ruido
0.0069	Rotura de pequeñas ventanas sometidas a tensión
0.010	Presión típica de la rotura de vidrios
0.020	Valor que da una probabilidad del 95% de no tener daños serios. Límite para la proyección de fragmentos (daños potenciales en tejados, 10% de los vidrios de las ventanas rotos)
0.028	Pequeños daños estructurales
0.034-0.069	Rotura de ventanas, potencialmente también de sus bastidores
0.048	Pequeños daños en las estructuras de las casas
0.069	Demolición parcial de casas, que resultan inhabitables
0.090	Distorsión de vigas de acero
0.138	Colapso parcial de paredes y tejados de las casas
0.159	Límite inferior para daños estructurales graves
0.172	50% de las construcciones de ladrillo destruidas
0.207	Daños menores en maquinaria pesada (1,500 kg). Estructuras de acero de los edificios arrancadas de los cimientos
0.345	Se arrancan postes de madera, como los del teléfono
0.345-0.483	Destrucción casi total de las casas
0.483	Vuelco de vagones de tren cargados
0.689	Probable destrucción total de los edificios. Daños y desplazamiento de la maquinaria pesada (3,500 kg)
20.68	Límite para la formación de cráter



c) *Vulnerabilidad a los fenómenos de tipo químico.*

La vulnerabilidad de las personas a la inhalación de sustancias tóxicas está relacionada con la naturaleza de la sustancia y su dosis, es decir, depende de la concentración y del tiempo durante el cual la sustancia es inhalada.

La fuga de sustancias tóxicas es un tipo de accidente industrial que tiene unas peculiaridades que lo distinguen de otros tipos de accidentes. Por un lado, tiene mayor probabilidad de afectar a la población en el exterior de las instalaciones, ya que es un tipo de peligro que se propaga a partir del foco de emisión; y por otro, es necesario un tiempo de latencia para que la sustancia se propague y afecte a la población, por lo que las decisiones que se tomen en ese periodo de tiempo serán determinantes a la hora de paliar los posibles efectos de la fuga.

Actualmente existen programas informáticos con modelos de dispersión de una nube tóxica sobre un área determinada en función de la cantidad de sustancia emitida, su concentración y de las condiciones atmosféricas. Estos programas son de gran utilidad para valorar en tiempo real la posible evolución de una nube tóxica y tomar las decisiones adecuadas de cara a mitigar sus consecuencias. A su vez estos mismos programas también son capaces de simular distintas explosiones, delimitando ya de antemano, en la fase de planificación, las zonas de seguridad. Existen también magnitudes como el LD<sub>50</sub>, el LC<sub>50</sub>, el TLV (y sus subtipos), el PEL y el IDLH que son características de las sustancias que pudieran tener un carácter tóxico.

Los efectos que la fuga de una sustancia peligrosa va a tener sobre la población van a variar mucho de unas condiciones a otras. Estos efectos pueden ser agudos o crónicos, si bien, los efectos agudos determinarán muchas de las actuaciones que se lleven a cabo por los equipos de primera intervención, y sin restar importancia a los efectos crónicos sobre las personas ni a los efectos sobre el medio ambiente, ya que en el primer caso se requerirá un seguimiento por parte de las autoridades sanitarias y en el segundo, en última instancia, también se verá afectada la salud de la población.

Los análisis de riesgos suelen centrar los cálculos de consecuencias en la estimación de tres magnitudes físicas peligrosas: radiación térmica (kW/m<sup>2</sup>), sobrepresión (mbar) y concentraciones



tóxicas (ppm ó mg/m<sup>3</sup>). Los umbrales habitualmente utilizados para establecer los daños se recogen en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Estimación del alcance de magnitudes físicas peligrosas. <sup>(3)</sup>

Fenómenos peligrosos	Variables Físicas Peligrosas	Umbrales Peligrosos
De tipo térmico	Radiación térmica (kW/m <sup>2</sup> )	<p>40 Destrucción equipos / tanques.            12.5 Ignición de recubrimientos plásticos. Extensión del incendio.            8 Umbral de letalidad (1% de afectación) por incendio, para un tiempo de exposición de un minuto            5 Máx. soportable por personas protegidas con trajes especiales y tiempo limitado. <b>Zona de intervención</b> con un tiempo máx. de exposición de 3 min. En caso de exposiciones menos prolongadas t<sub>2</sub>, puede corregirse dicho umbral utilizando el concepto de "dosis equivalente":</p> $(t_2^{4/3} t) = (5 \text{ kW/m}^2)^{4/3} \times 180 \text{ s} = 15.39 \times 10^6$ <p>3 <b>Zona de alerta</b>            1.5 Máx. soportable por personas con vestimentas normales y un tiempo prolongado.</p>
De tipo mecánico	<p>Ondas de presión:            - Sobrepresión (mbar)</p> <p>Otras variables físicas peligrosas:            - Impulso mecánico de la onda de presión (mbar s)            - Impulso mecánico de los proyectiles</p>	<p>1000 Umbral de letalidad (1% afectación) por efectos directos de la sobrepresión sobre el cuerpo humano            700 Demolición casi total de edificios            400 Demolición casi completa de casas            250 Rotura de tanques. Daño de maquinaria industrial pesada. Distorsión de estructuras y cimientos            125 Dislocación / colapso de paneles, paredes y techos. <b>Zona de intervención.</b>            50 Daños estructurales de pequeña magnitud en casa. <b>Zona de alerta.</b>            10 Rotura de vidrios.</p>
De tipo químico	Concentración con efectos tóxicos agudos (efectos evidentes sobre la salud en un corto periodo de tiempo)	<p><b>Concentración Inmediatamente Peligrosa para la Vida y la Salud</b> para una exposición de 30 min (IPVS en ppm ó mg/m<sup>3</sup>). <b>Zona de intervención.</b>            El valor umbral varía para cada sustancia.            En caso de exposiciones menos prolongadas cabe corregir el umbral utilizando el concepto de "dosis equivalente":</p> $\text{IPVS}^n \times 30 \text{ min} = C^n \times t$ <p>Donde "n" es el exponente de la ecuación Probit</p>

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



#### 2.1.3.4.2.5. Factores determinantes de la magnitud de las consecuencias. <sup>(3)</sup>

La magnitud de las consecuencias de un accidente determinado depende de una serie de factores, entre los que destacan los siguientes:

- *Inventario*. Cuando mayor sea la masa de material presente en una planta en la que tiene lugar un accidente, mayor será probablemente la masa involucrada en el mismo.
- *Factor energético*. A medida que aumenta la energía contenida en un sistema (energía de presión, calor de combustión) aumenta también su riesgo.
- *Factor tiempo*. La reducción del tiempo en el que es liberada una cantidad determinada de energía o de material implica un incremento de la magnitud de las consecuencias del suceso. Para una cantidad determinada de producto involucrada en el accidente, cuanto más corto sea el tiempo de escape más elevadas serán las concentraciones a una determinada distancia, más difícil e improbable será la huida o la evacuación de la población y más difícil será el control de la situación.
- *Relación intensidad / distancia*. Como consecuencia de los demás factores, la relación entre la intensidad de la acción (sobrepresión, radiación térmica, etc.) y la distancia a la que se encuentran las personas o el equipo será muy importante al establecer las consecuencias del accidente.
- *Factor de exposición*. El estudio de la distribución sobre el terreno de los efectos y de las personas puede conducir a resultados excesivamente alarmistas si no se tiene en cuenta el grado de exposición, y excesivamente optimistas si se sobrevalora. Es necesario, pues, estimular correctamente cuál será el efecto protector de edificios, personas, etc., ante determinados accidentes. En caso de nube tóxica, por ejemplo, un edificio puede suponer una protección muy buena si las personas que hay en su interior toman la precaución de cerrar las aberturas y reducir la ventilación al máximo.

Cuando la concatenación de escenarios propaga el accidente hacia diferentes zonas de una planta industrial e involucra cada vez más una mayor cantidad de producto, cosa que agrava de manera significativa el daño producido, se dice que se produce el *efecto dominó*.

**SEGUNDA PARTE  
TÉCNICAS DE  
ANÁLISIS DE RIESGOS**



### **2.2.1. Introducción.**

En esta segunda parte se dará una descripción más detallada de las técnicas utilizadas en el análisis de riesgos de la sección de reacción de la planta de alquilación, esto con el fin de conocer y entender que fue lo que se hizo en este estudio.

Como se mencionó en el capítulo primero, las técnicas de análisis de riesgos que se utilizaron fueron la técnica HazOp, el índice DOW, el análisis de árbol de fallas y el análisis de consecuencias. A continuación, se da una explicación más a fondo de cada una de estas técnicas.

### **2.2.2. Análisis de riesgos y operabilidad HazOp.** (3, 5, 6, 8, 10, 14, 15, 17, 23, 27, 28)

#### **2.2.2.1. Introducción al análisis HazOp.**

El análisis de peligros y operabilidad (por su traducción literal del inglés HAZard and OPerability Analysis, HazOp), o mejor conocido como análisis de riesgos y operabilidad, es un método que fue desarrollado en la década de los 70's por ingenieros de la Imperial Chemical Industries (ICI) y que inicialmente se utilizó en el diseño de plantas de fabricación de pesticidas.

El análisis HazOp se puede definir como la aplicación de un examen crítico, formal y sistemático a un proceso o proyecto de ingeniería de nueva instalación, para evaluar el riesgo potencial de la operación o funcionamiento incorrecto de los componentes individuales de los equipos, y los consiguientes efectos sobre la instalación como conjunto.

El método involucra, la investigación de desviaciones del intento de diseño o propósito de un proceso, por un grupo de individuos con experiencia en diferentes áreas tales como: ingeniería, producción, mantenimiento, química y seguridad. El grupo es guiado, en un proceso estructurado de tormenta de ideas, por un líder, que crea la estructura, al utilizar un conjunto de palabras guías o claves (no, mayor, menor, etc.) para examinar desviaciones de las condiciones normales de un proceso en varios puntos clave (nodos) de todo el proceso.

Estas palabras guías, se aplican a parámetros relevantes del proceso, tales como; flujo, temperatura, presión, composición, etc., para identificar las causas y consecuencias de desviaciones en



estos parámetros de sus valores normales.

Finalmente, la identificación de las consecuencias inaceptables, resulta en recomendaciones para mejorar el proceso. Estas pueden indicar modificaciones en el diseño, requerimientos en los procedimientos operativos, modificaciones en la documentación, mayor investigación, etc.

El fundamento de este método se basa en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones de operación y diseño suelen conducir a una falla en el sistema; dicha falla puede provocar desde un paro del proceso sin importancia hasta un accidente mayor de graves consecuencias.

En síntesis, dos son los objetivos primordiales de la técnica HazOp:

- Identificar riesgos y determinar su nivel, con el fin de mejorar la operabilidad de la sección ó unidad de proceso.
- Lograr que el personal técnico que participa en las sesiones HazOp se involucre directamente en la operación, para el entendimiento del proceso en situaciones tanto normales como anormales.

#### **2.2.2.1.1. Riesgo potencial y problemas de operación.**

Aunque la metodología del HazOp se concentra (mediante un enfoque sistemático) en identificar tanto riesgos como problemas de operabilidad, más del 80% de las recomendaciones del estudio son problemas de operabilidad y no de por sí, problemas de riesgo. Aunque la identificación de riesgos es el tema principal, los problemas de operabilidad se deben examinar, ya que tienen el potencial de producir riesgos en los procesos, que resulten en violaciones ambientales y/o laborales o tener un impacto negativo en la comunidad.

Actualmente se considera que los mayores beneficios de un estudio HazOp se relacionan con identificar problemas de operabilidad.

#### **2.2.2.1.2. Desviaciones del intento de diseño.**

Todas las plantas industriales tienen un propósito. Este puede ser, por ejemplo, producir un cierto



tonelaje de un producto químico por año, manufacturar un número especificado de automóviles o procesar cierto volumen de efluentes industriales por año, etc. Esto, se puede decir, que es el principal intento de diseño de la planta, pero en la mayoría de los casos, se entiende que un propósito adicional sería conducir las operaciones de la manera más segura y eficiente.

Con esto en mente, todas las partes y/o equipos de la planta se ensamblan para que en conjunto logren las metas deseadas. Sin embargo, para lograr esto, cada parte del equipo, cada bomba, tubería, etc., necesitan funcionar consistentemente de una manera particular. Es de esta manera que, cada elemento en particular tiene su intento de diseño o propósito.

Como ejemplo, supongamos que una parte del proceso, requiere un servicio de agua de enfriamiento. Para esto, generalmente se requiere una tubería para circulación del agua, una bomba, un abanico de enfriamiento y un intercambiador de calor. Podemos decir, que el intento de diseño de esta parte de la planta sería "continuamente circular agua de enfriamiento a una temperatura inicial de X °C y con un flujo de X litros por hora".

Es generalmente, a este nivel de detalle del intento de diseño o propósito, al que se dirige un estudio HazOp. La utilización de la palabra "desviación" ahora se entiende más fácilmente. Una desviación del intento de diseño, para el caso del servicio de agua de enfriamiento sería el cese de la circulación del agua, o que el agua tenga una temperatura inicial demasiado alta. Note la diferencia entre desviación y causa. En el caso anterior, la falla de la bomba sería la causa y no la desviación.

### **2.2.2.2. Nociones preliminares sobre el análisis HazOp.**

Esencialmente, el análisis HazOp involucra tener una descripción y documentación completa de la planta y sistemáticamente cuestionar cada parte, para identificar como se pueden producir desviaciones del intento de diseño. Una vez identificados, se hace una evaluación, para determinar si tales desviaciones y sus consecuencias, pueden tener un efecto negativo en la seguridad y operación eficiente de la planta. Si se considera necesario, se establecen acciones para remediar la situación.

Este análisis crítico, es aplicado de una manera estructurada, por el grupo de trabajo, que mediante una tormenta de ideas hacen un esfuerzo para descubrir causas creíbles de desviaciones. En la práctica,





muchas de las causas, serán obvias, tales como la falla de la bomba, que causa una pérdida del servicio del agua de enfriamiento, en el ejemplo mencionado. Sin embargo, una gran ventaja de la técnica, es que alienta al grupo a considerar otras posibilidades menos obvias de cómo pueden ocurrir las desviaciones, que de otra manera sería difícil descubrir en primera instancia. De esta manera, el estudio logra mejores resultados que una revisión mecánica de una lista de verificación. El resultado es, de que hay buenas oportunidades de identificar fallas y problemas potenciales, que no hayan sido previamente experimentados en el tipo de planta bajo estudio.

#### **2.2.2.2.1. Palabras guía.**

Para llevar a cabo este proceso de cuestionamiento y análisis sistemático, se hace uso de palabras claves para enfocar la atención del grupo sobre las desviaciones y sus posibles causas. Y es que el objetivo principal de estas palabras guía consiste en identificar:

- Desviaciones de la intención del diseño de la planta y de sus procedimientos.
- Causas y consecuencias de dichas desviaciones.
- Sistemas de protección instalados para reducir la probabilidad de la causa o la magnitud de la consecuencia.

Estas palabras guías se dividen en dos grupos:

- Palabras primarias, que enfocan la atención en un aspecto particular del intento de diseño o una condición o parámetro asociado con el proceso.
- Palabras secundarias que, cuando se combinan con las palabras primarias, sugieren posibles desviaciones.

El éxito que se tenga en la aplicación del análisis HazOp depende del buen uso que se haga de las palabras guía, por lo que es importante que tanto su significado como su uso quede bien entendido para el grupo de trabajo.

##### **2.2.2.2.1.1. Palabras primarias.**

Estas reflejan tanto el propósito, como aspectos operacionales de la planta bajo estudio. Palabras



típicas orientadas al proceso, pudieran ser las siguientes:

Flujo	Presión
Temperatura	Composición
Viscosidad	Adición
Nivel	Mantenimiento
Reacción	Instrumentación
Prueba	Separación
Muestreo	Reducción
Corrosión/Erosión	Mezclado

A primera vista, podría parecer que algunas palabras no tienen relación alguna con una interpretación razonable del propósito de diseño, pero no hay que descartar ninguna hasta que se compruebe, mediante el análisis HazOp, que no tienen que ver con el proceso.

Considerando aspectos de operabilidad del proceso, se pueden tomar en cuenta las siguientes palabras:

Aislamiento	Drenaje
Ventilación	Purgado
Inspección	Mantenimiento
Arranque	Paro
Relevo	

Muchas veces, estas palabras, no se consideran o se les da menor importancia. Pero hay que recordar que la finalidad de la técnica HazOp consiste en tomar en cuenta todas las palabras primarias e ir analizando una por una hasta descartar todas aquellas que no aplican en nuestro proceso.

#### **2.2.2.2.1.2. Palabras secundarias.**

Como se mencionó anteriormente, cuando las palabras secundarias se combinan con las primarias, sugieren desviaciones o problemas potenciales. Un listado de las palabras utilizadas se menciona a continuación en la tabla 3.1.

Se debe notar que no todas las combinaciones de palabras primarias y secundarias son relevantes. Por ejemplo; Temperatura/No (¡Cero absoluto ó  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ !) no tiene significado.



Tabla 2.7 Definición de las palabras guía secundarias. (10)

Palabra guía	Definición	Aplicación
No / ninguna	Negación del intento de diseño	No realiza el paso u operación. Un paso u operación importante en el proceso se omite
Más	Incremento cuantitativo	Se hace más que lo especificado o requerido en un sentido cuantitativo (ej. se abre una válvula completamente cuando se requiere solo abrir parcialmente)
Menos	Decremento cuantitativo	Se hace menos de lo especificado o requerido en un sentido cuantitativo (ej. purgar un depósito por 5 minutos en lugar de 10 minutos)
Además de	Incremento cualitativo	Se hace más de lo especificado en un sentido cualitativo (ej. se abren las válvulas para varios tanques cuando solo se requiere para una)
Parte de	Decremento cualitativo	Se realiza parte de un paso en un sentido cualitativo (Ej. se cierra solo una válvula cuando el procedimiento dice que se cierren todo el grupo y se abra la válvula de sangrado)
Reversa	Opuesto lógico del intento de diseño	Se hace lo opuesto a lo especificado. (ej. se abre una válvula cuando el procedimiento dice que se debe de cerrar)
En vez de	Sustitución completa	Se hace algo diferente a lo requerido (Ej. se abra la válvula equivocada)

En la siguiente tabla, se muestran todas las posibles combinaciones de palabras guías primarias y palabras guías secundarias. Sólo se marcan aquellas combinaciones que tienen relevancia y que pueden ser tomadas en cuenta en el análisis HazOp.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Tabla 2.8 Matriz de desviaciones para el análisis HazOp. (8)

Palabras primarias	Palabras guías secundarias						
	No / Ninguna	Más	Menos	Además de	Parte de	Reversa	En vez de
Flujo	No hay flujo	Más flujo	Menos flujo	Contaminación	Composición	Retroceso	Material equivocado
Presión		Más presión	Menos presión	Golpe de ariete	Presión diferencial ( $\Delta P$ )		Presión de vacío (colapso)
Temperatura		Alta temperatura	Baja temperatura	Oxidación ó fragilización	Gradiente ( $\Delta T$ )		
Viscosidad		Alta viscosidad	Baja viscosidad		Cambio de fase		
Nivel	Vacío	Alto nivel	Bajo nivel				
Mezcla	No mezcla	Mezcla excesiva	Mezcla insuficiente	Espuma			
Reacción	No hay reacción	Reacción exotérmica	Reacción incompleta	Cambio de fase	Reacción secundaria	Reacción inversa	Reacción equivocada
Operación	Falla de servicios	Operación por encima de la capacidad de diseño	Espera	Mantenimiento	Arranque ó paro		Muestreo
Relevo	Inadecuado			Efecto Joule-Thompson	Dos fases (Bifásico)		Explosión /ruptura por sobrepresión
Aterrizamiento	Fuentes de ignición			Descarga electrostática			Ignición
Instrumentación	No hay instrumentación	Instrumentación redundante (confiabilidad)	Falla/daño a instrumento	Alarmas	Falla un elemento del interlock		Paro de emergencia (ESD)
Contenedor	Ruptura			Seguridad	Fuga pequeña		Contaminación del ambiente por derrame ó fuga
Estructura	Falla de soporte		Corrosión ó erosión	A prueba de fuego	Materiales diferentes		
Fase	No hay separación		Menos separación		Separación incompleta		
Composición		Más composición	Menos composición		Impurezas		
Velocidad	No hay giro	Alta velocidad	Baja velocidad			Giro inverso	
Catalizador		Más catalizador	Menos catalizador				
Contaminación	No hay contaminación	Más contaminación	Menos contaminación				Medio ambiente limpio
Mantenimiento	No hay mantenimiento		Menos mantenimiento	Operación	Frecuencia no establecida		Desmantelamiento
Concentración		Alta concentración	Baja concentración				



### 2.2.2.3. Metodología del análisis HazOp.

El paso previo para el desarrollo del análisis es la definición del objetivo y el alcance del estudio, de los límites físicos de la instalación o el proceso que se quiere estudiar y de la información requerida. Además debe estudiarse el sistema o proceso ya definido para conocer la información disponible, prepararla y organizar el equipo de estudio, planear la secuencia del análisis y las sesiones de trabajo.

Posteriormente, en términos simples, el proceso de estudio HazOp involucra aplicar de una manera sistemática, todas las combinaciones relevantes de palabras claves, a la planta bajo estudio, en un esfuerzo de descubrir problemas potenciales. Los resultados se registran, en un formato de tabla o matriz que se muestra en la tabla 3.3.

Los aspectos principales que contempla el formato de registro de resultados son los siguientes:

- *Planta*: es el lugar donde se realiza el análisis HazOp.
- *Circuito*: es la forma en la que se divide la planta bajo estudio para organizar mejor el análisis.
- *Fecha*: la fecha es la del día en que se realiza el estudio.
- *Nodo*: son partes del proceso lo suficientemente pequeños para poderse manejar y lo suficientemente grandes para ser significativos, es decir, se considera como un nodo un equipo con sus líneas de alimentación y descarga o aquella parte del proceso en la cual un parámetro de la operación varía.
- *Diagramas*: son todos los diagramas que estén implicados en el nodo bajo estudio.
- *Producto(s)*: son todos los productos que se manejan en el nodo bajo estudio.
- *Desviación*: es la combinación de palabras clave primarias y secundarias que se está aplicando.
- *Esc (Escenario)*: indica el número de escenario de que se trata.
- *Causa*: listar todas las causas potenciales que resultarían en la desviación.
- *Consecuencia*: las consecuencias que se producirían, tanto como efecto de la desviación y si es apropiado, efectos de la causa por sí misma. En este punto se debe ser lo más claro posible en cuanto a la descripción de las consecuencias, esto con el fin de que cualquier persona de la planta entienda lo que se escribió en el reporte final. Una consideración importante en la evaluación de las consecuencias es que no se deben considerar los sistemas de protección o los instrumentos ya incluidos en el diseño.

Tabla 2.9 Formato de registro de las sesiones HazOp.



Planta:

Circuito:

Fecha:

Nodo:

Diagramas:

Producto:

Derivación:

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protección	Recomendación	Clase



SEGUNDA PARTE: TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RIESGOS

Facultad de Química, U.N.A.M.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- *F, G y R (Frecuencia, Gravedad y Riesgo)*: estos aspectos se detallarán más adelante.
- *Protecciones*: cualquier dispositivo protector, ya sea que prevenga la causa o salvede contra consecuencias adversas, debe ser registrado en esta columna. Cabe destacar que las protecciones no están restringidas al equipo físico de protección, dónde sea apropiado, se debe dar crédito, a aspectos de procedimientos, tales como inspecciones regulares de la planta siempre y cuando haya seguridad de que se estén llevando a cabo.
- *Recomendaciones*: donde una causa creible, resulte en una consecuencia negativa, se debe decidir si se debe tomar alguna recomendación para remediarla. Es en esta etapa, donde las consecuencias y sus protecciones asociadas son consideradas. Si parece que las medidas de protección son adecuadas, entonces ninguna recomendación necesita ser tomada y esto se indica en la columna de recomendaciones.
- *Clase*: este aspecto se detallará más adelante.

Al aplicar una palabra guía al parámetro se obtiene una desviación, por ejemplo si el parámetro es flujo y la palabra guía es menos, la desviación será menos flujo.

Para cada desviación hay que:

- Identificar las causas de la desviación.
- Determinar consecuencias, para cada causa, asumiendo que fallan todas las protecciones o no existen.
- Listar las medidas de protección existentes.
- Determinar el nivel de riesgo para cada causa, considerando la frecuencia con la que se da la causa y la gravedad de la consecuencia.
- Hacer recomendaciones para minimizar el riesgo, ya sea realizándolas para disminuir la frecuencia de la causa o para disminuir la gravedad de la consecuencia.

En la figura 3.1 se muestra un esquema de la metodología del análisis HazOp. Una vez que se hayan identificado una desviación viable en un nodo, así como sus causas, sus consecuencias y sus protecciones, se procede a evaluar el nivel de riesgo mediante la estimación de la gravedad y la frecuencia de dicha desviación. Para ello se utilizan ciertos criterios que nos sirven para estimar ambas variables. Estos criterios se encuentran en unas tablas que se muestran a continuación.

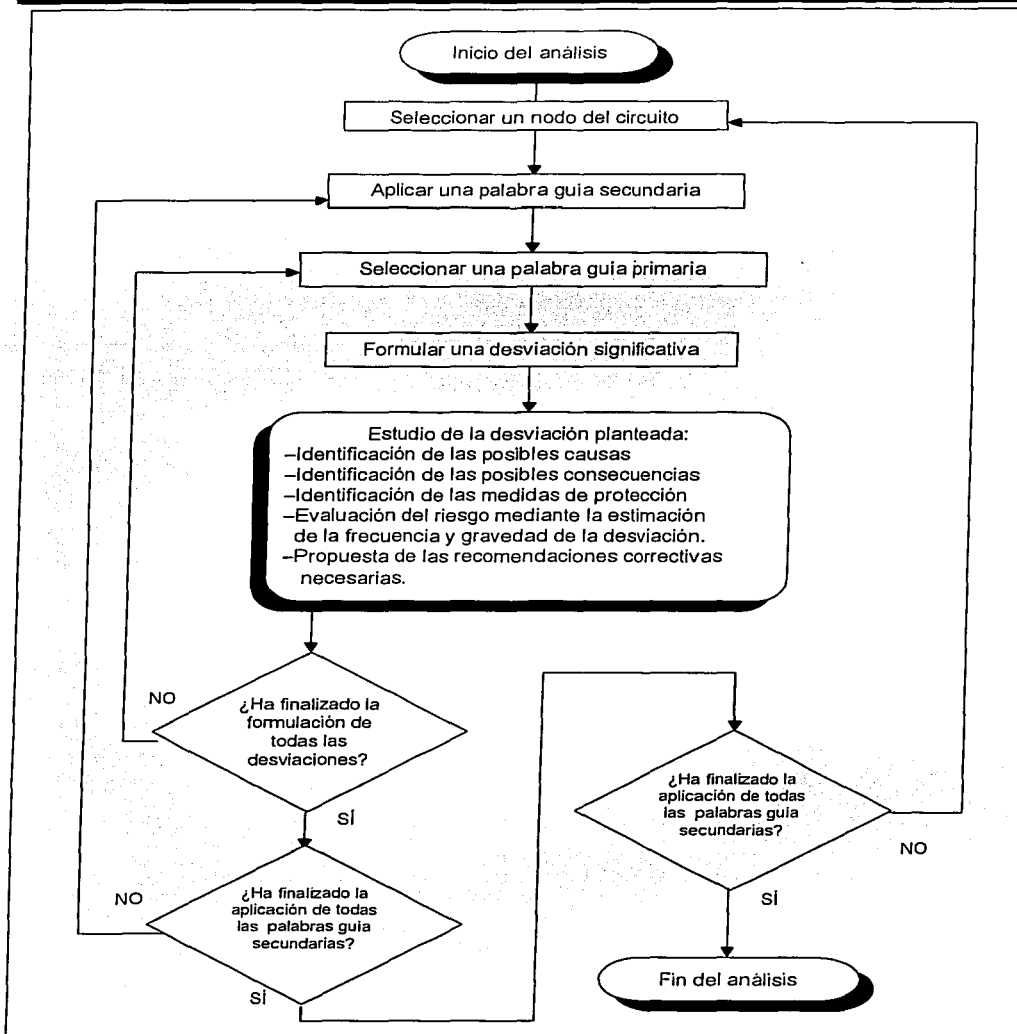
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.8 Esquema de ejecución del análisis HazOp. (3)





Cabe mencionar que estas tablas se utilizaron en el análisis HazOp del circuito de reacción que se incluye en este trabajo.

Tabla 2.10 Niveles de frecuencia.

Escala	Frecuencia	Descripción
1	Frecuente	Ocurre más de una vez al año
2	Ocasional	Ha ocurrido varias veces durante la vida de la planta
3	Posible	Se espera que ocurra no más de una vez en la vida de la planta
4	Importante	No se espera que ocurra en la vida de la planta

Tabla 2.11 Niveles de gravedad.

Escala	Gravedad	Aspecto	Descripción
1	Catastrófico	Personas	Pérdida de una o más vidas fuera de la refinería
		Instalaciones	Daños por más de \$25,000,000
		Medio ambiente	Fuga mayor que requiere limpieza fuera de la refinería
		Operación	Paro de la refinería
2	Mayor	Personas	Un lesionado fuera de la refinería y una pérdida de vida dentro de la refinería.
		Instalaciones	Daños por un monto entre \$2,500,000 y \$25,000,000
		Medio ambiente	Fuga mayor que no requiere limpieza fuera de la refinería
		Operación	Paro de más de una planta
3	Significativo	Personas	Varios lesionados dentro de la refinería
		Instalaciones	Daños por un monto entre \$250,000 y \$2,500,000
		Medio ambiente	Fuga menor que requiere limpieza dentro de la refinería
		Operación	Paro de una planta
4	Importante	Personas	Un lesionado dentro de la refinería
		Instalaciones	Daños por menos de \$250,000
		Medio ambiente	Fuga menor
		Operación	Paro de equipo o sección de planta

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con los niveles de frecuencia y gravedad ya establecidos, se construye una matriz de índice de riesgo que combina la probabilidad de ocurrencia de una desviación y la gravedad de las consecuencias del mismo. Dicha matriz se muestra a continuación en la tabla 3.6.



Tabla 2.12 Matriz de riesgos.

		Gravedad			
		1	2	3	4
Frecuencia	1	1	3	4	6
	2	3	4	6	7
	3	4	6	7	9
	4	6	7	9	10

Tabla 2.13 Matriz de riesgos modificada.

		Gravedad			
		1	2	3	4
Frecuencia	1	A	A	B	C
	2	A	B	C	D
	3	B	C	D	D
	4	C	D	D	D

Con la matriz de riesgos construida, se puede hacer una clasificación de los riesgos de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2.14 Clases de riesgos.

Escala	Clase	Descripción	Seguimiento
1 a 3	A	Inaceptable	El riesgo deberá mitigarse mediante controles de ingeniería y/o administrativos hasta un riesgo C o menor dentro de un periodo de 6 meses.
4	B	Indeseable	El riesgo deberá mitigarse mediante controles de ingeniería y/o administrativos hasta un riesgo C o menor dentro de un periodo de 12 meses.
6	C	Aceptable con controles	Debe verificarse que los procedimientos o controles estén en su lugar, en uso y que sean efectivos.
7 a 10	D	Aceptable como está	No se requiere mitigar el riesgo.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

De acuerdo con la clasificación anterior, la tabla 3.6 se modifica quedando como lo muestra la tabla 3.7.

Para estimar el nivel de frecuencia y gravedad, el equipo de trabajo debe hacer uso de sus conocimientos y su experiencia sobre el proceso en cuestión, para así aplicar de forma correcta y precisa los criterios establecidos en las tablas de frecuencia y gravedad.

Una vez que se han estimado la frecuencia y gravedad de la desviación en estudio, se prosigue con la proposición de recomendaciones que corregirán las desviaciones encontradas. En algunos casos se requerirá un análisis más profundo, por ejemplo, una simulación por computadora del accidente para estimar sus consecuencias, y/o un estudio formal de la probabilidad del suceso. En este caso, el equipo de trabajo puede sugerir un estudio con profundidad antes de recomendar la implementación de medidas concretas. En otras muchas circunstancias, el análisis HazOp es suficiente para decidir la



aplicación de medidas correctoras o incluso cambios de mayor entidad en el diseño.

Básicamente, las recomendaciones caen en dos categorías:

1. Recomendaciones preventivas, con lo que se busca reducir la frecuencia o la probabilidad de las causas de los posibles accidentes.
2. Recomendaciones correctivas, con lo cual se pretende mitigar las consecuencias de los posibles accidentes.

Obviamente es preferible la primera, no obstante, esto no es siempre posible, especialmente al trabajar con equipos en mal funcionamiento. Sin embargo, siempre se trata de eliminar primero la causa y solo donde sea necesario, mitigar las consecuencias.

Al indicar recomendaciones, es conveniente considerar varias notas de precaución. No se debe optar automáticamente por una solución de ingeniería, como por ejemplo, agregando alarmas, instrumentación adicional, etc. Se sabe que este tipo de recomendaciones ocasionan el incremento en el costo operacional desde el punto de vista de mantenimiento, calibración regular, etc. Una solución con exceso de ingeniería, es menos confiable que el diseño original debido a pruebas y mantenimiento inadecuado.

Finalmente, siempre se debe tomar en cuenta el nivel de entrenamiento y experiencia del personal que está operando la planta. Acciones que involucran sistemas de protección sofisticados y elaborados, generalmente se desperdician, son inherentemente peligrosos si los operadores no entienden su funcionamiento y es común que sean deshabilitados, ya sea deliberadamente o por error, porque nadie sabe como mantenerlos y calibrarlos.

Habiendo revisado las operaciones involucradas al registrar una sola desviación, el procedimiento consiste en continuar revisando y registrando todas las palabras guía.

#### **2.2.2.4. El grupo de trabajo.**

El grupo de trabajo, que conducirá el estudio de HazOp, debe consistir de personas con una buena



comprensión del proceso y de la planta bajo estudio. Los miembros del equipo de trabajo son de dos tipos: los técnicos y los analistas de riesgo.

Los técnicos implicados en el estudio soportan el apartado técnico. Los componentes deben ser especialistas en las áreas de conocimiento implicadas en el estudio; es aconsejable que sean verdaderos expertos. Las áreas de conocimiento implicadas en cada estudio pueden variar sustancialmente en función del objeto de la planta y del objetivo del estudio que se quiere desarrollar. Es recomendable que el número de especialistas que elaboran el estudio sea entre tres y seis; grupos menores pueden presentar una falta de conocimiento en determinados campos y grupos mayores suelen tener problemas organizativos.

Cabe resaltar que una de las personas que siempre debe ser incluida, es la del área de operaciones o producción. Esta persona, debe tener experiencia de primera mano, en las operaciones diarias de la planta en revisión. La contribución de esta persona puede ser invaluable, ya que incluye una perspectiva operacional que ninguno de los otros participantes pudiera nunca tener.

Los analistas de riesgo deben dar soporte logístico al estudio, es decir, dirigir, moderar y documentar el análisis. Los analistas deben ser especialistas en aplicar la metodología HazOp. Los analistas deben tener la formación necesaria para entender y controlar la discusión de forma satisfactoria. Básicamente, la parte de los analistas de riesgo se compone de dos personas: el coordinador y el secretario.

El coordinador es una persona que debe conocer perfectamente la metodología HazOp y debe ser cuidadosamente seleccionado, para lograr un progreso eficiente y sin problemas del estudio. Idealmente, esta persona no debe estar muy asociada con el proyecto en revisión, para evitar los riesgos de no ser suficientemente objetivo en la dirección del grupo.

El secretario será la persona encargada de registrar la información generada en el estudio. Este necesitará, sin embargo, tener suficiente conocimiento técnico para entender lo que se está discutiendo.

#### **2.2.2.5. Trabajo de preparación.**

Es de la mayor importancia, de que antes de que inicie un proyecto HazOp, se haga un trabajo de



preparación. Esto, no es solo esencial en algunos aspectos, tales como la estructuración adecuada del estudio y del grupo, sino que, además, aumenta la eficiencia del HazOp al mantener el interés de los participantes.

El trabajo preparatorio es responsabilidad del coordinador y los requerimientos son los siguientes:

- Recopilación de datos.
- Comprensión del tema.
- Subdivisión de la planta y planeación de la secuencia.
- Marcación de los planos.
- Selección de palabras guía adecuadas.
- Preparación de la agenda de trabajo.
- Preparación de un calendario de actividades.
- Selección del grupo de trabajo.

#### **2.2.2.5.1. Recopilación de datos.**

Toda la documentación relevante debe ser recopilada previamente. Típicamente esto pudiera consistir de lo siguiente:

- Diagramas de flujo de proceso (DFP).
- Una descripción comprensiva del proceso, conteniendo parámetros de operación, promedios de flujo, volúmenes, etc.
- Diagramas de tubería e instrumentación (DTI).
- Diagramas causa - efecto indicando como operan los sistemas de lazo y de control.
- Si está disponible, información de equipos paquete.
- Diagramas de localización general de equipo de la planta (Plot-plan).

Toda la información antes listada se debe tener actualizada y vigente en su totalidad para el éxito del análisis. En caso contrario, se debe realizar tanto la actualización de la información obsoleta como verificar la vigencia de la misma.



### **2.2.2.5.2. Comprensión del tema.**

El coordinador debe dedicar el tiempo necesario para lograr una buena comprensión de cómo se opera la planta, estudiando la información y platicando con el personal de diseño involucrado. Al realizar la tarea, es muy probable que note áreas con problemas potenciales. El coordinador debe realizar notas personales de esto, para evitar en lo posible, que se omitan en el estudio.

La etapa de preparación, es quizá la más importante, ya que es el fundamento sobre el cual, los otros pasos del proceso se basan. Sin una comprensión razonable de cómo funciona la planta, será imposible planear una estrategia sensible del estudio, decidir cuanto tiempo durará la revisión o quién necesita ser incluido en el grupo de trabajo.

### **2.2.2.5.3. Subdivisión de la planta y planeación de la secuencia.**

En todas, excepto en las plantas más simples, sería mucho esperar, que el grupo de trabajo analice todos los aspectos y operaciones del proceso simultáneamente. Por ello, se debe dividir el proceso en secciones manejables; en el caso de una planta, ésta se divide en circuitos y éstos a su vez se dividen en nodos. Los criterios que se siguen para la división en nodos de un proceso son los siguientes:

- ⇒ Los nodos se establecen a partir de la función que cumple el equipo (líneas de proceso, líneas de combustible, líneas de subproductos) y de la dirección de flujo.
- ⇒ Un nodo puede incluir uno o varios equipos, individuales o compuestos, que en su conjunto cumplen una misión en el proceso o instalación.
- ⇒ Un nodo puede incluir uno o varios equipos, como los mencionados antes, que aunque no compartan una misión común, manejan variables de proceso que no varían de forma significativa.

En plantas de proceso continuo, el análisis va de corriente arriba hacia corriente abajo, con servicios tales como, drenaje, ventilación, instrumentos de aire, agua de enfriamiento, etc., siendo consideradas separadamente y al final. Con respecto a subdividir la planta en secciones, no hay necesidad de considerar cada línea y cada equipo menor en una tabla separada. Esto sería un desperdicio de tiempo y una labor tediosa para el grupo.



Con operaciones por lotes o "batch" se requiere un enfoque diferente. En tales casos, los diagramas de la planta no son el enfoque primario del estudio y son más bien accesorios. De mayor importancia será, un diagrama de flujo detallado o la secuencia de pasos operativos, que deben ser realizados. Es en esta secuencia de lotes, donde se requiere la división en secciones manejables, y las palabras claves se aplicarán, a las operaciones secuenciales, tales como preparación, carga, reacción, transferencia, centrifugado, secado, etc. Esta metodología se requiere, porque es muy probable que cada elemento individual de la planta sea puesto en diferentes estados y sirva a diferentes propósitos en las diversas etapas del proceso.

#### **2.2.2.5.4. Marcación de los planos.**

Cuando la estrategia del estudio se haya decidido, los elementos de la planta integrados en cada tabla, se deben marcar en colores separados y distintivos, con los números de la tabla o nodo marcados con el mismo color. Las líneas deben ser paralelas y los equipos y depósitos delineados con el mismo color. Donde una tabla se extienda en dos o más planos, el color utilizado se debe mantener.

Este marcado previo, es una salida a la práctica común, de ir marcando el trabajo mientras avanza el estudio. Lo cual tiene dos propósitos: primero, ahorrar tiempo durante las juntas, tanto en el marcado, como en la discusión de donde la tabla o nodo debe iniciar y donde terminar, segundo, el coordinador se asegurará al planear la estrategia del estudio, de que no se haya pasado por alto algún punto.

#### **2.2.2.5.5. Selección de palabras guía adecuadas.**

Habiendo completado el trabajo anterior, será algo simple formular un listado comprensivo de las palabras guía requeridas para cubrir todos los aspectos del proceso en estudio.

Algunas compañías, dado que la mayoría de las plantas que operan, son de naturaleza similar, tendrán un conjunto estándar de palabras clave. Tal lista se debe verificar, para asegurar que cubra todos los aspectos del sistema en estudio. Cualquier palabra clave redundante, debe ser eliminada.

La lista final se debe copiar para entregar una copia a cada miembro del equipo. También se debe incluir un programa de las combinaciones apropiadas (p. ej. que palabras guía secundarias se aplicarán



a cada palabra guía primaria). Donde haya la posibilidad de confusión, respecto al significado de una combinación en particular, se debe dar una completa explicación de ésta.

Al integrar la lista, se debe considerar que entre menor sea el número de palabras utilizadas, mayor velocidad en el estudio. Esto no quiere decir, que algunos de los aspectos del proceso no se deben considerar.

#### **2.2.2.5.6. Preparación de la agenda de trabajo diaria.**

Los encabezados de la tabla de registro (Tabla 3.3), hacen referencia a los diagramas y planos relevantes y contienen una breve descripción del intento de diseño de la sección en análisis de la planta con las sustancias que se manejan en dicha sección.

La agenda es una lista de estos encabezados. Una copia debe ser enviada a cada miembro del grupo. Además de ser informativa y una ayuda para una buena participación, sirve para poner en perspectiva el total de trabajo que se debe lograr en el tiempo asignado. Esto inducirá en el grupo, un sentido de urgencia para lograr el trabajo.

#### **2.2.2.5.7. Preparación del calendario de actividades.**

El coordinador debe formular un horario de trabajo, indicando lo que necesita lograrse en cada junta de trabajo, para cumplir con el límite de tiempo asignado al estudio. Al integrar el calendario de trabajo, el coordinador se debe basar en su experiencia, para evaluar el tiempo requerido en cada revisión. Mucho de esto dependerá, de la complejidad de la planta y la experiencia del grupo.

Como una guía general, en una planta sencilla y con planos no muy complejos, en promedio, se puede estudiar tres diagramas diarios. Si el sistema a revisar, es complejo y cada diagrama, parece que se dibujó con la intención de no desperdiciar espacio, entonces se completarán dos o posiblemente sólo un diagrama por día.

Esté preparado para un desperdicio de tiempo, al iniciar el estudio. Al principio, el progreso del estudio, es siempre lento, en la medida de que el grupo se conoce, en el nuevo rol de revisar y criticar el diseño





propio y el de sus colegas, en la operación de la planta. Después del primer día todo irá más rápido.

#### **2.2.2.5.8. Selección del grupo de trabajo.**

Habiendo tenido una buena apreciación de lo que involucra el estudio, tanto en términos de contenido, como de tiempo requerido, el coordinador debe asegurar que los miembros principales del grupo tengan la experiencia adecuada y también tiempo disponible durante la revisión. Además, debe considerar que probablemente será necesario personal con experiencia adicional durante el transcurso de las juntas y estimar cuando será requerida su asistencia. Con respecto a esto último, en ciertas circunstancias, la secuencia del estudio puede modificarse alrededor de la disponibilidad de tal personal.

#### **2.2.2.6. El reporte final.**

El reporte final es un documento clave respecto a la seguridad de la planta. El número de horas - hombre, dedicadas al estudio, es generalmente considerable. Es crucial, que el beneficio de este estudio de expertos, sea fácilmente accesible y comprensible para una referencia futura, en caso de que haya necesidad de alterar la planta o sus condiciones de operación.

El reporte incluye los miembros del grupo de trabajo, las fechas de las reuniones, las palabras claves aplicadas y cada detalle de los resultados del estudio del grupo. Sin embargo, es usual incluir una descripción general cuyo contenido generalmente es el siguiente:

- Una descripción de los términos de referencia y enfoque del estudio.
- Una muy breve descripción del proceso estudiado.
- Los procedimientos y protocolos utilizados. Se debe listar las combinaciones aplicadas de las palabras clave, junto con una explicación de éstas, dado al grupo al inicio del estudio. También se deben explicar las hojas de acciones producidas y las respuestas dadas a estas acciones.
- Comentarios generales. Si, por ejemplo, al grupo se le asegura que se tendrán universalmente ventilaciones en los puntos altos y drenajes en los puntos bajos, se debe mencionar esta aseveración, así como su fuente. Si ciertos detalles de paquetes de vendedores no estuvieran disponibles, se debe explicar y listar los elementos que no fueron revisados.
- Resultados. Estos son generalmente las recomendaciones.



También se debe incluir en el reporte HazOp, un apéndice conteniendo:

- Copias maestras de los diagramas estudiados.
- Copias de la información técnica utilizada.
- Diagramas de causa - efecto (por ejemplo, matrices mostrando la acción ejecutiva de instrumentos relacionados con la seguridad y los lazos).
- Los cálculos generados.
- Correspondencia relevante entre departamentos, de contratista a vendedor y/o de cliente a contratista.

Cada uno de los documentos anteriores debe ser firmado y fechado por el coordinador del proyecto.

El reporte final del análisis HazOp debe ser compilado tan pronto como sea posible, después del estudio y una vez completado, éste no cambia. Por otro lado, el listado de recomendaciones se inicia al final del estudio y su contenido continuará cambiando, quizá por varios meses, hasta que la última recomendación haya sido revisada y aceptada.

El listado de recomendaciones representa un registro del estado de terminación de las acciones recomendadas del HazOp. Cuando todas las respuestas a las recomendaciones se hayan revisado y aceptado, finalmente se convierte éste en un registro estático conteniendo toda la historia de implementación de los resultados del análisis HazOp.

### **2.2.3. Índice DOW.** (2, 3, 6, 11, 17, 29)

#### **2.2.3.1. Introducción al índice DOW.**

Con el título original de DOW's Fire & Explosion Index, publicado por primera vez en 1966, este índice fue el resultado de una guía diseñada para clasificar instalaciones químicas.

Con el transcurso de los años, han aparecido sucesivas revisiones y actualizaciones (1966, 1972, 1976, 1981, 1987, 1994) que han llegado a convertir este índice en una herramienta de referencia imprescindible para la identificación de riesgos en plantas petroquímicas, muy utilizado para la justificación de localización de equipos industriales y la adopción de distancias de separación entre



equipos. De hecho, todos los proyectos industriales de la compañía DOW van acompañados de un estudio con este índice, e indican en un plano de localización general de equipo los círculos de exposición calculados para cada unidad de proceso.

La aplicación del método permite cuantificar numéricamente:

- *Un nivel de riesgo*, que se establece a través de un valor numérico denominado *Índice de fuego y explosión* y que normalmente se sitúa en el rango de 1 a 200 (rango que comprende diferentes calificativos de peligro, que van de “ligero” a “severo”).
- *Un área de exposición*, identificada con un círculo de radio proporcional al índice de fuego y explosión (que en adelante denominaremos IF&E) y que normalmente se sitúa en el rango de 0 a 50 m.
- *El máximo daño probable*, evaluado como costo económico del accidente debido a la pérdida de instalaciones. Se evalúa como una fracción del costo de las instalaciones afectadas por el área de exposición.
- *Los máximos días probables de indisponibilidad*, desde el momento del accidente hasta el momento en que puede reanudarse la producción.
- *El daño derivado de la pérdida de la producción*, como producto de los días de indisponibilidad de la planta por el valor perdido de la producción

### 2.2.3.2. Información necesaria para el índice DOW.

La información básica necesaria para la aplicación del índice DOW es la siguiente:

Documentación básica:

- ⇒ Planos de implantación o plot-plan's (útiles para dibujar los círculos e identificar unidades).
- ⇒ Diagramas de flujo de proceso (DFP).
- ⇒ Dependiendo del nivel de información incorporado en los DFP's, pueden ser también necesarios los diagramas de tubería e instrumentación (DTI).
- ⇒ Hojas de especificación de equipos, en especial, de los equipos críticos.

Datos de cada unidad:



- ⇒ Identificación de las sustancias procesadas y sus principales parámetros:
  - Factor material (tabulado). El método incluye un procedimiento de estimación. El factor material varía entre 1 y 40.
  - Propiedades físicas: entalpía de combustión, temperatura de inflamación y temperatura de ebullición.
- ⇒ Datos de proceso:
  - Presión de alivio de los sistemas de desfogue.
  - Temperatura y presión de operación.
  - Estado del producto: gas, gas licuado, líquido, líquido viscoso, sólido en polvo (es importante identificar el diámetro de la partícula), sólido compacto o granulado.
  - Cantidades retenidas de producto en las diferentes secciones del proceso.

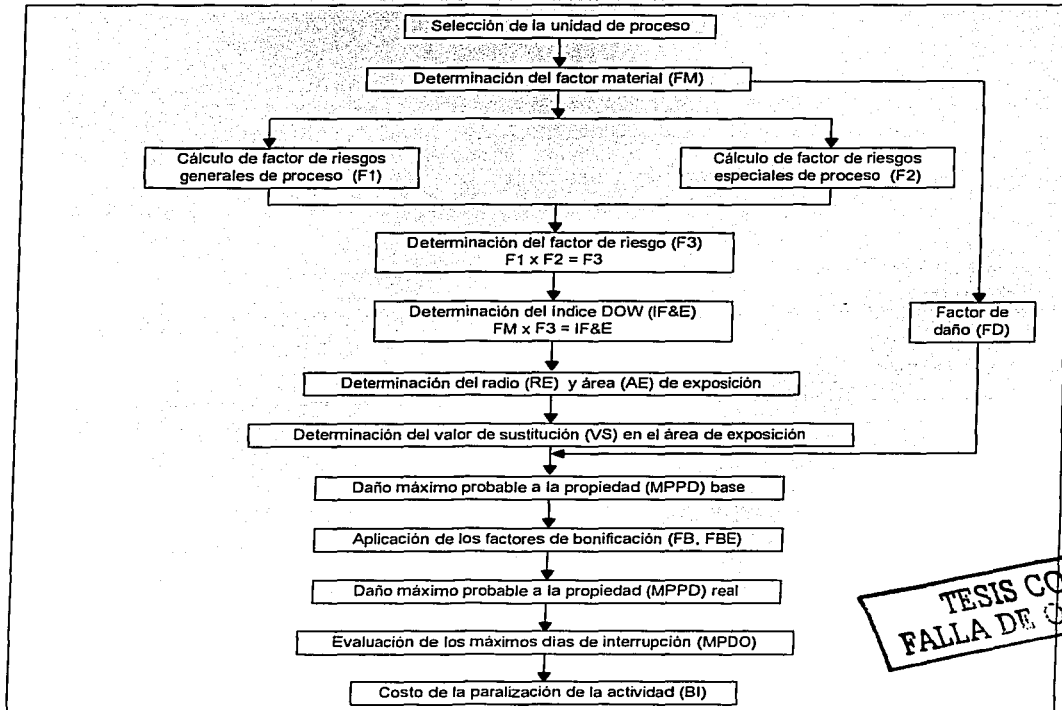
### 2.2.3.3. Descripción del método del índice DOW.

La metodología que a continuación se describe corresponde a la sexta edición (1987) del DOW's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide que incluye, entre otras, la novedad de considerar la toxicidad de los productos como una posible complicación en las respuestas frente a emergencias. El método se desarrolla siguiendo las etapas que a continuación se comentarán brevemente y que se exponen de forma gráfica y resumida en la figura 3.2.

1. División de la planta química en estudio en "unidades de proceso" para cada una de las cuales se determinará su "Índice de Fuego y Explosión" (IF&E).
2. Determinación del "factor material" (FM) para cada unidad; este factor se encuentra en tablas.
3. Evaluación de los factores de riesgo, considerando los riesgos generales de proceso (reacciones exotérmicas o endotérmicas, transporte de material, accesos, etc.) (F1) y los riesgos especiales del proceso (producto tóxico peligroso, operación en vacío, operación dentro o cerca del rango de inflamabilidad, etc.) (F2).
4. Evaluación del "factor de riesgo" (F3) y el "factor de daño" (FD) para cada unidad determinada en el inciso a).
5. Determinación de los "Índices de Fuego y Explosión" (IF&E) y el radio de exposición para cada unidad de proceso seleccionada (RE), con este valor se calcula el área de exposición (AE).
6. Evaluación del valor de sustitución del equipo en el área de exposición (VS).



- Evaluación del "Daño Máximo Probable a la Propiedad" base (MPPD por sus siglas en inglés, *Maximum Probable Property Damage*) en el que se usan el "factor de daño" (FD) y el "valor de sustitución" (VS).
- Evaluación del "factor de bonificación" (FB), como producto de los factores de bonificación por control de proceso ( $C_1$ ), por aislamiento de material ( $C_2$ ) y por protección contra incendio ( $C_3$ ). Con el FB se obtiene el factor de bonificación efectivo (FBE).
- Evaluación del MPPD efectivo con el uso del FBE y el MMPD base.
- Determinación de los "Máximos Días Probables de Indisponibilidad" (MPDO por sus siglas en inglés, *Maximum Probable Days Outage*) y los costos por "Interrupción de Negocios" (BI por sus siglas en inglés, *Business Interruption*) en estos días.

Fig. 2.9 Procedimiento de ejecución del índice DOW. <sup>(11)</sup>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Para tener una idea básica de los parámetros que el desarrollo del Índice DOW obliga a considerar, se estudia con un mínimo de detalle el contenido de cada una de las etapas indicadas anteriormente. Con esto, no se pretende sustituir el contenido de las Guías de Aplicación del índice de DOW, que son claras y precisas para la aplicación del método.

#### **2.2.3.3.1. División y selección de las unidades de proceso.**

Las instalaciones en estudio se dividen en "unidades de proceso" que pueden consistir en equipos individuales de proceso (columnas, reactores, tanques, etc.) o líneas de proceso que presenten condiciones operatorias semejantes y con implicación de las mismas sustancias.

La designación de la unidad de proceso se debe registrar en el espacio correspondiente en la forma de registro del IF&E. La unidad de manufactura también se debe registrar en esta forma (se hablará más a fondo de esta forma de registro posteriormente). Una unidad de manufactura es la planta de producción entera, incluyendo procesos químicos, procesos mecánicos, almacenes, líneas de empaque, etc.

Es muy claro que la mayoría de las unidades de manufactura contienen muchas unidades de proceso. Para calcular el IF&E, sólo se evaluarán las unidades que podrían tener un impacto desde el punto de vista de prevención de pérdidas. A estas unidades se les conoce como unidades pertinentes de proceso.

Algunos factores importantes en la selección de la unidad de proceso pertinente incluyen:

- a. Potencial de energía química (factor material).
- b. Cantidad de material peligroso en la unidad de proceso.
- c. Densidad de capital (dólares por pie cuadrado).
- d. Presiones y temperaturas de proceso.
- e. Historial de problemas que hayan generado incendios o explosiones.
- f. Unidades de operación críticas en la planta.

Generalmente, al incrementarse la magnitud de cualquiera de estos factores, mayor será la probabilidad de que las necesidades de la unidad de proceso sean evaluadas.



La destrucción de un equipo escaso, crítico o único en su género, dentro o cerca de un área de proceso podría generar muchos días de paro. Incluso con un daño mínimo por incendio o explosión, podría generar una gran pérdida económica debido al paro de producción. La pérdida de estos equipos críticos es una razón válida para seleccionar una unidad de proceso pertinente.

No existen reglas rígidas en la selección de la unidad de proceso a evaluar. La consulta a centros tecnológicos, ingenieros de operación con experiencia o especialistas en seguridad de procesos o prevención de pérdidas, puede ayudar a la determinación de los equipos con mayor potencial de fuego y explosión.

Cabe tener en cuenta las siguientes consideraciones importantes:

- A. El procedimiento del Índice de Fuego y Explosión asume que una unidad de proceso maneja al menos 5'000lb (2,268kg) de un material inflamable, combustible o reactivo. Si menos material está involucrado, generalmente el riesgo resultará sobreestimado. Sin embargo, los cálculos del IF&E pueden proveer resultados significativos para plantas pilotos si es que éstas manejan al menos 1'000lb (454kg) de material inflamable o combustible.
- B. Se requiere de una cuidadosa consideración para los casos en que los equipos se encuentren arreglados en series y no estén efectivamente aislados uno del otro. Un ejemplo podría ser un tren de reacción sin una bomba intermedia. En tales situaciones, el tipo de proceso determina si uno o varios recipientes deberán de ser considerados como unidad de proceso.
- C. Es también importante el considerar cuidadosamente el estado o punto en el tiempo de operación. Etapas normales como: arranque, operación en estado continuo, paro, llenado, vaciado, adición de catalizador, etc., crean condiciones únicas, las cuales por su naturaleza tienen un gran impacto en el IF&E. Generalmente, el buen juicio permitirá la selección del punto en el tiempo de operación para desempeñar el cálculo del índice de fuego y explosión. Ocasionalmente, más de un punto en el tiempo tendrá que ser considerado para determinar el riesgo.

#### **2.2.3.3.2. Determinación del factor material (FM).**

El factor material (FM) es una medida de las propiedades intrínsecas de potencial de liberación de



energía, en un incendio o explosión, producida por combustión o reacción química de una sustancia o una mezcla. El FM es un valor que oscila entre 1 y 40 y que se obtiene a partir de los números  $N_F$  y  $N_R$ , que son clasificaciones de la NFPA o señales que expresan inflamabilidad y reactividad (o inestabilidad) respectivamente.

Generalmente, los números  $N_F$  y  $N_R$  funcionan para temperaturas ambiente y se sabe que los peligros de reactividad e inestabilidad aumentan marcadamente con la temperatura. El riesgo de incendio de un combustible líquido a temperaturas superiores a su punto de destello es equivalente a aquél de un líquido inflamable a temperatura ambiente. Si la temperatura del material en el que se basa el FM se encuentra por arriba de los 140°F o 60°C, ciertos ajustes serán requeridos.

Existe una lista de factores materiales de más de 300 compuestos y materiales, y estos valores serán usados en la mayoría de los casos. Si dicha lista no tiene el material, es posible encontrar los  $N_F$  y  $N_R$  en las normas NFPA 325M o en la NFPA 49, con los cuales se puede determinar el FM. Si el material es un polvo combustible, se deberá usar el número de clasificación de finos (número St) en lugar del  $N_F$ .

#### **2.2.3.3.3. Determinación de factores de riesgo.**

Para tener en cuenta las condiciones de proceso que modifiquen el riesgo de las instalaciones en estudio se consideran dos tipos de factores de riesgo:

- Factor de riesgos generales de proceso (General Process Hazards) (F1).
- Factor de riesgos especiales de proceso (Special Process Hazards) (F2).

Ambos suponen unas penalidades a aplicar al FM, que tienen en cuenta los siguientes aspectos:

Factor de riesgos generales de proceso (F1):

- A. Reacciones químicas exotérmicas: ligeramente exotérmicas, moderadamente exotérmicas, exotérmicas con control crítico, exotérmicas particularmente sensibles.
- B. Procesos endotérmicos: calcinación, electrólisis, pirólisis.
- C. Manejo y transferencia de material: carga o descarga de sustancias altamente inflamables, mezcla, introducción de aire, atmósferas no inertes, etc.





- D. Unidades de proceso en zonas cerradas: filtros, manipulación en locales cerrados, ventilaciones mecánicas.
- E. Condiciones de acceso a las áreas de proceso: el equipo de emergencia debe tener varios accesos a la unidad de proceso disponibles en una emergencia. El requisito mínimo es tener al menos dos posibilidades diferentes de acceso. Este punto se debe considerar seriamente cuando se trate de unidades de proceso mayores localizadas en áreas cerradas.
- F. Drenaje y control de derrames: cubetas, distancias de tanques a instalaciones y otros.

Factor de riesgos especiales de proceso (F2):

- A. Toxicidad de las sustancias, considerada como complicación adicional en caso de intervención en emergencias, no desde el punto de vista de seguridad e higiene ni medioambiental. Para mezclas, use el componente con el mayor  $N_H$ . Los valores de  $N_H$  se encuentran reportados en tablas.
- B. Operación en presiones inferiores a la atmosférica. Esta sección se aplica a las condiciones de proceso en las que la entrada de aire a un sistema puede representar un peligro. El peligro puede resultar del contacto del aire con materiales sensibles a la humedad o al oxígeno, o de la formación de mezclas o ambientes, ya sea inflamables o explosivos. Esta penalización se aplicará solo si la presión absoluta del recipiente es menor que 500 mm Hg. Si la penalización es aplicada, no se debe duplicar o repetir la penalización en la sección C "Operación dentro o cerca del rango de inflamabilidad", o en la sección E "Presión de alivio".
- C. Operación dentro o cerca del rango de inflamabilidad. Existen ciertas condiciones de operación que pueden facilitar que el aire sea introducido en un sistema. La entrada de aire puede ocasionar la formación de una mezcla inflamable y crear un peligro.
- D. Presencia de polvos explosivos. La razón máxima de elevación de presión y la presión máxima generada por un fino, están muy influenciadas por el tamaño de partícula. En general, mientras más fino sea el polvo, mayor será el peligro, debido a la rápida razón de elevación de presión y a las presiones máximas generadas.
- E. Presión de alivio. Cuando se opera a presiones superiores a las atmosféricas, se aplica una penalización debido a las altas razones de descarga en el caso de fuga, originadas por las altas presiones. El punto más delicado es la posibilidad de falla de algún componente de la unidad de proceso causando la liberación de materiales inflamables.



- F. Bajas temperaturas. Esta sección considera la posible fragilidad del acero al carbón u otros metales al estar expuestos a temperaturas inferiores a su temperatura de transición de dúctil a frágil.
- G. Cantidad de material inestable o inflamable. Esta sección considera la exposición adicional a áreas de la unidad de proceso en las que las cantidades de material inflamable e inestable se incrementan.
- H. Corrosión y erosión. Aunque un buen diseño toma en cuenta la corrosión y la erosión, algunos problemas de este tipo pueden seguir ocurriendo en ciertos procesos. La razón de corrosión se considera como la suma de las razones interna y externa de corrosión.
- I. Fugas en juntas y empaques. Empaques y sellos de juntas o flechas, frecuentemente son fuente de fugas de materiales inflamables o combustibles, particularmente cuando existe un ciclo térmico o de presión
- J. Uso de equipo a fuego directo. La presencia de equipo a fuego directo en un proceso suma una probabilidad adicional de ignición cuando se fugan líquidos, vapores o finos combustibles.
- K. Sistemas de intercambio de calor con aceite caliente. Como la mayoría de los aceites calientes (para intercambio de calor) son combustibles y se usan frecuentemente por arriba de su punto de destello o punto de ebullición representan un riesgo adicional en cualquier unidad de proceso que los emplee.
- L. Equipos en rotación. Esta sección reconoce la exposición al peligro de una unidad de proceso cuando se incorporan grandes piezas de equipo en rotación. Aunque no se han desarrollado fórmulas para evaluar todos los tipos y tamaños de equipos en rotación, existe evidencia estadística que indica que las bombas y compresores más allá de cierto tamaño contribuyen a aumentar la probabilidad de ocurrencia de un incidente.

La contabilización de los factores de riesgo en el proceso se realiza asignando una penalización en cada uno de los apartados mencionados anteriormente. Esto permite definir los factores de riesgos generales (F1) y de riesgos especiales (F2) del proceso como sigue:

$$F1 = 1 + \sum (\text{penalización por cada uno de los riesgos generales})$$

$$F2 = 1 + \sum (\text{penalización por cada uno de los riesgos especiales})$$



#### 2.2.3.3.4. Evaluación del factor de riesgo (F3) y el factor de daño (FD).

Una vez evaluados F1 y F2, se calcula el factor de riesgo (F3) como el producto de F1 y F2:

$$F3 = F1 \times F2$$

El factor de daño (FD) se obtendrá de la figura 3.3 a partir de los valores de FM y F3.

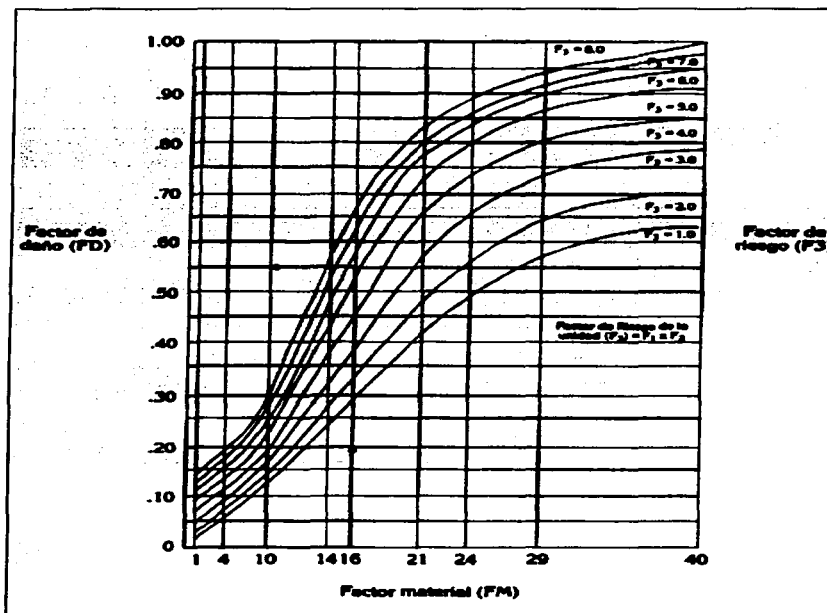


Fig. 2.10 Factor de daño (FD) de la unidad de proceso en función de F3 y FM. (11)

#### 2.2.3.3.5. Evaluación del Índice de Fuego y Explosión (IF&E).

El IF&E se emplea para poder estimar el daño que resultaría de un incidente de proceso en alguna planta. Los diferentes factores que contribuyen, tales como: el tipo de reacción, temperaturas de proceso, presiones, cantidades de combustible, etc., indican la probabilidad y el potencial de magnitud

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



de una fuga de combustible o de la liberación no controlada de energía causadas por fallas de control, fallas en el equipo por vibración u otras causas de fatiga por estrés.

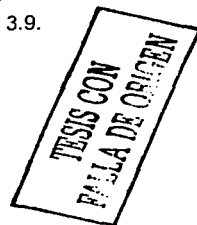
El Índice de Fuego y Explosión es el producto del factor de riesgo de la unidad de proceso (F3) y el factor material (FM) que en forma matemática se expresa como sigue:

$$IF\&E = F3 \times FM$$

De acuerdo con el valor obtenido de IF&E, este caerá en un rango de valores ya determinado que nos indicará el nivel de riesgo de la unidad de proceso. Dicho rango de valores se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 2.15 Categorías de riesgo en función del IF&E. <sup>(3)</sup>

<b>Rango del IF&amp;E</b>	<b>Grado de riesgo</b>
1-60	Ligero
61-96	Moderado
97-127	Intermedio
128-158	Pesado
≥159	Severo



Según el valor calculado para este índice, se determina el radio (RE) o área de exposición (AE) que representaría o daría una idea de la parte afectada por un incendio o una explosión generada en la unidad de proceso estudiada.

Para calcular el radio de exposición, se utiliza la figura 3.4 o bien, se puede utilizar la siguiente ecuación para determinar el radio de exposición:

$$RE = 0.256 \times IF\&E$$

Con el RE calculado, ahora se puede evaluar el área de exposición (AE) que para efectos del método, es un círculo ideal dentro del cual estarían comprendidos los equipos e instalaciones que pueden verse afectados por un incendio o por una explosión en la unidad de proceso que se evalúa. Evidentemente se trata de una fuerte simplificación, puesto que rara vez se producen accidentes con unos efectos totalmente simétricos, pero proporciona una medida aproximada del radio de alcance del accidente. El AE se calcula simplemente con la fórmula del área de un círculo donde el radio será RE.

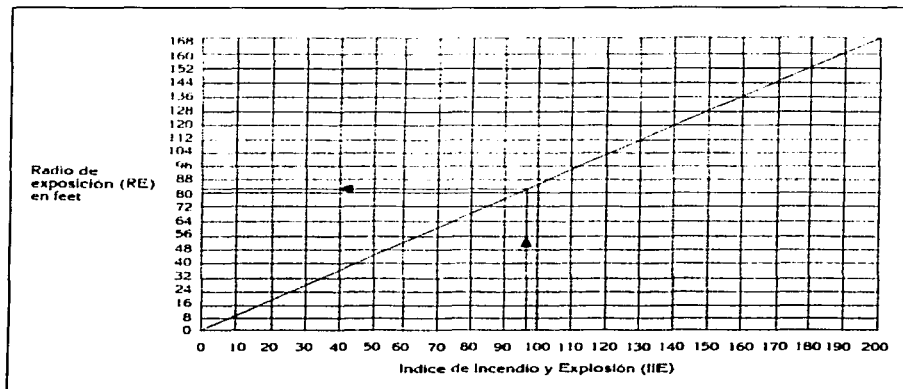


Fig. 2.11 Radio de exposición (RE) en función del IF&amp;E. (11)

#### 2.2.3.3.6. Evaluación del valor de sustitución del equipo (VS).

El valor de sustitución (VS) se puede calcular de acuerdo con:

$$VS = \text{Valor de la instalación} \times 0.82 \times FE$$

donde, FE es el factor de escalado, relación del área afectada o de exposición (AE) con respecto del área total de la instalación. Este factor se calcula de la siguiente manera:

$$FE = \frac{AE}{AT}$$

El factor 0.82 se explica teniendo en cuenta que ciertas obras pueden ser aprovechadas (cimentaciones, accesos, etc.) en caso de rehacer las instalaciones.

#### 2.2.3.3.7. Evaluación del "Daño Máximo Probable a la Propiedad" base (MPPD).

Con el factor de daño (FD) y el valor de sustitución (VS) se obtiene el daño máximo probable a la propiedad base (MPPD). Para ellos se emplea la siguiente ecuación:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



$$\text{MPPD base} = \text{FD} \times \text{VS}$$

### 2.2.3.3.8. Evaluación y aplicación de los factores de bonificación.

Hasta aquí se han considerado todos los factores (material y riesgos) que de algún modo incrementan el riesgo global de la planta y a través de ellos se ha determinado el daño máximo probable a la propiedad base (MPPD).

Una interpretación de este valor podría ser el considerar que sería el daño producido cuando fallasen absolutamente todas las medidas de prevención y protección existentes en una instalación industrial. El hecho es que estas medidas de prevención y protección existen y, por lo tanto, el estudio de la realidad debe considerarlas.

Por ello, una vez determinados todos los valores de riesgo, se introducen los factores de bonificación que tienen tres aspectos principales:

- ↓ Factores de bonificación por control de proceso (C1).
- ↓ Factores de bonificación por aislamiento de material (C2).
- ↓ Factores de bonificación por protección contra incendio (C3).

Brevemente, estos factores consideran:

Factores de bonificación por control de proceso (C1):

- a. Energía de emergencia.
- b. Refrigeración o enfriamiento.
- c. Control de explosiones o sistemas de alivio.
- d. Parada de emergencia.
- e. Control computarizado.
- f. Disponibilidad de gas inerte.
- g. Procedimientos y/o guías de operación.
- h. Programas de revisión de procesos y operaciones.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



- i. Otros análisis de riesgos.

Factores de bonificación por aislamiento de material (C2):

- a. Válvulas de control remoto.
- b. Depósito trasvase para emergencia o venteos conducidos.
- c. Drenajes.
- d. Sistema de bloqueo que impide el flujo.

Factores de bonificación por protección contra incendio (C3).

- a. Detectores de fugas.
- b. Acero estructural.
- c. Tanques.
- d. Suministro de agua contra incendio.
- e. Sistemas especiales (halón, CO<sub>2</sub>, detectores de humos y de llama).
- f. Sistema de rociadores.
- g. Cortinas de agua.
- h. Espuma contra incendios.
- i. Extintores manuales – monitores.
- j. Protección de cables eléctricos y de instrumentación.

Cada uno de estos factores se calcula a través del producto de las bonificaciones aplicables a cada concepto (Ci = II bonificación). Los factores C1, C2 y C3 siempre poseen valores menores que la unidad y variables desde 0.74 a 0.99.

El factor de bonificación (FB) se obtiene como producto de los valores anteriormente citados.

$$FB = C1 \times C2 \times C3$$

Una vez obtenido el FB, se puede determinar el factor de bonificación efectivo FBE con el uso de la figura 3.5.

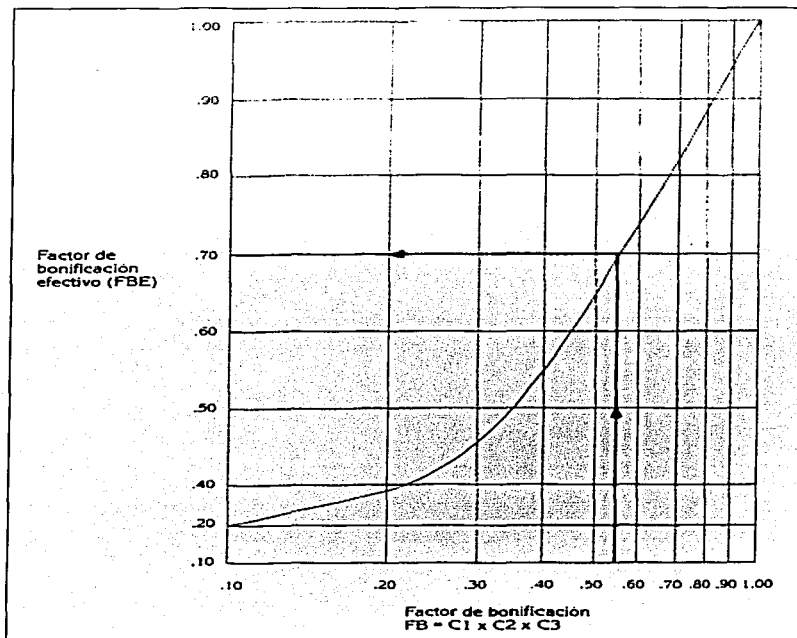


Fig. 2.12 Factor de bonificación efectivo (FBE) a partir del factor de bonificación (FB). (11)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.2.3.3.9. Evaluación del “Daño Máximo Probable a la Propiedad” efectivo (MPPD).

Ya que se tiene el FBE, se puede calcular el MPPD efectivo con el uso de la siguiente ecuación:

$$\text{MPPD efectivo} = \text{MPPD base} \times \text{FBE}$$

### 2.2.3.3.10. Determinación de los “Máximos Días Probables de Indisponibilidad” (MPDO) y los costos por “Interrupción de Negocios” (BI).

Una vez calculado el MPPD efectivo, se puede recurrir a la figura 3.6 para determinar los máximos días





probables de indisponibilidad (MPDO), o número de días de interrupción de la actividad industrial que supondría un accidente en la instalación en una situación real (considerando los sistemas de seguridad de la misma).

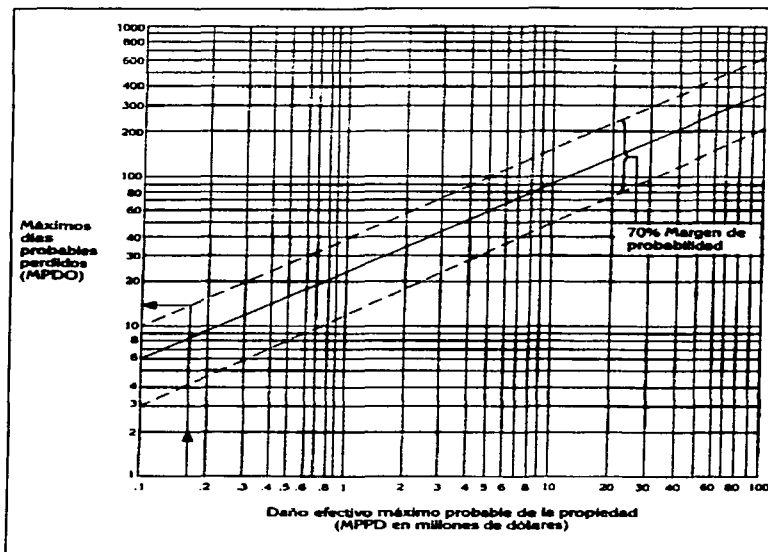


Fig. 2.13 Máximos días probables de indisponibilidad (MPDO) en función del MPPD efectivo. <sup>(11)</sup>

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN

Por último con este valor y el valor de la producción mensual (VPM, expresado en unidades monetarias) se calcula el costo asociado a la interrupción de la actividad industrial, BI, durante estos días de acuerdo con:

$$BI = \frac{MPDO}{30} \times VPM \times 0.7$$

#### 2.2.3.4. Formato de registro del índice DOW.

En la tabla siguiente se muestra el formato de registro que se utiliza para el índice DOW.



Tabla 2.16 Formato de registro para el IF&amp;E.

ÍNDICE DE FUEGO Y EXPLOSIÓN			
ÁREA/PAIS	DIVISION	LOCALIDAD	FECHA
SITIO		UNIDAD DE MANUFACTURA	UNIDAD DE PROCESO
MATERIALES EN LA UNIDAD DE PROCESO			
ESTADO DE OPERACIÓN		MATERIAL BÁSICO PARA EL FACTOR MATERIAL	
_ DISEÑO    _ ARRANQUE    _ OPERACIÓN    _ PARO			
<b>FACTOR MATERIAL</b>			
<b>1. Riesgos Generales de Proceso</b>			
Factor Base		Rango del factor de penalización	Factor de penalización empleado
A. Reacciones químicas exotérmicas		1.00	1.00
B. Procesos endotérmicos		0.30 a 1.25	
C. Manejo y transferencia de material		0.20 a 0.40	
D. Unidades de proceso en zonas cerradas		0.25 a 1.05	
E. Condiciones de acceso a las áreas de proceso		0.25 a 0.90	
F. Drenaje y control de derrames _____ gal		0.20 a 0.35	
F. Drenaje y control de derrames _____ gal		0.25 a 0.50	
<b>Factor de Riesgos Generales de Proceso (F1)</b>			
<b>2. Riesgos Especiales de Proceso</b>			
Factor Base		Rango del factor de penalización	Factor de penalización empleado
A. Toxicidad del material		1.00	1.00
B. Presiones sub-atmosféricas (<500 mmHg)		0.20 a 0.80	
C. Operación dentro o cerca del rango de inflamabilidad _____ Inerte _____ No Inerte		0.50	
a. Tanques de almacenamiento de líquidos inflamables		0.50	
b. Falta del proceso o Falta en el purgado		0.30	
c. Siempre en Rango de Inflamabilidad		0.80	
D. Presencia de polvos explosivos		0.25 a 2.00	
E. Presión de alivio _____ psig			
Presión de Alivio _____ psig			
F. Bajas temperaturas		0.20 a 0.30	
G. Cantidad de material inestable o inflamable _____ lb			
ΔH <sub>c</sub> = _____ BTU/lb			
1. Líquidos y/o gases en proceso			
2. Líquidos y/o gases en almacenamiento			
3. Combustibles sólidos en almacenamiento, finos en proceso			
H. Corrosión y erosión		0.10 a 0.75	
I. Fugas en juntas y empaques		0.10 a 1.50	
J. Uso de equipo a fuego directo			
K. Sistemas de intercambio de calor con aceite caliente		0.15 a 1.15	
L. Equipos en rotación		0.50	
<b>Factor de Riesgos Especiales de Proceso (F2)</b>			
<b>Factor de Riesgos de la Unidad de Proceso (F1 x F2 = F3)</b>			
<b>Índice de Fuego y Explosión (F3 x FM = IF&amp;E)</b>			

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



Tabla 2.16 Formato de registro para el IF&amp;E (continuación).

## FACTORES DE BONIFICACIÓN POR CONTROL DE PÉRDIDAS

## 1. Factor de bonificación por control de proceso (C1)

Característica	Rango del Factor de Bonificación	Factor de Bonificación Usado
a. Energía de Emergencia	0.98	
b. Refrigeración o enfriamiento	0.97 a 0.99	
c. Sistemas de alivio	0.84 a 0.98	
d. Parada de emergencia	0.96 a 0.99	
e. Control computarizado	0.93 a 0.99	
f. Gas inerte	0.94 a 0.96	
g. Procedimientos y/o guías de operación	0.91 a 0.99	
h. Programas de revisión de procesos y operaciones	0.91 a 0.98	
i. Otros análisis de riesgos.	0.91 a 0.98	
Valor de C1		

## 2. Factor de bonificación por el aislamiento de material (C2)

Característica	Rango del Factor de Bonificación	Factor de Bonificación Usado
a. Válvulas de control remoto	0.96 a 0.98	
b. Depósito trasvase para emergencia o venteos conducidos	0.96 a 0.98	
c. Drenajes	0.91 a 0.97	
d. Sistema de bloqueo que impide el flujo	0.98	
Valor de C2		

## 3. Factor de bonificación por protección contra incendio (C3)

Característica	Rango del Factor de Bonificación	Factor de Bonificación Usado
a. Detectores de fugas	0.94 a 0.98	
b. Acero estructural	0.95 a 0.98	
c. Tanques	0.84 a 0.91	
d. Suministro de agua contra incendio	0.94 a 0.97	
e. Sistemas especiales	0.91	
f. Sistema de rociadores	0.74 a 0.97	
g. Cortinas de agua	0.97 a 0.98	
h. Espuma	0.92 a 0.97	
i. Extinguidores de mano	0.93 a 0.98	
j. Protección de cables eléctricos y de instrumentación	0.94 a 0.98	
Valor de C3		

TESIS CON  
 PÁGINA DE ORIGEN

Factor de bonificación por control de pérdidas C1 x C2 x C3 =

## SUMARIO DEL ANÁLISIS DE RIESGOS DE LA UNIDAD DE PROCESO

1. Índice de Fuego y Explosión (IF&E)		
2. Radio de Exposición (RE)	ft o m	
3. Área de Exposición (AE)	ft <sup>2</sup> o m <sup>2</sup>	
4. Valor del Área de Exposición (VS)		SMM
5. Factor de Daño (FD)		
6. Daño Base Máximo Probable a la Propiedad - [4 x 5] (MPPD)base		SMM
7. Factor de Bonificación por Control de Pérdidas (FB)		
8. Daño Real Máximo Probable a la Propiedad - [6 x 7] (MPPD)efectivo		SMM
9. Días Máximos Probables de Páro de Producción (MPDO)	Días	
10. Interrupción de Negocios (BI)		SMM

En el apéndice B se encuentran todos los factores de riesgo y bonificación junto con sus valores numéricos para cada uno de los aspectos considerados en esos rubros.



## **2.2.4. Análisis de árbol de fallas (FTA).** (2 3 6 12 15 17, 18, 27, 28)

### **2.2.4.1. Introducción al análisis de árbol de fallas.**

El análisis de árbol de fallas (FTA, por sus siglas en inglés *Fault Tree Analysis*) fue iniciado en la década de los sesenta, por H. A. Watson, de los laboratorios Bell Telephone, en un proyecto del sistema de control de lanzamiento de cohetes. A partir de 1970, su utilización se extendió a otros campos de la industria y, en especial, fue muy empleada en la industria nuclear.

Un árbol de fallas es la representación o desarrollo gráfico deductivo desde el evento principal o suceso final no deseado, denominado "Top Event" o evento tope, y pasando por todas sus combinaciones de eventos o sucesos intermedios, hasta llegar a sus causas o eventos básicos, que representan el límite de resolución del árbol. Esta técnica permite asimismo la cuantificación de la probabilidad o frecuencia con que puede producirse un suceso, es decir, permite el cálculo de la no fiabilidad o no disponibilidad del sistema.

La ventaja principal de esta técnica es su representación gráfica, que facilita la comprensión de la causalidad. El análisis de árbol de fallas es de gran ayuda para:

- Conducir al analista en forma deductiva a poner de manifiesto las posibles fallas del sistema.
- Destacar aspectos del sistema que son importantes desde el punto de vista de las fallas.
- Proporcionar una ayuda gráfica que haga visibles los cambios de diseño.
- Facilitar a los analistas concentrarse en una falla determinada de interés de forma rápida y ordenada.
- Incrementar el conocimiento del analista sobre el sistema en estudio.

El análisis de árbol de fallas es un proceso deductivo que permite determinar cómo puede tener lugar un suceso particular, es decir, partiendo del evento culminante o no deseado y siguiendo el sistema en retroceso, se buscan todas las causas posibles del suceso peligroso.



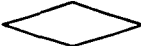


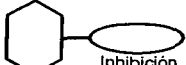

### **2.2.4.2. Conceptos previos.**

Antes de comenzar con el método del árbol de fallas, es importante conocer primero la simbología que



se utiliza para su construcción así como su significado (ver tabla 3.11).

Tabla 2.17 Simbología para la elaboración de un árbol de fallas. <sup>(28)</sup>

Símbolo	Significado
	Sucesos intermedios: Resultan de la interacción de otro suceso, que a su vez se desarrollan mediante puertas lógicas. El situado en la parte superior del árbol es el denominado "Top Event".
	Sucesos básicos: Constituyen la base de la raíz del árbol. No necesitan desarrollo posterior en otros sucesos.
	Sucesos no desarrollados: No son sucesos básicos y podrían desarrollarse más, pero el desarrollo no se considera necesario, o no se dispone de la suficiente información.
	Puertas "O": Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia de cualquiera de los sucesos de entrada para producir el suceso de salida. Corresponde al operador booleano $\oplus$ .
	Puertas "Y": Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia simultánea de todos los sucesos de entrada para producir el suceso de salida. Corresponde al operador booleano $\otimes$ .
	Puertas inhibición: Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia del suceso de entrada y la satisfacción de una condición de inhibición.
	Suceso externo: Se utiliza para indicar una condición o un suceso que existe como parte del escenario en que se desarrolla el árbol de fallas.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

#### 2.2.4.3. Metodología del FTA.

La metodología que se sigue para la construcción de un árbol de fallas y su análisis consiste de los siguientes pasos:

1. Definición del problema o evento culminante.
2. Construcción del árbol de fallas.
3. Análisis del árbol de fallas.

A continuación se describen cada uno de los pasos de la metodología del árbol de fallas.



#### **2.2.4.3.1. Definición del problema.**

El primer paso para la construcción de un árbol de fallas es un estudio previo del sistema o proceso que se quiere analizar con el fin de determinar los incidentes susceptibles de ser analizados y evaluados. Dichos incidentes ya fueron detectados previamente con técnicas de identificación de riesgos.

Para la elección del evento no deseado o evento tope, se requiere que este sea muy específico y definido ya que eventos no deseados que sean muy amplios y pobremente definidos normalmente conducen a análisis deficientes. Básicamente, un evento tope debe responder a tres preguntas: qué, cuándo y dónde.

Una vez determinado el evento tope que se quiere desarrollar, deben establecerse las condiciones que envuelven al evento no deseado y que son: límites físicos de la instalación, nivel de detalle de la resolución, condiciones iniciales de funcionamiento y otros supuestos.

#### **2.2.4.3.2. Construcción del árbol de fallas.**

Ya que se ha definido el evento tope, es necesario identificar, de manera secuencial, las fallas de los elementos. Para ello, se procede a determinar las causas inmediatas del mismo, las cuales se pueden definir como las causas necesarias y suficientes para que aparezca. Estas causas serán consideradas, a continuación, de forma independiente como sucesos "sub-top" y se determinan las causas necesarias y suficientes para que ocurra cada una de ellas; y así sucesivamente hasta alcanzar el nivel de detalle elegido. En el siguiente apartado se tratará más a fondo las causas comunes de fallas

Se puede ver claramente dos tipos de sucesos: los básicos y los no desarrollados. Los eventos básicos son aquellos que no requieren un desarrollo posterior, ya que por sí solos dan una clara explicación de una falla particular del sistema. Los eventos no desarrollados, como su nombre lo indica, son aquellos que no ocurrieron porque el evento tope está fuera de los límites definidos para el análisis del sistema, o bien, porque no se cuenta con información adicional para tal fin, de modo que su desarrollo no altera significativamente el análisis.

La manera en que se combinan los eventos (tope, intermedios y básicos) se hace por medio del uso de



puertas lógicas (and, or, entre otras). Con ayuda de estas puertas se buscan relaciones lógicas de los eventos que conduzcan al evento no deseado.

La complicación del proceso de construcción del árbol de fallas radica en la diversidad de elementos que intervienen en el proceso y en la falta de capacidad de los conocimientos actuales para reflejar todas las particularidades de cada elemento al mismo tiempo que los unifica en un proceso común que debe desembocar en el árbol de fallas.

La forma del árbol de fallas presenta la estructura que muestra la figura 3.7.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

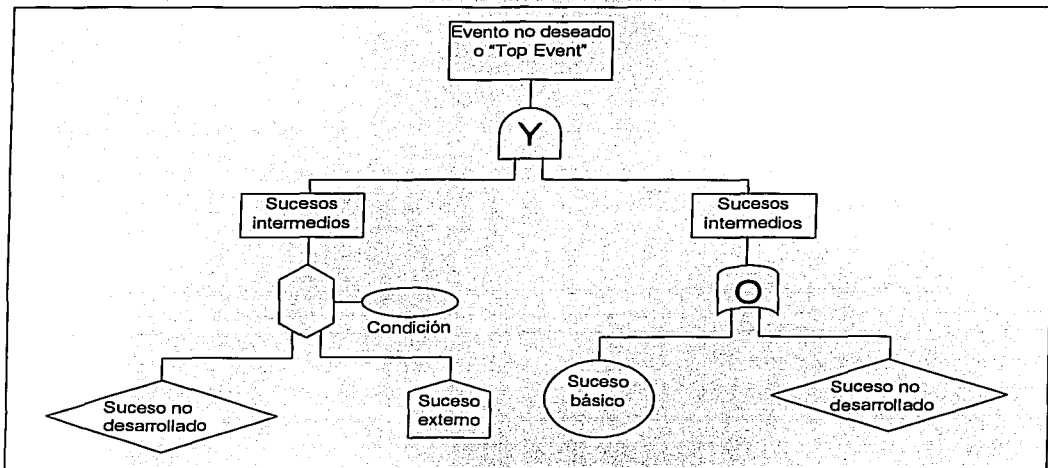


Fig. 2.14 Estructura de un árbol de fallas.

Analizando los elementos que intervienen en el proceso de construcción, podemos distinguir los siguientes:

- Un modelo que describe de la manera más adecuada posible a un sistema técnico, cuantos más detalles, características y especificaciones relevantes para la construcción del árbol contenga el modelo más preciso podrá ser el árbol construido, pero si el número de ellos es abrumador, harán imposible la construcción. Lo que significa que es necesario elegir "que



características" del sistema reflejará el modelo, tanto en cantidad como en calidad de forma previa al comienzo de la tarea de obtener del árbol de fallas.

- b) Uno o varios "expertos" encargados de la construcción del árbol de fallas con cierto grado de experiencia en los siguientes aspectos:
- ⇒ Conocimiento físico del sistema (experiencia del diseño), conocimiento operacional del sistema (experiencia de operación).
  - ⇒ Comportamiento del sistema fuera de los límites normales de operación.
  - ⇒ Formas de fallas del sistema (normales y fuera de límites).
  - ⇒ Comportamiento de las secuencias o cadenas de fallas, tolerancias y márgenes (operativos y de tiempos).
  - ⇒ Comportamiento de otros sistemas y equipos parecidos.
  - ⇒ Proceso de construcción de un árbol de fallas.
  - ⇒ Criterios válidos y contrastados sobre la relevancia de los eventos y/o fallas en la explotación del sistema.
  - ⇒ Hábito de desenvolverse en el entorno de las fallas.
- c) Un procedimiento que garantice el seguimiento de las reglas básicas de construcción del árbol de fallas mientras estas son aplicadas al modelo del sistema.

Finaliza este proceso con la comprobación de que el árbol generado es completo (se han desarrollado todas las puertas lógicas) y conexo (todas las puertas están conectadas de alguna forma al árbol resultante). Todos estos elementos componen un proceso de construcción que habrá de repetirse tantas veces como sea necesario, por ejemplo, si se está en la etapa de diseño de un sistema habrá que estudiar el árbol de fallas para un mismo evento tope en todos los modelos de los diferentes diseños alternativos.

Para que el proceso anterior conduzca a un árbol de fallas que represente correctamente la lógica que conduce al suceso no deseado, es necesario observar una serie de reglas básicas:

Regla I. Escribir las descripciones de los sucesos como fallas, precisando de manera escueta y clara ¿Qué fallas son? y ¿Cuándo ocurren?. Abrevie las palabras pero no las ideas.

Regla II. Realícese para cada falla la pregunta ¿Es esta falla una avería de componente?. Si la respuesta es afirmativa clasifique la falla como avería de componente, si la respuesta es no clasifíquela





como falla de sistema.

Regla III. Si el funcionamiento normal de un componente ayuda a propagar una falla, entonces dicho componente funciona con normalidad (No ha fallado).

Regla IV. Todas las entradas de una puerta deben ser definidas completamente antes de emprender el análisis individual de cada una de ellas.

Regla V. Las entradas de una puerta no deben proceder directamente de otra puerta, ya que toda puerta debe conducir a un suceso que deberá estar perfectamente clasificado como falla según la regla I.

Para la construcción del árbol de fallas existe una gran variedad de técnicas que no describiremos aquí, pero que sí mencionaremos y que son: las tablas de decisión binarias, el uso de dígrafos y las redes semánticas.

#### **2.2.4.3.2.1. Causas comunes de fallas.**

Una causa común de falla es todo suceso que provoque una pérdida de múltiples elementos o protecciones de un sistema que no pueda ser explicada por la simple coincidencia de fallas aleatorias independientes. Existen múltiples motivos para que aparezcan fallas debido a causas comunes, entre ellos cabe destacar:

- Estructuras dependientes no identificadas
- Aparición aleatoria de condiciones medioambientales anormales
- Deficiencias en el diseño o la construcción.
- Operación inapropiada del sistema.

En los gráficos siguientes se puede encontrar una clasificación de las causas comunes de fallas, que se pueden usar con lista de chequeo a la hora de buscarlas en el sistema. Están clasificadas en dos grandes tipos:

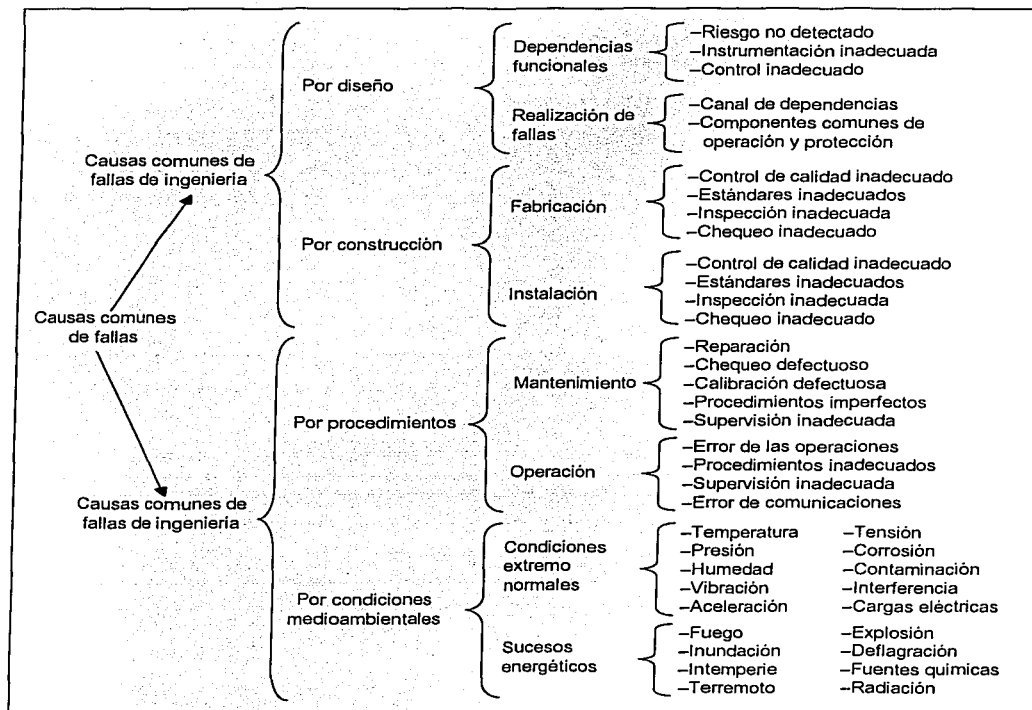
Originadas en la ingeniería del sistema, ya sea en la etapa de diseño o en la de construcción.

- En la etapa de diseño, las fallas pueden ser de tipo dependencias funcionales o realización de fallas.
- En la etapa de construcción, las fallas pueden ser por fabricación o instalación.



Originadas en la operación del sistema, ya sean provenientes de los procedimientos involucrados en la operación o de las condiciones medioambientales.

- Por procedimientos, las fallas pueden ser por mantenimiento o por operación.
- Por condiciones medioambientales, las fallas pueden ser por condiciones extremo normales o por sucesos naturales.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.15 Causas comunes de fallas. (12)

La dependencia entre sucesos diferentes puede tener razones funcionales (normalmente de naturaleza determinista) o sucesos aleatorios. Las principales clases de estructuras dependientes son:

- No disponibilidad funcional con un mismo sistema. Aquel caso en el que la falla de un elemento



- impide a otros elementos, que no han fallado, realizar su trabajo.
- No disponibilidad funcional entre diferentes sistemas. Aquel caso en el que varios sistemas diferentes, localizados en diferentes lugares, fallan debido a que comparten algún subsistema. Ejemplo: la misma fuente de energía eléctrica.
  - Cascada de fallas. La no disponibilidad de un componente (o sistema) puede provocar la no disponibilidad de otros componentes (o sistemas) relacionados con él, por ejemplo: la falla de una protección eléctrica puede provocar la falla de otros elementos por exceso de tensión.
  - Restricciones de procedimiento. Pueden aparecer no disponibilidades o fallas debidas a restricciones en los procesos causadas por procedimientos administrativos o por la realización de mantenimientos.
  - Causas externas. Condiciones medioambientales externas pueden provocar la falla de múltiples elementos o sistemas (tormenta, accidentes, etc.).
  - Estructuras dependientes unidas a factores humanos. El comportamiento humano puede potenciar notablemente dependencias funcionales o de fallas, especialmente en caso de tensión o de crisis operacional.

Existen otras clases de estructuras dependientes, pero las que se listaron se consideran las más importantes.

#### **2.2.4.3.3. Análisis del árbol de fallas.**

El análisis de árbol de fallas es un método deductivo que permite obtener información cualitativa y cuantitativa de un sistema bajo estudio. Este análisis se realiza sobre el denominado árbol de fallas, entendiendo por ello, la representación gráfica de un modelo lógico con combinaciones de eventos que conducen a la aparición de un suceso predefinido y no deseado de un sistema. La información cualitativa más importante está constituida por la identificación de aquellos grupos mínimos de fallas que conducen a la aparición de la falla no deseada. La información cuantitativa más relevante es la indisponibilidad y la no-fiabilidad del sistema. Este tipo de análisis se puede aplicar tanto en la etapa de diseño como en la de explotación de un sistema técnico, pudiendo proporcionar en ambos casos mejoras substanciales en los procesos involucrados.

El análisis cualitativo posibilita conocer los conjuntos mínimos de corte (MCS por sus siglas en inglés,



*Minimal Cut Sets*). Los MCS se definen como los diferentes conjuntos de fallas críticas que al producirse provocan la anomalía global del sistema. El conocimiento de estos MCS permite detectar los puntos débiles de la instalación analizada con la metodología del árbol de fallas. Cada uno de los MCS representa una manera distinta de llegar al suceso no deseado o evento tope.

El análisis cuantitativo permite calcular básicamente la frecuencia de acontecimiento de un accidente y la indisponibilidad del sistema. Para poder efectuar el análisis cuantitativo es preciso conocer el tiempo de funcionamiento de la instalación y las tasas de fallas (o en su defecto, criterios para la asignación de probabilidades de falla), el tiempo de reparación, la indisponibilidad y el tiempo de comprobación para cada componente.

#### **2.2.4.3.3.1. Análisis cualitativo del árbol de fallas.**

El resultado más frecuente de la etapa de construcción del árbol de fallas es el árbol mismo, o sea, la representación gráfica de las relaciones lógicas entre los sucesos básicos, intermedios y tope. A partir de este árbol se puede obtener la función lógica que lo representa, que será en nuestro caso una función Booleana de  $n$  variables indicadoras binarias del suceso tope y a la que denominaremos "función de estructura". Este tipo de funciones Booleanas posee múltiples representaciones y será necesario encontrar aquellas que son adecuadas para analizar el sistema representado, desde un punto de vista ingenieril. La mejor manera de comprender como falla un sistema, o sea, como se presenta el suceso tope no deseado, es encontrar aquellas combinaciones mínimas de sucesos básicos que son suficientes para ello. Estas combinaciones son las componentes de una de las representaciones posibles de la función de estructura, que se denomina Forma Disyuntiva Normal (FDN) obtenida como la suma de productos de las variables que componen cada una de éstas combinaciones, y se llaman primeros implicantes (PI). Un caso especial de función de estructura es aquella en la que no aparecen como sucesos básicos negaciones de otros sucesos básicos, denominada coherente, para la cual los PI's se denominan Conjuntos Mínimos de Corte (MCS).

La determinación de los MCS no es una tarea trivial dado que pueden ser billones de ellos los que compongan la FDN de una función de estructura medianamente compleja. Para afrontarla será necesario disponer de:



- Algoritmos que generen de forma eficiente los MCS.
- Usar estrategias adecuadas para representar y almacenar los MCS que empleen la menor cantidad de recursos (memoria y operaciones) posibles.
- La obtención de los MCS como elemento fundamental para comprender como falla un sistema es la piedra angular del denominado análisis cualitativo del árbol de fallas. Este análisis se puede abordar mediante diversos métodos que son agrupables en dos clases:
  - Directos, que abordan la función de estructura tal cual se ha obtenido del árbol de fallas. Esta es la opción clásica, desarrollada durante muchos años y con logros bien establecidos hasta la actualidad, pero con limitaciones que obligan a procesos de truncamiento y aproximaciones en el caso de árboles muy grandes o complicados.
  - Indirectos, que se basan en transformar el árbol de fallas en otro tipo de gráfico llamado Diagrama de Decisión Binario (DDB) antes de proceder a la determinación de los MCS. Esta es una opción reciente y novedosa que presenta importantes ventajas que están siendo puestas de manifiesto con los trabajos actuales. Entre ellas cabe citar la posibilidad de abordar grandes árboles y de realizar la posterior evaluación de la probabilidad del suceso top de forma exacta e implícita. Sus inconvenientes más importantes son:
    - La necesidad de escoger un orden determinado de las variables, que representan a los sucesos básicos, para obtener un DDB adecuado. Cuestión para la que no se han desarrollado criterios demostrados matemáticamente.
    - La imposibilidad de aplicar los DDB a procesos dinámicos.

El análisis cualitativo suele ser complementado con la determinación de la importancia relativa de unos sucesos básicos frente a otros, a efectos de evaluar su contribución a la indisponibilidad del sistema.

Para que el análisis cualitativo del árbol de fallas quede más claro, se usará como ejemplo el árbol de fallas que se construyó para este trabajo y que se encuentra en el capítulo III. En el apéndice C se tratarán nociones breves sobre la teoría de funciones Booleanas necesaria para el estudio de la función de estructura.



### 2.2.4.3.3.1.1. Obtención de los MCS.

Las fallas en los sistemas pueden ocurrir de muchas maneras diferentes. Cada forma única es un modo de falla del sistema e involucra simples o múltiples fallas de los componentes del mismo. Para reducir las posibilidades de fallas del sistema, primero debemos identificar los modos de falla y luego eliminar los que ocurren de modo más frecuente y / o los más probables.

Para un dado árbol de fallas el concepto de conjunto de corte (cut set) define claramente los modos de falla de un sistema. Un conjunto de corte es un conjunto de eventos básicos tal que si todos ellos ocurren la ocurrencia del evento tope está garantizada. Por el contrario, un conjunto de caminos es un conjunto de eventos básicos que si ninguno de los eventos en el conjunto ocurre el evento tope se garantiza que no ocurre.

Un sistema grande tiene un gran número de modos de falla, un sistema con 40-90 componentes puede llegar a tener cientos de miles de conjuntos de corte. Para estos casos es necesario llegar a reducir los modos de falla para simplificar el análisis. Se requieren sólo los modos de falla que son generales, en el sentido que si eliminamos estos modos de falla, esto resultará en la eliminación de gran parte de los modos de falla del sistema. Un conjunto mínimo de corte (MCS) es uno tal que si un elemento se remueve del conjunto, los demás eventos colectivamente no son más un conjunto de corte. Un conjunto de corte que incluye otros conjuntos no es un conjunto de corte mínimo. El concepto de conjunto de corte mínimo nos permite reducir el número de conjuntos de corte y el número de eventos básicos involucrados en cada conjunto de corte, lo que simplifica el análisis. Una compuerta OR incrementa el número de conjuntos de corte, mientras que una compuerta AND incrementa el número de eventos en un conjunto de corte, de acuerdo con esto se puede establecer el siguiente algoritmo:

- Identifique las compuertas con un nombre.
- Numere cada evento básico.
- Ubique la primera compuerta después del evento tope en la primera fila y columna de una matriz.
- Itere de un modo descendente haciendo las siguientes operaciones:



- Reemplace las compuertas OR por un arreglo vertical compuesto por las entradas a la compuerta e incremente los conjuntos de corte.
  - Reemplace las compuertas AND por arreglos horizontales de las entradas e incremente la medida del conjunto de corte.
- Cuando todas las compuertas hayan sido reemplazadas por los eventos básicos obtenga los MCS removiendo todos los superconjuntos (conjuntos que incluyen algún otro conjunto).

El evento tope quedará de la siguiente forma:

$$T = M1 + M2 + \dots + Mn$$

Los  $M_i$  corresponden a los llamados MCS, que cumplen con el siguiente par de condiciones:

- La ocurrencia de cualquiera de ellos causa el evento principal.
- Cada uno define un modo de falla del sistema

El orden de un MCS está determinado por el número de eventos primarios que incluye, es decir, un MCS de orden dos (o de segundo orden) está integrado por dos eventos primarios; un MCS de orden tres (o de tercer orden) está integrado por tres eventos básicos, y así sucesivamente. En general, los MCS de orden inferior indican que el evento tope ocurre con la combinación de un número menor de eventos primarios.

#### **2.2.4.3.3.2. Análisis cuantitativo del árbol de fallas.**

La cuantificación es una etapa esencial en el análisis de árbol de fallas, ya que puede proporcionar diversas magnitudes de gran interés desde el punto de vista de la fiabilidad del sistema.

En el caso de que los eventos básicos estén cuantificados es posible calcular la probabilidad de ocurrencia de la falla principal. Para ellos es necesario conocer la probabilidad de ocurrencia o no disponibilidad de los eventos y la valoración de las dependencias entre las fallas de los componentes.

Entre los valores estadísticos que pueden determinarse figuran:



- Probabilidad y grado de ocurrencia del evento tope.
- Probabilidad de que ocurra un determinado conjunto mínimo de falla.
- Importancia estadística de los eventos básicos con relación al evento tope.

La determinación de estos valores estadísticos es una información valiosa que permite modificar las partes convenientes del sistema para disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento tope. Esta probabilidad puede calcularse de modo simple si todos los eventos básicos del árbol son independientes, es decir, si cumplen las siguientes condiciones:

- La falla de un componente no debe influir en la probabilidad de falla de otros componentes.
- La probabilidad de reparación de un componente dentro de un tiempo dado  $t$  debe ser independiente del estado de los otros componentes.

Los métodos de cuantificación del árbol de fallas se pueden clasificar de acuerdo al camino seguido para abordarla. Una primera clase de métodos es aquella que emplea MCS, siendo el procedimiento clásico de evaluación, esta técnica se describirá un poco más en el siguiente apartado. Otra clase está constituida por los métodos que evalúan directamente a partir de su Función de Estructura y que tienen dos importantes subdivisiones: procedimientos exactos capaces de evaluar el árbol exactamente, empleados para árboles de hasta mediano tamaño, y procedimientos aproximados, empleados para árboles de gran tamaño. Estos métodos evitan las dificultades inherentes al hecho de realizar el análisis cualitativo previo, pero se enfrenta a los derivados de afrontar directamente la función de estructura.

La última clase y muy recientemente perfeccionada, es la que evalúa el árbol mediante una transformación previa a Diagrama de Decisión Binario seguida del empleo de productos implícitos, que ha permitido evaluar exactamente árboles que hasta ahora sólo se evaluaban de forma aproximada. El principal inconveniente de estos métodos viene del hecho de no existir criterios matemáticamente demostrados que permitan definir el orden adecuado de los sucesos básicos que conduce al DDB óptimo, lo que puede llegar a anular las ventajas a conseguir en comparación con los otros métodos.

#### **2.2.4.3.3.2.1. Análisis de MCS.**

La técnica conocida como análisis de conjuntos mínimos de corte (Minimal Cut Set Analysis), consiste





en una técnica matemática que sirve para manipular la estructura lógica del árbol de fallas e identificar así todas las combinaciones de eventos básicos, los cuales inciden en el evento tope, mediante el uso de las reglas algebraicas del álgebra booleana. Así, la estructura lógica del árbol de fallas original es, matemática y lógicamente, equivalente a la estructura original solo que con una estructura mínima de conjuntos. El proceso de transformación abarca cualquier evento singular que aparezca repetidamente (fallas de causa común) en varias ramas o niveles del árbol, para reducirlo al mínimo.

El procedimiento consiste en ordenar la estructura del árbol de fallas de forma que podamos expresarla en términos de ecuaciones algebraicas booleanas; así, el álgebra booleana es usada para reducir las ecuaciones. La reducción implica la introducción de los elementos inmediatamente relacionados con el evento que se está describiendo en la ecuación algebraica; de esta forma, la ecuación final va a quedar en términos de eventos básicos que serán posteriormente reestructurados en un nuevo árbol (árbol reducido), solo que este es equivalente al primero matemáticamente.

Ya obtenido el árbol por medio de los conjuntos mínimos, se debe calcular la probabilidad de ocurrencia del evento tope. Para ello, se asignan probabilidades a los sucesos básicos mediante una tabla de criterios (ver tabla 3.12), y posteriormente se sustituirán en la ecuación final del árbol de fallas para calcular la probabilidad del evento tope.

Tabla 2.18 Criterios para la asignación de probabilidades.

PROBABILIDAD (P)	FRECUENCIA PROBABLE (F)
1	Inminente (puede ocurrir en cualquier momento)
$1 \times 10^{-1}$	Muy probable (ha ocurrido o puede ocurrir varias veces al año)
$1 \times 10^{-3}$	Probable (ha ocurrido o puede ocurrir en un año)
$1 \times 10^{-5}$	Poco probable (no se ha presentado en 5 años)
$1 \times 10^{-7}$	Improbable (no se ha presentado en 10 años)
$1 \times 10^{-9}$	No se ve probabilidad de que ocurra

Con la probabilidad del evento tope calculada, se procede a calcular su frecuencia con el uso de la siguiente ecuación:

$$P = 1 - e^{-ft}$$

Donde:  $f$  = eventos / año

$t$  = años

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Ec.1



Para comprender un poco más las bases del análisis cuantitativo del árbol de fallas con el uso del álgebra de Boole, refiérase al apéndice C.

### **2.2.5. Análisis de consecuencias.**

El análisis de consecuencias proporciona información sobre los efectos que se producirían en caso de una explosión ó ruptura de una línea de proceso ó de un recipiente que almacena un líquido peligroso, así como los efectos de una explosión ó incendio de una nube de gas no confinada. Las explosiones e incendios pueden causar daños por quemaduras directas ó por radiación térmica, daños por proyectiles ó daños por ondas de presión.

La manera más eficaz para obtener esta información es mediante el uso de modelos matemáticos que simulan una gran parte de los fenómenos antes mencionados. Dicha información es muy útil para determinar las consecuencias de un accidente, incluyendo otros aspectos referentes al fenómeno mismo como velocidad de descarga, nivel de radiación, radios de afectación, etc. Esta información es valiosa para evaluar el diseño de nuevos procesos y en el caso de procesos en operación, evalúa los sistemas de seguridad existentes en la instalación.

Los modelos están constituidos por ecuaciones empíricas o fundamentos que representan el proceso fisicoquímico que ocurre durante el accidente. Frecuentemente los resultados son sólo estimados desde las propiedades físicas, por lo que la mayoría de los modelos tienden a maximizar los resultados. Esto asegura que la modelación se encuentra "del lado seguro".

Existen en la actualidad una gran variedad de programas de cómputo –por ejemplo, el PHAST, el ARCHIE, el ALOHA, etc.– que utilizan estos modelos, lo cual facilita en gran medida la simulación de los fenómenos antes mencionados.

No se profundizará más sobre este tema ya que no se utilizó de forma directa algún modelo en el presente trabajo. Para saber acerca de los modelos que se utilizan para la simulación de los fenómenos que ya se mencionaron, refiérase a la bibliografía que se encuentra al final de este trabajo.

**TERCERA PARTE**  
**PLANTA DE ALQUILACIÓN**



### **2.3.1. Conceptos previos de la alquilación.**

#### **2.3.1.1. Antecedentes.** <sup>(13)</sup>

La adición de un grupo alquilo a cualquier compuesto es una reacción de alquilación, pero en la terminología de la refinación del petróleo, el término de alquilación se utiliza para denominar a las reacciones de olefinas de bajo peso molecular con una isoparafina, para dar isoparafinas de mayor peso molecular. A pesar de que esta reacción es simplemente la inversa del craqueo, la creencia de que los hidrocarburos parafinicos eran químicamente inertes retrasó su descubrimiento hasta 1935. La demanda de combustibles de aviación de alto octanaje durante la Segunda Guerra Mundial actuó como detonador para el desarrollo del proceso de alquilación para producir gasolinas isoparafinicas de alto número de octano.

Aunque la alquilación puede tener lugar a altas temperaturas y presiones en ausencia de catalizador, los únicos procesos de importancia comercial tienen lugar a bajas temperaturas en presencia de ácido sulfúrico o fluorhídrico como catalizadores. Las reacciones que tienen lugar en ambos procesos son complejas y el producto tiene un amplio rango de puntos de ebullición. Eligiendo adecuadamente las condiciones de operación, la mayor parte de los productos pueden incluirse en el rango de puntos de ebullición de la gasolina, con números de octano Motor de 88 a 94 y números de octano Research de 94 a 99.

En 1920, un barril de crudo, que contiene 159 litros, producía 41.5 litros de gasolina, 20 litros de queroseno, 77 litros de gasoleo y destilados y 20 litros de destilados más pesados. Hoy, gracias al proceso de alquilación, un barril de crudo produce 79,5 litros de gasolina, 11,5 litros de combustible para reactores, 34 litros de gasoleo y destilados, 15 litros de lubricantes y 11,5 litros de residuos más pesados.

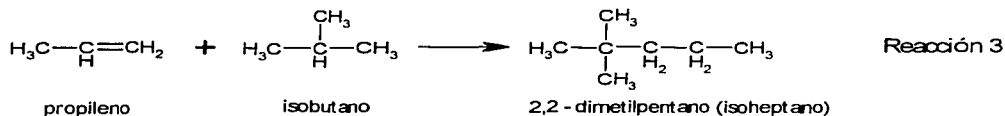
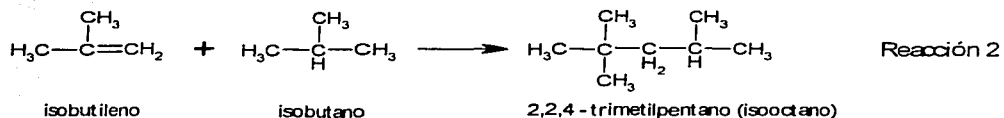
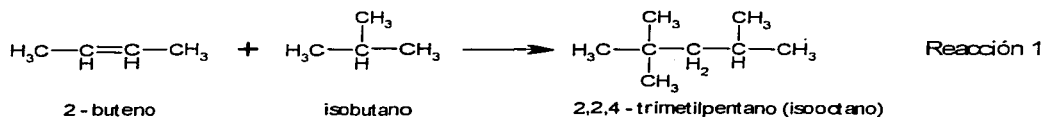
#### **2.3.1.2. Reacciones de alquilación.** <sup>(13)</sup>

En los procesos de alquilación que emplean ácido fluorhídrico o sulfúrico como catalizadores, sólo reaccionan con las olefinas las isoparafinas con átomos de carbono terciarios, como el isobutano o el isopentano. En la práctica sólo se usa el isobutano, pues el isopentano tiene un número de octano



suficientemente alto y presión de vapor baja por lo que puede ser mezclado directamente para dar gasolinas.

Las principales reacciones que tienen lugar en la alquilación y que son de interés para la industria petrolera son las siguientes:



Se han propuesto varias teorías acerca del mecanismo de reacción de la alquilación en presencia de un catalizador ácido. La más aceptada propone la formación de iones carbonio por transferencia de protones desde el catalizador ácido a las moléculas de olefina, seguida de la combinación con isobutano para producir cationes terbutilos. Tomando como ejemplo de olefina al 2-buteno (butileno), los iones terbutilos pueden reaccionar con éste para formar iones carbonio C<sub>8</sub> capaces de reaccionar con isobutano para formar parafinas C<sub>8</sub> y iones terbutilos. Estos iones terbutilos reaccionan entonces con otras moléculas de 2-buteno para continuar la cadena. A continuación se ilustra la secuencia anterior utilizando como reacción de ejemplo la número 1 y 2, y como catalizador al ácido fluorhídrico; dichas reacciones son las que principalmente se llevan a cabo en el circuito de reacción de la planta de alquilación de la cual se hizo el análisis de riesgos. Cabe mencionar que la reacción de alquilación es

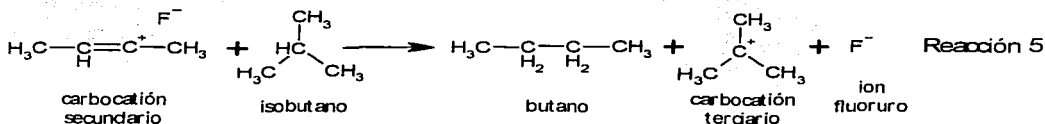
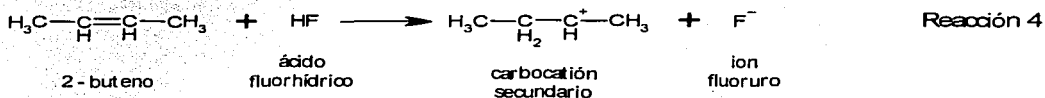


altamente exotérmica ya que puede liberar de 124,000 a 140,000 BTU por barril de isobutano reaccionado.

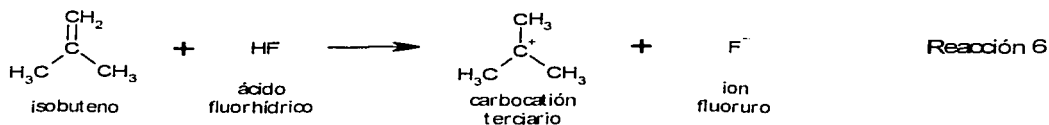
#### Formación del catión terbutilo:

Para que se efectúe la alquilación es necesario formar un carbocatión terciario, para ello existen dos rutas:

→ La primera es cuando reacciona el 2-buteno con el HF para formar un carbocatión secundario (reacción 4), posteriormente el carbocatión secundario reacciona con el isobutano para producir butano y el carbocatión terciario requerido (reacción 5).

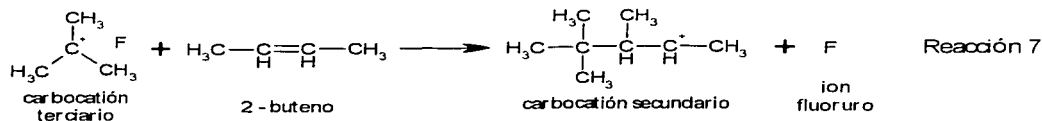


→ La segunda ruta es cuando se hace reaccionar el isobuteno con HF dando como resultado el carbocatión que se requiere (reacción 6).

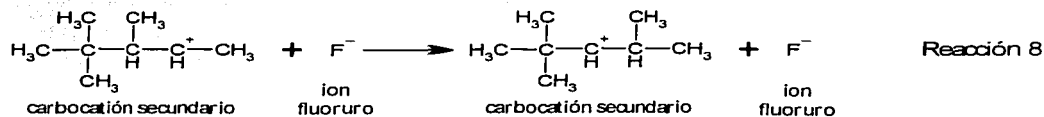


#### Reacción de los cationes terbutilo con 2-buteno:

Para producir el alquilado (2, 2, 4-trimetilpentano) se hace reaccionar el carbocatión terciario con 2-buteno para producir el carbocatión secundario que se presenta en la reacción 7.

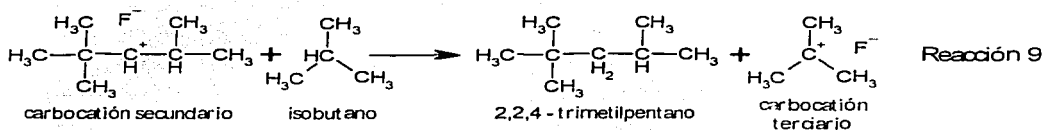


Posteriormente se efectúa la transposición del metilo, con el objeto de disminuir la tensión estérica que se origina por la presencia de tres metilos en dos carbonos contiguos de la cadena principal, por lo que se produce el siguiente carbocatión (reacción 8):



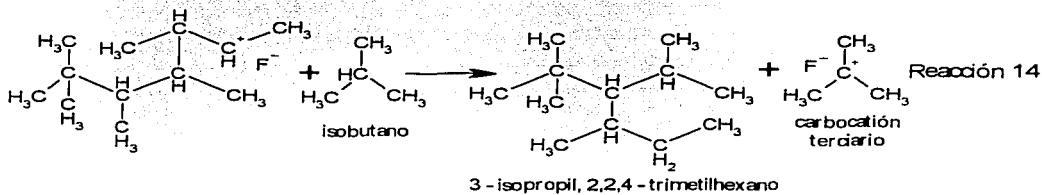
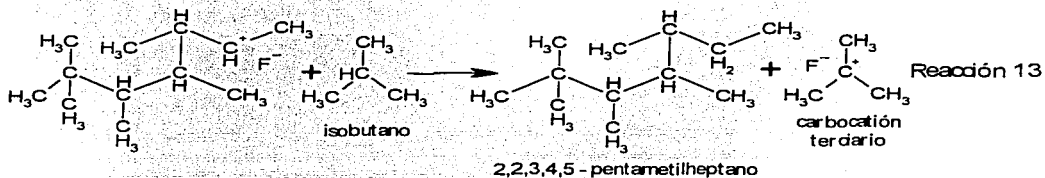
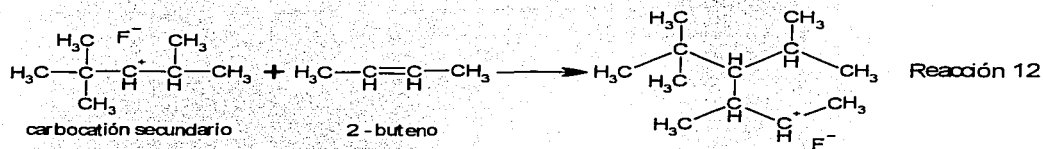
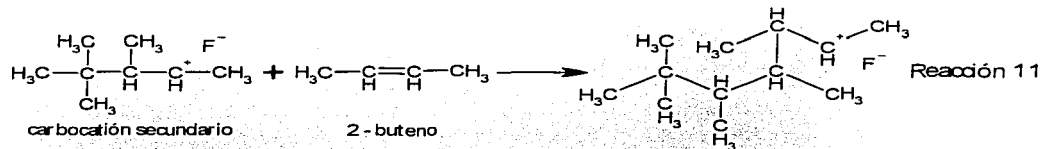
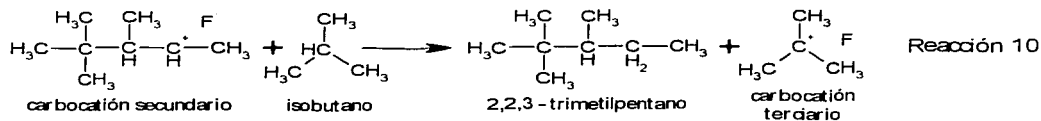
*Formación del alquilado (2,2,4-trimetilpentano):*

El carbocatión que se obtiene de la reacción 8 se hace reaccionar con isobutano para producir el alquilado y nuevamente el carbocatión terciario con lo que se continúa la cadena de reacción (reacción 9).



*Reacciones secundarias:*

También se llevan a cabo reacciones secundarias útiles como por ejemplo la reacción 10 donde se obtiene 2,2,3-trimetilpentano y también la formación de compuestos de mayor peso molecular, ya que los carbocationes secundarios pueden reaccionar con el 2-buteno, como se muestra en las reacciones 11 y 12. Si los compuestos resultantes de las reacciones 11 y 12 reaccionan con isobutano, se pueden obtener compuestos de doce carbonos como se especifica en las reacciones 13 y 14.



### 2.3.1.3. Variables de reacción. (13, 25)

La reacción que usa ácido sulfúrico es mucho más sensible a la temperatura que la reacción que usa fluorhídrico. Con ácido sulfúrico es necesario llevar a cabo las reacciones a 50 o 70°F o menos, para así minimizar las reacciones de óxido-reducción, que dan como resultado la formación de asfaltos y





desprendimiento de dióxido de azufre. Si el catalizador es ácido fluorhídrico anhidro, la temperatura se limita normalmente a 100°F o menos. En ambas reacciones, el volumen de ácido empleado es aproximadamente igual al volumen de hidrocarburo líquido y se mantiene suficiente presión en el sistema como para mantener los hidrocarburos y el ácido en fase líquida. Se emplean elevadas relaciones isoparafina/olefina (de 4:1 a 15:1) para minimizar la polimerización y elevar el octanaje. Para obtener elevada calidad de producto y altos rendimientos es esencial que haya una eficaz agitación para aumentar el contacto entre las fases ácida y de hidrocarburo. Se usa en general tiempos de contacto de 10 a 40 minutos. El rendimiento, la volatilidad y el número de octano del producto se regulan ajustando la temperatura, la razón ácido/hidrocarburo y la razón isoparafina/olefina. Para las mismas condiciones de reacción, los productos obtenidos de la alquilación con fluorhídrico y con sulfúricos son muy similares.

Las variables que tienen un efecto importante en el rendimiento y la calidad del producto en las reacciones de alquilación son las que a continuación se describen:

⇒ *Temperatura de reacción.* Esta variable tiene su mayor efecto en las reacciones catalizadas por ácido sulfúrico que en las reacciones con ácido fluorhídrico. Las bajas temperaturas proporcionan altas calidades, y el efecto de cambiar la temperatura de la reacción con ácido sulfúrico de 35 a 55°F es hacer bajar el octanaje de los productos de una a tres unidades, de acuerdo a la eficiencia de la mezcla de la reacción. En comparación, un aumento de la temperatura de reacción de 60 a 125°F en la alquilación con ácido fluorhídrico, disminuye la calidad del alquilado en tres octanos.

La mayor sensibilidad a la temperatura de la alquilación con ácido sulfúrico se debe a que la viscosidad de éste varía en proporción inversa con la temperatura. En el caso de que se tengan bajas temperaturas, la viscosidad del ácido sulfúrico es elevada, por lo que se ve dificultada la mezcla adecuada de los reactivos y su posterior separación. A temperaturas por arriba de 70°F, la polimerización de las olefinas empieza a ser importante, por consiguiente, el rendimiento disminuye. Por lo anterior, el rango de temperaturas en el que es viable la reacción de alquilación es de 40 a 50°F con un máximo de 70°F y un mínimo de 30°F.

En el caso de la alquilación con ácido fluorhídrico, la temperatura no es un aspecto importante y



ésta se encuentra normalmente en el intervalo de 70 a 100°F.

⇒ *Concentración del ácido.* Este aspecto tiene efectos variables sobre la calidad del alquilado, dependiendo de la eficiencia de mezclado en la reacción y del contenido en agua del ácido. En la alquilación con ácido sulfúrico, se obtiene la mejor calidad y el más alto rendimiento con concentraciones de ácido del 93 al 95% en peso de ácido, 1 a 2% de agua y el resto, hidrocarburos diluyentes. La cantidad de agua en el ácido le disminuye su actividad catalítica de 3 a 5 veces más que los hidrocarburos diluyentes. Cuanto peor sea el mezclado en el reactor tanto más elevada ha de ser la concentración del ácido necesario para mantener baja la dilución. Aumentando la concentración del ácido del 89 al 93% en peso se mejora la calidad del alquilado en uno o dos octanos.

En la reacción con ácido fluorhídrico se logran los mayores octanajes en un rango de concentraciones del ácido del 86 al 90% en peso. A nivel industrial, las concentraciones usuales de ácido varían entre 83 y el 92% en peso y contienen menos del 1% en agua.

⇒ *Concentración del isobutano.* Ésta se expresa comúnmente como la razón isobutano/olefina. Altas razones isobutano/olefina aumentan el octanaje y el rendimiento, y reducen las reacciones laterales y el consumo de ácido. En la práctica industrial, la razón isobutano/olefina varía entre 5:1 y 15:1.

Existen otras variables de relativa importancia que influyen en el rendimiento y calidad del producto de la alquilación y que son más propias del proceso de la planta de alquilación que de la reacción en sí. Entre estas variables se encuentran la *velocidad espacial de la olefina*, que se define como el volumen de olefina introducido por hora dividido por el volumen de ácido del reactor. Disminuyendo la velocidad espacial de olefina se reduce la producción de hidrocarburos de elevado punto de ebullición, se aumenta el número de octano y se disminuye el consumo de ácido. La velocidad espacial de olefina es un modo de expresar el tiempo de reacción, y otro modo es el *tiempo de contacto*. El tiempo de contacto se define como el tiempo de residencia del alimento fresco y del isobutano recirculado externamente en el reactor. El tiempo de contacto para la alquilación con ácido fluorhídrico está entre 5 y 25 minutos, y para la alquilación con ácido sulfúrico entre 5 y 40 minutos.



#### 2.3.1.4. Catalizadores. <sup>(13)</sup>

Como ya se ha mencionado, el ácido sulfúrico y el ácido fluorhídrico son los únicos catalizadores de uso comercial para la producción de gasolina alquilada de alto octanaje, pero para la producción de etilbenceno, cumeno y bencenos alquilados con largas cadenas ( $C_{12}$  a  $C_{16}$ ) se usan otro tipo de catalizadores.

Las reacciones que se desean obtener principalmente son aquellas en las que se formen iones carbonio  $C_+$  y la posterior formación de alquilado. La principal reacción indeseable es la polimerización de las olefinas. Sólo los ácidos fuertes pueden catalizar las reacciones de alquilación, en cambio, los ácidos débiles pueden causar la polimerización. Por lo anterior, la concentración de los ácidos debe mantenerse alrededor del 88% en peso de  $H_2SO_4$  o HF para impedir una excesiva polimerización. El ácido sulfúrico que contenga  $SO_3$  libre causa también reacciones laterales no deseadas, y generalmente no suelen usarse concentraciones de  $H_2SO_4$  superiores al 99.3% en peso.

El isobutano es sólo soluble en la fase ácida en un 0.1% en peso en sulfúrico, y en un 3% en fluorhídrico. Las olefinas son más solubles en la fase ácida y es conveniente un pequeño grado de polimerización de las olefinas, puesto que los productos de la polimerización se disuelven en el ácido y aumentan la solubilidad del isobutano en la fase ácida.

Si la concentración del ácido llega a ser menor del 88%, debe eliminarse algo de ácido para ser reemplazado por ácido más concentrado. En las plantas de alquilación que usan ácido fluorhídrico, el ácido retirado se redestila y los productos de polimerización se eliminan en forma de un aceite oscuro y espeso. El HF concentrado se recircula al proceso, siendo el consumo neto de 0.3 lb por barril de alquilado producido.

En el caso del ácido sulfúrico, este debe regenerarse en una planta de ácido sulfúrico que generalmente no forma parte de la planta de alquilación, siendo el consumo de ácido del orden de 18 a 30 lb por barril de alquilado producido.

#### 2.3.1.5. Procesos industriales de alquilación. <sup>(13)</sup>

Hoy día, como ya se ha mencionado, existen solamente dos procesos, en el ámbito industrial, para la



alquilación: el proceso que utiliza ácido fluorhídrico y el que usa ácido sulfúrico.

Para los que utilizan ácido fluorhídrico, sólo existen dos procesos, cuyo diseño y licencia pertenecen uno, a la Phillips Petroleum Company y el otro, a la UOP Process Division of Universal Oil Products Company. El proceso que se utiliza en la planta de alquilación en el que se efectuó el análisis de riesgos corresponde al proceso de la Phillips Petroleum Company, que se explicará más a fondo en el siguiente apartado.

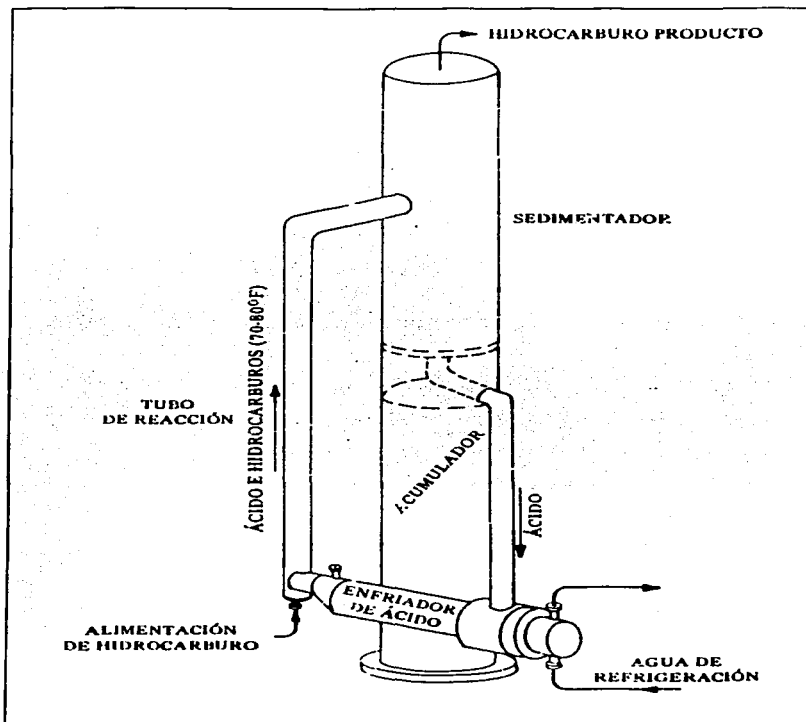
En un sistema de alquilación con ácido fluorhídrico es decisivo, para un buen rendimiento, el diseño de la sección reactor–enfriador–asentador de ácido. A lo largo de los años han aparecido diversos diseños del sistema de reacción, tanto por parte de UOP como por parte de Phillips. Muchos de los sistemas de reacción diseñados por UOP son parecidos a un cambiador de calor horizontal de coraza y tubos, con agua fría circulando por el interior de los tubos para mantener la temperatura de reacción en el nivel deseado. Se consigue una buena mezcla en el reactor utilizando una bomba de recirculación, para forzar la mezcla a través del reactor con un flujo entre ocho y diez veces el flujo de alimentación de la mezcla de hidrocarburos al reactor.

Los sistemas de reactores diseñados por Phillips han sido normalmente similares a los ilustrados en la figura 4.1. La circulación del ácido en este sistema se consigue por diferencia de densidades y así no es necesaria la relativamente cara bomba de circulación del ácido.

En los tramos del sistema de proceso donde se presume la circulación de la mezcla de HF y agua, el equipo de proceso se fabrica en Monel o acero cubierto de Monel. Las otras partes del sistema son de acero al carbono.

Respecto a los procesos con ácido sulfúrico, se encuentran el proceso de Cascade Autorefrigeration, cuya licencia es de M.W. Kellogg Company, y el proceso Effluent Refrigeration cuya licencia es de Stratford Engineering Corporation.

Las mayores diferencias entre los procesos Cascade y Effluent Refrigeration están localizadas en el diseño de los reactores y en el punto del proceso en que se evaporan al propano y el isobutano para conseguir la refrigeración.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.16 Reactor Phillips de HF. (13)

El proceso Cascade Autorefrigeration (ver figura 4.2) emplea un reactor en cascada de múltiples etapas, con mezcladores en cada etapa para emulsionar la mezcla hidrocarburo-ácido. El ácido y el isobutano entran a la primera etapa del reactor y pasan a continuación a las etapas siguientes. El alimento olefínico se divide e inyecta en cantidades iguales en cada una de las etapas. La temperatura en el reactor se controla vaporizando una parte de la fase hidrocarburo en cada etapa del reactor. Cada etapa trabaja a la presión adecuada para mantener su temperatura al nivel deseado. Los gases desprendidos en la vaporización son básicamente propano e isobutano.

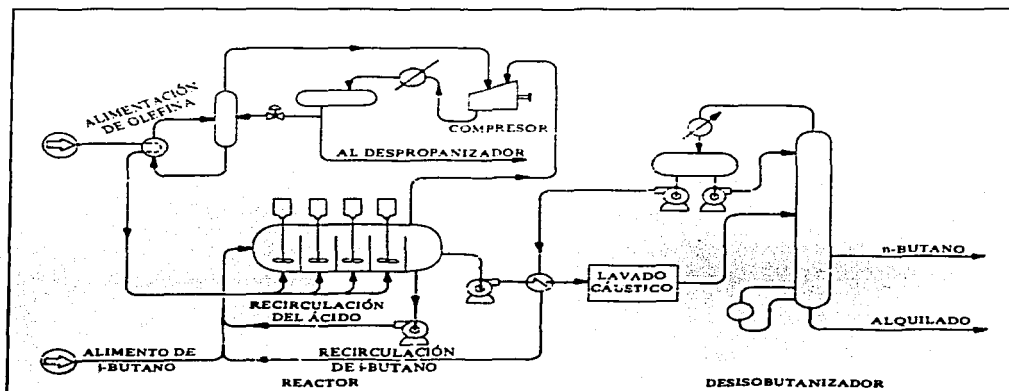


Fig. 2.17 Unidad de alquilación en cascada con ácido sulfúrico. (13)

Estos gases desprendidos se comprimen y se licuan. Una parte de este líquido se vaporiza en un cambiador para enfriar el alimento olefínico antes de enviarlo al reactor. Los vapores se recirculan para su recompresión. El resto del hidrocarburo licuado se envía a una columna despropanizadora para eliminar el exceso de propano que se acumula en el sistema. El isobutano líquido del fondo del despropanizador se bombea hasta la primera etapa del reactor.

La emulsión ácido-hidrocarburo de la última etapa del reactor separa en sus fases ácido e hidrocarburo en un sedimentador. El ácido se elimina del sistema para su empleo posterior y la fase de hidrocarburo se bombea a través de un lavador con sosa para eliminar las trazas de ácido y enviarlo a un desisobutanizador.

El desisobutanizador separa la corriente de alimentación de hidrocarburo en isobutano (que vuelve al reactor), n-butano y alquilado.

El proceso Effluent Refrigeration (ver figura 4.3) emplea un único reactor en una sola etapa, en el cual la temperatura se mantiene mediante serpentines de refrigeración. El reactor contiene un agitador que emulsiona la mezcla ácido-hidrocarburo y la recircula al reactor. El tiempo de residencia medio en el reactor es del orden de 20 a 25 minutos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

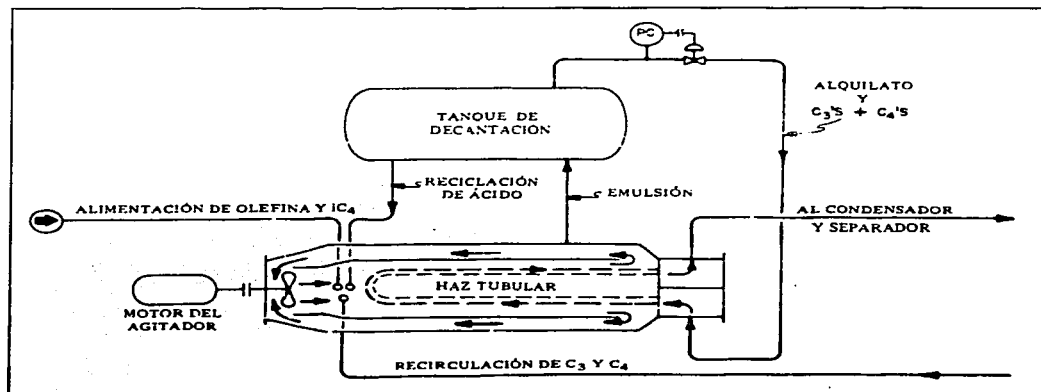


Fig. 2.18 Esquema básico del proceso Effluent Refrigeration. (13)

La emulsión eliminada del reactor se envía a un sedimentador para separar las fases. Se recicla el ácido y se disminuye la presión de la fase hidrocarburo para vaporizar por destilación súbita una parte de la corriente y reducir la temperatura del líquido hasta unos 20°F. El líquido frío se emplea como refrigerante en el haz de tubos del reactor.

Los gases desprendidos se comprimen y licuan, y entonces se envían al despropanizador, donde se separa el propano grado GLP y el isobutano de recirculación. El hidrocarburo líquido procedente del haz de tubo del reactor se separa en isobutano, n-butano y alquilado, en una columna desisobutanizadora. El isobutano se recicla, siendo los productos el n-butano y el alquilado.

### 2.3.2. Proceso de alquilación con HF. (25)

#### 2.3.2.1. Introducción.

El proceso de alquilación con ácido fluorhídrico, como ya se ha mencionado, es aquel en el cual se combinan olefinas tales como propeno, butenos o pentenos con isobutano en presencia de ácido fluorhídrico como catalizador para generar un producto en el rango de ebullición de la gasolina. Este producto se llama alquilado (2,2,4-trimetilpentano). En este proceso, hidrocarburos que son demasiado

TESIS CON  
PALLA DE ORIGEN



ligeros y muy volátiles para usarse en gasolina son químicamente combinados o unidos para producir el alquilado. El alquilado producido en esta planta se empleará como componente en el mezclado para obtener un combustible de alto octanaje.

La carga de olefina a la planta de alquilación consistirá básicamente de butenos (butilenos), propeno (propilenos) y, posiblemente, pentenos (amilenos) producidos en las unidades de proceso de la refinería. Parte del isobutano requerido por el proceso estará contenido en la corriente de alimentación de olefina, y el restante será suministrado de otras fuentes para complementar el requerimiento de isobutano.

El ácido fluorhídrico (HF) actúa como catalizador para la reacción entre olefinas e isobutano. El ácido forma parte de la reacción, pero al completarse ésta, el ácido se libera y puede ser utilizado nuevamente. La presencia de un exceso de ácido es necesaria antes de que la olefina y el isobutano se combinen para formar el alquilado.

El HF se diluye con el agua y el aceite soluble en ácido (ASA). Estos contaminantes deben ser removidos por fraccionamiento para mantener la pureza del ácido. Una parte del ácido se pierde en la rectificación o fraccionamiento. El HF también se pierde en el proceso, en forma de fluoruros orgánicos los cuales se generan como componentes estables en el propano, butano y alquilado.

Tanto el ácido fluorhídrico como el isobutano representan un costo considerable en la operación de la planta. Una operación eficiente de la planta garantizará que dicho costo se mantenga en un nivel razonable, por lo que se deberán tomar todas las precauciones necesarias para mantener al mínimo las pérdidas de ácido e isobutano.

Debido a las características propias del ácido fluorhídrico, su manejo implica apegarse a ciertas prácticas de seguridad. Se puede considerar al HF como la sustancia de mayor riesgo de la planta de alquilación, sin dejar de tomar en cuenta el riesgo que tienen también las demás sustancias que se utilizan en la planta. En el apéndice D se muestran las características del ácido fluorhídrico así como sus efectos fisiológicos y su hoja de seguridad.





### **2.3.2.2. Principales sustancias involucradas en el proceso de alquilación.**

La planta de alquilación es un sistema interno de la refinería, por lo que su materia prima proviene principalmente de la planta MTBE y su producto y subproductos son enviados a almacenamiento. Estos movimientos son realizados a través del sistema de tuberías (racks) internos de la refinería.

La materia de la planta de alquilación consiste de las siguientes sustancias: butadieno, 1-buteno, isobutano, n-butano, trazas de propano, propileno y pentanos. Como sustancias de apoyo al proceso se encuentran el ácido fluorhídrico y la sosa cáustica. Como producto principal se tiene al alquilado (2,2,4-trimetilpentano) y como productos secundarios se tienen al propano y al n-butano. En el apéndice D se muestran las hojas de seguridad de las sustancias que se consideran más importantes en el proceso de alquilación.

Cabe mencionar a aquellas sustancias que se utilizan como servicios auxiliares a la planta de alquilación y son: el aire (de instrumentos, de respiración y de planta), el agua (de servicios, de proceso y de enfriamiento; como vapor que puede ser de baja, media y alta presión), el nitrógeno y el amoníaco.

### **2.3.2.3. Descripción del proceso de la planta de alquilación.**

El proceso de alquilación se puede dividir en tres etapas principales y que son:

- ◆ Sección de preparación de la alimentación.
- ◆ Sección de reacción, regeneración de HF y tratamiento de ASA's.
- ◆ Sección de fraccionamiento y de tratamiento de productos (purificación).

Para tener una visión más clara de la descripción del proceso que se va dar a continuación, véase el diagrama de flujo de proceso que se encuentra en el anexo I.

#### **2.3.2.3.1. Sección de preparación de la alimentación.**

Esta sección comienza desde el límite de batería donde a través de la bomba GA-301 A/B es succionada la carga de C<sub>4</sub> refinado (mezcla de hidrocarburos que contiene butadieno, 1-buteno,



isobutano, n-butano, trazas de propano, propileno y pentanos) con un flujo de 46.9 m<sup>3</sup>/h que proviene de la unidad de MTBE previo almacenaje en los tanques esféricos TE-16 y TE-17 a una presión de 4.9 kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 38°C.

Las bombas de alimentación de la carga mantienen la presión suficiente para conservar la alimentación al reactor en fase líquida (presión, temperatura y composición determinan que cantidad de la alimentación al reactor permanece en fase líquida).

A la descarga de las bombas se cuenta con un totalizador másico que envía la medición al cuarto de control, el flujo es controlado por la válvula FV-31101B que se encuentra conectado con el FT-31101A (indicador de hidrógeno); posteriormente, la carga es precalentada por los fondos de la torre DA-301 (Unidad DME) en los cambiadores EA-301 A/B/C/D/E en donde la temperatura se incrementa hasta 57°C; a la salida de estos cambiadores, a la carga se le adiciona hidrógeno a una presión de 33 kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 38°C, el flujo de hidrógeno es controlado por la válvula FV-31101A y TV-31102. El hidrógeno se requiere en la reacción para la conversión de butadieno a 1-buteno. La reacción de isomerización que convierte 1-buteno a 2-buteno también requiere la presencia de hidrógeno, aún cuando el hidrógeno no se consume en esta reacción. La cantidad de hidrógeno adicionada es bastante pequeña (a la composición de diseño, alrededor de 2.5 moles de hidrógeno se requieren por cada mol de butadieno).

Posteriormente la carga pasa al cambiador EA-302 (el cual tiene 3 opciones de operación: operar por tubos con vapor de alta presión, vapor de baja presión o agua de enfriamiento), dependiendo de la actividad del catalizador, la función de este cambiador es la de mantener la temperatura de la carga entre 54-100°C. La carga entra luego a un mezclador estático en línea (ME-301) que asegura una temperatura uniforme antes que la corriente de alimentación llegue al controlador de temperatura.

La carga entra al Reactor Hydrisom DC-301 —el cual opera a 93°C y 33 kg/cm<sup>2</sup>— donde se lleva a cabo la conversión de butadieno a 1-buteno, la isomerización de 1-buteno a 2-buteno (olefinas) y 2-buteno a n-butano; una vez realizada la conversión, las olefinas pasan al intercambiador de calor EA-303 para elevar su temperatura de 103 a 110.6°C, cuyo medio de calentamiento es vapor de media presión. Posteriormente, el flujo se envía a la unidad DME integrada por los siguientes equipos: torre agotadora DA-301 —opera a 104°C y 17.0 kg/cm<sup>2</sup>—, rehervidor EA-304 (opera con vapor de media presión),



mezclador ME-307, condensador EA-305, acumulador FA-302 y bombas de reflujo GA-302 A/B. Esta unidad tiene como propósito remover los hidrocarburos ligeros, el dimetiléter (DME), el hidrógeno, el metanol y el agua.

La corriente de olefinas que sale por el fondo de la torre DA-301 (unidad DME) entra a los intercambiadores de calor EA-301 A/B/C/D/E y EA-306 —opera con agua de enfriamiento— para bajar su temperatura de 104.4 hasta 37.8°C, para luego combinarse con un flujo de isobutano, propileno y butileno frescos, provenientes de los tanques esféricos de almacenamiento TE-23/24, TE-18 y TE-22 respectivamente.

Tanto el isobutano proveniente de los tanques TE-23/24 como el propileno proveniente del tanque TE-18 son succionados por las bombas GA-303 A/B y GA-317 A/B respectivamente, para luego ser enviados hacia un sistema de secado, integrado por los siguientes equipos: dos torres de secado de carga fresca FF-301 A/B, un condensador de regeneración de las torres de secado EA-308, un eliminador de agua de carga fresca FA-305, dos bombas para regeneración GA-304 A/B y un calentador de regeneración EA-307 —opera con vapor de media presión—; del mismo modo, el butileno proveniente del tanque TE-22 es succionado por la bombas GA-318 para luego ser enviado a un sistema de secado conformado por los siguientes equipos: dos torres de secado de carga fresca FF-303 A/B, un condensador de regeneración de las torres de secado EA-332, un eliminador de agua de carga fresca FA-317, dos bombas para regeneración GA-316 A/B y un calentador de regeneración EA-331 —opera con vapor de media presión—.

Una vez que se han secado el isobutano, el butileno y el propileno, se mezclan para luego, como ya se dijo antes, unirse con la carga de olefinas proveniente del intercambiador EA-306. Esta nueva se envía hacia un tercer sistema de secado, integrado por los siguientes equipos: dos torres de secado de carga olefinas e isobutano FF-302 A/B, un condensador de regeneración de las torres de secado EA-310, un eliminador de agua de carga fresca FA-306, dos bombas para regeneración GA-305 A/B y un calentador de regeneración EA-309, cuyo medio de calentamiento es vapor de alta presión.

La corriente ya secada se envía al mezclador de carga ME-302, donde se mezcla con el isobutano de recirculación del proceso. La corriente combinada es la alimentación total de hidrocarburo hacia los reactores. La relación en volumen de isobutano a contenido de olefina en este punto será



aproximadamente de 12 a 1. La corriente de alimentación de la carga al reactor se divide en dos líneas para ser enviada a la etapa de reacción.

### 2.3.2.3.2. Sección de reacción, regeneración de HF y tratamiento de ASA's.

Las dos corrientes de isobutano y olefinas provenientes del mezclador ME-302 entran a los enfriadores/mezcladores EA-311 A/D; posteriormente, la mezcla se dispersa dentro del reactor de alquilación (reactor asentador de ácido) DA-302 —el cual opera a 48.2°C y 8.9 kg/cm<sup>2</sup>—, por medio de tubos de dispersión y espreas, las cuales permiten que exista un buen contacto entre las olefinas, el isobutano y el ácido. El efluente del reactor es una mezcla compuesta por etano, propano, n-butano, isobutano, pentano, alquilado y HF, la cual se envía a fraccionamiento y tratamiento mediante las bombas GA-307 A/B.

Por la parte inferior del asentador de ácido DA-302, se extrae el HF y se recircula hacia los enfriadores EA-311 A/B, donde se completa el ciclo para que se lleve a cabo la reacción de olefinas e isobutano. De la parte inferior de los EA-311 A/B sale una corriente que lleva: trazas de etano y propano, HF, isobutano, n-butano, pentanos, alquilado, ASA's y agua. Esta corriente es succionada por las bombas GA-306 A/B y enviada a los intercambiadores de calor EA-333 —trabaja con los fondos de la DA-304— y EA-112 —trabaja con vapor de media presión— para elevar su temperatura de 41.8 a 143.3°C. Después de ser calentada, esta corriente entra a la torre regeneradora de ácido DA-303, donde se separan las trazas de etano y propano, el HF, el isobutano, el n-butano, los pentanos, el alquilado y el agua de una parte de las ASA's; la mezcla de hidrocarburos y ácido retorna al asentador y las ASA's se envían a tratamiento.

La corriente de ASA's obtenida del fondo de DA-303 será lavada con sosa cáustica para neutralizar el ácido HF residual que permanezca en el ASA, para ello, se envía al mezclador ME-303 donde se mezclará con una corriente rica en sosa proveniente del fondo del tanque FA-307, dicha corriente de sosa es movida por las bombas GA-308 A/B. La corriente de ASA's está a control de nivel por medio del LT-31112 que actúa sobre la válvula LV-31112 en el fondo de la torre DA-303 mientras que la corriente de sosa se mantiene a 66°C mediante los cambiadores EA-314 A/B con vapor de baja presión o agua de enfriamiento.

La corriente que sale del mezclador ME-303 se envía al neutralizador FA-307 para lavado con sosa. La



sosa se asienta en el fondo y las ASA's, después de haber estado en contacto con la sosa, se neutralizan y flotan en la parte superior de la fase cáustica más pesada. El ASA fluye de la parte superior del FA-307 al tanque amortiguador de ASA FA-308. Del tanque FA-308 salen las ASA's para ser enviadas mediante la bomba GA-309 A, al horno rehedor de la fraccionadora principal BA-301. Una línea de recirculación, un calentador interno y un calentador de tanque amortiguador de ASA EA-315, se proporcionan para mantener tibio el ASA en un clima frío. Una línea es también provista para enviar el ASA de regreso al recipiente lavador si éste no hubiera sido neutralizado adecuadamente.

### **2.3.2.3.3. Sección de fraccionamiento y de tratamiento de productos (purificación).**

El efluente de la sección de reacción (corriente proveniente del asentador DA-302) es bombeado hacia los intercambiadores de calor EA-316 (calienta con isobutano de recirculación proveniente de la fraccionadora DA-304) y EA-317 (calienta con alquilado proveniente del fondo de la fraccionadora DA-304) para elevar su temperatura de 48.2 a 71.1°C. Con el efluente ya calentado, éste entra a la columna DA-304 a la altura del plato 72, donde será fraccionado. Por la parte del domo se separa etano, isobutano, propano, trazas de n-butano y ácido fluorhídrico y por los fondos se obtiene trazas de isobutano, n-butano, pentano y alquilado.

Los domos de la fraccionadora DA-304 se condensan en los intercambiadores de calor EA-318 A/F – enfrían con agua– y posteriormente se envían al tanque acumulador FA-309. La corriente líquida de este acumulador es succionada por las bombas GA-310 A/B, cuyo flujo se divide en dos corrientes a la descarga; una se envía como reflujo hacia la torre fraccionadora DA-304 en el plato No. 100 y la otra corriente se envía hacia el agotador de ácido, DA-306, donde se lleva a cabo la separación de HF, etano, propano, trazas de isobutano y n-butano por domos y por fondos salen etano, propano, compuestos fluorados, trazas de isobutano y n-butano; cabe mencionar que la mayor cantidad de propano sale por los fondos.

La corriente del fondo de la DA-306 se divide en dos a la salida de la torre, una corriente se une a la corriente de isobutano de reciclo, pasando previamente por el intercambiador de calor EA-325 para disminuir su temperatura de 62.6 a 37.8°C (de esta misma corriente sale una que va a las bombas GA-310 A/B y que sirve como un limpiador de los sellos mecánicos de éstas); la otra corriente se envía hacia la etapa de tratamiento, precalentándose previamente en los intercambiadores de calor carga-



efluente de defluorinadores de propano y calentador de carga a defluorinadores EA-326 y EA-327 respectivamente, donde aumenta su temperatura de 62.6 a 176.7°C. Después la corriente fluye hacia los defluorinadores FA-311 A/B, que operan en serie, posteriormente, la corriente intercambia calor en los intercambiadores EA-326 y EA-328 (condensador de propano) donde disminuye su temperatura de 162.8 a 38°C. Ya luego, la corriente se trata con hidróxido de potasio en el tratador de propano FA-312, finalmente, esta corriente es succionada con las bombas GA-320 A/B y se envía a almacenamiento al tanque estérico TE-14 como propano producto.

Justo abajo del plato 79 de la torre fraccionadora DA-304, se produce el isobutano líquido, el cual es enviado a recirculación mezclándose con la corriente de isobutano fresco y olefinas en el ME-302, no sin antes pasar por un tren de enfriamiento integrado por los intercambiadores de calor EA-316 y EA-321 A/D para bajar su temperatura de 100.5 a 37.8°C. De esta corriente, sale una que se divide en dos, una se dirige a la columna regeneradora de ácido DA-303 y la otra va a la bomba GA-306 A como limpiador de los sellos mecánicos de la bomba.

En el plato 11 de la fraccionadora DA-304, se produce n-butano que se envía al rectificador de butano DA-305, que tiene por objetivo separar el pentano, el alquilado y componentes pesados que son arrastrados por el n-butano. Hay dos corrientes de proceso que salen del rectificador: uno es el líquido proveniente del fondo del rectificador que se dirige al plato 9 de la fraccionadora DA-304 y la otra, que es la corriente rectificada compuesta principalmente de n-butano, se dirige al intercambiador de calor, (calentador de carga a defluorinadores de butano) EA-329 –intercambia calor con la corriente que provienen de los fondos de la DA-304— donde se calienta de 117 a 204.4°C. Al salir del intercambiador EA-329, esta corriente continúa hacia los defluorinadores de butano FA-313 A/B que operan en serie, a continuación, la corriente se enfría de 190.6 a 38.0°C en el intercambiador de calor EA-330 y, posteriormente, se trata con hidróxido de potasio en el tratador FA-314, finalmente, esta corriente se succiona con las bombas GA-321 A/B y se envía a almacenamiento al tanque estérico TE-11 como butano producto.

El producto principal de la DA-304 es el alquilado, que se separa por la parte inferior de la columna fraccionadora. La corriente de alquilado a la salida de la torre se divide en dos, una es la recirculación hacia la misma torre, pasando previamente por las bombas GA-311 A/C y después por el calentador BA-301, que es el rehervidor de fondos que calienta la recirculación para tener la temperatura apropiada



de operación de la torre y también para asegurar una buena defluorinación térmica del alquilado; dicha temperatura debe estar por encima de los 190°C.

La otra corriente se divide a su vez en dos corrientes: una se utiliza como fluido de limpieza hacia las bombas GA-307 A/B (de carga a la torre fraccionadora DA-304), pasando previamente por el intercambiador de calor EA-323 —opera con agua de enfriamiento— donde se enfría de 236.8 a 46.1°C. La otra corriente se divide en dos para enfriarse en los intercambiadores de calor EA-327 y EA-329 respectivamente; después de ser enfriadas las corrientes, se unen en una sola corriente. Dicha corriente se dirige al intercambiador EA-317 donde es enfriado hasta una temperatura de 85°C, luego pasa por los intercambiadores EA-333 y EA-322 A/B donde la corriente, que en su mayoría se compone de alquilado, llega a una temperatura de 38°C. A la salida del intercambiador EA-322 A/B, el alquilado es succionado por las bombas GA-322 A/B para ser finalmente enviado a almacenamiento en el tanque FB-350 como alquilado producto.

#### **2.3.2.4. Variables de operación de la planta de alquilación.**

Con el propósito de que la planta de alquilación opere de forma eficiente, es importante tener un conocimiento general de la reacción y de los factores que la afectan. Estos factores son llamados variables de operación.

Las variables que afectan la cantidad y la calidad del alquilado y que tienen algún efecto sobre el consumo de ácido son las siguientes:

- *Tipo de carga de olefina disponible.* Las olefinas normalmente cargadas a la unidad de alquilación son propilenos, butilenos y amilenos. Estas olefinas, bajo condiciones similares, producen la misma cantidad de alquilado: esto es, un volumen de olefina y de 1.0 a 1.3 volúmenes de isobutano combinados para producir de 1.6 a 1.8 volúmenes de alquilado, dependiendo de la relación isobutano /olefina en la alimentación al reactor. Bajo condiciones similares, los butilenos producen el alquilado de más alta calidad, mientras que los propilenos y amilenos producen un alquilado de menor calidad. Sin embargo, esta variable usualmente no es considerada una variable de operación, debido a que las reservas de carga están



usualmente determinadas por su disponibilidad, la economía de la operación, y las especificaciones del alquilado a ser producido.

- *Relación isobutano/olefina.* Esta es la relación de volumen de isobutano a volumen de olefina en la alimentación al reactor. El volumen de olefina está calculado desde el porcentaje total de volumen de líquido de olefina en la alimentación cruda por el volumen de la alimentación cruda. El volumen de isobutano es la suma de los volúmenes de isobutano en la alimentación de olefina, la alimentación de isobutano del exterior, y la corriente de isobutano recirculado desde la esfera de almacenamiento de isobutano, y la corriente de isobutano de recirculación desde la torre fraccionadora principal. Normalmente la relación isobutano a olefina será mantenida en 12 a 1. Durante periodos de baja alimentación de olefina, la relación isobutano olefina se excederá de las condiciones de diseño de 12 a 1, lo cual tendrá muchos defectos deseables. Esta es la variable más importante del proceso de alquilación y es una de las cuales es más sencillo de controlar.

Incrementado la relación isobutano a olefina tiene varios efectos:

- Se incrementará el volumen de alquilado producido por volumen de olefina cargada.
  - Mejorará la calidad (rango de octanaje) del alquilado.
  - Se incrementará la formación de isoóctanos y consecuentemente disminuirá la formación de ASA, lo cual disminuye los requerimientos de regeneración de ácido.
- *Temperatura de reacción.* La alquilación de butilenos libera alrededor de 300 BTU por libra de alquilado formado. Este calor debe ser removido para controlar la temperatura de reacción. La reacción de alquilación ha sido estudiada sobre el rango de  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $66^{\circ}\text{C}$ , y se ha visto que la calidad del alquilado varía con la temperatura de reacción siendo constantes las otras condiciones.

En estudios de alquilación con butilenos, se ha encontrado que la calidad del alquilado es disminuida por un incremento en la temperatura de reacción.

En estudios de alquilación con propilenos, se ha encontrado que la calidad del alquilado es incrementada por un aumento en la temperatura de reacción pero a un grado menor que el





efecto opuesto sobre butilenos.

Incrementando la temperatura de reacción se incrementa el consumo de ácido debido al incremento de producción de ASA's.

- *Concentración del ácido.* La concentración del ácido es considerada como la aparente acidez titulable del ácido en el reactor. La acidez para estos casos se reporta como por ciento en peso de HF. Un decremento en la acidez es causado por la formación de ASA's y por absorción de agua desde las corrientes de alimentación frescas. La operación apropiada de la unidad regeneradora de ácido reduce estas impurezas. Incrementando la fuerza del ácido, disminuye el consumo de HF como fluoruros orgánicos combinados. Cualquier cambio en la concentración del ácido en el rango de 85–95% tiene un pequeño o no tienen un efecto en la cantidad del alquilado producido.
- *Relación ácido/hidrocarburo en el reactor.* Esta es la relación del volumen de ácido al volumen total de hidrocarburo en la alimentación del reactor. Los efectos de esta variable no son aparentemente apreciables en el rango de reacciones de volúmenes de 1 a 10 de HF por volumen de alimentación de hidrocarburo. La unidad de alquilación está diseñada con una relación de HF a hidrocarburo de 4 a 1.
- *Mezclado en el reactor.* Esta variable no es usualmente considerada como una variable de operación debido a que el operador tiene un control pequeño o no tiene control sobre el grado de mezclado en ningún punto en particular del reactor. Sin embargo, es esencial que los componentes de reacción tengan un buen mezclado para lograr producir un alquilado de alta calidad.

En sistemas de diseño moderno (sin agitadores mecánicos), boquillas de hidrocarburo son proporcionadas para lograr un mezclado íntimo con el ácido, de forma que si los flujos son incrementados, el mezclado se incrementa.

- *Tiempo de reacción.* El tiempo de reacción es el tiempo consumido en el reactor por la alimentación de hidrocarburo. Variando el tiempo de reacción desde 15 segundos a 15 minutos,



no tiene un efecto apreciable en la cantidad o calidad del alquilado producido.

### **2.3.3. Justificación del análisis de riesgos de la planta de alquilación.**

Como ya se ha visto, las sustancias que se manejan en esta planta son de un alto riesgo debido a las características inflamables de éstas; pero sobretodo, el manejo de ácido fluorhídrico en esta planta hace que ésta sea considerada como de alto riesgo debido al carácter altamente tóxico de esta sustancia. Hay que agregar también las condiciones de proceso que se manejan en esta planta, ya que no se encuentran a niveles normales de presión y temperatura.

Todas estas condiciones más aparte las propias de una planta de proceso químico, hacen que sea necesario la realización de un análisis de riesgos de la planta de alquilación para encontrar todas aquellas condiciones que puedan propiciar algún accidente, emitir las recomendaciones o protecciones que disminuyan el riesgo y, en general, llevar a cabo una buena administración de los riesgos encontrados.

El análisis de riesgos se justifica porque con esta herramienta se protege de algún modo a las personas, al medio ambiente y a las instalaciones de la planta además de que es una forma de prever pérdidas económicas de gran magnitud.

**CAPÍTULO III**  
**RESULTADOS DEL**  
**ANÁLISIS DE RIESGOS**



### **3.1. Metodología para el análisis de riesgos de la planta de alquilación.**

Los pasos que se siguieron para efectuar el análisis de riesgos de la planta de alquilación fueron los siguientes:

1. Recopilación de toda la información relacionada con planta de alquilación, en especial, información relacionada con la operación y el proceso de la planta.
2. Recopilación de los diagramas de tubería e instrumentación (DTI) y de flujo de proceso (DFP), así como su actualización y verificación mediante revisión en campo de los mismos.
3. Revisión de los registros históricos de incidentes y/o accidentes, registros de calibración, prueba de líneas y válvulas de relevo (PSV's).
4. Para realizar el análisis HazOp, se procede primero a dividir la planta en circuitos y estos a su vez en nodos, esto se realiza con la ayuda del equipo multidisciplinario.
5. Aplicación de la técnica HazOp a cada nodo seleccionado de acuerdo al método propuesto en la segunda parte del capítulo II.
6. Establecimiento del plan de trabajo para dar seguimiento a las recomendaciones obtenidas durante el análisis HazOp.
7. Identificación de los escenarios de accidentes durante la aplicación de la técnica HazOp.
8. Aplicación de la técnica de análisis de árbol de fallas y análisis de consecuencias, propuestos en la segunda parte del capítulo II, para cada escenario de accidente identificado.
9. Se complementa el análisis de riesgos con el índice DOW, usando la técnica propuesta en la segunda parte del capítulo II, de los equipos seleccionados.

### **3.2. Resultados del análisis HazOp.**

Previo a realizar el análisis HazOp, es necesario contar con los diagramas de tubería e instrumentación (DTI) y de flujo de proceso (DFP) actualizados y que el equipo multidisciplinario haya entendido la operación normal de la planta. La actualización de DTI's y DFP's se hace mediante revisiones o recorridos a la planta junto con el diagrama que involucre la parte donde se esté revisando.

Una vez cubierto lo anterior, se procede a dividir el proceso en circuitos. A su vez, los circuitos serán divididos en nodos. Los nodos, como ya se mencionó, son partes del proceso lo suficientemente pequeños para poderse manejar y lo suficientemente grandes para ser significativos.



La planta de alquilación se dividió en los siguientes circuitos:

- Circuito 1. Pretratamiento (Hidrysom).
- Circuito 2. Reacción.
- Circuito 3. Regeneración de ácido (HF).
- Circuito 4. Tratamiento de ASA's.
- Circuito 5. Fraccionamiento.
- Circuito 6. Alquilado producto.
- Circuito 7. Tratamiento de productos.

Para la descripción de los circuitos, la química del proceso, productos y subproductos del proceso de alquilación se utilizó el manual de operación de la planta. Se revisó también el registro de incidentes, registro de calibración de líneas y los reportes de inspección para la consideración de escenarios de riesgo.

Cada uno de los circuitos se subdivide a su vez en nodos, mismos que fueron analizados mediante el uso de las palabras guía primarias y secundarias; las recomendaciones resultantes de este análisis están listadas en un plan de trabajo o registro de medidas de análisis de riesgos.

El circuito que se seleccionó para el presente trabajo es el circuito de reacción que comprende a partir del mezclador ME-302, los enfriadores/mezcladores EA-311 A/D, el reactor asentador de ácido DA-302, las bombas GA-307 A/B y GA-306A y los tanques FB-301 A/B. La descripción de este circuito se halla en la tercera parte del capítulo anterior en la parte correspondiente a la descripción del proceso.

Los diagramas utilizados para el análisis HazOp, las actas resultantes del mismo y la lista jerarquizada de las desviaciones encontradas se muestran en el anexo II.

### **3.3. Resultados del índice DOW.**

El cálculo del Índice de Fuego y Explosión (IF&E) o índice DOW, es una herramienta que ayuda a determinar las áreas con mayor potencial de pérdida en un proceso en particular. También facilita la predicción del daño físico y la interrupción de la producción que ocurrirían en el caso de un incidente. El



primer paso en la determinación del IF&E requiere el empleo de un procedimiento eficiente y lógico para determinar cuál de las unidades de proceso debe ser estudiada. Una unidad de proceso puede ser definida como cualquier equipo de proceso mayor. En una planta de alquilación se pueden identificar las siguientes unidades de proceso: tanque de descarga de HF FB-302, asentador de ácido DA-302, torre fraccionadora DA-304, defluorinador de propano FA-311, torre regeneradora de ácido DA-303.

Para este trabajo, se selecciona como unidad de proceso al reactor asentador de ácido DA-302 ya que pertenece al circuito que se está estudiando, además de que es el que tiene una mayor capacidad de manejo de hidrocarburos en el circuito. Para la evaluación del índice DOW se utilizó la metodología propuesta en la segunda parte del capítulo II.

En la página siguiente se muestra la hoja de registro con los resultados obtenidos de la aplicación del método para la determinación del índice DOW (Tabla 5.1) y el anexo III muestra el diagrama de localización general de equipo con el área de exposición (AE) que, como ya se mencionó, se trata de un círculo cuyo centro es el equipo DA-302 y que nos dice de modo teórico el área que puede ser afectada por una explosión o un incendio de la unidad de proceso en estudio.

### **3.4. Resultados del análisis de árbol de fallas.**

El árbol de fallas (FTA), como ya se ha mencionado, es una técnica cualitativa y/o cuantitativa de riesgos que permite visualizar las causas que darían origen a un incidente que para efectos de la técnica se le denomina como evento indeseado, evento culminante ó escenario potencial de accidente. El evento culminante se puede dar mediante la combinación de fallas de componentes ó fallas del operador. La técnica FTA usa salidas lógicas, las cuales son representadas por las letras "Y" (que representa el producto) y "O" (que representa la suma).

Primeramente se selecciona un escenario que será el evento tope, para esto se utilizan los resultados del análisis HazOp, posteriormente se justifica la elección del escenario y finalmente se hace el análisis de árbol de fallas del evento tope. Básicamente lo que se pretende obtener con el análisis de árbol de fallas es la probabilidad de ocurrencia del evento tope resolviendo el árbol con el álgebra de Boole y luego se calcula la frecuencia del evento tope; mediante esta técnica se puede decidir si se acepta o no el riesgo; si no se acepta, se aplican protecciones para disminuir el riesgo. La metodología que se siguió



para la construcción del árbol así como su análisis se encuentra en la segunda parte del capítulo II en el apartado correspondiente.

Tabla 3.1 Registro de cálculo del índice DOW.

INDICE DE FUEGO Y EXPLOSIÓN. ASENTADOR DE ÁCIDO DA-302.			
ÁREA/PAÍS MÉXICO	DIVISIÓN PEMEX REFINACIÓN	LOCALIDAD SALINA CRUZ, OAX.	FECHA 2002-12-20
SITIO ALQUILACIÓN	UNIDAD DE MANUFACTURA ALQUILACIÓN	UNIDAD DE PROCESO DA-302	
MATERIALES EN LA UNIDAD DE PROCESO HF, ETANO, PROPANO, ISOBUTANO, N-BUTANO, PENTANOS, ALQUILADO, ASA's, AGUA			
ESTADO DE OPERACIÓN		MATERIAL BÁSICO PARA EL FACTOR MATERIAL	
<input type="checkbox"/> DISEÑO	<input type="checkbox"/> ARRANQUE	<input checked="" type="checkbox"/> OPERACIÓN	<input type="checkbox"/> PARO
ALQUILADO		ALQUILADO	
<b>FACTOR MATERIAL</b>			16
<b>1. Riesgos Generales de Proceso</b>			
<b>Factor Base</b>			1.00
A. Reacciones Químicas Exotérmicas			0.30 a 1.25
B. Procesos Endotérmicos			0.20 a 0.40
C. Manejo y Transferencia de Material			0.25 a 1.05
D. Unidades de Proceso Cerradas o Techadas			0.25 a 0.90
E. Acceso			0.20 a 0.35
F. Drenaje y Control de Derrames			0.25 a 0.50
381,500 gal.			0.25 a 0.50
<b>Factor de Riesgos Generales de Proceso (F<sub>1</sub>)</b>			1.450
<b>2. Riesgos Especiales de Proceso</b>			
<b>Factor Base</b>			1.00
A. Materiales Tóxicos			0.20 a 0.80
B. Presiones Sub-atmosféricas (<500 mmHg)			0.50
C. Operación Dentro o Cerca del Rango de inflamabilidad			
<input type="checkbox"/> Inerte <input checked="" type="checkbox"/> No Inerte			
1. Tanques de almacenamiento de líquidos inflamables			0.50
2. Falla del proceso o Falla en el purgado			0.30
3. Siempre en Rango de Inflamabilidad			0.80
D. Explosiones por Finos			0.25 a 2.00
E. Presión			
Presión de Operación 85 psig			
Presión de Alivio 93 psig			0.381
F. Bajas Temperaturas			0.20 a 0.30
G. Cantidad de Material Inestable o Inflamable			
Cantidad 287,000 lb.			
H <sub>c</sub> = 20'500 BTU/lb			
1. Líquidos y gases en proceso			2.250
2. Líquidos y gases en almacenamiento			0.000
3. Combustibles sólidos en almacenamiento, finos en proceso			0.000
H. Corrosión y Erosión			0.10 a 0.75
I. Fugas en Juntas y Empaques			0.10 a 1.50
J. Uso de Equipo a Fuego Directo			0.000
K. Sistemas de Intercambio de Calor con Aceite Caliente			0.15 a 1.15
L. Equipo Dinámico			0.50
<b>Factor de Riesgos Específicos de Proceso (F<sub>2</sub>)</b>			4.184
<b>Factor de Riesgos de la Unidad de Proceso (F<sub>1</sub> x F<sub>2</sub> = F<sub>3</sub>)</b>			6.066
<b>Índice de Fuego y Explosión (F<sub>3</sub> x FM = IF&amp;E)</b>			97.062
			INTERMEDIO

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Tabla 3.1 Registro de cálculo del índice DOW (continuación).

## FACTORES DE CRÉDITO POR CONTROL DE PÉRDIDAS

1. Factor de Crédito por Control de Proceso ( $C_1$ )

Característica	Rango del Factor de Crédito	Factor de Crédito Usado
a. Poder de Emergencia	0.98	0.98
b. Enfriamiento	0.97 a 0.99	0.98
c. Control de Explosión	0.84 a 0.98	0.90
d. Paro de Emergencia	0.96 a 0.99	0.96
e. Control Computarizado	0.93 a 0.99	0.93
f. Gas Inerte	0.94 a 0.96	1.00
g. Procedimientos/ Guías de Operación	0.91 a 0.99	0.92
h. Revisión de Reactivos Químicos	0.91 a 0.98	0.91
i. Otros Análisis de Riesgos.	0.91 a 0.98	0.92
Valor de $C_1$		0.594

2. Factor de Crédito por el Aislamiento de Material ( $C_2$ )

Característica	Rango del Factor de Crédito	Factor de Crédito Usado
a. Válvulas de Control Remoto	0.96 a 0.98	0.96
b. Vaciado / Desfogue	0.96 a 0.98	0.96
c. Drenaje	0.91 a 0.97	0.92
d. Lógicos de Control	0.98	0.98
Valor de $C_2$		0.831

3. Factor de Crédito por Protección Contra-incendio ( $C_3$ )

Característica	Rango del Factor de Crédito	Factor de Crédito Usado
a. Detección de Fugas	0.94 a 0.98	0.98
b. Acero Estructural	0.95 a 0.98	0.98
c. Suministro de Agua Contra-incendio	0.94 a 0.97	0.94
d. Sistemas Especiales	0.91	0.91
e. Sistemas de Espreas	0.74 a 0.97	0.90
f. Cortinas de Agua	0.97 a 0.98	0.98
g. Espumas	0.92 a 0.97	1.00
h. Extinguidores de Mano	0.93 a 0.98	0.94
i. Protección de Cables	0.94 a 0.98	0.96
Valor de $C_3$		0.654

Factor de Crédito por Control de Pérdidas  $C_1 \times C_2 \times C_3 =$  0.323

## SUMARIO DEL ANÁLISIS DE RIESGOS DE LA UNIDAD DE PROCESO

1. Índice de Fuego y Explosión (IF&E)	97.062	
2. Radio de Exposición (RE)	24.86 m	
3. Área de Exposición (AE)	1941 m <sup>2</sup>	
4. Valor del Área de Exposición (VS)		10.82 \$MM
5. Factor de Daño (FD)	0.55	
6. Daño Base Máximo Probable a la Propiedad – [6 x 7] (MPPD base)		5.951 \$MM
7. Factor de Bonificación por Control de Pérdidas (FB)	0.323	
8. Factor de Bonificación por Control de Pérdidas efectivo (FBE)	0.483	
9. Daño Real Máximo Probable a la Propiedad – [8 x 10] (MPPD real)		2.874 \$MM
10. Días Máximos Probables de Paro de Producción promedio (MPDO)	45 Días	
11. Valor de la producción Mensual (VPM)		5.451 \$MM
12. Interrupción de Negocios (BI)		5.724 \$MM

TESIS CON FALLA DE ORIGEN





### 3.4.1. Selección de escenarios para el análisis de árbol de fallas.

Dado que en este circuito se maneja la mayor cantidad de sustancias de alto riesgo, en especial el manejo de ácido fluorhídrico, algunas de las desviaciones que se hallaron en el análisis HazOp resultaron ser las de mayor riesgo de toda la planta de alquilación. Es por ello que el análisis de árbol de fallas será fundamental para aquellos escenarios que impliquen flujos de HF y que, además, pueda haber una alta probabilidad de incendio o explosión debido a la naturaleza propia de las sustancias manejadas en el circuito. Es importante primero conocer las características u hojas de seguridad de las sustancias que se manejan en el circuito de reacción, para ello, consulte el apéndice D.

De todas las desviaciones encontradas en el análisis HazOp y de acuerdo a la lista jerarquizada de desviaciones del anexo II, se elegirá como evento tope el siguiente: "Fuga e incendio de alquilado en las bombas GA-307 A/B de carga a la fraccionadora DA-304". Dicho evento tope corresponde al escenario 16 de los registros del análisis HazOp.

El escenario que se ha escogido solo muestra la sucesión de causas que desencadenarían el evento culminante de un incendio y/o explosión; esto no quiere decir que dicho evento haya ocurrido, ya que se revisó el registro de incidentes y accidentes de la planta y no se han presentado sucesos de importancia.

Se ha seleccionado este escenario debido a las graves consecuencias que puede ocasionar y que se enumeran a continuación:

1. Fuga incontrolable de sustancias inflamables, corrosivas y tóxicas, provocando daños al personal, medio ambiente e instalaciones.
2. Formación de nube no confinada inflamable, tóxica, corrosiva y explosiva provocando daños al personal, medio ambiente e instalaciones.
3. Explosión y/o incendio.

De los registros del análisis HazOp, este evento presenta un nivel de riesgo tipo B, esto quiere decir que tanto su frecuencia como su gravedad son muy altos.



### 3.4.2. Construcción y análisis del árbol de fallas.

Para que el evento tope tenga lugar, se requieren de dos condiciones necesarias que son: la fuga del alquilado de la bomba GA-307 A/B y que haya un punto de ignición. Para ello, se enlistan las condiciones necesarias para que se lleve a cabo el evento tope:

⇒ La fuga de alquilado puede deberse a:

- Falla o daños de los sellos mecánicos.
- Cavitación de la bomba.
- Falla de las bridas de empalme en la succión y/o en la descarga.
- Ruptura de la línea de descarga.

⇒ El punto de ignición indispensable para que se lleve a cabo el incendio y/o la explosión puede deberse a:

- Sobrecalentamiento del motor.
- Sobrecalentamiento de la bomba.
- Un corto circuito en el motor.

Las condiciones mencionadas a su vez pueden deberse a otras causas, los cuales son desarrollados con mayor amplitud en el árbol de fallas del presente análisis. En el anexo IV.A. se muestra el árbol de fallas ya construido, suponiendo la falla de las protecciones, con las condiciones antes planteadas y su desarrollo gráfico hasta los sucesos básicos, que son considerados las raíces del árbol. La construcción del árbol de fallas se efectuó siguiendo la metodología propuesta en la segunda parte del capítulo II en su respectivo apartado. En la tabla siguiente se listan todos los sucesos básicos obtenidos del árbol de fallas del anexo IV.A. con su respectiva probabilidad de ocurrencia, dicha probabilidad se asigna con la ayuda de la tabla 5.2.



Tabla 3.2 Probabilidad de ocurrencia de los eventos básicos (provenientes del diagrama del anexo IV.A.).

NÚMERO	EVENTO BÁSICO	PROBABILIDAD
B1	Sello inadecuado	1.00E-05
B2	Sello mal instalado	1.00E-05
B3	Flecha desalineada	1.00E-05
B4	Bajo nivel en el DA-302	1.00E-03
B5	Vaporización de la carga	1.00E-03
B6	Acoplamiento inadecuado	1.00E-03
B7	Línea en su límite de retiro	1.00E-05
B8	Alineación inadecuada	1.00E-05
B9	Se sobrepasa presión de diseño	1.00E-03
B10	Válvula check mal instalada	1.00E-03
B11	Desgaste de la línea por corrosión	1.00E-03
B12	Motor mal seleccionado	1.00E-02
B13	Sobrecarga eléctrica	1.00E-05
B14	Falla mantenimiento preventivo	1.00E-03
B15	Falla de mantenimiento de instalaciones eléctricas	1.00E-05
B16	Anclaje o instalación inadecuada	1.00E-09
B17	Taponamiento en el filtro de succión	1.00E-03
B18	Falla del PI-3073 A/B	1.00E-05
B19	Espárragos inadecuados	1.00E-05
B20	Falta de espárragos	1.00E-03
B21	Válvula de control falla en cerrado	1.00E-05
B22	Taponamiento de la línea	1.00E-03
B23	Falla del mantenimiento del sistema de tierras	1.00E-03
B24	Falla de protección antichispa del motor	1.00E-07
B25	Lubricante de mala calidad	1.00E-07
B26	Suministro insuficiente	1.00E-05
B27	El operador no conecta el motor a tierra después de dar mantenimiento.	1.00E-05
B28	Medio de aterrizamiento inadecuado	1.00E-07

Con el árbol ya construido, se puede plantear la función de estructura utilizando las equivalencias de las compuertas "Y" & "O" con sus respectivas operaciones (x & +, respectivamente) y posteriormente, se hace la reducción de la expresión obtenida mediante la aplicación de las reglas del álgebra booleana. A continuación se muestra el desarrollo de la función de estructura para el árbol de fallas del anexo IV.A., desde la formación de los conjuntos de separación hasta la formación de los conjuntos mínimos.

$$P = F1 \times F2 \quad F1 = F3 + F4 + F5 + F6 \quad F2 = F7 + F8 + F9$$

$$P = (F3 + F4 + F5 + F6) \times (F7 + F8 + F9)$$

FALLA DE ORIGEN



$$\begin{aligned}
 F3 &= B1 + B2 + B3 + F10 & F4 &= B4 + B5 + F11 & F5 &= B6 + F12 \\
 F6 &= B7 + B8 + B9 + B10 + B11 & F7 &= B12 + B13 + B14 + F13 \\
 F8 &= B15 + B13 + F14 & F9 &= B3 + F15
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= ((B1 + B2 + B3 + F10) + (B4 + B5 + F11) + (B6 + F12) + (B7 + B8 + B9 + B10 + B11)) \times ((B12 + B13 \\
 &+ B14 + F13) + (B15 + B13 + F14) + (B3 + F15)) \\
 F10 &= B16 + B14 & F11 &= B17 \times B18 & F12 &= B19 + B20 \\
 F13 &= B10 + B21 + B22 & F14 &= B23 + B24 + F16 & F16 &= B27 + B28 \\
 F15 &= B25 + B26
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= ((B1 + B2 + B3 + (B16 + B14)) + (B4 + B5 + (B17 \times B18)) + (B6 + (B19 + B20)) + (B7 + B8 + B9 + \\
 &B10 + B11)) \times ((B12 + B13 + B14 + (B10 + B21 + B22)) + (B15 + B13 + (B23 + B24 + (B27 + B28))) \\
 &+ (B3 + (B25 + B26)))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= (B1 + B2 + B3 + B4 + B5 + B6 + B7 + B8 + B9 + B10 + B11 + B14 + B16 + B19 + B20 + B17 \times B18) \\
 &\times (B3 + B10 + B12 + 2 \times B13 + B14 + B15 + B21 + B22 + B23 + B24 + B25 + B26 + B27 + B28)
 \end{aligned}$$

Efectuando el producto de la ecuación anterior y aplicando las reglas del álgebra de Boole, en especial las de la idempotencia y las de la absorción, y reacomodando términos, resulta en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 P &= (B3) + (B10) + (B14) + (B1 \cdot B12) + (B1 \cdot B13) + (B1 \cdot B15) + (B1 \cdot B21) + (B1 \cdot B22) + (B1 \cdot B23) + (B1 \cdot B24) + (B1 \cdot B25) + \\
 &(B1 \cdot B26) + (B1 \cdot B27) + (B1 \cdot B28) + (B2 \cdot B12) + (B2 \cdot B13) + (B2 \cdot B15) + (B2 \cdot B21) + (B2 \cdot B22) + (B2 \cdot B23) + (B2 \cdot B24) + \\
 &(B2 \cdot B25) + (B2 \cdot B26) + (B2 \cdot B27) + (B2 \cdot B28) + (B4 \cdot B12) + (B4 \cdot B13) + (B4 \cdot B15) + (B4 \cdot B21) + (B4 \cdot B22) + (B4 \cdot B23) + \\
 &(B4 \cdot B24) + (B4 \cdot B25) + (B4 \cdot B26) + (B4 \cdot B27) + (B4 \cdot B28) + (B5 \cdot B12) + (B5 \cdot B13) + (B5 \cdot B15) + (B5 \cdot B21) + (B5 \cdot B22) + \\
 &(B5 \cdot B23) + (B5 \cdot B24) + (B5 \cdot B25) + (B5 \cdot B26) + (B5 \cdot B27) + (B5 \cdot B28) + (B6 \cdot B12) + (B6 \cdot B13) + (B6 \cdot B15) + (B6 \cdot B21) + \\
 &(B6 \cdot B22) + (B6 \cdot B23) + (B6 \cdot B24) + (B6 \cdot B25) + (B6 \cdot B26) + (B6 \cdot B27) + (B6 \cdot B28) + (B7 \cdot B12) + (B7 \cdot B13) + (B7 \cdot B15) + \\
 &(B7 \cdot B21) + (B7 \cdot B22) + (B7 \cdot B23) + (B7 \cdot B24) + (B7 \cdot B25) + (B7 \cdot B26) + (B7 \cdot B27) + (B7 \cdot B28) + (B8 \cdot B12) + (B8 \cdot B13) + \\
 &(B8 \cdot B15) + (B8 \cdot B21) + (B8 \cdot B22) + (B8 \cdot B23) + (B8 \cdot B24) + (B8 \cdot B25) + (B8 \cdot B26) + (B8 \cdot B27) + (B8 \cdot B28) + (B9 \cdot B12) + \\
 &(B9 \cdot B13) + (B9 \cdot B15) + (B9 \cdot B21) + (B9 \cdot B22) + (B9 \cdot B23) + (B9 \cdot B24) + (B9 \cdot B25) + (B9 \cdot B26) + (B9 \cdot B27) + (B9 \cdot B28) + \\
 &(B11 \cdot B12) + (B11 \cdot B13) + (B11 \cdot B15) + (B11 \cdot B21) + (B11 \cdot B22) + (B11 \cdot B23) + (B11 \cdot B24) + (B11 \cdot B25) + (B11 \cdot B26) + \\
 &(B11 \cdot B27) + (B11 \cdot B28) + (B16 \cdot B12) + (B16 \cdot B13) + (B16 \cdot B15) + (B16 \cdot B21) + (B16 \cdot B22) + (B16 \cdot B23) + (B16 \cdot B24) + \\
 &(B16 \cdot B25) + (B16 \cdot B26) + (B16 \cdot B27) + (B16 \cdot B28) + (B19 \cdot B12) + (B19 \cdot B13) + (B19 \cdot B15) + (B19 \cdot B21) + (B19 \cdot B22) + \\
 &(B19 \cdot B23) + (B19 \cdot B24) + (B19 \cdot B25) + (B19 \cdot B26) + (B19 \cdot B27) + (B19 \cdot B28) + (B20 \cdot B12) + (B20 \cdot B13) + (B20 \cdot B15) + \\
 &(B20 \cdot B21) + (B20 \cdot B22) + (B20 \cdot B23) + (B20 \cdot B24) + (B20 \cdot B25) + (B20 \cdot B26) + (B20 \cdot B27) + (B20 \cdot B28) + \\
 &(B17 \cdot B18 \cdot B12) + (B17 \cdot B18 \cdot B13) + (B17 \cdot B18 \cdot B15) + (B17 \cdot B18 \cdot B21) + (B17 \cdot B18 \cdot B22) + (B17 \cdot B18 \cdot B23) + \\
 &(B17 \cdot B18 \cdot B24) + (B17 \cdot B18 \cdot B25) + (B17 \cdot B18 \cdot B26) + (B17 \cdot B18 \cdot B27) + (B17 \cdot B18 \cdot B28)
 \end{aligned}$$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

La ecuación anterior es la representación matemática del árbol de fallas del anexo IV.A. y es con esta ecuación con la que se trabaja en la evaluación de la probabilidad y la frecuencia del evento tope. Para fines del análisis, se muestra a continuación el valor de cada término de la ecuación, denominándose de



ahora en adelante conjuntos mínimos, así como su porcentaje de contribución a la suma total de todos los términos de la ecuación. La suma total corresponde a la probabilidad del evento tope y la frecuencia se calcula utilizando la ecuación 1 que se encuentra en la segunda parte del capítulo II.

Tabla 3.3 Cálculo de conjuntos mínimos y de sus porcentajes de contribución y cálculo de la probabilidad del evento tope (anexo IV.A.).

Núm. de conjunto mínimo	Conjunto mínimo	Probabilidad de ocurrencia	Porcentaje de contribución	Núm. de conjunto mínimo	Conjunto mínimo	Probabilidad de ocurrencia	Porcentaje de contribución
C1	B3	1.00E-05	0.480097	C50	B6*B15	1.00E-08	4.80097E-04
C2	B10	1.00E-03	48.009655	C51	B6*B21	1.00E-08	4.80097E-04
C3	B14	1.00E-03	48.009655	C52	B6*B22	1.00E-06	0.048010
C4	B1*B12	1.00E-07	0.004801	C53	B6*B23	1.00E-06	0.048010
C5	B1*B13	1.00E-10	4.80097E-06	C54	B6*B24	1.00E-10	4.80097E-06
C6	B1*B15	1.00E-10	4.80097E-06	C55	B6*B25	1.00E-10	4.80097E-06
C7	B1*B21	1.00E-10	4.80097E-06	C56	B6*B26	1.00E-08	4.80097E-04
C8	B1*B22	1.00E-08	4.80097E-04	C57	B6*B27	1.00E-08	4.80097E-04
C9	B1*B23	1.00E-08	4.80097E-04	C58	B6*B28	1.00E-10	4.80097E-06
C10	B1*B24	1.00E-12	4.80097E-08	C59	B7*B12	1.00E-07	0.004801
C11	B1*B25	1.00E-12	4.80097E-08	C60	B7*B13	1.00E-10	4.80097E-06
C12	B1*B26	1.00E-10	4.80097E-06	C61	B7*B15	1.00E-10	4.80097E-06
C13	B1*B27	1.00E-10	4.80097E-06	C62	B7*B21	1.00E-10	4.80097E-06
C14	B1*B28	1.00E-12	4.80097E-08	C63	B7*B22	1.00E-08	4.80097E-04
C15	B2*B12	1.00E-07	0.004801	C64	B7*B23	1.00E-08	4.80097E-04
C16	B2*B13	1.00E-10	4.80097E-06	C65	B7*B24	1.00E-12	4.80097E-08
C17	B2*B15	1.00E-10	4.80097E-06	C66	B7*B25	1.00E-12	4.80097E-08
C18	B2*B21	1.00E-10	4.80097E-06	C67	B7*B26	1.00E-10	4.80097E-06
C19	B2*B22	1.00E-08	4.80097E-04	C68	B7*B27	1.00E-10	4.80097E-06
C20	B2*B23	1.00E-08	4.80097E-04	C69	B7*B28	1.00E-12	4.80097E-08
C21	B2*B24	1.00E-12	4.80097E-08	C70	B8*B12	1.00E-07	0.004801
C22	B2*B25	1.00E-12	4.80097E-08	C71	B8*B13	1.00E-10	4.80097E-06
C23	B2*B26	1.00E-10	4.80097E-06	C72	B8*B15	1.00E-10	4.80097E-06
C24	B2*B27	1.00E-10	4.80097E-06	C73	B8*B21	1.00E-10	4.80097E-06
C25	B2*B28	1.00E-12	4.80097E-08	C74	B8*B22	1.00E-08	4.80097E-04
C26	B4*B12	1.00E-05	0.480097	C75	B8*B23	1.00E-08	4.80097E-04
C27	B4*B13	1.00E-08	4.80097E-04	C76	B8*B24	1.00E-12	4.80097E-08
C28	B4*B15	1.00E-08	4.80097E-04	C77	B8*B25	1.00E-12	4.80097E-08
C29	B4*B21	1.00E-08	4.80097E-04	C78	B8*B26	1.00E-10	4.80097E-06
C30	B4*B22	1.00E-06	0.048010	C79	B8*B27	1.00E-10	4.80097E-06
C31	B4*B23	1.00E-06	0.048010	C80	B8*B28	1.00E-12	4.80097E-08
C32	B4*B24	1.00E-10	4.80097E-06	C81	B9*B12	1.00E-05	0.480097
C33	B4*B25	1.00E-10	4.80097E-06	C82	B9*B13	1.00E-08	4.80097E-04
C34	B4*B26	1.00E-08	4.80097E-04	C83	B9*B15	1.00E-08	4.80097E-04
C35	B4*B27	1.00E-08	4.80097E-04	C84	B9*B21	1.00E-08	4.80097E-04
C36	B4*B28	1.00E-10	4.80097E-06	C85	B9*B22	1.00E-06	0.048010
C37	B5*B12	1.00E-05	0.480097	C86	B9*B23	1.00E-06	0.048010
C38	B5*B13	1.00E-08	4.80097E-04	C87	B9*B24	1.00E-10	4.80097E-06
C39	B5*B15	1.00E-08	4.80097E-04	C88	B9*B25	1.00E-10	4.80097E-06
C40	B5*B21	1.00E-08	4.80097E-04	C89	B9*B26	1.00E-08	4.80097E-04
C41	B5*B22	1.00E-06	0.048010	C90	B9*B27	1.00E-08	4.80097E-04
C42	B5*B23	1.00E-06	0.048010	C91	B9*B28	1.00E-10	4.80097E-06
C43	B5*B24	1.00E-10	4.80097E-06	C92	B11*B12	1.00E-05	0.480097
C44	B5*B25	1.00E-10	4.80097E-06	C93	B11*B13	1.00E-08	4.80097E-04
C45	B5*B26	1.00E-08	4.80097E-04	C94	B11*B15	1.00E-08	4.80097E-04
C46	B5*B27	1.00E-08	4.80097E-04	C95	B11*B21	1.00E-08	4.80097E-04
C47	B5*B28	1.00E-10	4.80097E-06	C96	B11*B22	1.00E-06	0.048010
C48	B6*B12	1.00E-05	0.480097	C97	B11*B23	1.00E-06	0.048010
C49	B6*B13	1.00E-08	4.80097E-04	C98	B11*B24	1.00E-10	4.80097E-06

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Tabla 3.3 Cálculo de conjuntos mínimos y de sus porcentajes de contribución y cálculo de la probabilidad del evento tope (continuación).

Núm. de conjunto mínimo	Conjunto mínimo	Probabilidad de ocurrencia	Porcentaje de contribución	Núm. de conjunto mínimo	Conjunto mínimo	Probabilidad de ocurrencia	Porcentaje de contribución
C99	B11*B25	1.00E-10	4.80097E-06	C123	B19*B27	1.00E-10	4.80097E-06
C100	B11*B26	1.00E-08	4.80097E-04	C124	B19*B28	1.00E-12	4.80097E-08
C101	B11*B27	1.00E-08	4.80097E-04	C125	B20*B12	1.00E-05	0.480097
C102	B11*B28	1.00E-10	4.80097E-06	C126	B20*B13	1.00E-08	4.80097E-04
C103	B16*B12	1.00E-11	4.80097E-07	C127	B20*B15	1.00E-08	4.80097E-04
C104	B16*B13	1.00E-14	4.80097E-10	C128	B20*B21	1.00E-08	4.80097E-04
C105	B16*B15	1.00E-14	4.80097E-10	C129	B20*B22	1.00E-06	0.048010
C106	B16*B21	1.00E-14	4.80097E-10	C130	B20*B23	1.00E-06	0.048010
C107	B16*B22	1.00E-12	4.80097E-08	C131	B20*B24	1.00E-10	4.80097E-06
C108	B16*B23	1.00E-12	4.80097E-08	C132	B20*B25	1.00E-10	4.80097E-06
C109	B16*B24	1.00E-16	4.80097E-12	C133	B20*B26	1.00E-08	4.80097E-04
C110	B16*B25	1.00E-16	4.80097E-12	C134	B20*B27	1.00E-08	4.80097E-04
C111	B16*B26	1.00E-14	4.80097E-10	C135	B20*B28	1.00E-10	4.80097E-06
C112	B16*B27	1.00E-14	4.80097E-10	C136	B17*B18*B12	1.00E-10	4.80097E-06
C113	B16*B28	1.00E-16	4.80097E-12	C137	B17*B18*B13	1.00E-13	4.80097E-09
C114	B19*B12	1.00E-07	0.004801	C138	B17*B18*B15	1.00E-13	4.80097E-09
C115	B19*B13	1.00E-10	4.80097E-06	C139	B17*B18*B21	1.00E-13	4.80097E-09
C116	B19*B15	1.00E-08	4.80097E-04	C140	B17*B18*B22	1.00E-11	4.80097E-07
C117	B19*B21	1.00E-10	4.80097E-06	C141	B17*B18*B23	1.00E-11	4.80097E-07
C118	B19*B22	1.00E-08	4.80097E-04	C142	B17*B18*B24	1.00E-15	4.80097E-11
C119	B19*B23	1.00E-08	4.80097E-04	C143	B17*B18*B25	1.00E-15	4.80097E-11
C120	B19*B24	1.00E-12	4.80097E-08	C144	B17*B18*B26	1.00E-13	4.80097E-09
C121	B19*B25	1.00E-12	4.80097E-08	C145	B17*B18*B27	1.00E-13	4.80097E-09
C122	B19*B26	1.00E-10	4.80097E-06	C146	B17*B18*B28	1.00E-15	4.80097E-11
					<b>TOTAL</b>	<b>2.08291E-03</b>	<b>100</b>

El número de conjuntos mínimos que se obtuvieron, como se puede apreciar, es de 146; de los cuales 3 son conjuntos de primer orden o de un solo evento básico, 132 son conjuntos de segundo orden o de dos eventos básicos y 11 son conjuntos de tercer orden o de tres eventos básicos. Los conjuntos mínimos que principalmente contribuyen al total son el C2 y el C3 que corresponden a conjuntos mínimos de primer orden; en cambio, los conjuntos mínimos que poco contribuyen al total son el C109, C110 y C113 que corresponden a conjuntos mínimos de segundo orden.

La probabilidad de ocurrencia del evento tope es de  $2.08291 \times 10^{-3}$  con una frecuencia de  $2.08509 \times 10^{-3}$  eventos por año si consideramos que en la ecuación 1 el tiempo  $t$  es igual a un año. Cabe recordar que el cálculo de la probabilidad y la frecuencia se hizo suponiendo la falla de todas protecciones del sistema considerado.

### 3.5. Resultados del análisis de consecuencias.

La mayoría de los accidentes en plantas de alquilación son resultado de derrames de materiales

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



tóxicos, inflamables, corrosivos y explosivos. Por ejemplo, un material es descargado por orificios ocasionados por daños en el material de los tanques, por fugas en bridas, en sellos de bombas, en partes internas de válvulas y una gran variedad de fuentes.

Los modelos matemáticos simulan la descarga de estos materiales, generando información muy útil para determinar las consecuencias de suscitarse un accidente, incluyendo la velocidad de descarga del material, la cantidad total que es descargada, y el estado físico del material descargado. Esta información es valiosa para evaluar el diseño de nuevos procesos y en el caso de procesos en operación evalúa los sistemas de seguridad existentes en la instalación. Los modelos están constituidos por ecuaciones empíricas o fundamentos que representan el proceso fisicoquímico que ocurre durante la descarga de un material.

Frecuentemente los resultados son sólo estimados desde las propiedades físicas, por lo que la mayoría de los modelos tienden a maximizar la tasa de descarga y la cantidad descargada. Esto asegura que la modelación se encuentra "del lado seguro".

Para el análisis de eventos en la planta de alquilación se utilizó un software especializado para simular los eventos y determinar los radios de afectación, conocido como PHAST (Process Hazard Analysis Safety Tool) versión 6.0. Este software ha sido aceptado en México por el Instituto Nacional de Ecología (INE), en los Estados Unidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA), para la determinación de consecuencias en una evaluación de riesgo. También se utilizó el programa ARCHIE (Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation) versión 1.0 como complemento para el análisis de consecuencias.

El escenario de riesgo que se escogió para el análisis de consecuencias será el mismo que se usó para el análisis de árbol de fallas y que es: "Fuga e incendio de alquilado en las bombas GA-307 A/B de carga a la fraccionadora DA-304". Los eventos que se evaluaron como consecuencia del escenario de riesgo considerado y de acuerdo a las características físicas y químicas del alquilado son los siguientes:

- Dispersión de una nube de alquilado.
- Evaluación de un dardo de fuego o "jet fire".
- Evaluación del incendio de una nube de vapor de alquilado no confinado.



- Evaluación de la explosión de una nube de vapor de alquilado no confinado.
- Evaluación de la explosión de alquilado descargado.

Previo a la evaluación de estos eventos, se requiere haber estimado la rapidez de descarga de la fuga así como el flujo másico, volumétrico y molar de la fuga.

Para la simulación de los eventos, se plantearon una serie de consideraciones que servirán para la obtención de resultados confiables:

1. Para la generación de eventos se utilizaron las siguientes fuentes:
  - a) Los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología HazOp.
  - b) La estadística de incidentes y accidentes de la planta de Alquilación.
2. Las composiciones de las mezclas generadas para este estudio así como algunas propiedades físicas y químicas de las mismas fueron tomadas de los balances de materia de diseño entregados por el licenciador Phillips Petroleum Company. Algunas otras propiedades fueron obtenidas mediante programas y ecuaciones de estimación de propiedades. A continuación, se muestra en la tabla 5.4 las características de la corriente que se tomará como base para la simulación de los eventos antes mencionados.

Tabla 3.4 Propiedades de la corriente de alquilado.

Componentes	Fórmula	Masa molecular	Flujo másico (kg/h)	Flujo molar (kgmol/h)	Fracción mol
Ácido fluorhídrico	HF	20	4,919.00	245.950	0.029560
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.07	104.50	3.475	0.000418
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	15,793.90	358.163	0.043046
Isobutano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	325,463.0	5599.460	0.672980
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	62,720.10	1079.074	0.129690
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.151	70,885.80	982.465	0.118079
2,2,4-Trimetilpentano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.232	5,918.90	51.815	0.006227
Propiedades del alquilado					
Flujo total másico (kg/h):	485,805.20	Capacidad calorífica (kcal/kg °C):	0.6279		
Flujo total molar (kgmol/h):	8,320.40	Viscosidad (cP):	0.1242		
Masa molecular:	58.3872	Conductividad térmica (kcal/h m °C):	0.0808		
Densidad (kg/m³):	550.089	Calor de combustión (BTU/lb):	19,336.62		
Temperatura crítica (K):	421.147	Coefficiente $\gamma$ (Cp/Cv):	1.0573		
Presión crítica (atm):	37.946	L.S.I. (% en volumen):	8.7037		
Temp. de burbuja a 1 atm (°F):	13.92069	L.I.I. (% en volumen):	1.7259		
Presión de vapor a 27°C (bar):	3.401435	TLV (ppm):	3		

TESS CON  
FALLA DE ORIGEN





3. Las condiciones de presión y temperatura se tomaron de los diagramas de flujo de proceso y que son de 10.35 bar (presión absoluta) y 48.2°C.
4. Adicionalmente, para realizar las simulaciones en el programa PHAST y el ARCHIE se tomaron las siguientes consideraciones:
  - a) El orificio formado por corrosión en bridas, sellos de las válvulas y en las líneas analizadas es de forma regular y de un diámetro determinado. El diámetro equivalente del orificio varía desde 3.17 mm (0.125") hasta 12.70 mm (0.5"); para todos los escenarios se considera una fuga de 0.50" por corrosión debido a las condiciones del proceso.
  - b) Se contempló un tiempo máximo para la detección y control de la fuga de 30 minutos, tomando en cuenta las siguientes consideraciones: tiempo máximo para la detección del evento por parte del personal de PEMEX y tiempo que ocupa el personal de mantenimiento u operación para llegar al lugar exacto de la fuga y controlarla.
  - c) Básicamente se consideraron tres condiciones ambientales: en la primera, se tomó una velocidad del viento de 6 m/s con estabilidad ambiental clase F por ser las condiciones meteorológicas para el peor escenario, de acuerdo con el INE y con el "RMP Offsite Consequence Analysis" de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA); en la segunda se utilizó la velocidad del viento promedio de la región de 9.7 m/s, con estabilidad ambiental clase D por ser las características promedio del sitio más favorables para generar eventos de riesgo y como tercera condición se utilizó la velocidad de 5.0 m/s con estabilidad ambiental clase D, por ser las características promedio menos favorables para generar eventos de riesgo (vea apéndice E sobre estabilidad ambiental).
  - d) Se consideró una temperatura ambiental media del área de 27°C, una presión atmosférica de 1 atm y una humedad relativa media anual de 78%.
  - e) Los radios que se presentan en caso de un evento de antorcha o chorro de fuego, se determinaron a partir de la evaluación de diferentes flujos térmicos, los cuales se indican en la tabla 5.5, y de los diferentes niveles de sobrepresión que se muestran en la tabla 5.6.



Tabla 3.5 Niveles de radiación.

Radiación	Descripción
1.4 kW/m <sup>2</sup> (440 BTU/h*ft <sup>2</sup> )	Es el flujo térmico equivalente al del sol en verano y al medio día. Este límite se considera como <b>zona de seguridad</b> .
5.0 kW/m <sup>2</sup> (1,268 BTU/h*ft <sup>2</sup> )	Nivel de radiación térmica suficiente para causar daños al personal si no se protege adecuadamente en 20 segundos, sufriendo quemaduras hasta de 2do grado sin la protección adecuada. Esta radiación será considerada como límite de <b>zona de amortiguamiento</b> .
12.5 kW/m <sup>2</sup> (3,963 BTU/h*ft <sup>2</sup> )	Es la energía mínima requerida para la ignición pilotada de la madera y fundición de tubería de plástico. Con 1% de letalidad en 1 minuto. Esta radiación se considerará para el personal y las instalaciones como <b>zona de alto riesgo</b> .

Fuente: Chemical Process Safety. Fundamentals with Applications; Crow/Louvar, Prentice Hall, 1990

Tabla 3.6 Niveles de sobrepresión.

Presión	Descripción
0.5 psi (0.02 bar)	La sobrepresión a la que se presentan rupturas del 10% de ventanas de vidrio y algunos daños a techos; este nivel tiene la probabilidad del 95% de que no ocurran daños serios. Esta área se considerará como límite de la <b>zona de salvaguarda</b> .
1 psi (0.13 bar)	Es la presión en la que se presenta destrucción parcial de casas y daños reparables a edificios; provoca el 1% de ruptura de timpanos y el 1% de heridas serias por proyectiles. De 0,5 a 1 lb/in <sup>2</sup> se considerará como la <b>zona de amortiguamiento</b> .
2 psi (0.20 bar)	A esta presión se presenta el colapso parcial de techos y paredes de casas. De 1 a 2 lb/in <sup>2</sup> se considera como la <b>zona de exclusión (riesgo)</b> .

Fuente: Chemical Process Safety. Fundamentals with Applications; Crow/Louvar, Prentice Hall, 1990

A continuación se muestran los resultados de la simulación de los eventos seleccionados.

### 3.5.1. Estimación de la rapidez de descarga de la fuga.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De la introducción de los datos requeridos por el programa, se obtiene que la fuga de alquilado de los sellos de la bomba GA-307 A/B tendrá una rapidez de 36.12 m/s (118.52 ft/s), que equivale a un flujo másico de 2.52 kg/s (332.97 lb/min). Por las condiciones de operación a las que se encuentra el alquilado, se prevé que al salir a la atmósfera, el alquilado se encontrará en fase vapor junto con una fase líquida en forma de spray. Considerando que el tiempo de detección y control de la fuga es de 30 minutos (1800 s), se habrán fugado 4530.97 kg (9,989.07 lb) de alquilado en ese tiempo y con la rapidez de descarga estimada. La rapidez de descarga de la fuga se utilizará para las posteriores simulaciones de los eventos.



### 3.5.2. Evaluación de la dispersión de una nube de alquilado.

De acuerdo con las condiciones del alquilado después de haberse fugado, se puede considerar como posible el evento de la dispersión de una nube de alquilado si se supone que no hay fuentes de ignición cercanas a la nube. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 3.7 Resultados obtenidos de la dispersión de una nube tóxica.

Dispersión de una nube tóxica de alquilado		Distancias y concentraciones						
		(m) (ft) (ppm)	(m) (ft) (ppm)	(m) (ft) (ppm)	(m) (ft) (ppm)	(m) (ft) (ppm)	(m) (ft) (ppm)	(m) (ft) (ppm)
CATEGORÍAS	6 m/s, F	30.48	2,926.99	4,858.21	6,789.12	8,720.02	10,650.93	13,547.45
		100	9603	15,939	22,274	28,609	34,944	44,447
		61,479	23.8	11.7	7.4	5.3	4.1	3.1
	9.7 m/s, D	30.48	644.04	1,052.78	1,461.82	1,870.56	2,279.60	2,892.86
		100	2,113	3,454	4,796	6,137	7,479	9,491
		8,936	35	15.4	9	6.1	4.4	3
	5 m/s, D	30.48	972.62	1,600.81	2,229	2,856.89	3,485.08	4,427.22
		100	3,191	5,252	7,313	9,373	11,434	14,525
		17,329	34	15	8.8	6	4.4	3.1

Se puede apreciar que para el peor escenario (6 m/s, F), la distancia a la cual se puede considerar una zona segura es más allá de los 13.55 km. Para las condiciones promedio de la zona (9.7 m/s, D), la distancia de la zona de seguridad se reduce notablemente a unos 2.9 km. Por último, para las condiciones menos favorables de que suceda tal evento (5 m/s, D), la distancia a la cual se considera como zona de seguridad es de 4.43 km. El tiempo considerado fue de 30 minutos desde el inicio de la fuga. Suponiendo que se traten de áreas circulares, se representarán en un plot-plan las zonas de concentración para las condiciones promedio del ambiente (ver anexo V.A.).

### 3.5.3. Evaluación de un dardo de fuego o "jet fire".

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De acuerdo con las condiciones del alquilado a la salida, se puede evaluar el evento de dardo de fuego o "jet fire" con los siguientes radios de afectación obtenidos mediante simulación.

Se observa que para las peores condiciones (6 m/s, F), la zona de amortiguamiento se encuentra a una distancia de 44.55 m; para las condiciones promedio (9.7 m/s, D), la zona de amortiguamiento se encuentra a 43.09 m y para las condiciones menos favorables (5 m/s, D), la zona de amortiguamiento



se encuentra a 45.58 m. Para las tres condiciones, la radiación que se puede recibir a estas distancias puede provocar al personal quemaduras de 2do grado si permanece más de 20 segundos.

Tabla 3.8 Resultados obtenidos de un dardo de fuego.

Dardo de fuego o "jet fire"		Radiación (kW/m <sup>2</sup> )						Longitud alcanzada por el jet fire	
		1.4		5.0		12.5			
		Distancia						m	ft
		m	ft	m	ft	m	ft		
CATEGORIAS	6 m/s, F	58.412	191.64	44.547	146.16	38.431	126.09	29.41	96.49
	9.7 m/s, D	57.401	188.32	43.092	141.38	36.736	120.53	27.45	90.06
	5 m/s, D	59.269	194.45	45.582	149.55	39.531	129.70	30.66	100.59

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

La zona de seguridad se encuentra a 58.41 m, 57.40 m y 59.27 m para las condiciones de 6 m/s (F), 9.7 m/s (D) y 5m/s (D) respectivamente; en estas zonas, la radiación equivale al sol de medio día por lo que ya no existe el riesgo de quemaduras de cualquier grado. Por debajo de los 40 m, para las tres condiciones ambientales, la radiación es muy alta, por lo que se considera ya una zona de alto riesgo. En el anexo V.B. se muestran las distintas zonas de radiación en un plot-plan de la planta de alquilación para las condiciones promedio de la zona.

### 3.5.4. Evaluación del incendio y explosión de una nube de vapor no confinada.

Suponiendo que la nube de alquilado formada encuentre una fuente de ignición, se puede evaluar el incendio de una nube de vapor no confinada. El rendimiento de la explosión se consideró en un 15%. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 3.9 Resultados obtenidos del incendio de una nube de vapor no confinada.

Incendio de una nube de vapor no confinada		Concentración (ppm)											
		½ L.I.I. (8,629.5)						L.I.I. (17,259)					
		Distancia máxima de riesgo		Amplitud máxima de la zona de riesgo		Masa del gas en el aire		Distancia máxima de riesgo		Amplitud máxima de la zona de riesgo		Masa del gas en el aire	
		m	ft	m	ft	kg	lb	m	ft	m	ft	kg	lb
CATEGORIAS	6 m/s, F	139.6	458	125.6	412	58.97	130	96.01	315	86.56	284	40.37	89
	9.7 m/s, D	82.91	272	41.45	136	21.77	48	56.99	187	28.65	94	14.97	33
	5 m/s, D	82.91	272	41.45	136	41.73	92	56.99	187	28.65	94	29.03	64



Tabla 3.10 Resultados obtenidos de la explosión de una nube de vapor no confinada.

Explosión de una nube de vapor no confinada	Sobrepresión (psi)						
	0.5		1.0		2.0		
	Distancia						
	m	ft	m	ft	m	ft	
CATEGORÍAS	6 m/s, F	123.32	404.59	70.85	232.44	41.70	136.82
	9.7 m/s, D	88.59	290.66	50.90	166.99	29.96	98.29
	5 m/s, D	110.48	362.47	63.47	208.24	37.36	122.57

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

De la bomba y hasta una distancia de 29.96 m se considera zona de alto riesgo para el personal que se encuentre en el área; por la sobrepresión de 2 psi, las afectaciones son catastróficas para los equipos de la sección de reacción de la planta de alquilación, área de tanques y área de tratamiento de efluentes. De 29.96 m y hasta 50.90 m se afectarían básicamente los instrumentos de campo; los daños al personal de la planta que se encuentre dentro de este radio pueden ser la ruptura de tímpanos y heridas serias por proyectiles. De 50.90 m a 88.59 m se considera como zona de salvaguarda con daños menores a los equipos. En el anexo V.C. se muestra el plot-plan con las regiones de inflamabilidad y en el anexo V.D. se muestra el plot-plan con las distintas zonas de sobrepresión para las condiciones promedio de la zona.

A continuación se muestra en las tablas 5.11 (a, b y c) los daños esperados por la explosión de la nube de vapor no confinado para las tres condiciones ambientales consideradas. Para todos los casos se considero un rendimiento de explosión del 15%.

 Tabla 3.11a Daños esperados para la explosión de una nube de vapor no confinada.  
 Estabilidad atmosférica = F, velocidad del viento = 6 m/s, peso del gas en el aire = 89 lb

Distancia de la explosión		Daño esperado de la explosión
m	ft	
1,221.33	4007	Rompimiento ocasional de ventanas bajo tensión o esfuerzo.
172.21	565	Algunos daños a techos interiores de casas; 10% de las ventanas rotas.
64.31 - 111.56	211 - 366	Ventanas usualmente fragmentadas; algunos marcos dañados.
64.31	211	Demolición parcial de casas; inhabitables.
16.76 - 64.31	55 - 211	Rango de daños serios/leves por la proyección de vidrios/objetos.
39.01	128	Colapso parcial de muros/techos exteriores de casas.
29.57 - 39.01	97 - 128	Muros de concreto no reforzado cuarteados.
13.41 - 34.44	44 - 113	Rango de ruptura de tímpano del 90-1% de la población expuesta.
33.53	110	Destrucción del 50% de las casas hechas con ladrillo.
24.69 - 29.57	81 - 97	Daños a los paneles de acero de los edificios.
21.64	71	Daños a cimientos de construcciones cercanas.
17.98 - 21.64	59 - 71	Completa destrucción de las casas.
14.63	48	Probable destrucción total de construcciones.
8.84 - 12.19	29 - 40	Rango de 99-1% de muerte de la población expuesta debido a los efectos directos de la explosión



Tabla 3.11b Daños esperados para la explosión de una nube de vapor no confinada.

Estabilidad atmosférica = D, velocidad del viento = 9.7 m/s, peso del gas en el aire = 33 lb		
Distancia de la explosión		Daño esperado de la explosión
m	ft	
877.52	2,879	Rompimiento ocasional de ventanas bajo tensión o esfuerzo.
123.75	406	Algunos daños a techos interiores de casas; 10% de las ventanas rotas.
46.33 - 80.16	152 - 263	Ventanas usualmente fragmentadas; algunos marcos dañados.
46.33	152	Demolición parcial de casas; inhabitables.
11.89 - 46.33	39 - 152	Rango de daños serios/leves por la proyección de vidrios/objetos.
28.04	92	Colapso parcial de muros/techos exteriores de casas.
21.34 - 28.04	70 - 92	Muros de concreto no reforzado cuarteados.
9.75 - 24.69	32 - 81	Rango de ruptura de timpano del 90-1% de la población expuesta.
24.08	79	Destrucción del 50% de las casas hechas con ladrillo.
17.98 - 21.34	59 - 70	Daños a los paneles de acero de los edificios.
15.54	51	Daños a cimientos de construcciones cercanas.
12.80 - 15.54	42 - 51	Completa destrucción de las casas.
10.67	35	Probable destrucción total de construcciones.
6.4 - 8.84	21 - 29	Rango de 99-1% de muerte de la población expuesta debido a los efectos directos de la explosión

Tabla 3.11c Daños esperados para la explosión de una nube de vapor no confinada.

Estabilidad atmosférica = D, velocidad del viento = 5 m/s, peso del gas en el aire = 64 lb		
Distancia de la explosión		Daño esperado de la explosión
m	ft	
1,094.23	3590	Rompimiento ocasional de ventanas bajo tensión o esfuerzo.
154.23	506	Algunos daños a techos interiores de casas; 10% de las ventanas rotas.
57.61 - 99.97	189 - 328	Ventanas usualmente fragmentadas; algunos marcos dañados.
57.61	189	Demolición parcial de casas; inhabitables.
14.94 - 57.61	49 - 189	Rango de daños serios/leves por la proyección de vidrios/objetos.
34.75	114	Colapso parcial de muros/techos exteriores de casas.
26.52 - 34.75	87 - 114	Muros de concreto no reforzado cuarteados.
11.89 - 30.79	39 - 101	Rango de ruptura de timpano del 90-1% de la población expuesta.
29.87	98	Destrucción del 50% de las casas hechas con ladrillo.
22.25 - 26.52	73 - 87	Daños a los paneles de acero de los edificios.
19.51	64	Daños a cimientos de construcciones cercanas.
16.15 - 19.51	53 - 64	Completa destrucción de las casas.
13.11	43	Probable destrucción total de construcciones.
7.92 - 10.97	26 - 36	Rango de 99-1% de muerte de la población expuesta debido a los efectos directos de la explosión

### 3.5.5. Evaluación de la explosión de alquilado descargado.

Si se considera la posibilidad de que todo el material descargado (4,530.97 kg) por la fuga en el lapso de 30 minutos llegará a explotar, se obtienen los siguientes resultados (se considero como rendimiento de explosión un 15%):

Tabla 3.12 Resultados obtenidos de la explosión del alquilado descargado.

Explosión del alquilado descargado	Sobrepresión (psi)					
	0.5		1.0		2.0	
	Distancia					
	m	ft	m	ft	m	ft
Para todas las condiciones	594.85	1,951.6	341.74	1,121.2	201.16	659.96





Se puede observar que la zona de alto riesgo se encuentra a una distancia de las bombas GA-307 de 201.16 m; dentro de esta zona se presenta la máxima probabilidad de muerte y la segura destrucción de instalaciones. La zona de amortiguamiento se ubica de los 201.16 m hasta los 341.74 m; aquí solamente se presenta el rompimiento de tímpanos para el personal así como heridas por proyectiles, la destrucción de instalaciones se presenta de forma parcial. La zona de seguridad se halla a partir de los 341.74 m y hasta los 594.85 m; dentro de esta zona solamente se presentan daños menores tanto a instalaciones como a personas.

A continuación se muestra en la tabla 5.13 los daños esperados por la explosión del alquilado descargado. Se considero un rendimiento de explosión del 15%.

Tabla 3.13 Daños esperados de la explosión del alquilado descargado.

Distancia de la explosión		Daño esperado de la explosión
m	ft	
11,087.40	36,376	Rompimiento ocasional de ventanas bajo tensión o esfuerzo.
1,562.41	5,126	Algunos daños a techos interiores de casas; 10% de ventanas rotas.
583.08 - 1,011.33	1,913 - 3,318	Ventanas usualmente fragmentadas; algunos marcos dañados.
583.08	1,913	Demolición parcial de casas; inhabitables.
149.66 - 583.08	491 - 1,913	Rango de daños serios/leves por la proyección de vidrios/objetos.
351.74	1,154	Colapso parcial de muros/techos exteriores de casas.
268.53 - 351.74	881 - 1,154	Muros de concreto no reforzado cuarteados.
119.79 - 310.9	393 - 1,020	Rango de ruptura de timpano del 90-1% de la población expuesta.
302.36	992	Destrucción del 50% de las casas hechas con ladrillo.
224.03 - 268.53	735 - 881	Daños a los paneles de acero de los edificios.
195.68	642	Daños a cimientos de construcciones cercanas.
161.24 - 195.68	529 - 642	Completa destrucción de las casas.
132.89	436	Probable destrucción total de construcciones.
79.55 - 109.73	261 - 360	Rango de 99-1% de muerte de la población expuesta debido a los efectos directos de la explosión

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**CAPÍTULO IV  
CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES**





#### **4.1. Conclusiones y recomendaciones del análisis HazOp.**

Por medio del análisis HazOp se ubicaron 29 escenarios de riesgo en el circuito de reacción de la planta de alquilación, los cuales, por su nivel de riesgo se dividen en los siguientes rubros: 7 escenarios de riesgo tipo B, 12 escenarios de riesgo tipo C y 10 escenarios de riesgo tipo D. En estos escenarios ya están contempladas las protecciones, por lo que el nivel de riesgo ya incluye este aspecto; es decir, los escenarios de riesgo tipo B eran de tipo A sin protecciones, del mismo modo sucede con los otros tipos de escenario de riesgo. En los registros del análisis HazOp del anexo II.C. se muestra para cada escenario el nivel de riesgo con y sin protecciones.

Cabe recordar que los escenarios de riesgo tipo A son inaceptables por lo que las recomendaciones que se emitan para su mitigación se deben aplicar de forma inmediata y deben ocupar el primer lugar en su realización. Para los escenarios de riesgo tipo B, siendo escenarios indeseables, las recomendaciones que se emitan para su mitigación se pueden aplicar en un lapso de tiempo mayor e incluso, con un estudio de costo-beneficio, decidir si algunas de ellas se aplican o no. Para los escenarios de riesgo tipo C, las recomendaciones que se emitan para su mitigación no son de aplicación urgente, por lo que en algunas ocasiones requerirán de un estudio costo-beneficio para determinar si se aplican o no; incluso, los escenarios de riesgo tipo C se pueden aceptar tal y como están. Por último, los escenarios de riesgo tipo D no requieren de medidas o recomendaciones urgentes, ya que por su nivel tan bajo de riesgo, no implican ningún problema futuro para la planta; únicamente se recomienda seguir con los controles habituales para evitar que estos riesgos suban de nivel.

A continuación, en la tabla 6.1, se muestra una lista de recomendaciones ordenada de forma jerarquizada de acuerdo al nivel de riesgo; lo anterior significa que la primera recomendación de la lista se debe aplicar de forma inmediata y así sucesivamente con las demás recomendaciones. Se emitieron un total de 43 recomendaciones, muchas de ellas son de carácter operativo y de mantenimiento, algunas otras recomendaciones son de carácter administrativo (manuales y procedimientos). En la sección de reacción de la planta de alquilación se presentaron los escenarios de mayor nivel de riesgo, por lo que las recomendaciones que se hayan emitido se deben aplicar dentro de los tiempos marcados.



Tabla 4.1 Lista jerarquizada de recomendaciones para la mitigación de riesgos.

Nivel	Escenarios	Recomendaciones
B	15, 16, 18, 19, 21	1. Modernizar los detectores de HF que deberán ser selectivos, para que no detecten otros compuestos.
B	15, 16, 17, 18, 19, 21	2. Continuar con el programa de mantenimiento de los detectores de ácido fluorhídrico.
B	5, 6, 7, 11, 12, 18, 19, 21	3. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento del personal en la toma de decisiones.
B	15, 16, 17, 18, 19, 21	4. Relocalizar el tablero de control local del sistema de mitigación de la planta.
B	15, 16, 17, 18, 19, 21	5. Continuar con el mantenimiento a las luces de emergencia (niveles de contaminación).
B	15, 16, 17, 18	6. Instalar válvulas de corte rápido en la succión de las bombas GA-307 A/B.
B	15	7. Instalar en la recirculación a la torre de enfriamiento EF-300 una válvula reguladora de presión, para mantener una presión constante en el cabezal de agua de enfriamiento del sistema de mitigación.
B	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	8. Ampliar el sistema del circuito cerrado de televisión, colocando una cámara adicional en la parte inferior del rack de tuberías para detectar fugas en sellos de bombas, bridas y líneas.
B	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	9. Dar mantenimiento preventivo al sistema de circuito cerrado de televisión.
B	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	10. Adquirir equipos de protección personal tanto para personal de operación como para el personal de contra incendio, para la atención de emergencias que incluyan doble protección (HF e HC).
B	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	11. Adquirir y continuar aplicando la pintura detectora de ácido en bridas, válvulas y conexiones en todas las secciones ácidas de la planta.
B	15, 16, 17, 18, 19, 21	12. En caso de presentarse una fuga de ácido/hidrocarburo, el personal de operación actuará de acuerdo al procedimiento de emergencia y únicamente el personal de contra incendio como apoyo.
B	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	13. Mantener siempre disponible el gluconato de calcio.
B	20	14. Elaborar un procedimiento para control de fugas en la sección ácida de esta sección de la planta.
B	20	15. Adecuar la logística para reparar los tanques FB-301, FB-302 y sus periféricos en la reparación general de la planta.
B	20	16. Optimizar y mejorar el diseño del sistema de mitigación al detectar HF, para que actúe en forma automática.
B	20	17. Cambiar válvulas autorregulables en el sistema de mitigación por válvulas de operación neumática para mejorar la operación.
B	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	18. Ampliar el sistema del circuito cerrado de televisión, colocando una cámara adicional en la parte superior de la torre de enfriamiento EF-300, otra de vista general en la calle lado norte de la planta y otra en el área del calentador BA-301.
B	20	19. No permitir asentamientos humanos a un mínimo de 2 km de distancia de la planta de alquilación.
B	23	20. Realizar un estudio por parte del fabricante para localizar posibles fallas del PLC y atenderlas en tiempo y forma.
C	1	21. Considerar el adicionar una celda de agua de enfriamiento con su motor-reductor en la torre de enfriamiento, ya que actualmente no tiene flexibilidad.
C	1	22. Continuar con el tratamiento químico de la torre de enfriamiento, evaluando los cambiadores de calor.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



Tabla 4.1 Lista jerarquizada de recomendaciones para la mitigación de riesgos (continuación).

Nivel	Escenarios	Recomendaciones
C	1, 2, 3	23. Realizar un estudio para colocar discos de ruptura o modificación de internos en PSV's de área ácida.
C	15, 16, 17, 18, 19, 21	24. Continuar con los programas de simulacros operacionales y pruebas en el sistema de mitigación.
C	20	25. Implementar la política de grabación diaria de la operación en el sistema de circuito cerrado de televisión, proporcionando los cassettes de video.
C	6	26. Seleccionar y adquirir sellos mecánicos adecuados al uso del producto de las bombas GA-307 A/B.
C	7	27. Reparar y poner en operación los analizadores continuos.
C	13	28. Elaborar un programa de mantenimiento para los analizadores continuos.
C	8, 11	29. Instalar indicación de nivel al sistema de control distribuido, en acumulador de ácido fresco FB-302, para no purgar ácido fluorhídrico a la atmósfera.
C	9	30. Instalar indicación de nivel al sistema de control distribuido, en acumulador de ácido fresco FB-301 A/B, para no purgar ácido fluorhídrico a la atmósfera.
C	8, 11	31. Instalar indicación de nivel al sistema de control distribuido, en acumulador de ácido fresco FB-302, para no purgar ácido fluorhídrico a la atmósfera.
C	25	32. Incluir en los programas de capacitación simulacros de procedimiento de trasiego de ácido.
C	25, 26	33. Adquirir válvulas de monel de cierre hermético nivel 4 en los tanques recuperadores de ácido FB-301 A/B.
D	2	34. Cada vez que la planta salga a reparación general, incluir el mantenimiento a la torre de enfriamiento.
D	2, 3	35. Continuar con el tratamiento químico integral de corrosión, el control de incrustación a los distribuidores y estructura de concreto de las torres de agua de enfriamiento.
D	5	36. Mantener las condiciones de operación de diseño de la torre regeneradora de ácido.
D	7	37. Elaborar un programa de mantenimiento para los analizadores continuos.
D	11	38. Continuar con la rutina de chequeo de nivel del asentador DA-302.
D	8, 9	39. Continuar aplicando los procedimientos operacionales para reposición de ácido.
D	22	40. Operar dentro de las condiciones de operación de diseño de la planta para minimizar la formación de fluoruros (temperatura de reacción no mayor a 40°C).
D	28	41. Realizar inspecciones en campo y tendencia de históricos.
D	29	42. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo a densímetros.
D	18, 19, 21	43. Continuar con el programa de calibración de espesores de tuberías en el área de reacción de la planta.

#### 4.2. Conclusiones y recomendaciones del índice DOW.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

El índice DOW es una herramienta que nos dice el nivel de riesgo de incendio y/o explosión de una unidad de proceso, y de ese índice se obtiene una serie de valores que nos dan una idea de las



consecuencias de un incendio y/o explosión en cuanto a los daños a instalaciones y a las pérdidas económicas.

El índice de incendio y explosión (IF&E) que se obtuvo de la unidad de proceso DA-302 es de 97.062 lo que nos da un nivel de riesgo intermedio. Con el valor de IF&E se obtiene el radio de exposición (RE) que tiene un valor de 24.86 m; suponiendo que se trate de un círculo perfecto, el área de exposición calculada es de 1,941 m<sup>2</sup>. Con el valor total de la planta de alquiler, se calcula el valor del área expuesta por el posible incendio y/o explosión que es de 10.82 \$MM; este valor también representa el costo de reponer las instalaciones dañadas por el incendio y/o explosión.

Con el procedimiento propuesto en la segunda parte del capítulo II, se obtiene el factor de daño y con el valor del área expuesta se obtuvo el valor del daño máximo probable a la propiedad (MPPD) que es de 5.951 \$MM; éste valor no toma en cuenta las protecciones o salvaguardas que tenga la unidad de proceso. Si se contabilizan las protecciones de la unidad de proceso, se obtiene el factor de bonificación cuyo valor efectivo es de 0.483; éste y junto con el MPPD, nos da el valor del daño máximo probable a la propiedad real, que es 2.874 \$MM; éste valor ya toma en cuenta las protecciones o salvaguardas de la unidad de proceso.

Con el MPPD real calculado, se obtiene los días máximos probables de pérdida de producción (MPDO), que tiene un valor de 45 días; dicho valor nos indica el máximo tiempo probable en la que se dejará de producir, en este caso, el alquilado. Con el MPDO y el valor de la producción mensual, se obtiene el costo por la pérdida de producción (BI) que nos indica el dinero que no se podrá ganar debido al incendio y/o explosión de la unidad de proceso.

Como se ve, el índice DOW solamente es una medida del riesgo de una unidad de proceso en cuanto a su operación y nos da una estimación de las consecuencias de un incendio y/o explosión; no nos dice que acciones se pueden tomar para mitigar el riesgo o que medidas tomar para disminuir las consecuencias de un posible accidente.

### **4.3. Conclusiones y recomendaciones del análisis de árbol de fallas.**

El árbol de fallas del anexo IV.A. nos muestra todas las posibles causas que provocarían la ocurrencia



del evento tope "Fuga e incendio de alquilerado en las bombas GA-307 A/B de carga a la fraccionadora DA-304". Para disminuir la posibilidad de que ocurra el evento tope, se emiten una serie de recomendaciones que se listan a continuación:

⇒ Daños al sello:

- Verificar la adecuada instalación de la bomba.
- Verificar que el sello sea el adecuado y su instalación correcta.
- Instalar doble sello.
- Verificar la alineación de la flecha.
- Verificar la rotación del motor.
- Asegurar la correcta aplicación del mantenimiento preventivo de acuerdo a programa.

⇒ Falla de bridas de empalme en la succión y/o en la descarga:

- Verificar el acoplamiento adecuado de las bridas de empalme.
- Asegurar inventario suficiente de espárragos.
- Verificar que el espárrago sea el adecuado y verificar su correcta instalación.

⇒ Ruptura de la línea de descarga:

- Asegurar la correcta alineación de la línea de descarga con la bomba.
- Asegurar la adecuada instalación de la válvula check.

⇒ Sobrecalentamiento del motor:

- Asegurar y verificar que el motor sea el adecuado para las condiciones de operación.
- Asegurar la correcta aplicación del mantenimiento preventivo de acuerdo a programa.
- Asegurar y verificar la adecuada instalación de la válvula check.
- Colocar protección para sobrecarga eléctrica y darle adecuado mantenimiento.

⇒ Corto circuito en el motor:

- Asegurar y verificar la correcta aplicación del mantenimiento a instalaciones eléctricas de acuerdo a programa.
- Asegurar y verificar la correcta aplicación del mantenimiento al sistema de tierras de acuerdo a programa.



- Asegurar y verificar la correcta aplicación del mantenimiento a la protección antichispa.
- Efectuar un estudio para determinar si el medio de aterrizamiento es el adecuado o no; si no lo es, cambiarlo de forma inmediata; si lo fuera, darle el mantenimiento adecuado.
- Asegurar y verificar que se haya aterrizado el motor después de darle mantenimiento.
- Continuar con el patrullaje operacional.

⇒ Sobrecalentamiento de la bomba:

- Mantener el nivel de aceite de lubricación, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y asegurar el buen funcionamiento del sistema de lubricación.
- Dar mantenimiento al sistema de lubricación de acuerdo al programa establecido.
- Continuar con el mantenimiento predictivo de acuerdo al programa.
- Continuar con el programa de rotación de equipos.
- Continuar con el patrullaje operacional

Aplicando las recomendaciones que se han listado, el árbol de fallas se reduce a la estructura que se muestra en el anexo IV.B.; se aplicó para este árbol el mismo procedimiento de análisis que se utilizó con el árbol de fallas del anexo IV.A.

La función de estructura obtenida de la aplicación del procedimiento se muestra a continuación junto con su desarrollo:

$$P = F1 \times F2 \quad F1 = F3 + F4 + F5 + F6 \quad F2 = F7 + F8 + F9$$

$$P = (F3 + F4 + F5 + F6) \times (F7 + F8 + F9)$$

$$F4 = B4 + B5 + F11 \quad F6 = B7 + B9 + B11 \quad F7 = B13 + F13 \quad F8 = B13 + F14$$

$$P = (F3 + (B4 + B5 + F11) + F5 + (B7 + B9 + B11)) \times ((B13 + F13) + (B13 + F14) + F9)$$

$$F11 = B17 \times B18 \quad F13 = B21 + B22$$

$$P = (F3 + (B4 + B5 + (B17 \times B18)) + F5 + (B7 + B9 + B11)) \times ((B13 + (B21 + B22)) + (B13 + F14) + F9)$$

$$P = (B4 + B5 + B7 + B9 + B11 + B17 \times B18 + F3 + F5) \times (2 \times B13 + B21 + B22 + F14 + F9)$$

Efectuando el producto de la ecuación anterior y aplicando las reglas del álgebra de Boole, en especial las de la idempotencia y las de la absorción, y reacomodando términos, resulta en la siguiente ecuación:



$$\begin{aligned}
 P = & B4 \cdot B13 + B4 \cdot B21 + B4 \cdot B22 + B4 \cdot F9 + B4 \cdot F14 + B5 \cdot B13 + B5 \cdot B21 + B5 \cdot B22 + B5 \cdot F9 + B5 \cdot F14 + \\
 & B7 \cdot B13 + B7 \cdot B21 + B7 \cdot B22 + B7 \cdot F9 + B7 \cdot F14 + B9 \cdot B13 + B9 \cdot B21 + B9 \cdot B22 + B9 \cdot F9 + B9 \cdot F14 + \\
 & B11 \cdot B13 + B11 \cdot B21 + B11 \cdot B22 + B11 \cdot F9 + B11 \cdot F14 + B17 \cdot B18 \cdot B13 + B17 \cdot B18 \cdot B21 + \\
 & B17 \cdot B18 \cdot B22 + B17 \cdot B18 \cdot F9 + B17 \cdot B18 \cdot F14 + F3 \cdot B13 + F3 \cdot B21 + F3 \cdot B22 + F3 \cdot F9 + F3 \cdot F14 + \\
 & F5 \cdot B13 + F5 \cdot B21 + F5 \cdot B22 + F5 \cdot F9 + F5 \cdot F14
 \end{aligned}$$

Ec. 1

La tabla de probabilidades que se utilizó para el cálculo de la probabilidad del evento tope del árbol de fallas del anexo IV.B. se muestra a continuación:

Tabla 4.2 Probabilidad de ocurrencia de los eventos básicos (provenientes del diagrama del anexo IV.B.).

NÚMERO	EVENTO BÁSICO	PROBABILIDAD
B4	Bajo nivel en el DA-302	1.00E-03
B5	Vaporización de la carga	1.00E-03
B7	Línea en su límite de retiro	1.00E-05
B9	Se sobrepasa presión de diseño	1.00E-03
B11	Desgaste de la línea por corrosión	1.00E-03
B13	Sobrecarga eléctrica	1.00E-07
B17	Taponamiento en el filtro de succión	1.00E-03
B18	Falla del PI-3073 A/B	1.00E-05
B21	Válvula de control falla en cerrado	1.00E-05
B22	Taponamiento de la línea	1.00E-03
F3	Falla o daños al sello	1.00E-05
F5	Falla de bridas de empalme en la succión y/o en la descarga	1.00E-05
F9	Sobrecalentamiento de la bomba	1.00E-05
F14	Acumulación de electricidad estática	1.00E-07

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

La ecuación 1 es la representación matemática del árbol de fallas del anexo IV.B. y es con esta ecuación con la que se trabaja en la evaluación de la probabilidad y la frecuencia del evento tope. Para fines del análisis, se muestra a continuación el valor de cada término de la ecuación, denominándose de ahora en adelante conjuntos mínimos, así como su porcentaje de contribución a la suma total de todos los términos de la ecuación. La suma total corresponde a la probabilidad del evento tope y la frecuencia se calcula utilizando la ecuación 1 que se encuentra en la segunda parte del capítulo II.

El número de conjuntos mínimos que se obtuvieron con el árbol de fallas del anexo IV.B. es de 40; de los cuales 35 son conjuntos de segundo orden o de dos eventos básicos y 5 son conjuntos de tercer orden o de tres eventos básicos. Los conjuntos mínimos que tienen una mayor contribución al total son el CR3, CR8, CR18 y el CR23 que corresponden a conjuntos mínimos de segundo orden; en cambio,



los conjuntos mínimos que poco contribuyen al total son el CR26 y CR30 que corresponden a conjuntos mínimos de segundo orden.

Tabla 4.3 Cálculo de conjuntos mínimos y de sus porcentajes de contribución y cálculo de la probabilidad del evento tope (anexo IV.B).

Núm. de conjunto mínimo	Conjunto mínimo	Probabilidad de ocurrencia	Porcentaje de contribución	Núm. de conjunto mínimo	Conjunto mínimo	Probabilidad de ocurrencia	Porcentaje de contribución
CR1	B4*B13	1.00E-10	0.002432	CR21	B11*B13	1.00E-10	0.002432
CR2	B4*B21	1.00E-08	0.243225	CR22	B11*B21	1.00E-08	0.243225
CR3	B4*B22	1.00E-06	24.322519	CR23	B11*B22	1.00E-06	24.322519
CR4	B4*F9	1.00E-08	0.243225	CR24	B11*F9	1.00E-08	0.243225
CR5	B4*F14	1.00E-10	0.002432	CR25	B11*F14	1.00E-10	0.002432
CR6	B5*B13	1.00E-10	0.002432	CR26	B17*B18*B13	1.00E-15	2.43225E-08
CR7	B5*B21	1.00E-08	0.243225	CR27	B17*B18*B21	1.00E-13	2.43225E-06
CR8	B5*B22	1.00E-06	24.322519	CR28	B17*B18*B22	1.00E-11	2.43225E-04
CR9	B5*F9	1.00E-08	0.243225	CR29	B17*B18*F9	1.00E-13	2.43225E-06
CR10	B5*F14	1.00E-10	0.002432	CR30	B17*B18*F14	1.00E-15	2.43225E-08
CR11	B7*B13	1.00E-12	2.43225E-05	CR31	F3*B13	1.00E-12	2.43225E-05
CR12	B7*B21	1.00E-10	0.002432	CR32	F3*B21	1.00E-10	0.002432
CR13	B7*B22	1.00E-08	0.243225	CR33	F3*B22	1.00E-08	0.243225
CR14	B7*F9	1.00E-10	0.002432	CR34	F3*F9	1.00E-10	0.002432
CR15	B7*F14	1.00E-12	2.43225E-05	CR35	F3*F14	1.00E-12	2.43225E-05
CR16	B9*B13	1.00E-10	0.002432	CR36	F5*B13	1.00E-12	2.43225E-05
CR17	B9*B21	1.00E-08	0.243225	CR37	F5*B21	1.00E-10	0.002432
CR18	B9*B22	1.00E-06	24.322519	CR38	F5*B22	1.00E-08	0.243225
CR19	B9*F9	1.00E-08	0.243225	CR39	F5*F9	1.00E-10	0.002432
CR20	B9*F14	1.00E-10	0.002432	CR40	F5*F14	1.00E-12	2.43225E-05
					TOTAL	4.11142E-06	100

La probabilidad de ocurrencia del evento tope es de  $4.11142 \times 10^{-6}$  con una frecuencia de  $4.111424 \times 10^{-6}$  eventos por año si consideramos un período de tiempo igual a un año.

En resumen, mediante la aplicación del análisis de árbol de fallas al escenario "Fuga e incendio de alquilado en las bombas GA-307 A/B de carga a la fraccionadora DA-304" se obtuvieron los siguientes resultados:

- La probabilidad de que ocurra el evento tope en las condiciones actuales, es decir, suponiendo que fallen todas las protecciones es de  $P = 2.082914 \times 10^{-3}$  con una frecuencia de  $F = 2.085087 \times 10^{-3}$  (ver anexo IV.A.).
- Aplicando las recomendaciones que se enlistaron anteriormente, la probabilidad de que ocurra el evento tope es de  $P = 4.11142 \times 10^{-6}$  con una frecuencia de  $F = 4.11143 \times 10^{-6}$  (ver anexo IV.B.).

Con base en lo anterior, se llega a la conclusión de que no se acepta el riesgo de ocurrencia del evento tope analizado ( $P = 2.082914 \times 10^{-3}$ ), ya que con una serie de recomendaciones que no implican un alto

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**





costo, se puede disminuir la probabilidad de ocurrencia a  $P = 4.11142 \times 10^{-6}$ , por consiguiente, la frecuencia también disminuye de forma significativa.

#### **4.4. Conclusiones y recomendaciones del análisis de consecuencias.**

Cabe aclarar que los eventos que se estudiaron para el análisis de consecuencias, son solamente eventos teóricos que han sido simulados mediante computadora y que en realidad no han sucedido dentro de la planta. Dichas simulaciones son herramientas que nos ayudan a tomar decisiones acerca de las acciones que se deben tomar en caso de que alguno de los eventos propuestos ocurriese. Hay que agregar que la probabilidad de ocurrencia de los eventos simulados es casi nula, ya que la planta de alquilación cuenta con programas de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo, así como programas de inspección de líneas y equipos.

Es preciso mencionar que los resultados de las simulaciones del análisis de consecuencias no necesariamente se llevan a cabo como se plantea en los modelos, ya que las condiciones ambientales no tienen un régimen estacionario, sino que varía conforme el transcurso del tiempo, como por ejemplo, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, etc. Los resultados del análisis de consecuencias son representativos para las condiciones promedio ambientales; por lo tanto, las regiones que se han dibujado en los plot-plans de la planta para los diferentes eventos son las zonas donde existe la mayor posibilidad de daño como consecuencia de dichos acontecimientos.

El principal efecto de la dispersión de una nube de alquilado pesa sobre todo en las personas, debido a la cantidad de HF que tiene la corriente de alquilado y a sus características toxicológicas. También tiene un importante efecto sobre los equipos y las instalaciones por tener un gran poder corrosivo; ya se vio en los resultados que en las condiciones promedio, la distancia mínima de seguridad a la fuente de emisión es de casi 2.9 km.

Para el caso del jet fire o "dardo de fuego", el principal efecto es la radiación térmica, el cual afecta tanto a personas como a equipos e instalaciones. El área de afectación cubre lo que es el circuito de reacción, el de tratamiento de efluentes, parte de la sección de pretratamiento, el cuarto de personal de operación y parte de la sección de fraccionamiento. Más allá de estas zonas, se puede considerar un área segura para el personal.



En el evento del incendio y explosión de una nube de vapor no confinada, el efecto principal de ambos eventos es la radiación térmica y la sobrepresión, que, como se puede ver en los anexos V.C. y V.D., en el incendio no se abarca un área muy extensa de daño, pero dicha área cubre la mayor parte de la planta de alquilación. Para el caso de la explosión, el área abarcada es más grande en comparación al incendio, cubriendo casi por completo la planta de alquilación, por lo que los daños provocados por este evento serán de una índole mayor.

Si suponemos que todo el material descargado llegará a explotar, las áreas de afectación serían muy extensas, llegando incluso a otras plantas de proceso, como la planta de MTBE que se encuentra a un costado de la planta de alquilación.

#### **4.5. Conclusiones generales.**

A lo largo del desarrollo del análisis de riesgos, se puede observar que los resultados obtenidos tienen como finalidad garantizar el buen funcionamiento del proceso de la planta de alquilación, pero no solo eso, sino que también garantiza que los posibles accidentes que se pudieran dar tendrán una probabilidad muy baja de que se lleven a cabo.

En el análisis HazOp, se pudieron identificar todas aquellas desviaciones que pudieran derivar en accidentes o eventos no deseados en el proceso de la sección de reacción; estas desviaciones se consideran como las más factibles que se pudieran presentar a lo largo de la vida de la planta.

En el índice DOW, solamente se hizo una evaluación de todas las características propias de la sección en estudio. Dicha evaluación nos arroja el grado de riesgo que presenta la sección de acuerdo a una escala de valores que provee el índice DOW. También se pueden obtener una serie de parámetros que nos permiten darnos una idea de lo que puede ocurrir en caso de un incendio o una explosión.

En el análisis de árbol de fallas, se determinó la probabilidad de que ocurriera un evento considerado como tope (dicho evento se toma de los registros resultantes del análisis HazOp) así como su frecuencia.



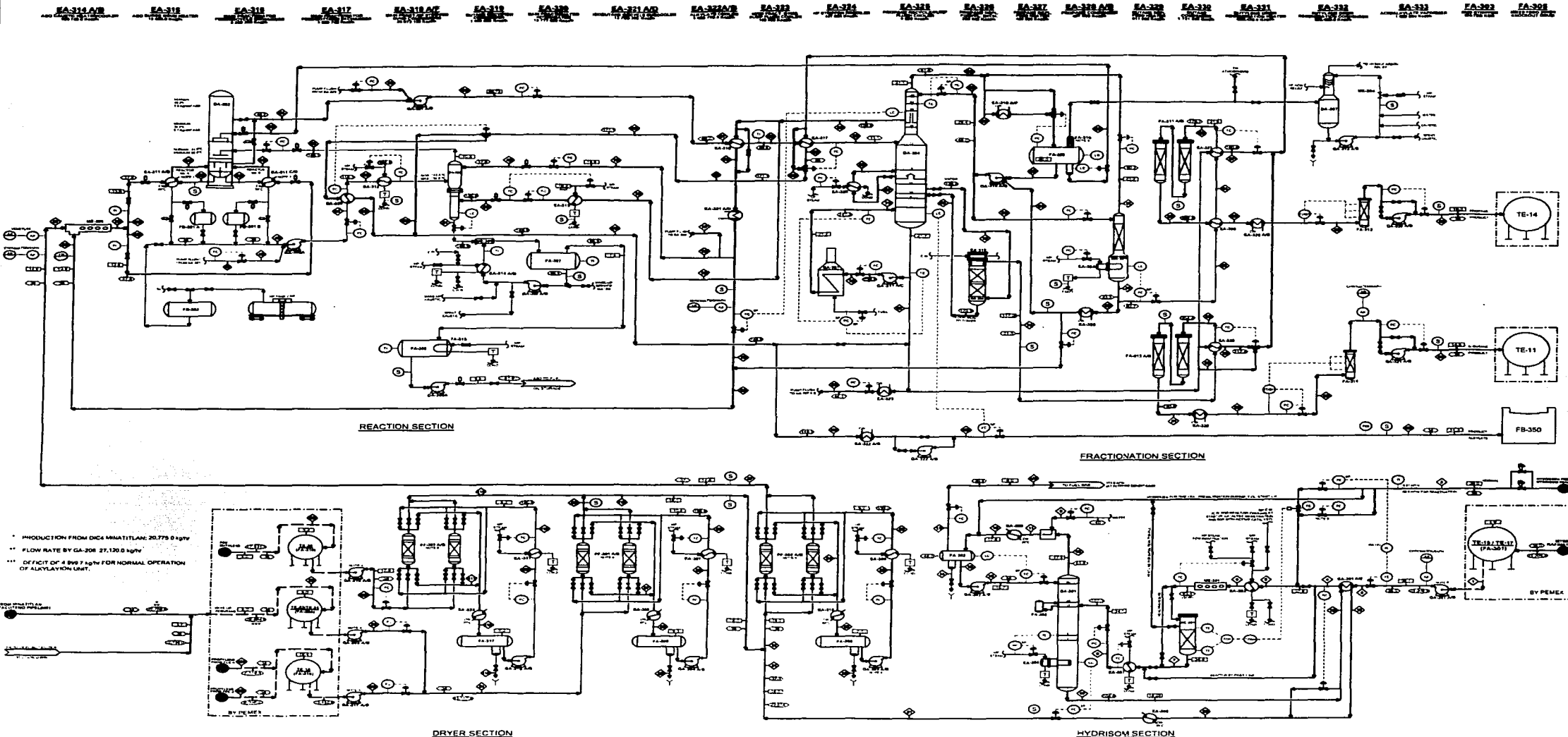
Y finalmente, en el análisis de consecuencias, para una determinada serie de eventos, se estimó la magnitud de los mismos de acuerdo a las condiciones ambientales consideradas.

Para que un análisis de riesgos tenga éxito, en el sentido de que cumpla su propósito, éste debe ser lo más completo posible, es por ello que se utilizan varias herramientas para que el análisis de riesgos sea lo más confiable posible. Si solamente se utilizará una herramienta, ésta contemplaría solamente aspectos que le son propias de ella dejando afuera otros que si toman en cuenta los demás tipos de análisis.

Si bien, para este análisis de riesgos se utilizaron cuatro herramientas de análisis, en un estudio más serio es bueno utilizar una mayor número de herramientas de análisis ya que la planta de alquilación se considera como de alto riesgo, por lo que el análisis de riesgos que se desea obtener debe contemplar muchos aspectos que difícilmente se pueden encontrar en una sola herramienta de análisis, pero también se garantiza que el análisis de riesgos será lo más completo posible.

# ANEXOS

(500-MS-1-d-CC-04) | OXENW  
www.oxenw.com



PRODUCTION FROM DIC4 MINATILAN: 20,775 t/yr  
 FLOW RATE BY GA-308: 27,120 t/yr  
 DEFICIT OF 4 t/yr FOR NORMAL OPERATION OF ALKYLATION UNIT.

- NOTES:
1. NORMALLY ONLY INSTRUMENT CONTROL FUNCTIONS ARE INDICATED. SUCH FUNCTIONS, MAINTENANCE AND REPAIR FUNCTIONS ARE TO BE PROVIDED TO MONITOR UNIT PERFORMANCE AND TO PERMIT ACCURATE OVERALL UNIT HEAT AND MATERIAL BALANCE.
  2. INSTRUMENT ACTUATING LINES ARE NOT INTENDED TO INDICATE PREFERENCE FOR EITHER AIR, HYDRAULIC OR ELECTRIC HOODS.
  3. DETAILED PROCESS FLOW SHEETS TAKE PRECEDENCE OVER SIMPLIFIED PROCESS FLOW DIAGRAMS.
  4. FEED PUMPS WILL BE LOCATED ADJACENT TO SURGE SPHERES.
  5. IN FLOW CONTROL, FOR REACTIVATION.
  6. FEED DRYERS SHOWN WITH ONE ON PROCESS AND ONE ON REGENERATION.
  7. COOLING WATER FLOW TO THE UNIT DOES THROUGH THE ACID COOLERS FIRST AND THEN THROUGH THE OTHER EXCHANGERS EXCEPT WHERE OTHERWISE INDICATED.
  8. VENT GAS AIR NUMBER HAS A REFRIGERATION CON. WHICH USES EXPANDED GAS (PROPANE) AS REFRIGERANT.

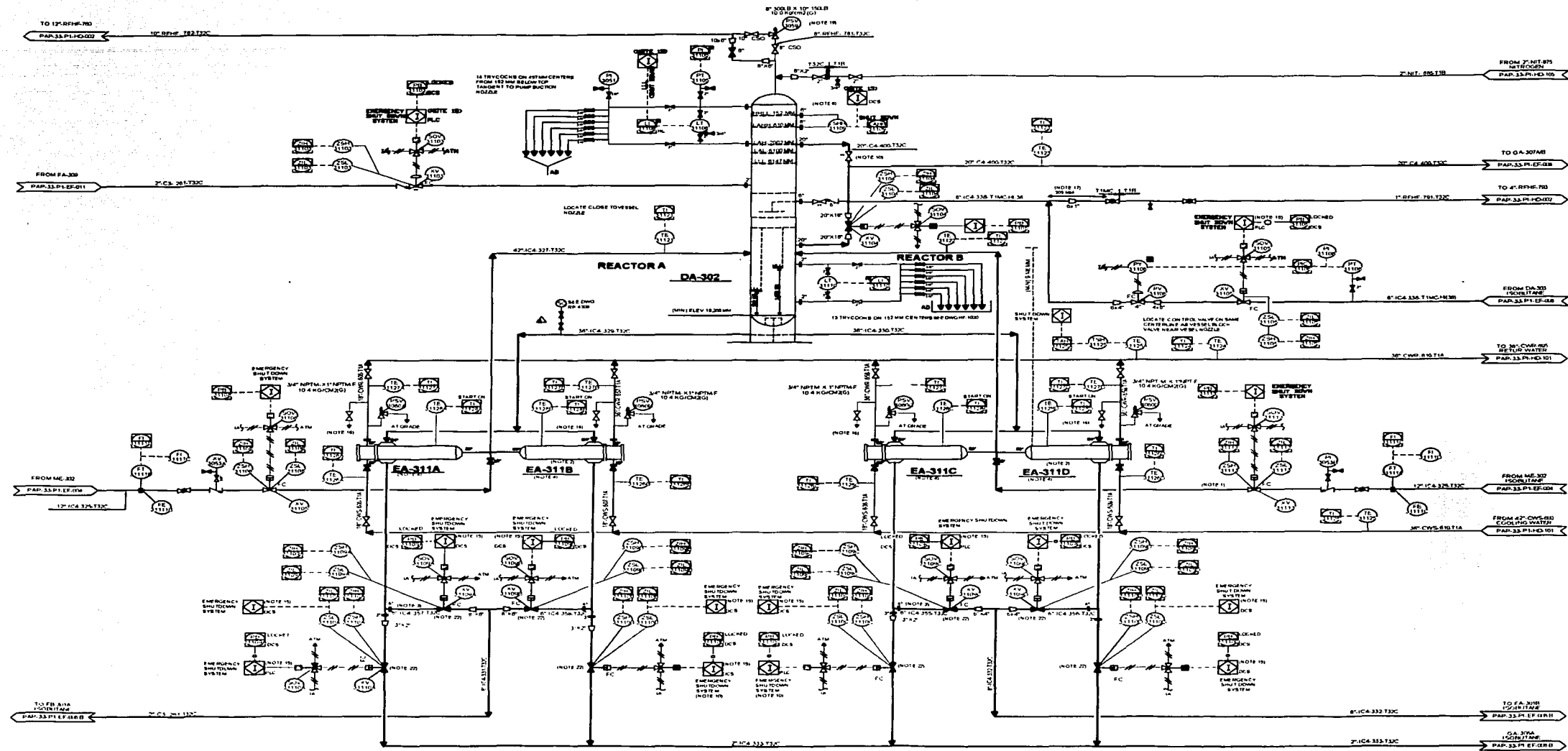
- LEGEND:
- EXISTING EQUIPMENT
  - MAJOR CONTROL INSTRUMENTS
  - STREAM No.
  - PRESSURE (kg / cm<sup>2</sup> ABS)
  - FLOW RATE (t/yr)
  - TEMPERATURE (°C)

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

FA-306 FA-307 FA-308 FA-309 FA-310 FA-311 A/B FA-312 FA-313 A/B FA-314 FA-317 FB-301 A/B FB-350 FF-301 A/B FF-302 A/B FF-303 A/B GA-301 A/B GA-302 A/B GA-303 A/B GA-304 A/B GA-305 A/B GA-306 A/B GA-307 A/B GA-308 A/B GA-309 A/B  
 GA-310 A/B GA-311 A/C GA-312 A/B GA-313 A/B GA-317 A/B GA-318 A/B GA-320 A/B GA-321 A/B GA-322 A/B ME-301 ME-302 ME-303 ME-304 TE-11 TE-14 TE-16/TE-17 TE-18 TE-22 TE-20/TE-21

ITEM No.	DA-302
SERVICE	ACID SETTLER
DESIGN CODE	AS-217 (REV. 01)
DATE	12/82
BY	JLS
CHECKED	JLS
APPROVED	JLS
REVISIONS	AUTOMATIC

ITEM No.	EA-311 A/D
SERVICE	ACID COOLER
DESIGN CODE	AS-217 (REV. 01)
DATE	12/82
BY	JLS
CHECKED	JLS
APPROVED	JLS
REVISIONS	AUTOMATIC



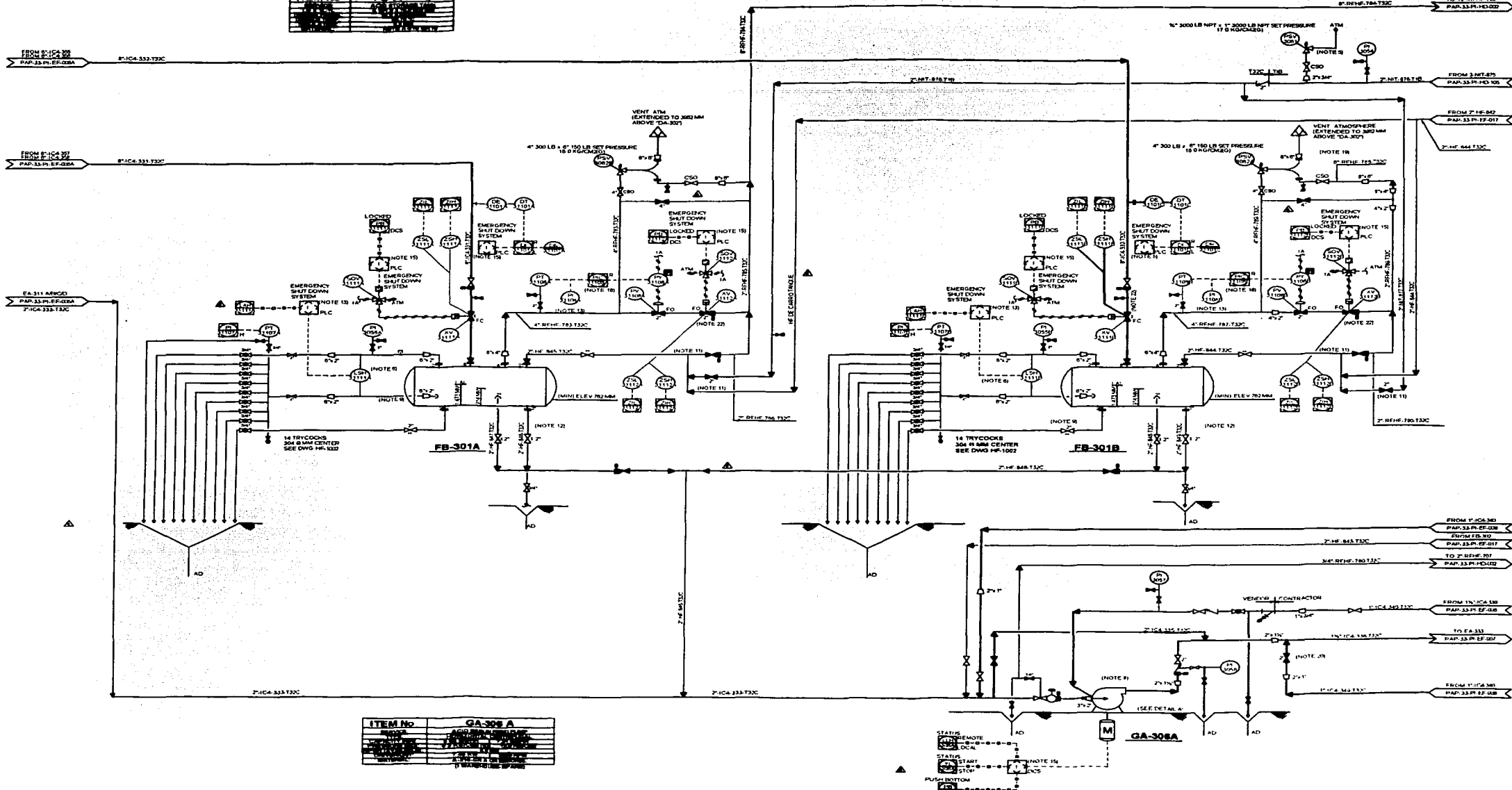
- NOTES:**
- 1- LOCATE VALVES AND CHECK VALVES ON ACID...
  - 2- LOCATE VALVES AND CHECK VALVES ON ACID...
  - 3- LOCATE CONNECTIONS CLOSE TO ACID COOLER...
  - 4- ALL VALVES SHALL BE INSTALLED 6 INCH UP...
  - 5- BETWEEN AT GRADE VALVES AND INSTRUMENTS...
  - 6- NUCLEAR LEVEL DETECTOR STRIPPING...
  - 7- INSTRUMENTS FROM ROOMS BE NEAR TO ACID COOLER...
  - 8- MUST BE SYNCHRONIZED...
  - 9- INSTRUMENTS CONNECTED TO REACTOR IN ABOVE...
  - 10- INSTRUMENTS CONNECTED TO REACTOR IN ABOVE...
  - 11- LOCATE THESE VALVES AS CLOSE TO...
  - 12- LOCATE THESE VALVES AS CLOSE TO...
  - 13- LOCATE THESE VALVES IN HORIZONTAL POSITION...
  - 14- EMERGENCY SHUT DOWN SYSTEM (AYD)...
  - 15- IN THE CHECK VALVE THE CHECK VALVE SHALL...
  - 16- EMERGENCY SHUT DOWN SYSTEM (AYD)...
  - 17- EMERGENCY SHUT DOWN SYSTEM (AYD)...
  - 18- EMERGENCY SHUT DOWN SYSTEM (AYD)...
  - 19- THE ACID RELIEF VALVE AND ITS BY PASS...
  - 20- THESE VALVES SHALL BE CLOSED SLOWLY...
  - 21- LOCATE PUMPS AT 18 HRS IN VIEW OF...
  - 22- FOR COOLING LOOP NEW DATA FROM...
  - 23- THESE VALVES ARE PLUG TYPE...
  - 24- INSTRUMENTS TAPS FOR GA-106A, PLAN 10...
  - 25- INSTRUMENTS TAPS FOR GA-106B, PLAN 10...
  - 26- THE PUMP INSTRUMENT TAPS FOR GA-106A/B...
  - 27- BE AWAREING UNA REDERA DE RELIEVO PARA...
  - 28- SERBIOA DIBUJADA POR CHEYERS-CPM
  - 29- LOCATE THESE THREE VALVES AS CLOSE TO...
  - 30- LOCATE VALVES ON INSTRUMENTS ON VESSEL...
  - 31- MUST LOCATE AS NEAR AS POSSIBLE TO NEEDLE...

**LISTA DE CAMBIOS REV. 10**

- 1- EL PLANO ORIGINAL SE DIVIDO EN DOS DIAGRAMAS...
- 2- SE AGREGO NOTA 29.

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

ITEM No	FB-301 A/B
DESCRIPCIÓN	VALVULAS DE CONTROL
ESPECIFICACIONES	1. VALVULAS DE CONTROL DE FLUJO
CONDICIONES DE OPERACIÓN	2. OPERAR EN POSICIÓN DE CIERRE
REQUISITOS DE MANTENIMIENTO	3. MANTENER EN POSICIÓN DE CIERRE



ITEM No	GA-308 A
DESCRIPCIÓN	MOTOR DE BOMBEO
ESPECIFICACIONES	1. MOTOR DE BOMBEO DE ACIÓ
CONDICIONES DE OPERACIÓN	2. OPERAR EN POSICIÓN DE CIERRE
REQUISITOS DE MANTENIMIENTO	3. MANTENER EN POSICIÓN DE CIERRE

- NOTES**
1. LOCATE BLOCK AND CHECK VALVES ON ACID COOLER NOZZLE (CA-301 A/B)
  2. SEE DWGS. HFC-101A OR HFC-101B FOR DETAILS COOLER NOZZLES (CA-301 A/B)
  3. LOCATE CONNECTIONS CLOSE TO ACID COOLER
  4. ACID COOLERS WILL BE INSTALLED 6.315 M ABOVE GRADE
  5. NITROGEN AT 18.00 M (60 FT) FOR USE WITHING OF FB-301 SET PRESSURE (17.00 M (56 FT)) IN ACCORDANCE TO MAXIMUM ALLOWABLE WORK PRESSURE (MECHANICAL DESIGN)
  6. NUCLEAR LEVEL DETECTOR STANDOFF
  7. PIPING FROM MINER ME-30 TO ACID COOLER MUST BE SYMMETRICAL
  8. SEE DWGS. HFC-101A A 3000 GLAND PLATE DRAIN PIPING ACCORDING TO INSTRUMENT PRACTICE
  9. HYDROCARBON CONNECTION IS 20.3 MM ABOVE SYSTEM ACID PUMP LEVEL
  10. PUMP OUT NOZZLE SIZE SHALL BE THE SAME AS SETTLER EFFLUENT NOZZLE SIZE
  11. LOCATE THESE TWO VALVES AS CLOSE TO VESSEL BLOCK VALVE AS POSSIBLE. ALL THREE VALVES (INCLUDING VESSEL BLOCK VALVE) SHALL BE OPERATED FROM SAME PLATFORM. THIS NOTE APPL Y FOR VESSEL FB-301 A/B
  12. LOCATE THESE VALVES IN HORIZONTAL POSITION
  13. HC ACID EMERGENCY PUMP SYSTEM (AVOID LIQUID POOLSETS)
  14. THE PRESSURE GAUGE AND ITS VENT ARE LOCATED ON THE CHECK VALVE. THE CHECK VALVE SHOULD BE IN VERTICAL POSITION
  15. LOGIC CONTROL INTERCONNECTION SEE DWGS FROM PAP-33-P1-EF-017 TO INSTRUMENT PRACTICE
  16. SAMPLE CONNECTION FOR 700P CHECK OF THE COOLING WATER RETURN
  17. 305 MM (RN) UNINSULATED STRAIGHT OF BOTTOM OF PIPE
  18. LOCATED NEAR THE CORRESPONDING CONTROL VALVE
  19. THE ACID RELIEF VALVE AND ITS BY PASS SHALL BE INSTALLED SELF DRAINING TO THE ACIDLEAF HEADER
  20. LOCATE VALVE AS CLOSE AS POSSIBLE TO GA-308A DISCHARGE VALVE
  21. FOR CONTROL LOOP SEE DRAWINGS FROM PAP-33-P1-EF-015 TO 340
  22. THESE VALVES ARE FLSO TYPE
  23. INSTRUMENTS TAG FOR GA-308A PLAN 53 PAL-51 NOTE LAM 3110A LAL 31100
  24. GLOBE VALVE IN SIGHT OF FLOW INDICATOR
  25. DRIED ORIGINAL FOR HYDROCARBON
  - \*\* LOCATE VALVES ON INSTRUMENT ON VESSEL NOZZLE

LISTA DE CAMBIOS REV. 10  
1. SE AGRREGA NOTA 25

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Desviación: 1. Alta temperatura

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
1	1. Bajo flujo de agua de enfriamiento en los EA-311 A/B y C/D.	1. Incremento de la presión en el asentador DA-302. 2. Disminución de la producción en la planta. 3. Relievo de la válvula PSV-3059. 4. Se favorecen las condiciones para llevarse a cabo las reacciones de polimerización. 5. Formación de fluoruros orgánicos. 6. Fuga e incendio. 7. Paro de planta.	1 (2)	3 (3)	4 (6)	1. Alarma por bajo flujo de agua de enfriamiento FT-31204, en el cabezal de descarga de las bombas GA-331 A/B/C/D. 2. Disparo por muy bajo flujo de agua de enfriamiento FSL-31204A, en el cabezal de descarga de las bombas GA-331 A/B/C/D. 3. Alarma por alta presión el PT-31105, en el asentador DA-302. 4. Alarma por alta temperatura TI-31127 A/D en la salida de agua de enfriamiento en los intercambiadores EA-311A/B. 5. Disparo de la planta por el TSH-31125 A. 6. Alarma por alta temperatura en los TI-31121/31122. 7. Botón de pánico PB-31108, disparo de planta. 8. La válvula de seguridad PSV-3059, en el asentador DA-302. 9. Mantenimiento preventivo y predictivo a bombas de agua de enfriamiento GA-331 A/D, de acuerdo a programa. 10. Bomba de reliev de agua de enfriamiento, operen tres y una esté de repuesto.	1. Considerar el adicionar una caída de agua de enfriamiento con su motor-reductor, ya que actualmente no tiene flexibilidad. 2. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo y predictivo a bombas. 3. Continuar con el tratamiento químico de la torre de enfriamiento, evaluando los cambiadores de calor. 4. Realizar un estudio para colocar discos de ruptura o modificación de internos en PSVs de línea ácida.	B (C)

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



ANEXOS

**Anexo II.C. Actas resultantes del análisis HazOp.**

Facultad de Química, U.N.A.M.







Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASAs, isobutano.

Desviación: 1. Alta temperatura

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
2	2. Alta temperatura, a más de 85° C, de agua de enfriamiento.  a) Baja eficiencia en la torre de enfriamiento.  b) Fuga del motor-reductor del ventilador BV-301 A/B/C.	1. Incremento de la presión en el asentador DA-302.  2. Disminución de la producción en la planta.  3. Ralevo de la válvula PSV-3059.  4. Se favorecen las condiciones para llevarse a cabo las reacciones de polimerización.  5. Formación de fluoruros orgánicos.  6. Fuga e incendio.  7. Paro de planta.	1 (2)	3 (3)	4 (6)	1. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302.  2. Alarma por alta temperatura TI-31127 A/D en la salida de agua de enfriamiento en los EA-311 A/B.  3. Disparo de la planta por el TSH-31125A.  4. Alarma por alta temperatura en los TI-31121/31122 en la salida de los reactores A/B.  5. Botón de pánico PB-31108, disparo de planta.  6. La válvula de seguridad PSV-3059, en el asentador DA-302.  7. Mantenimiento preventivo y predictivo a los moto-reductores BV-301 A/B/C, de acuerdo a programa.	1. Cada vez que la planta salga a reparación general, incluir el mantenimiento a la torre de enfriamiento.  2. Continuar con el tratamiento químico integral de corrosión, el control de incrustación e los distribuidores y estructura de concreto de las torres de agua de enfriamiento.  3. Realizar un estudio para colocar discos de ruptura o modificación de interros en PSVs de área ácida.	B (C)
3	3. Incrementos en los EA-311A/B, lado agua (tubos).	1. Incremento de la presión en el asentador DA-302.  2. Disminución de la producción en la planta.  3. Ralevo de la válvula PSV-3059.  4. Se favorecen las condiciones para llevarse a cabo las reacciones de polimerización.  5. Formación de fluoruros orgánicos.  6. Hay corrosión por rotura de tubos.  7. Fuga e incendio.	1 (2)	3 (3)	4 (6)	1. Tratamiento químico integral de corrosión a la torre de enfriamiento.  2. Alarma por alta temperatura TI-31121/31122, en la salida de los reactores A/B.  3. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302.  4. La válvula de seguridad PSV-3059, en el asentador DA-302.	1. Continuar con el tratamiento químico integral de corrosión, el control de incrustación e los distribuidores y estructura de concreto de las torres de agua de enfriamiento.  2. Realizar un estudio para colocar discos de ruptura o modificación de interros en PSVs de área ácida.	B (C)



TESIS CON  
FALLA DE CALIFICACIÓN



Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Desviación: 1. Alta temperatura

Esc.	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
4	4. Un aumento súbito en el contenido de olefinas en la alimentación al asentador DA-302.  a) Carga fuera de especificación.	1. Incremento de la presión en el asentador DA-302. 2. Disminución de la producción en la planta. 3. Relevo de la válvula PSV-304B. 4. Se favorecen las condiciones para llevarse a cabo las reacciones de polimerización. 5. Formación de fluoruros orgánicos. 6. Paro de planta.	1 (2)	2 (3)	3 (6)	1. Alarma por alta temperatura TI-31121/31122, a la salida de los reactores A/B. 2. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302. 3. La válvula de seguridad PSV-3059, en el asentador DA-302. 4. Alarma por alta temperatura en la salida de agua de enfriamiento, TI-31127 A/B. 5. Análisis de laboratorio. 6. Capacitación y adiestramiento. 7. Procedimiento de arranque.	1. Apearse estrictamente al procedimiento de arranque donde deben analizarse las cargas. 2. Continuar analizando la calidad de la carga. 3. Realizar un estudio para cobocar discos de ruptura o modificación de internos en PSVs de área ácida.	A (C)
5	5. Incremento de temperatura del retorno de ácido regenerado de la DA-303.	1. Incremento de la temperatura en los productos de la reacción (succión GA-307 A/B). 2. Favorece la formación de fluoruros orgánicos. 3. Obstrucción en cambiadores de calor y bombas. 4. Paro de planta.	1 (2)	2 (3)	3 (6)	1. Alarma por alta temperatura TI-31130A. 2. Alarma por alta temperatura TI-31123. 3. Alarma por alta temperatura TI-31121/31122, a la salida de los reactores A/B. 4. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302.	1. Mantener las condiciones de operación de diseño de la torre regeneradora de ácido. 2. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento para el personal para la toma de decisiones.	A (C)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Derivación: 2. Alta presión

Exc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
6	1. Disparo de las bombas GA-307 A/B, carga a la fraccionadora.	1. Falta de carga a la fraccionadora DA-304. 2. Alto nivel de hidrocarburos en el asentador DA-302. 3. Relevo de la válvula de seguridad PSV-3059 del asentador DA-302. 4. Fugas e incendio. 5. Perno de planta.	2 (2)	2 (3)	4 (6)	1. Alarma por bajo flujo de carga a la fraccionadora, FT-31116. 2. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302. 3. Alarma por alto nivel LT-31107, en el asentador DA-302. 4. La válvula de seguridad PSV-3048 en el asentador DA-302. 5. Disparo por muy alto nivel LAH-31108, en el asentador DA-302.	1. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo y predictivo a bombas. 2. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento para el personal para la toma de decisiones. 3. Seleccionar y adquirir sellos mecánicos adecuados al uso del producto de las bombas GA-307 A/B.	B (C)
7	2. Incremento en la cantidad de propano en las corrientes de carga (isobutano, propileno, butano-butileno y refinado).  a) Aumento de propano en el isobutano recirculado.	1. Relevo de la válvula de seguridad PSV-3059 del asentador DA-302. 2. Perno de planta.	2 (2)	2 (3)	4 (6)	1. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302. 2. La válvula de seguridad PSV-3059 en el asentador DA-302. 3. Análisis de laboratorio en las corrientes de carga e isobutano de recido. 4. Analizadores continuos de las corrientes de carga, isobutano de recido y productos finales.	1. Continuar con las rutinas de análisis químicos de las corrientes. 2. Reparar y poner en operación los analizadores continuos. 3. Elaborar un programa de mantenimiento para los analizadores continuos. 4. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento para el personal para la toma de decisiones. 5. Continuar con el programa de mantenimiento y calibración a PSVs. 6. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo a instrumentos.	B (C)



TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN



Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

ANEXOS

Desviación: 2. Alta presión

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
8	3. Pérdida de sello en el tanque FB-302 (de ácido fresco) durante la etapa de reposición de ácido fresco.	1. Relevo de la válvula de seguridad PSV-3059 en el asentador DA-302. 2. Pérdida de ácido hacia el desfogue. 3. Paro de planta.	2 (3)	3 (3)	6 (7)	1. Válvula de seguridad PSV-3059 en el DA-302. 2. Verificación de nivel del FB-302 mediante las válvulas manuales de purga (trycocks). 3. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302. 4. Procedimiento operacional para reposición de ácido. 5. Alarma por alta presión en el PT-31112 en el FB-302.	1. Instalar indicación de nivel al sistema de control distribuido, en el acumulador de ácido fresco FB-302, para no purgar ácido fluorhídrico a la atmósfera. 2. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento para el personal para la toma de decisiones. 3. Continuar aplicando los procedimientos operacionales para reposición de ácido. 4. Continuar con el programa de mantenimiento y calibración a PSV's.	C (D)
9	4. Pérdida de sello en el tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B durante la etapa de reposición de ácido recuperado.	1. Relevo de la válvula de seguridad PSV-3059 en el asentador DA-302. 2. Pérdida de ácido hacia el desfogue. 3. Paro de planta.	2 (3)	3 (3)	6 (7)	1. Válvula de seguridad PSV-3059 en el DA-302. 2. Verificación de nivel del FB-302 mediante las válvulas manuales de purga (trycocks). 3. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302. 4. Procedimiento operacional para reposición de ácido. 5. Alarma por alta presión en el PT-31107 A/B en el FB-301 A/B.	1. Instalar indicación de nivel al sistema de control distribuido, en el acumulador de ácido fresco FB-301 A/B, para no purgar ácido fluorhídrico a la atmósfera. 2. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento para el personal para la toma de decisiones. 3. Continuar aplicando los procedimientos operacionales para reposición de ácido. 4. Continuar con el programa de mantenimiento y calibración a PSV's.	C (D)

165

Facultad de Química, U.N.A.M.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Node: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Desviación: 2. Alta presión

Exc.	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
10	5. Falta de la LV-31118 en posición de abierto por formación de fluoruros (controladores de nivel de HF del acumulador FA-309).	1. Pérdida del sello de la bota del acumulador de reflujo FA-309. 2. Envío de propano al asentador DA-302. 3. Relevó de la válvula de seguridad PSV-3059 en el asentador DA-302. 4. Enfriamiento de la línea de ácido al asentador DA-302. 5. Fractura y fuga de la línea de la LV-31118 hacia la DA-302. 6. Paro de planta.	3 (3)	2 (4)	6 (9)	1. Alarma por bajo nivel LT-31118 en FA-309. 2. Alarma por baja temperatura TI-31172 en la línea de ácido al asentador DA-302. 3. Válvula de protección XV-31103 en la línea de ácido al asentador DA-302. 4. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302. 5. La válvula de seguridad PSV-3059 en el asentador DA-302.	1. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento para el personal para la toma de decisiones. 2. Continuar con el programa de mantenimiento a válvulas e instrumentos.	C (D)

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Desviación: 3. Bajo nivel

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
11	1. Falta de inventario de HF.	1. Disminución de la relación de ácido/olefinas. 2. Se favorecen las condiciones para llevarse a cabo las reacciones de polimerización. 3. Presionamiento del asentador DA-302. 4. Releva de la PSV-3059 del asentador DA-302. 5. Disminución de la pureza del ácido. 6. Paro de planta.	2 (2)	2 (3)	4 (6)	1. Alarma por bajo nivel de ácido LT-31110 en el asentador DA-302. 2. Detección de nivel en forma manual mediante las válvulas trycocks del asentador DA-302. 3. Tener un inventario de ácido en el FB-302. 4. Supervisión operacional. 5. Alarma por alta presión PT-31105, en el asentador DA-302. 6. Válvula de seguridad PSV-3059 en el asentador DA-302. 7. PI-3052.	1. Instalar indicación de nivel al sistema de control distribuido, en acumulador de ácido fresco FB-302, para no purgar ácido fluorhídrico a la atmósfera. 2. Continuar con el programa de adquisición de los carros tanques de ácido. 3. Continuar con la rutina de chequeo de nivel del asentador DA-302. 4. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento del personal en la toma de decisiones. 5. Continuar con el programa de mantenimiento a instrumentos.	B (C)
12	2. Falsa señal LT-31110 nivel de HF del asentador DA-302.	1. Disminución de la relación de ácido/olefinas. 2. Se favorecen las condiciones para llevarse a cabo las reacciones de polimerización. 3. Alta temperatura en los tubos reactores. 4. Alta presión en el asentador DA-302. 5. Paro de planta.	2 (2)	2 (3)	4 (6)	1. Detección de nivel en forma manual mediante las válvulas trycocks en el nivel de ácido del asentador DA-302. 2. Alarma por alta presión en el PT-31105, presión en el domo del asentador DA-302. 3. Análisis de laboratorio. 4. Alarma por alta temperatura TI-31121 y TI-31122.	1. Continuar con el programa de mantenimiento a instrumentos. 2. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento del personal en la toma de decisiones. 3. Continuar con la rutina para checar nivel en las trycocks.	B (C)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nota: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, Isobutano.

Derivación: 3. Bajo nivel

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
13	<p>3. Fala en el sistema de comunicación PLC abriendo las válvulas de vaciado XV-31109A y XV-31109B o XV-31109C y XV-31109D. XV-31111 A/B, cerrando las válvulas XV-31108 y 31113.</p> <p>a) Atoramiento en la etapa de transición.</p> <p>b) Que actúe el sistema de emergencia de vaciado de ácido debido a una fuga de ácido.</p> <p>c) Fala de aire de instrumentos.</p> <p>d) Fala de energía eléctrica.</p>	<p>1. Presionamiento del asentador DA-302.</p> <p>2. Aumento de temperatura en los tubos reactores.</p> <p>3. Cavitación de las bombas GA-307 A/B.</p> <p>4. Fuga por sello de las bombas.</p> <p>5. Incendio.</p> <p>6. Perno de planta.</p>	1 (1)	2 (3)	3 (4)	<p>1. Detección de nivel en forma manual mediante las válvulas trycords en el nivel de ácido del asentador DA-302.</p> <p>2. Alarma por bajo nivel LT-31110 en el fondo del asentador DA-302.</p> <p>3. Al cumplirse la condición de la detección de ácido, actúe el sistema de mitigación.</p> <p>4. Indicación de la posición de las válvulas XV-31109 A/B y XV-31109 C/D, local y remota.</p> <p>5. Alarma por alto nivel LSH-31111 A/B de FB-301 A/B.</p> <p>6. Alarma de los detectores de densidad DT-31101 A y C.</p> <p>7. Actúe lógico AX-001/002 vaciado de ácido.</p>	<p>1. Continuar con el programa de mantenimiento al sistema de comunicación PLC.</p> <p>2. Continuar con el programa de mantenimiento de los detectores de ácido.</p> <p>3. Continuar con el programa de mantenimiento a instrumentos.</p> <p>4. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento del personal en la toma de decisiones.</p>	A (B)
14	<p>4. Alto contenido de olefinas en la carga (butano-butieno, propileno, refinado e isobutano).</p>	<p>1. Disparo de la planta por bajo nivel.</p> <p>2. Pérdida de producción.</p> <p>3. Se pierde la relación isobutano/olefinas en la carga y en el isobutano de recirculación.</p> <p>4. Alta temperatura en la reacción.</p> <p>5. Relevo de la PSV-3059.</p>	2 (2)	3 (4)	6 (7)	<p>1. Alarma por bajo nivel LT-31108 en la fase hidrocarburo.</p> <p>2. Alarma por alta presión PT-31106.</p> <p>3. Alarma por alta temperatura en los tubos reactores TI-31121 y 31122.</p> <p>4. Interlock por bajo nivel LT-31110.</p>	<p>1. Rehabilitar analizadores continuos para asegurar la calidad de la carga.</p> <p>2. Continuar con los análisis rutinarios de la calidad de las cargas.</p> <p>3. Continuar con el programa de mantenimiento a instrumentos.</p> <p>4. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento del personal en la toma de decisiones.</p>	C (D)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nota: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagrama: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, Isobutano.

Derivación: 4. Fugas HF/HC

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
15	1. Falla de la junta de bridas y de conexiones roscaadas.	1. Fuga incontrolable de sustancias inflamables, corrosivas y tóxicas, provocando quemaduras de HF al personal, daños al medio ambiente, instalaciones y a terceros. 2. Formación de nube no confinada inflamable, tóxica, corrosiva y explosiva. 3. Explosión y/o incendio.	2 (2)	1 (2)	9 (4)	1. Sistema de mitigación. 2. Detectores de HF e hidrocarburos. 3. Botón de pánico PB-301. 4. Circuito cerrado de televisión. 5. Capacitación a todo el personal de la refinería. 6. Pintura detectora de HF (cambio de color naranja a rojo) en bridas, válvulas y conexiones. 7. Regaderas y lavajos. 8. Botón de vaciado AX-001/002 de ácido de la DA-302 al catchador FB-301. 9. Simulacros operacionales. 10. Simulacros de contra incendio. 11. Equipo autónomo de protección personal clase D de tipo encapsulado con respiración autónoma. 12. Tablero local del sistema de mitigación. 13. Apoyo externo del sistema de contra incendio de refinería a falls del sistema de mitigación.	1. Continuar con el programa de capacitación para todo el personal durante todo el año. 2. Relocalizar el tablero de control local del sistema de mitigación. 3. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo y correctivo a las bombas GA-341, GA-340 A (motor) y GA-340 B (combustión interna). 4. Continuar con el mantenimiento a las luces de emergencia (niveles de contaminación). 5. Instalar válvulas de corte rápido en la succión de la GA-307 A/B. 6. Instalar en la recirculación a la torre de enfriamiento EF-300 una válvula reguladora de presión, para mantener una presión constante en el cabezal del sistema de mitigación. 7. Ampliar el sistema del circuito cerrado de televisión, colocando una cámara adicional en la parte inferior del rack para detectar fugas en sellos de bombas, bridas y líneas. 8. Modernizar los detectores de HF que deberán ser selectivos, para que no detecten otros compuestos.	A (B)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, UNAM







Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Desviación: 4. Fugas HF/HC

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
						14. Sistema de control de derrames e drenajes de HF (fosas de neutralización). 15. Disponibilidad del gluconato de calcio. 16. Tinas de neutralización. 17. Sistema de contra incendio fijos y portátiles. 18. Indicador de la dirección del viento (cono).	9. Mantener siempre disponible el gluconato de calcio. 10. Adquirir equipos de protección personal tanto para personal de operación como para el personal de contra incendio, para la atención de emergencias que incluyen doble protección (HF e HC). 11. Adquirir y continuar aplicando la pintura de detectores de ácido en bridas, válvulas y conexiones en todas las secciones ácidas. 12. Dar mantenimiento preventivo al sistema de circuito cerrado de televisión. 13. Continuar con los programas de simulacros operacionales y pruebas de sistema de mitigación. 14. En caso de presentarse una fuga de ácido/hidrocarburo, el personal de operación actuará de acuerdo al procedimiento de emergencias y únicamente el personal de contra incendio como apoyo.	
16	2. Fuga por sellos de bombas GA-307 A/B, de carga a la fraccionadora DA-304.	1. Fuga incontrolable de sustancias inflamables, corrosivas y tóxicas, provocando quemaduras de HF al personal, daños al medio ambiente, instalaciones y a terceros.	2 (2)	1 (2)	9 (4)	1. Sistema de mitigación. 2. Detectores de HF e hidrocarburos. 3. Botón de pánico PB-301. 4. Circuito cerrado de televisión.	1. Continuar con el programa de capacitación para todo el personal durante todo el año. 2. Relocalizar el tablero de control local del sistema de mitigación.	A (B)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Derivación: 4. Fugas HF/HC

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase			
		<p>2. Formación de nube no confinada inflamable, tóxica, corrosiva y explosiva.</p> <p>3. Explosión y/o incendio.</p>				<p>5. Capacitación a todo el personal de la refinería.</p> <p>6. Pintura detectora de HF (cambio de color naranja a rojo) en bridas, válvulas y conexiones.</p> <p>7. Regaderas y letreros.</p> <p>8. Botón de vaciado AX-001/002 de ácido de la DA-302 a los tanques recuperadores FB-301 A/B.</p> <p>9. Simulacros operacionales.</p> <p>10. Simulacros de contra incendio.</p> <p>11. Equipo autónomo de protección personal clase D de tipo encapsulado con respiración autónoma.</p> <p>12. Tablero local del sistema de mitigación.</p> <p>13. Apoyo externo del sistema de contra incendio de refinería a falla del sistema de mitigación.</p> <p>14. Sistema de control de derrames e drenajes de HF (fugas de neutralización).</p> <p>15. Disponibilidad del gluconato de calcio.</p> <p>16. Tinas de neutralización.</p>				<p>3. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo y correctivo a las bombas GA-341, GA-340 A (motor) y GA-340 B (combustión interna).</p> <p>4. Continuar con el mantenimiento a las luces de emergencia (niveles de contaminación).</p> <p>5. Instalar válvulas de corte rápido en la succión de la GA-307 A/B.</p> <p>6. Instalar en la recirculación a la torre de enfriamiento EF-300 una válvula reguladora de presión, para mantener una presión constante en el cabezal del sistema de mitigación.</p> <p>7. Ampliar el sistema del circuito cerrado de televisión, colocando una cámara adicional en la parte inferior del rack para detectar fugas en sellos de bombas, bridas y líneas.</p> <p>8. Modernizar los detectores de HF que deberán ser selectivos, para que no detecten otros compuestos.</p> <p>9. Mantener siempre disponible el gluconato de calcio.</p> <p>10. Adquirir equipos de protección personal tanto para personal de operación como para el personal de</p>	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, UNAM.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nota: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Derivación: 4. Fugas HF/HC

Esc.	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clas
						17. Sistemas de contra incendio fijos y portátiles. 18. Indicador de la dirección del viento (cono).	contra incendio, para la atención de emergencias que incluyan doble protección (HF e HC).  11. Adquirir y continuar aplicando la pintura detectora de ácido en bridas, válvulas y conexiones en todas las secciones ácidas.  12. Dar mantenimiento preventivo al sistema de circuito cerrado de televisión.  13. Continuar con los programas de simulacros operacionales y pruebas de sistema de mitigación.  14. En caso de presentarse una fuga de ácido/hidrocarburo, el personal de operación actuará de acuerdo al procedimiento de emergencia y únicamente el personal de contra incendio como apoyo.	
17	Falla del empaque de presostatos de válvulas.	1. Fuga incontrolable de sustancias inflamables, corrosivos y tóxicos, provocando quemaduras de HF al personal, daños al medio ambiente, instalaciones y a terceros.  2. Formación de nube no confinada inflamable, tóxica, corrosiva y explosiva.  3. Explosión y/o incendio.	2 (2)	1 (2)	3 (4)	1. Sistema de mitigación. 2. Detectores de HF e hidrocarburos. 3. Botón de pánico PB-801. 4. Circuito cerrado de televisión. 5. Capacitación a todo el personal de la refinería. 6. Pintura detectora de HF (cambio de color naranja a rojo) en bridas, válvulas y conexiones.	1. Continuar con el programa de capacitación para todo el personal durante todo el año.  2. Reubicar el tablero de control local del sistema de mitigación.  3. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo a válvulas.  4. Continuar con el mantenimiento a las luces de emergencia (niveles de costanera).	A (B)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nodo: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Desviación: 4. Fugas HF/HC

Esc.	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
						7. Regadores y lavajos. 8. Botón de vaciado AX-001/002 de ácido de la DA-302 e los tanques FB-301 A/B. 9. Simulacros operacionales. 10. Simulacros de contra incendio. 11. Equipo autónomo de protección personal clase D de tipo encapsulado con respiración autónoma. 12. Tablero local del sistema de mitigación. 13. Apoyo externo del sistema de contra incendio de refinería a falla del sistema de mitigación. 14. Sistema de control de derrames a drenajes de HF (fosas de neutralización). 15. Disponibilidad del glucosato de calcio. 16. Tiras de neutralización. 17. Sistemas de contra incendio fijos y portátiles. 18. Indicador de la dirección del viento (cono).	5. Instalar válvulas de corte rápido en la succión de la GA-307 A/B. 6. Instalar en la recirculación a la torre de enfriamiento EF-300 una válvula reguladora de presión, para mantener una presión constante en el cabezal del sistema de mitigación. 7. Ampliar el sistema del circuito cerrado de televisión, colocando una cámara adicional en la parte inferior del rack para detectar fugas en sellos de bombas, bridas y llaves. 8. Modernizar los detectores de HF que deben ser selectivos, para que no detecten otros compuestos. 9. Mantener siempre disponible el glucosato de calcio. 10. Adquirir equipos de protección personal tanto para personal de operación como para el personal de contra incendio, para la atención de emergencias que impliquen doble protección (HF e HC). 11. Adquirir y costear aplicando la pista detectores de ácido en bridas, válvulas y conexiones en todas las secciones ácidas. 12. Dar mantenimiento preventivo al sistema de circuito cerrado de televisión.	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química, UNAM





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nota: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, Isobutano.

Derivación: 4. Fugas HF/HC

Esc.	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
18	4. Fuga por poro en tuberías, recipientes, sopletería y accesorios.	<p>1. Fuga incontrolable de sustancias inflamables, corrosivas y tóxicas, provocando quemaduras de HF al personal, daños al medio ambiente, instalaciones y a terceros.</p> <p>2. Formación de tubo no confinada inflamable, tóxica, corrosiva y explosiva.</p> <p>3. Explosión y/o incendio.</p>	2 (3)	2 (2)	4 (6)	<p>1. Sistema de mitigación.</p> <p>2. Detectores de HF e hidrocarburos.</p> <p>3. Botón de pánico PB-301.</p> <p>4. Circuito cerrado de televisión.</p> <p>5. Capacitación a todo el personal de la refinería.</p> <p>6. Pintura detectora de HF (cambia de color naranja a rojo) en bridas, válvulas y conexiones.</p> <p>7. Regaderas y lavajos.</p> <p>8. Botón de vaciado AX-001/002 de ácido de la DA-302 al tanque FB-301 A/B.</p> <p>9. Simulacros operados sales.</p> <p>10. Simulacros de contra incendio.</p> <p>11. Equipo autónomo de protección personal clase D de tipo encapsulado con respiración autónoma.</p>	<p>1. Continuar con los programas de simulacros operacionales y pruebas de sistemas de mitigación.</p> <p>14. En caso de presentarse una fuga de ácido/hidrocarburo, el personal de operación actuará de acuerdo al programa de emergencia y únicamente el personal de contra incendio como apoyo.</p>	8 (C)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuitos: Circuito de reacción.

Fecha: 28 de enero de 2003.

Nota: Asentador de ácido fluorhídrico DA-302.

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Productos: Alquilado, ácido fluorhídrico, ASA's, isobutano.

Desviación: 4. Fugas HF/HC

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
						12. Tablero local del sistema de mitigación. 13. Apoyo externo del sistema de contra incendio de refinería a falta del sistema de mitigación. 14. Sistema de control de derrames a drenajes de HF (fosas de neutralización). 15. Disponibilidad del glucosato de calcio. 16. Tinas de neutralización. 17. Sistemas de contra incendio fijos y portátiles. 18. Indicador de la dirección del viento (cono).	adicional e a la parte inferior del rack para detectar fugas en sellos de bombas, bridas y líneas. 9. Modernizar los detectores de HF que deberán ser selectivos, para que no detecten otros compuestos. 10. Mantener siempre disponible el glucosato de calcio. 11. Adquirir equipos de protección personal tanto para personal de operación como para el personal de contra incendio, para la atención de emergencias que impliquen doble protección (HF e HC). 12. Adquirir y continuar aplicando la pintura detectora de ácido en bridas, válvulas y conexiones en todas las secciones ácidas. 13. Dar mantenimiento preventivo al sistema de circuito cerrado de televisión. 14. Continuar con los programas de simulacros operacionales y pruebas de sistema de mitigación. 15. En caso de presentarse una fuga de ácido/hidrocarburo, el personal de operación actuará de acuerdo al procedimiento de emergencia y únicamente el personal de contra incendio no apoyo.	

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química, UNAM





Planta: Alquilación.

Círculo: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Nodo: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Desviación: 1. Fugas

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
19	1. Fuga de bridas y conexiones.	<p>1. Fuga incontrolable de sustancias inflamables, corrosivas y tóxicas, provocando quemaduras de HF al personal, daños al medio ambiente, instalaciones y a terceros.</p> <p>2. Formación de nube no confinada inflamable, tóxica, corrosiva y explosiva.</p> <p>3. Explosión y/o incendio.</p>	2 (3)	2 (2)	4 (6)	<p>1. Sistema de mitigación.</p> <p>2. Detectores de HF e hidrocarburos.</p> <p>3. Circuito cerrado de televisión.</p> <p>4. Capacitación a todo el personal de la refinería y torre de decisiones para esta causa.</p> <p>5. Pintura detectora de HF (cambio de color naranja a rojo) en bridas, válvulas y conexiones.</p> <p>6. Regaderas y lavajos.</p> <p>7. Botón de vaciado AX001/002 de ácido de la DA-302 a los tanques recuperadores FB-301 A/B.</p> <p>8. Simulacros operacionales.</p> <p>9. Simulacros de contra incendio.</p> <p>10. Equipo autónomo de protección personal clase D de tipo encapsulado con respiración autónoma.</p> <p>11. Tablero local del sistema de mitigación.</p> <p>12. Apoyo externo del sistema de contra incendio de refinería a falta del sistema de mitigación.</p> <p>13. Sistema de control de derrames e derrames de HF (fosas de neutralización).</p>	<p>1. Contar con el programa de capacitación para todo el personal durante todo el año.</p> <p>2. Contar con el programa de calibración de espesores de tuberías.</p> <p>3. Reubicar el tablero de control local del sistema de mitigación.</p> <p>4. Contar con el mantenimiento a las fosas de emergencia (niveles de contaminación).</p> <p>5. Instalar en la recirculación a la torre de enfriamiento EF-300 una válvula reguladora de presión, para mantener una presión constante en el cabezal del sistema de mitigación.</p> <p>6. Ampliar el sistema del circuito cerrado de televisión, colocando una cámara adicional en la parte inferior del rack para detectar fugas en sellos de bombas, bridas y líneas.</p> <p>7. Modernizar los detectores de HF que deberán ser selectivos, para que no detecten otros compuestos.</p> <p>8. Mantener siempre disponible el glucosato de calcio.</p> <p>9. Adquirir equipos de protección personal tanto para personal de operación como para el personal de contra incendio, para la atención de emergencias que incluya doble protección (HF e HC).</p>	B (C)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, UNAM





Planta: Alquilación.

Circuitos: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Neda: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Derivación: 1. Fugas

Exc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clas
						14. Disponibilidad del glucosato de calcio. 15. Tiras de neutralización. 16. Sistemas de contra incendio fijos y portátiles. 17. Indicador de la dirección del viento (cono). 18. Control de presión PIC-31108 A/B en los tanques FB-301 A/B. 19. Las válvulas XV-31112 A/B al derribo.	10. Adquirir y continuar aplicando la pista de detectores de ácido en bridas, válvulas y conexiones en todas las secciones ácidas. 11. Dar mantenimiento preventivo al sistema de circuito cerrado de televisión. 12. Continuar con los programas de simulacro operacionales y pruebas de sistema de mitigación. 13. En caso de presentarse una fuga de ácido/hidrocarburo, el personal de operación actuará de acuerdo al procedimiento de emergencia y únicamente el personal de contra incendio como apoyo. 14. Elaborar un procedimiento en caso de presentarse fugas en esta sección de la planta.	
20	2. Fuga en empaque de prensaestopos de válvulas de bloqueo.	1. Fuga incontrolable de sustancias inflamables, corrosivas y tóxicas, provocando quemaduras de HF al personal, daños al medio ambiente, instalaciones y a terceros. 2. Formación de nube no confinada inflamable, tóxica, corrosiva y explosiva. 3. Explosión y/o incendio.	2 (3)	1 (1)	3 (4)	1. Control de presión PIC-31108 A/B en los tanques FB-301 A/B. 2. Si se presenta una fuga en las válvulas, es factible que se sellen o se abridas completamente. 3. FB-302 para vaciado de FB-301 A/B siempre y cuando tenga 50% de nivel o menos. 4. Se cuenta con bomba GA-306A para enviar el ácido al esanador DA-302.	1. Elaborar un procedimiento para control de fugas en esta sección de la planta. 2. Adecuar la logística para reparar los tanques FB-301 A/B, FB-302 y sus periféricos en la reparación general de la planta. 3. Colocar válvulas checks en la composición del sistema de mitigación con la red de agua contra incendio.	A (B)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.







Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Nota: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Desviación: 1. Fugas

Exc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
						5. Detectores de HF e hidrocarburos. 6. Tinas de neutralización. 7. Circuito cerrado de televisión. 8. Sistema de mitigación. 9. Sistemas de contra incendio fijos y portátiles. 10. Repederos y levsijos. 11. Simulacros operacionales. 12. Simulacros de contra incendio. 13. Equipo autónomo de protección personal clase D de tipo encapsulado con respiración autónoma. 14. Tablero local del sistema de mitigación. 15. Apoyo externo del sistema de contra incendio de refinería a falla del sistema de mitigación. 16. Sistema de control de derrames e drenajes de HF (fosas de neutralización). 17. Disponibilidad del gluconato de calcio.	4. Optimizar y mejorar el diseño del sistema de mitigación al detectar HF, para que actúe en forma automática. 5. Cambiar válvulas autorregulables en el sistema de mitigación por válvulas de operación neumática para mejorar la operación. 6. Instalar en la recirculación a la torre de enfriamiento EF-300 una válvula reguladora de presión, para mantener una presión constante en el cabezal del sistema de mitigación. 7. Ampliar el sistema del circuito cerrado de televisión, colocando una cámara adicional en la parte superior de la torre de enfriamiento EF-300, otra de vista general en la calle lado norte de la planta y otra en el área del calentador BA-301. 8. Los detectores de HF deberán ser selectivos, para que no detecten otros compuestos. 9. Mantener siempre disponible el gluconato de calcio. 10. Adquirir equipos de protección personal tanto para personal de operación como para el personal de contraincendio, para la atención de emergencias que incluyan doble	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Nodo: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Derivación: 1. Fugas

Exc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
							<p>protección (HF e HC), equipo Reflector de Kepler o similar.</p> <p>11. Adquirir y continuar aplicando la pletina detectora de ácido en bridas, válvulas y conexiones en todas las secciones ácidas.</p> <p>12. Implementar la política de grabación diaria de la operación en el sistema de circuito cerrado de televisión, proporcionando los casetes de video.</p> <p>13. No permitir asentamientos humanos a un mínimo de 2 Km de distancia de la planta de alquilación.</p>	
21	3. Fuga por poros en el tanque.	<p>1. Fuga incontrolable de sustancias inflamables, corrosivas y tóxicas, provocando quemaduras de HF al personal, daños al medio ambiente, instalaciones y a terceros.</p> <p>2. Formación de neblina corrosiva e inflamable, tóxica, corrosiva y explosiva.</p> <p>3. Explosión y/o incendio.</p>	2 (B)	1 (1)	3 (4)	<p>1. Sistema de mitigación.</p> <p>2. Detectores de HF e hidrocarburos.</p> <p>3. Circuito cerrado de televisión.</p> <p>4. Capacitación a todo el personal de la refinería y torre de destilación para esta causa.</p> <p>5. Pletina detectora de HF (cambia de color naranja a rojo) en bridas, válvulas y conexiones.</p> <p>6. Rayadores y levajos.</p> <p>7. Simulacros operados.</p> <p>8. Simulacros de control incendio.</p> <p>9. Equipo autónomo de protección</p>	<p>1. Continuar con el programa de capacitación para todo el personal durante todo el año.</p> <p>2. Continuar con el programa de calibración de espesores de tuberías.</p> <p>3. Reubicar el tablero de control local del sistema de mitigación.</p> <p>4. Continuar con el mantenimiento a las luces de emergencia (niveles de contaminación).</p> <p>5. Instalar en la recirculación a la torre de enfriamiento EF-300 una válvula reguladora de presión, para mantener una presión constante en el cabezal del sistema de mitigación.</p>	A (B)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, UNAM.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Nota: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Derivación: 1. Fugas

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
						<p>personal clase D de tipo encapsulado con respiración autónoma.</p> <p>10. Tablero local del sistema de mitigación.</p> <p>11. Apoyo externo del sistema de contra incendio de refinería a falla del sistema de mitigación.</p> <p>12. Sistema de control de derrames e drenajes de HF (fosas de neutralización).</p> <p>13. Disponibilidad del gluconato de calcio.</p> <p>14. Tinas de neutralización.</p> <p>15. Sistemas de contra incendio fijos y portátiles.</p> <p>16. Indicador de la dirección del viento (cono).</p> <p>17. Control de presión PIC-31108 A/B en los tanques FB-301 A/B.</p> <p>18. Las válvulas XV-31112 A/B al desfogue.</p>	<p>6. Ampliar el sistema del circuito cerrado de televisión, colocando una cámara adicional en la parte inferior del rack para detectar fugas en sellos de bombas, bridas y líneas.</p> <p>7. Modernizar los detectores de HF que deberán ser selectivos, para que no detecten otros compuestos.</p> <p>8. Mantener siempre disponible el gluconato de calcio.</p> <p>9. Adquirir equipos de protección personal tanto para personal de operación como para el personal de contra incendio, para la atención de emergencias que incluyen doble protección (HF e HC).</p> <p>10. Adquirir y continuar aplicando la pintura detectora de ácido en bridas, válvulas y conexiones en todas las secciones ácidas.</p> <p>11. Dar mantenimiento preventivo al sistema de circuito cerrado de televisión.</p> <p>12. Continuar con los programas de simulacros operacionales y pruebas de sistema de mitigación.</p> <p>13. En caso de presentarse una fuga de ácido/hidrocarburo, el personal de</p>	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Node: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Desviación: 1. Fugas

Esc.	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
							operación actuará de acuerdo al procedimiento de emergencia y únicamente el personal de contra incendio como apoyo. 14. Elaborar un procedimiento en caso de presentarse fugas en esta sección de la planta.	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química, UNAM.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Nota: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Derivación: 2. Alto nivel

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clas
22	1. Falta en los analizadores de densidad y/o posición de abierto de las válvulas XV-31109 A/B/C/D y XV-31111 A/B.  a) Por falla del posicionador de la válvula. b) Atoramiento por obstrucción de fluoruros.	1. Bajo nivel de ácido en el asentador DA-302 y disparo de las bombas GA-307 A/B. 2. Alta presión en el FB-301 A/B. 3. Ralevo de las válvulas PSV-3062 A/B. 4. Corrosión excesiva de sosa en DA-307, torre neutralizadora de desfogue ácido. 5. Paro de planta.	2 (3)	3 (3)	6 (7)	1. Alarma por alto nivel LAH-31111 A/B. 2. Alarma por bajo nivel LT-31110 en DA-302. 3. Alarma por alta presión PIC-31108 A/B. 4. Medición manual del nivel por válvulas trycoche en DA-302. 5. Medición manual del nivel por válvulas trycoche en FB-301 A/B. 6. Válvulas de seguridad PSV-3059 y PSV-3062 A/B en DA-302 y FB-301 A/B respectivamente. 7. Alarma por alta presión PT-31108 A/B en FB-301 A/B. 8. Alarma por alta temperatura TI-31186 en DA-307.	1. Continuar con el programa de mantenimiento a los analizadores de densidad. 2. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento al personal en la toma de decisiones. 3. Operar dentro de las condiciones de operación de diseño para minimizar la formación de fluoruros (temperatura de reacción no mayor a 40° C). 4. Continuar con el programa de mantenimiento a válvulas.	C (D)
23	2. Falta de energía eléctrica y PLC (controlador lógico programable) de protecciones de la planta.  a) Falta de comunicación entre el PLC y el sistema de control distribuido.	1. Bajo nivel de ácido en el asentador DA-302 y disparo de las bombas GA-307 A/B. 2. Alta presión en el FB-301 A/B. 3. Ralevo de las válvulas PSV-3062 A/B. 4. Corrosión excesiva de sosa en DA-307, torre neutralizadora de desfogue ácido. 5. Paro de planta.	1 (1)	3 (3)	4 (4)	1. Alarma de falla del PLC (controlador lógico programable) en el sistema de control distribuido. 2. Alarma de actuación del botón de pánico PB-301. 3. Respaldo por backup de baterías del PLC (controlador lógico programable). 4. Alarma por bajo nivel LAH-31108 que manda a disparar las bombas GA-307 A/B.	1. Realizar un estudio por el fabricante para localizar posibles fallas del PLC y standardizar en tiempo y forma. 2. Continuar con el programa de capacitación a todo el personal involucrado (operación y mantenimiento).	B (B)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Nota: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Deviación: 2. Alto nivel

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
24	3. Falla en el botón de emergencia PB-301 o falla en el sistema de vaciado de ácido.  a) Por error humano.	1. Bajo nivel de ácido en el asentador DA-302 y disparo de las bombas GA-307 A/B.  2. Alta presión en el FB-301 A/B.  3. Relevo de las válvulas PSV-3062 A/B.  4. Consumo excesivo de sosa en DA-307, torre neutralizadora de desfogue ácido.  5. Páreo de planta.	1 (3)	3 (3)	4 (7)	1. Alarma de falla del PLC (controlador lógico programable) en el sistema de control distribuido.  2. Alarma de actuación del botón de pánico PB-301 y fuga de ácido AX-001.  3. Alarma por bajo nivel LAH-31108 que manda a disparar las bombas GA-307 A/B.	1. Programa de mantenimiento preventivo a los lógicos de control.  2. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento al personal para la toma de decisiones.  3. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo a los detectores de ácido.	B (D)
25	4. Falla de procedimiento en forma manual del traspaso de ácido del FB-302 al asentador de ácido DA-302.  a) Al abrir válvulas al FB-301 A/B.  b) Que se pasen las 2 válvulas manuales de interconexión entre recipientes.	1. Alta presión en el FB-301 A/B.  2. Relevo de las válvulas PSV-3062 A/B.  3. Envío de ácido de alta pureza al desfogue.  4. Alto consumo de sosa clástica.  5. Páreo de planta por falta de ácido fluorhídrico.	3 (3)	3 (4)	7 (9)	1. Procedimiento de traspaso de ácido.  2. Alarmas por alto nivel botes y asentador.  3. Alarmas por alta presión botes.  4. Neutralizador de desfogue ácido DA-307.  5. PSV's 3062, 3059 y 3075.	1. Verificar que estén debidamente rotuladas las válvulas manuales del procedimiento.  2. Incluir en los programas de capacitación y adiestramiento al personal el procedimiento de traspaso de ácido.  3. Continuar con el programa de capacitación y adiestramiento al personal y en especial para el personal de nuevo ingreso.  4. Adquirir válvulas de Monel de cierre hermético nivel 4.	D (D)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química UNAM





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Nodo: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Deviación: 3. Alta presión

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Previsiones	Recomendaciones	Clase
26	1. Vaciado de DA-302 y falso en posición de cerrado de XV-31108.	1. Actuación de la válvula de seguridad PSV-3062A en FB-301A. 2. Envío de HF/HC a DA-307. 3. Consumo excesivo de sosa en DA-307. 4. Corrosión excesiva en líneas y equipos. 5. Páreo de planta.	1 (3)	2 (3)	3 (7)	1. Válvula de seguridad PSV-3062A en FB-301A. 2. Volante de XV-11108 para actuación manual de la válvula. 3. Indicador local de presión PT-31107A en FB-301A. 4. Alarma por alta presión PT-31107A en FB-301A. 5. Alarma por alta temperatura TI-31186 en torre neutralizadora de desfogues ácidos DA-307. 6. Calibración de líneas y equipos.	1. Programa de calibración y mantenimiento a PSV's. 2. Programa de mantenimiento preventivo a válvulas e instrumentos. 3. Continuar con la capacitación y adiestramiento del personal para la toma de decisiones.	A (D)
27	2. Vaciado de DA-302 con falso señal en PT-31107 indicando menor presión de la real.	1. Calibración de la válvula de seguridad PSV-3062A en FB-301A. 2. Envío de HF/HC a DA-307. 3. Consumo excesivo de sosa en DA-307. 4. Corrosión excesiva en líneas y equipos. 5. Páreo de planta.	2 (2)	2 (3)	4 (5)	1. Válvula de seguridad PSV-3062A en FB-301A. 2. Indicador local de presión PI-3055A en FB-301A. 3. Alarma por alta presión PT-31108A en FB-301A. 4. Mantenimiento preventivo a instrumentos. 5. Alarma por alta temperatura TI-31186 en torre neutralizadora de desfogues ácidos DA-307. 6. Calibración de líneas y equipos.	1. Programa de calibración y mantenimiento a PSV's. 2. Programa de mantenimiento preventivo a válvulas e instrumentos. 3. Continuar con la capacitación y adiestramiento del personal para la toma de decisiones.	B (C)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



ANEXOS

Facultad de Química, U.N.A.M.





Planta: Alquilación.

Circuito: Circuito de reacción.

Fecha: 6 de febrero de 2003.

Nota: Tanque receptor de vaciado de emergencia (FB-301 A/B).

Diagramas: PAP-33-P1-EF-006A, PAP-33-P1-EF-006B

Producto: Ácido fluorhídrico.

Desviación: 3. Alta presión

Esc	Causa	Consecuencias	F	G	R	Protecciones	Recomendaciones	Clase
28	3. Se pasa válvula manual de nitrógeno al FB-301 A/B.	1. Relevo de las PSV-3062 A/B. 2. Pérdida de ácido a desfogue. 3. Mayor consumo de nitrógeno y de sosa cáustica en el DA-307. 4. Paro de planta.	2 (2)	3 (4)	6 (7)	1. Alarmas por alta presión PT-31107 A/B, PI-3055 A/B, PT-31108 A/B. 2. PT-31260 en línea de nitrógeno de L.B. 3. PSV's en los recipientes.	1. Adquirir válvulas de Monel de cierre hermético nivel 4. 2. Realizar inspecciones en campo y tendencias de históricos.	C (D)
29	4. Alto contenido de olefinas en el tanque FB-301 A/B debido a un alto nivel.	1. Reacciones exotérmicas. 2. Relevo de las PSV-3062 A/B de los tanques. 3. Fugas por bridas. 4. Incendio.	2 (2)	3 (4)	6 (7)	1. Densímetros DT-31101 A/D. 2. Alarmas por alta presión en FB-301 A/B.	1. Continuar con el programa de mantenimiento preventivo a densímetros. 2. Continuar con la capacitación y adiestramiento del personal para la toma de decisiones. 3. Programa de mantenimiento y calibración a PSV's.	C (D)

Nota: en las columnas correspondientes a frecuencia (F), gravedad (G) y riesgo (R), el valor encerrado entre paréntesis corresponde a una valoración de los escenarios con protecciones; en cambio, los que no corresponden a una valoración de los escenarios, sin protecciones. Se sigue el mismo criterio para la columna correspondiente a la Clase.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

Facultad de Química, UNAM.

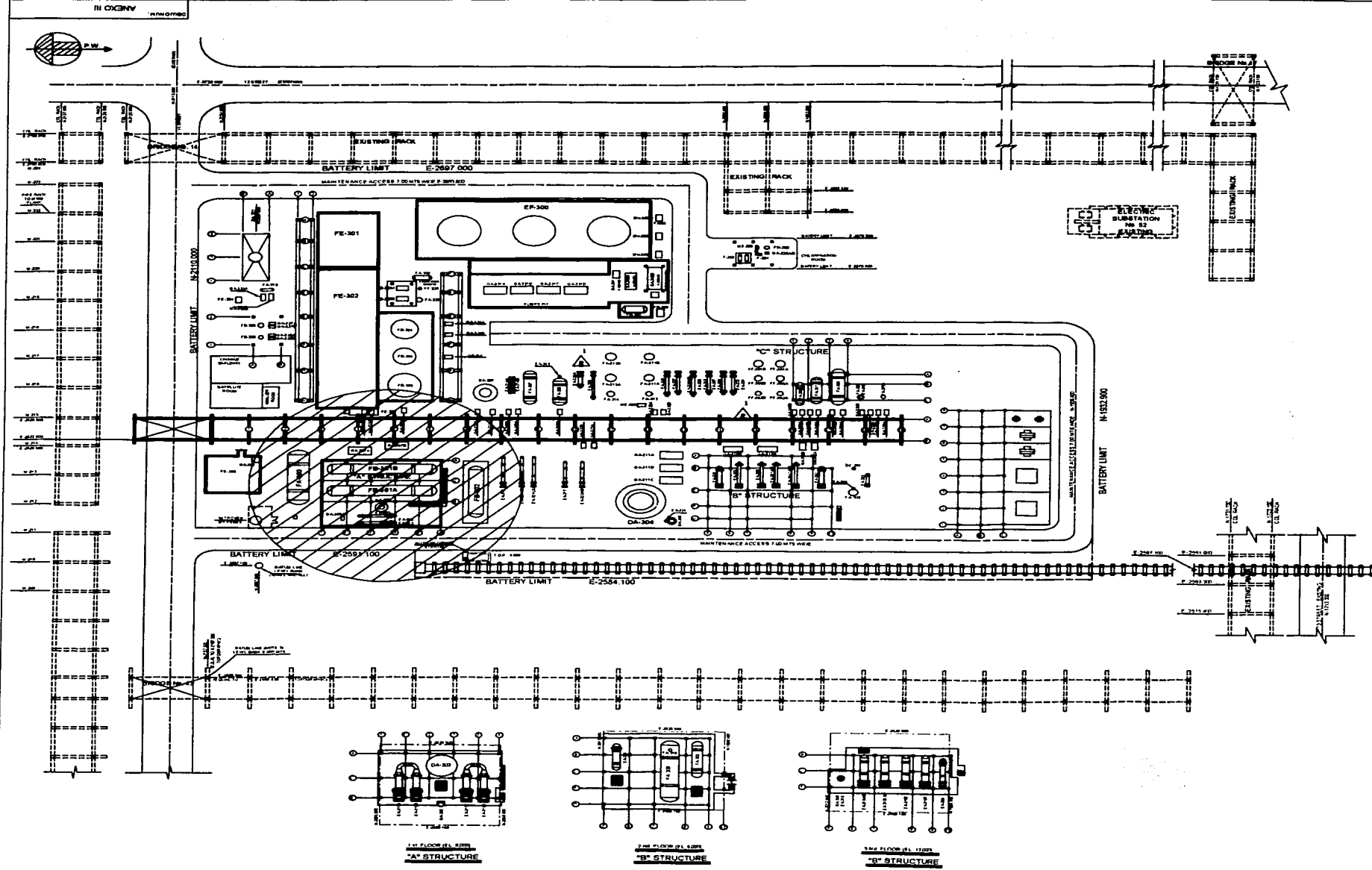




**Anexo II.D. Lista jerarquizada de escenarios.**

Clase	Escenario	Nodo	Desviación
B	13	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Bajo nivel
B	15	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Fugas HF/HC
B	16	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Fugas HF/HC
B	17	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Fugas HF/HC
B	20	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Fugas
B	21	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Fugas
B	23	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Alto nivel
C	1	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta temperatura
C	2	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta temperatura
C	3	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta temperatura
C	4	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta temperatura
C	5	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta temperatura
C	6	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta presión
C	7	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta temperatura
C	11	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Bajo nivel
C	12	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Bajo nivel
C	18	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Fugas HF/HC
C	19	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Fugas
C	27	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Alta presión
D	8	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta presión
D	9	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta presión
D	10	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Alta presión
D	14	Asentador de ácido fluorhídrico DA-302	Bajo nivel
D	22	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Alto nivel
D	24	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Alto nivel
D	25	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Alto nivel
D	26	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Alta presión
D	28	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Alta presión
D	29	Tanque receptor de vaciado de emergencia FB-301 A/B	Alta presión

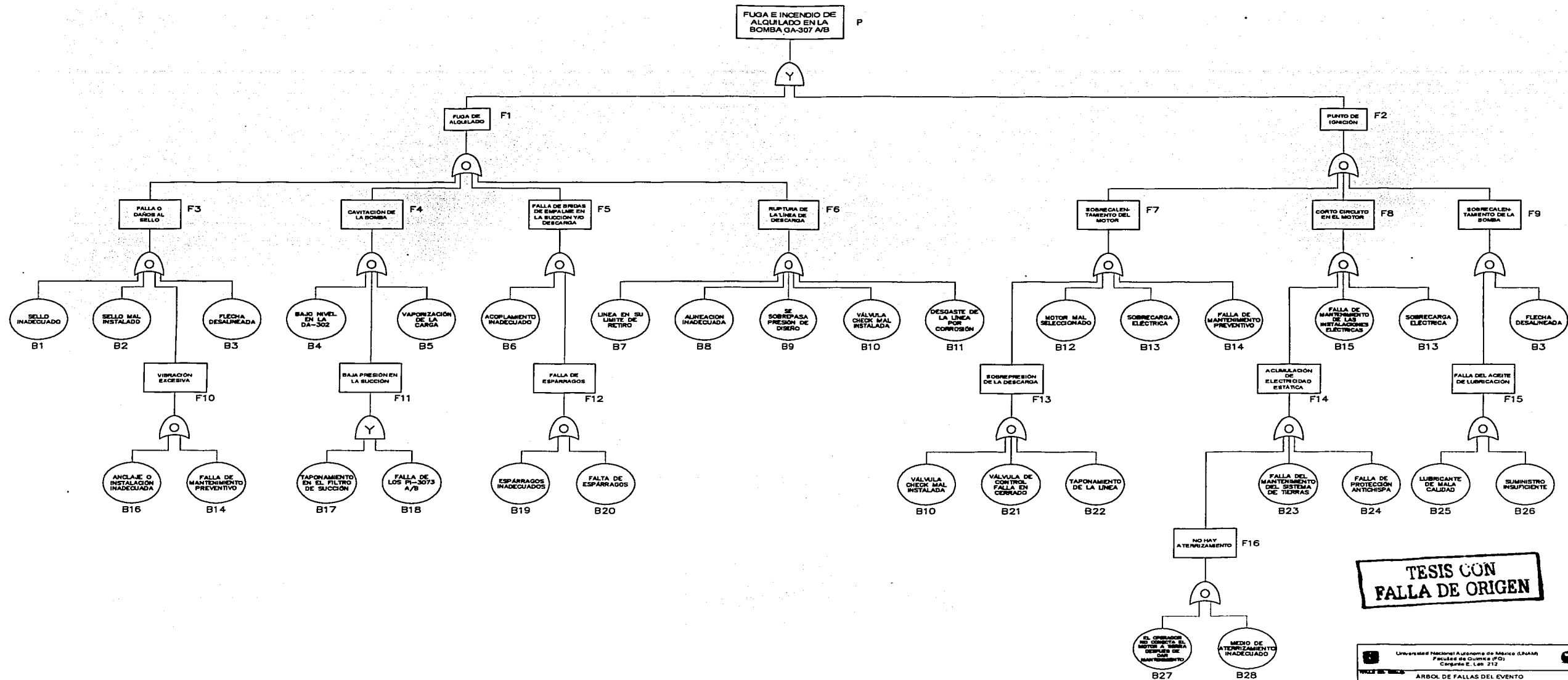
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



EQUIPMENT INDEX	
EQUIP No.	DESCRIPTION
DA-300	MAIN PRACTICATOR RECYCLE PUMP/PLUMBER
DA-301	COOLING PUMP
DA-302	CHIMNEY
DA-303	ACID RECYCLE COLLECTOR
DA-304	ACID RECYCLE COLLECTOR
DA-305	ACID RECYCLE COLLECTOR
DA-306	ACID RECYCLE COLLECTOR
DA-307	ACID RECYCLE COLLECTOR
DA-308	HYDROCHLORIC ACID TANK
DA-309	HYDROCHLORIC ACID TANK
DA-310	HYDROCHLORIC ACID TANK
DA-311	CHIMNEY
DA-312	CHIMNEY
DA-313	CHIMNEY
DA-314	CHIMNEY
DA-315	CHIMNEY
DA-316	CHIMNEY
DA-317	CHIMNEY
DA-318	CHIMNEY
DA-319	CHIMNEY
DA-320	CHIMNEY
DA-321	CHIMNEY
DA-322	CHIMNEY
DA-323	CHIMNEY
DA-324	CHIMNEY
DA-325	CHIMNEY
DA-326	CHIMNEY
DA-327	CHIMNEY
DA-328	CHIMNEY
DA-329	CHIMNEY
DA-330	CHIMNEY
DA-331	CHIMNEY
DA-332	CHIMNEY
DA-333	CHIMNEY
DA-334	CHIMNEY
DA-335	CHIMNEY
DA-336	CHIMNEY
DA-337	CHIMNEY
DA-338	CHIMNEY
DA-339	CHIMNEY
DA-340	CHIMNEY
DA-341	CHIMNEY
DA-342	CHIMNEY
DA-343	CHIMNEY
DA-344	CHIMNEY
DA-345	CHIMNEY
DA-346	CHIMNEY
DA-347	CHIMNEY
DA-348	CHIMNEY
DA-349	CHIMNEY
DA-350	CHIMNEY
DA-351	CHIMNEY
DA-352	CHIMNEY
DA-353	CHIMNEY
DA-354	CHIMNEY
DA-355	CHIMNEY
DA-356	CHIMNEY
DA-357	CHIMNEY
DA-358	CHIMNEY
DA-359	CHIMNEY
DA-360	CHIMNEY
DA-361	CHIMNEY
DA-362	CHIMNEY
DA-363	CHIMNEY
DA-364	CHIMNEY
DA-365	CHIMNEY
DA-366	CHIMNEY
DA-367	CHIMNEY
DA-368	CHIMNEY
DA-369	CHIMNEY
DA-370	CHIMNEY
DA-371	CHIMNEY
DA-372	CHIMNEY
DA-373	CHIMNEY
DA-374	CHIMNEY
DA-375	CHIMNEY
DA-376	CHIMNEY
DA-377	CHIMNEY
DA-378	CHIMNEY
DA-379	CHIMNEY
DA-380	CHIMNEY
DA-381	CHIMNEY
DA-382	CHIMNEY
DA-383	CHIMNEY
DA-384	CHIMNEY
DA-385	CHIMNEY
DA-386	CHIMNEY
DA-387	CHIMNEY
DA-388	CHIMNEY
DA-389	CHIMNEY
DA-390	CHIMNEY
DA-391	CHIMNEY
DA-392	CHIMNEY
DA-393	CHIMNEY
DA-394	CHIMNEY
DA-395	CHIMNEY
DA-396	CHIMNEY
DA-397	CHIMNEY
DA-398	CHIMNEY
DA-399	CHIMNEY
DA-400	CHIMNEY
DA-401	CHIMNEY
DA-402	CHIMNEY
DA-403	CHIMNEY
DA-404	CHIMNEY
DA-405	CHIMNEY
DA-406	CHIMNEY
DA-407	CHIMNEY
DA-408	CHIMNEY
DA-409	CHIMNEY
DA-410	CHIMNEY
DA-411	CHIMNEY
DA-412	CHIMNEY
DA-413	CHIMNEY
DA-414	CHIMNEY
DA-415	CHIMNEY
DA-416	CHIMNEY
DA-417	CHIMNEY
DA-418	CHIMNEY
DA-419	CHIMNEY
DA-420	CHIMNEY
DA-421	CHIMNEY
DA-422	CHIMNEY
DA-423	CHIMNEY
DA-424	CHIMNEY
DA-425	CHIMNEY
DA-426	CHIMNEY
DA-427	CHIMNEY
DA-428	CHIMNEY
DA-429	CHIMNEY
DA-430	CHIMNEY
DA-431	CHIMNEY
DA-432	CHIMNEY
DA-433	CHIMNEY
DA-434	CHIMNEY
DA-435	CHIMNEY
DA-436	CHIMNEY
DA-437	CHIMNEY
DA-438	CHIMNEY
DA-439	CHIMNEY
DA-440	CHIMNEY
DA-441	CHIMNEY
DA-442	CHIMNEY
DA-443	CHIMNEY
DA-444	CHIMNEY
DA-445	CHIMNEY
DA-446	CHIMNEY
DA-447	CHIMNEY
DA-448	CHIMNEY
DA-449	CHIMNEY
DA-450	CHIMNEY
DA-451	CHIMNEY
DA-452	CHIMNEY
DA-453	CHIMNEY
DA-454	CHIMNEY
DA-455	CHIMNEY
DA-456	CHIMNEY
DA-457	CHIMNEY
DA-458	CHIMNEY
DA-459	CHIMNEY
DA-460	CHIMNEY
DA-461	CHIMNEY
DA-462	CHIMNEY
DA-463	CHIMNEY
DA-464	CHIMNEY
DA-465	CHIMNEY
DA-466	CHIMNEY
DA-467	CHIMNEY
DA-468	CHIMNEY
DA-469	CHIMNEY
DA-470	CHIMNEY
DA-471	CHIMNEY
DA-472	CHIMNEY
DA-473	CHIMNEY
DA-474	CHIMNEY
DA-475	CHIMNEY
DA-476	CHIMNEY
DA-477	CHIMNEY
DA-478	CHIMNEY
DA-479	CHIMNEY
DA-480	CHIMNEY
DA-481	CHIMNEY
DA-482	CHIMNEY
DA-483	CHIMNEY
DA-484	CHIMNEY
DA-485	CHIMNEY
DA-486	CHIMNEY
DA-487	CHIMNEY
DA-488	CHIMNEY
DA-489	CHIMNEY
DA-490	CHIMNEY
DA-491	CHIMNEY
DA-492	CHIMNEY
DA-493	CHIMNEY
DA-494	CHIMNEY
DA-495	CHIMNEY
DA-496	CHIMNEY
DA-497	CHIMNEY
DA-498	CHIMNEY
DA-499	CHIMNEY
DA-500	CHIMNEY

DIAGRAMA DE ZONAS DE EXPOSICION  
 RADIO DE EXPOSICION (RE) = 24.66 m  
 AREA DE EXPOSICION (AE) = 1,941 m<sup>2</sup>

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

FLUGA E INCENDIO DE ALQUILADO EN LA BOMBA GA-307 A/B P



FLUGA DE ALQUILADO F1

PUNTO DE IGNICION F2

FALLA O DAÑOS AL BELLO F3

CAVITACION DE LA BOMBA F4

FALLA DE BRIDAS DE EMPALME EN LA SUCCION Y/O DESCARGA F5

RUPTURA DE LA LINEA DE DESCARGA F6

SOBRECALENTAMIENTO DEL MOTOR F7

CORTO CIRCUITO EN EL MOTOR F8

SOBRECALENTAMIENTO DE LA BOMBA F9

BAJO NIVEL EN LA DA-302 B4

VAPORIZACION DE LA CARGA B5

BAJA PRESION EN LA SUCCION F11

TAPONAMIENTO EN EL FILTRO DE SUCCION B17

FALLA DE LOS PI-3073 A/B B18

LINEA EN SU LIMITE DE RETIRO B7

SE SOBREPASA PRESION DE DISEÑO B9

DESGASTE DE LA LINEA POR CORROSION B11

SOBRECARGA ELECTRICA B13

SOBREPRESION DE LA DESCARGA F13

VÁLVULA DE CONTROL FALLA EN CERRADO B21

TAPONAMIENTO DE LA LINEA B22

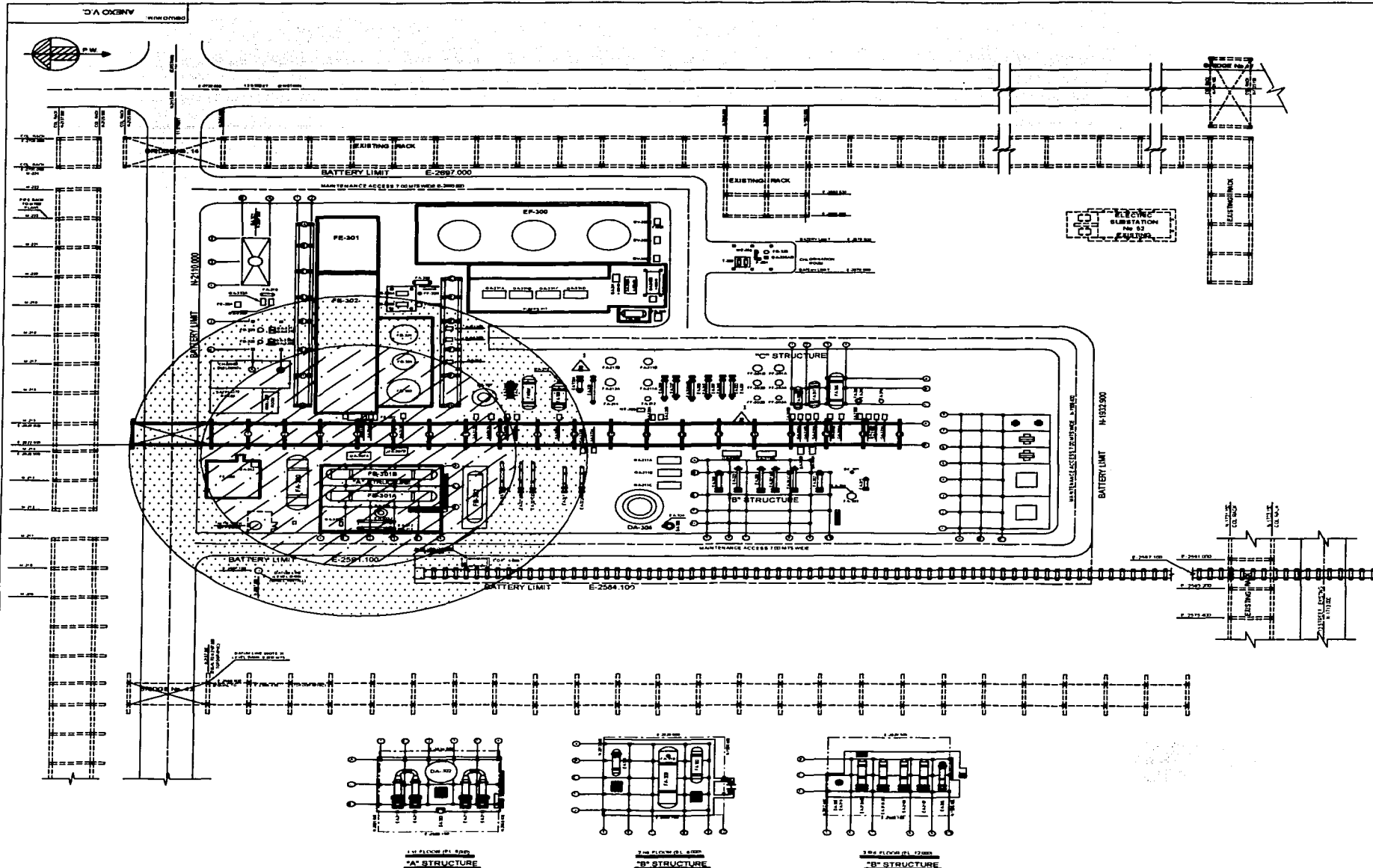
SOBRECARGA ELECTRICA B13

ACUMULACION DE ELECTRICIDAD ESTÁTICA F14

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



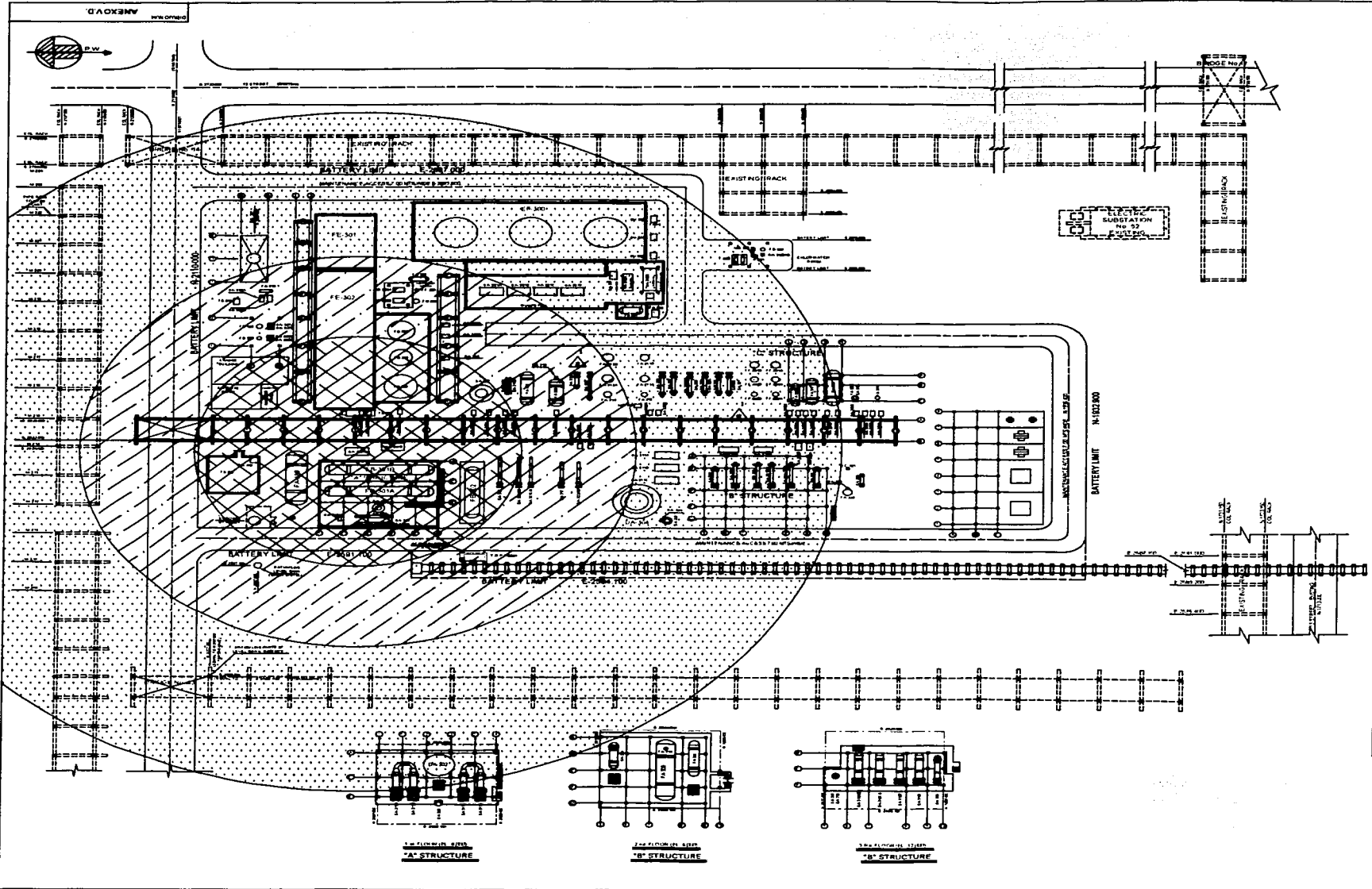




EQUIPMENT INDEX	
EQ. I.D. No.	DESCRIPTION
EA-201	MAIN FRAC TOWER REBOILER SURFACE
EA-202	ACID REBOILER
EA-203	CONDENSER
EA-204	ACID REBOILER
EA-205	CONDENSER
EA-206	CONDENSER
EA-207	CONDENSER
EA-208	CONDENSER
EA-209	CONDENSER
EA-210	CONDENSER
EA-211	CONDENSER
EA-212	CONDENSER
EA-213	CONDENSER
EA-214	CONDENSER
EA-215	CONDENSER
EA-216	CONDENSER
EA-217	CONDENSER
EA-218	CONDENSER
EA-219	CONDENSER
EA-220	CONDENSER
EA-221	CONDENSER
EA-222	CONDENSER
EA-223	CONDENSER
EA-224	CONDENSER
EA-225	CONDENSER
EA-226	CONDENSER
EA-227	CONDENSER
EA-228	CONDENSER
EA-229	CONDENSER
EA-230	CONDENSER
EA-231	CONDENSER
EA-232	CONDENSER
EA-233	CONDENSER
EA-234	CONDENSER
EA-235	CONDENSER
EA-236	CONDENSER
EA-237	CONDENSER
EA-238	CONDENSER
EA-239	CONDENSER
EA-240	CONDENSER
EA-241	CONDENSER
EA-242	CONDENSER
EA-243	CONDENSER
EA-244	CONDENSER
EA-245	CONDENSER
EA-246	CONDENSER
EA-247	CONDENSER
EA-248	CONDENSER
EA-249	CONDENSER
EA-250	CONDENSER
EA-251	CONDENSER
EA-252	CONDENSER
EA-253	CONDENSER
EA-254	CONDENSER
EA-255	CONDENSER
EA-256	CONDENSER
EA-257	CONDENSER
EA-258	CONDENSER
EA-259	CONDENSER
EA-260	CONDENSER
EA-261	CONDENSER
EA-262	CONDENSER
EA-263	CONDENSER
EA-264	CONDENSER
EA-265	CONDENSER
EA-266	CONDENSER
EA-267	CONDENSER
EA-268	CONDENSER
EA-269	CONDENSER
EA-270	CONDENSER
EA-271	CONDENSER
EA-272	CONDENSER
EA-273	CONDENSER
EA-274	CONDENSER
EA-275	CONDENSER
EA-276	CONDENSER
EA-277	CONDENSER
EA-278	CONDENSER
EA-279	CONDENSER
EA-280	CONDENSER
EA-281	CONDENSER
EA-282	CONDENSER
EA-283	CONDENSER
EA-284	CONDENSER
EA-285	CONDENSER
EA-286	CONDENSER
EA-287	CONDENSER
EA-288	CONDENSER
EA-289	CONDENSER
EA-290	CONDENSER
EA-291	CONDENSER
EA-292	CONDENSER
EA-293	CONDENSER
EA-294	CONDENSER
EA-295	CONDENSER
EA-296	CONDENSER
EA-297	CONDENSER
EA-298	CONDENSER
EA-299	CONDENSER
EA-300	CONDENSER
EA-301	CONDENSER
EA-302	CONDENSER
EA-303	CONDENSER
EA-304	CONDENSER
EA-305	CONDENSER
EA-306	CONDENSER
EA-307	CONDENSER
EA-308	CONDENSER
EA-309	CONDENSER
EA-310	CONDENSER
EA-311	CONDENSER
EA-312	CONDENSER
EA-313	CONDENSER
EA-314	CONDENSER
EA-315	CONDENSER
EA-316	CONDENSER
EA-317	CONDENSER
EA-318	CONDENSER
EA-319	CONDENSER
EA-320	CONDENSER
EA-321	CONDENSER
EA-322	CONDENSER
EA-323	CONDENSER
EA-324	CONDENSER
EA-325	CONDENSER
EA-326	CONDENSER
EA-327	CONDENSER
EA-328	CONDENSER
EA-329	CONDENSER
EA-330	CONDENSER
EA-331	CONDENSER
EA-332	CONDENSER
EA-333	CONDENSER
EA-334	CONDENSER
EA-335	CONDENSER
EA-336	CONDENSER
EA-337	CONDENSER
EA-338	CONDENSER
EA-339	CONDENSER
EA-340	CONDENSER
EA-341	CONDENSER
EA-342	CONDENSER
EA-343	CONDENSER
EA-344	CONDENSER
EA-345	CONDENSER
EA-346	CONDENSER
EA-347	CONDENSER
EA-348	CONDENSER
EA-349	CONDENSER
EA-350	CONDENSER
EA-351	CONDENSER
EA-352	CONDENSER
EA-353	CONDENSER
EA-354	CONDENSER
EA-355	CONDENSER
EA-356	CONDENSER
EA-357	CONDENSER
EA-358	CONDENSER
EA-359	CONDENSER
EA-360	CONDENSER
EA-361	CONDENSER
EA-362	CONDENSER
EA-363	CONDENSER
EA-364	CONDENSER
EA-365	CONDENSER
EA-366	CONDENSER
EA-367	CONDENSER
EA-368	CONDENSER
EA-369	CONDENSER
EA-370	CONDENSER
EA-371	CONDENSER
EA-372	CONDENSER
EA-373	CONDENSER
EA-374	CONDENSER
EA-375	CONDENSER
EA-376	CONDENSER
EA-377	CONDENSER
EA-378	CONDENSER
EA-379	CONDENSER
EA-380	CONDENSER
EA-381	CONDENSER
EA-382	CONDENSER
EA-383	CONDENSER
EA-384	CONDENSER
EA-385	CONDENSER
EA-386	CONDENSER
EA-387	CONDENSER
EA-388	CONDENSER
EA-389	CONDENSER
EA-390	CONDENSER
EA-391	CONDENSER
EA-392	CONDENSER
EA-393	CONDENSER
EA-394	CONDENSER
EA-395	CONDENSER
EA-396	CONDENSER
EA-397	CONDENSER
EA-398	CONDENSER
EA-399	CONDENSER
EA-400	CONDENSER
EA-401	CONDENSER
EA-402	CONDENSER
EA-403	CONDENSER
EA-404	CONDENSER
EA-405	CONDENSER
EA-406	CONDENSER
EA-407	CONDENSER
EA-408	CONDENSER
EA-409	CONDENSER
EA-410	CONDENSER
EA-411	CONDENSER
EA-412	CONDENSER
EA-413	CONDENSER
EA-414	CONDENSER
EA-415	CONDENSER
EA-416	CONDENSER
EA-417	CONDENSER
EA-418	CONDENSER
EA-419	CONDENSER
EA-420	CONDENSER
EA-421	CONDENSER
EA-422	CONDENSER
EA-423	CONDENSER
EA-424	CONDENSER
EA-425	CONDENSER
EA-426	CONDENSER
EA-427	CONDENSER
EA-428	CONDENSER
EA-429	CONDENSER
EA-430	CONDENSER
EA-431	CONDENSER
EA-432	CONDENSER
EA-433	CONDENSER
EA-434	CONDENSER
EA-435	CONDENSER
EA-436	CONDENSER
EA-437	CONDENSER
EA-438	CONDENSER
EA-439	CONDENSER
EA-440	CONDENSER
EA-441	CONDENSER
EA-442	CONDENSER
EA-443	CONDENSER
EA-444	CONDENSER
EA-445	CONDENSER
EA-446	CONDENSER
EA-447	CONDENSER
EA-448	CONDENSER
EA-449	CONDENSER
EA-450	CONDENSER
EA-451	CONDENSER
EA-452	CONDENSER
EA-453	CONDENSER
EA-454	CONDENSER
EA-455	CONDENSER
EA-456	CONDENSER
EA-457	CONDENSER
EA-458	CONDENSER
EA-459	CONDENSER
EA-460	CONDENSER
EA-461	CONDENSER
EA-462	CONDENSER
EA-463	CONDENSER
EA-464	CONDENSER
EA-465	CONDENSER
EA-466	CONDENSER
EA-467	CONDENSER
EA-468	CONDENSER
EA-469	CONDENSER
EA-470	CONDENSER
EA-471	CONDENSER
EA-472	CONDENSER
EA-473	CONDENSER
EA-474	CONDENSER
EA-475	CONDENSER
EA-476	CONDENSER
EA-477	CONDENSER
EA-478	CONDENSER
EA-479	CONDENSER
EA-480	CONDENSER
EA-481	CONDENSER
EA-482	CONDENSER
EA-483	CONDENSER
EA-484	CONDENSER
EA-485	CONDENSER
EA-486	CONDENSER
EA-487	CONDENSER
EA-488	CONDENSER
EA-489	CONDENSER
EA-490	CONDENSER
EA-491	CONDENSER
EA-492	CONDENSER
EA-493	CONDENSER
EA-494	CONDENSER
EA-495	CONDENSER
EA-496	CONDENSER
EA-497	CONDENSER
EA-498	CONDENSER
EA-499	CONDENSER
EA-500	CONDENSER

DIAGRAMA DE REGIONES DE INFLAMABILIDAD  
 CONCENTRACION = L.I.I. (17,259 ppm)  
 RADIO = 28.65 m  
 CONCENTRACION = 1/2 L.I.I. (8,629.5 ppm)  
 RADIO = 41.45 m

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



**EQUIPMENT INDEX**

EQUIP No	DESCRIPTION
BA 301	MAIN FRACTIONATOR REHEAT FURNACE
BA 302	COLDING TANK
BA 303	DRUM STRAINER
BA 304	ACID REHEAT FURNACE
BA 305	MAIN FRACTIONATOR
BA 306	ACID REHEAT FURNACE
BA 307	ACID REHEAT FURNACE
BA 308	ACID REHEAT FURNACE
BA 309	ACID REHEAT FURNACE
BA 310	ACID REHEAT FURNACE
BA 311	ACID REHEAT FURNACE
BA 312	ACID REHEAT FURNACE
BA 313	ACID REHEAT FURNACE
BA 314	ACID REHEAT FURNACE
BA 315	ACID REHEAT FURNACE
BA 316	ACID REHEAT FURNACE
BA 317	ACID REHEAT FURNACE
BA 318	ACID REHEAT FURNACE
BA 319	ACID REHEAT FURNACE
BA 320	ACID REHEAT FURNACE
BA 321	ACID REHEAT FURNACE
BA 322	ACID REHEAT FURNACE
BA 323	ACID REHEAT FURNACE
BA 324	ACID REHEAT FURNACE
BA 325	ACID REHEAT FURNACE
BA 326	ACID REHEAT FURNACE
BA 327	ACID REHEAT FURNACE
BA 328	ACID REHEAT FURNACE
BA 329	ACID REHEAT FURNACE
BA 330	ACID REHEAT FURNACE
BA 331	ACID REHEAT FURNACE
BA 332	ACID REHEAT FURNACE
BA 333	ACID REHEAT FURNACE
BA 334	ACID REHEAT FURNACE
BA 335	ACID REHEAT FURNACE
BA 336	ACID REHEAT FURNACE
BA 337	ACID REHEAT FURNACE
BA 338	ACID REHEAT FURNACE
BA 339	ACID REHEAT FURNACE
BA 340	ACID REHEAT FURNACE
BA 341	ACID REHEAT FURNACE
BA 342	ACID REHEAT FURNACE
BA 343	ACID REHEAT FURNACE
BA 344	ACID REHEAT FURNACE
BA 345	ACID REHEAT FURNACE
BA 346	ACID REHEAT FURNACE
BA 347	ACID REHEAT FURNACE
BA 348	ACID REHEAT FURNACE
BA 349	ACID REHEAT FURNACE
BA 350	ACID REHEAT FURNACE
BA 351	ACID REHEAT FURNACE
BA 352	ACID REHEAT FURNACE
BA 353	ACID REHEAT FURNACE
BA 354	ACID REHEAT FURNACE
BA 355	ACID REHEAT FURNACE
BA 356	ACID REHEAT FURNACE
BA 357	ACID REHEAT FURNACE
BA 358	ACID REHEAT FURNACE
BA 359	ACID REHEAT FURNACE
BA 360	ACID REHEAT FURNACE
BA 361	ACID REHEAT FURNACE
BA 362	ACID REHEAT FURNACE
BA 363	ACID REHEAT FURNACE
BA 364	ACID REHEAT FURNACE
BA 365	ACID REHEAT FURNACE
BA 366	ACID REHEAT FURNACE
BA 367	ACID REHEAT FURNACE
BA 368	ACID REHEAT FURNACE
BA 369	ACID REHEAT FURNACE
BA 370	ACID REHEAT FURNACE
BA 371	ACID REHEAT FURNACE
BA 372	ACID REHEAT FURNACE
BA 373	ACID REHEAT FURNACE
BA 374	ACID REHEAT FURNACE
BA 375	ACID REHEAT FURNACE
BA 376	ACID REHEAT FURNACE
BA 377	ACID REHEAT FURNACE
BA 378	ACID REHEAT FURNACE
BA 379	ACID REHEAT FURNACE
BA 380	ACID REHEAT FURNACE
BA 381	ACID REHEAT FURNACE
BA 382	ACID REHEAT FURNACE
BA 383	ACID REHEAT FURNACE
BA 384	ACID REHEAT FURNACE
BA 385	ACID REHEAT FURNACE
BA 386	ACID REHEAT FURNACE
BA 387	ACID REHEAT FURNACE
BA 388	ACID REHEAT FURNACE
BA 389	ACID REHEAT FURNACE
BA 390	ACID REHEAT FURNACE
BA 391	ACID REHEAT FURNACE
BA 392	ACID REHEAT FURNACE
BA 393	ACID REHEAT FURNACE
BA 394	ACID REHEAT FURNACE
BA 395	ACID REHEAT FURNACE
BA 396	ACID REHEAT FURNACE
BA 397	ACID REHEAT FURNACE
BA 398	ACID REHEAT FURNACE
BA 399	ACID REHEAT FURNACE
BA 400	ACID REHEAT FURNACE

**DIAGRAMA DE ZONAS DE SOBREPRESIÓN**

- SOBREPRESIÓN = 2.0 psi  
RADIO = 29.90 m
- SOBREPRESIÓN = 1.0 psi  
RADIO = 50.90 m
- SOBREPRESIÓN = 0.5 psi  
RADIO = 86.50 m

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



# APÉNDICES

**Apéndice A. Principales accidentes de la industria química.** (3. 4. 6. 27. 28)

<b>Fecha</b>	<b>Accidente</b>	<b>Consecuencias</b>
4/ENE/1966	Feyzin, Francia. En una refinería de ese lugar, se lleva a cabo un mal procedimiento de purga a una esfera de propano, lo que provoca una fuga de este. Al encontrar la nube de propano su punto de ignición, se produce un incendio que provoca BLEVE's en otras esferas.	Murieron 18 personas y 84 quedaron heridas. Pérdidas materiales por cerca de los 68 millones de dólares.
1/JUN/1974	Flixborough, Reino Unido. En una planta de Nypro la rotura de una tubería provoca la descarga de unas 80 toneladas de ciclohexano líquido y caliente. La nube resultante da origen a una explosión de gran poder destructivo.	28 muertos y cientos de heridos. Destrucción completa de las instalaciones. Pérdidas estimadas en los 412 millones de dólares.
10/JUL/1976	Seveso, Italia. En una planta de ICMESA (Hoffmann La Roche), una reacción química fuera de control provoca el venteo de un reactor, liberándose unas 2 toneladas de productos químicos a la atmósfera. Entre estos había de 0.5 a 2 kilogramos de dioxina, cuya dosis letal para una persona de sensibilidad promedio es inferior de 0.1 miligramos.	Contaminación de un área extensa debido a la emisión de dioxina por lo que fue preciso evacuar a más de 1,000 personas. No hubo muertos como consecuencia directa del accidente, pero la dioxina afectó a muchas personas (acné por cloro), se produjeron abortos y contaminación del suelo.
11/JUL/1978	San Carlos, España. En el campamento de Los Alfaques, un camión de 39 toneladas sobrecargado con unos 45 m <sup>3</sup> de propileno, dio origen a una explosión BLEVE al chocar con la pared del camping.	216 muertos y poco más de 200 heridos.
19/DIC/1982	Tacoa, Venezuela. En una central térmica se produce la explosión de un tanque de almacenamiento de combustible. El incendio originado por la explosión caliente a otros tanques en los que había agua y productos del petróleo, provocando en ellos el efecto boilover	Murieron más de 200 personas. La zona de desastre abarcó un radio de aproximadamente 1000 m. Destrucción total de la ciudad que se encontraba cerca de ahí.
19/NOV/1984	San Juan de Ixhuatepec, Estado de México. Se produjo la ignición de una gran cantidad de gas L.P. que se había escapado por una rotura de una tubería de 8"Ø producida como consecuencia de un sobrellenado. El incendio produce el calentamiento de otras esferas lo que provoca un BLEVE. En total, explotaron 4 esferas y 15 depósitos cilíndricos.	Murieron 542 personas y 4200 resultaron heridas. Cerca de 10,000 personas perdieron sus hogares. Pérdidas estimadas en 22,5 millones de dólares.



3/DIC/1984	Bhopal, India. Se produce un escape de gas tóxico (isocianato de metilo) en una planta de Union Carbide que producía una sustancia insecticida. La emisión se esparce sobre una superficie de unos 40 kilómetros.	2,500 muertes directas por envenenamiento y aproximadamente el mismo número en condiciones críticas. Unas 150,000 personas requirieron tratamiento médico. Se produjeron efectos a largo plazo, como ceguera, trastornos mentales, lesiones hepáticas y renales, así como malformaciones embrionarias. Cerca de 500,000 personas fueron afectadas. Considerado el peor accidente de la historia en la industria química.
4/JUN/1989	Uta, Rusia. El gas L.P. procedente de una fuga de un gasoducto ubicado a lo largo del recorrido del Transiberiano en Rusia, dio lugar a una explosión cerca de Uta, a unos 115 km al este de Moscú. La causa principal del escape se debe, según se cree, a la corrosión del material de la tubería. El gas se había ido acumulando en un valle por donde pasaban vías del tren.	Destrucción de dos trenes de pasajeros que circulaban en aquel momento por el lugar de la explosión. De un total estimado de 1,200 pasajeros, 700 perecieron.
22/ABR/1992	Guadalajara, México. Se produce una serie de explosiones en cadena a lo largo de una red urbana de alcantarillado de unos 13 kilómetros de longitud, al parecer debido a vertidos de combustible y productos derivados del petróleo en los mismos.	Los datos oficiales informan de 200 muertos y 1,500 heridos, 1,402 viviendas destruidas, así como 450 negocios, 600 vehículos y 10 km de calles. Las pérdidas materiales estuvieron alrededor de los 7,000 millones de dólares.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## Apéndice B. Factores de riesgo y bonificación del índice DOW. (3)

### -----DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO-----

FACTOR MATERIAL A TEMPERATURA AMBIENTE (FM)				
CANTIDAD "HOLDUP" (kg)				
CALOR DE COMBUSTIÓN O DESCOMPOSICIÓN (J/kg)				
TEMPERATURA DE OPERACIÓN (°C)				
PRESIÓN DE OPERACIÓN (Pa rel.)				
PRESIÓN DE ALIVIO (Pa rel.)				
DISTANCIA A HORNIOS (m)				
VOLUMEN ACEITE TÉRMICO EN EL CIRCUITO DE CALEFACCIÓN (m <sup>3</sup> )				
NÚMEROS "NFPA"	<table border="0"> <tr> <td rowspan="2">           { NÚMERO DE INFLAMABILIDAD (NF)            NÚMERO DE REACTIVIDAD (NF)         </td> <td>NÚMERO DE SALUD (NH)</td> </tr> <tr> <td>NÚMERO DE REACTIVIDAD (NF)</td> </tr> </table>	{ NÚMERO DE INFLAMABILIDAD (NF) NÚMERO DE REACTIVIDAD (NF)	NÚMERO DE SALUD (NH)	NÚMERO DE REACTIVIDAD (NF)
{ NÚMERO DE INFLAMABILIDAD (NF) NÚMERO DE REACTIVIDAD (NF)	NÚMERO DE SALUD (NH)			
	NÚMERO DE REACTIVIDAD (NF)			
TEMPERATURA DE INFLAMACIÓN, "FLASH POINT" (°C)				
TEMPERATURA DE EBULLICIÓN (°C)				
TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN O DE COMIENZO DE EXOTERMICIDAD (°C)				
CLASIFICACIÓN SI- DEL POLVO (1, 2 ó 3): GRANULOMETRÍA (m):				

### FACTORES GENERALES DE RIESGO

<b>A. Reacciones químicas exotérmicas</b>	
- Hidrogenación	0.30
- Hidrólisis	0.30
- Isomerización	0.30
- Sulfonación (ArH + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → RSO <sub>3</sub> H + H <sub>2</sub> O)	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
<b>- Oxidación</b>	
- Proceso de combustión	1.00
- Combinación con O <sub>2</sub>	0.50
- Combinación con un agente vigoroso	1.00
- Polimerización	0.50
- Condensación (R1 + R2 → R3 + H <sub>2</sub> O, HCl, etc.)	0.50
- Halogenación (R + halógeno)	1.00
- Nitración (RH + HNO <sub>3</sub> → RNO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O)	1.25
<b>B. Procesos endotérmicos (aplicar sólo a reactores)</b>	
- Energía con fuego directo (calcínación, pirólisis)	0.40
- Energía sin fuego directo (incluido electrólisis)	0.20
- Pirólisis o craqueo	0.20
<b>C. Manejo y transferencia de material</b>	
- Carga y descarga de líquidos con FP ≤ 37 °C que implica co(des)conexión de líneas (ej. mangueras)	0.50
- Uso de centrifugas, reactores o tanques agitados semabiertos con materiales inflamables a la temperatura de proceso	0.50
- Almacenamiento (al exterior o a cubierto)	
- Gases inflamables (botellas, NF = 3 ó 4)	0.85
- Líquidos (bidones, garrafas)	
Con FP ≤ 37 °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, polvos (NF = 3)	0.65
- Factor adicional por ausencia de rociadores	0.20
<b>D. Unidades de proceso en zonas cerradas (3 o más lados cerrados sin aberturas en las bases)</b>	

- Filtros y colectores de polvo combustible	0.50
- Equipos que procesan líquidos combustibles	
- Entre FP - BP	----
- A temperatura ≤ BP	----
- Factor de reducción por ventilación mecánica adecuada	0.50
<b>E. Condiciones de acceso a las áreas de proceso para el equipo de emergencia</b>	
- Área de proceso ≥ 930 m <sup>2</sup> con un solo acceso	0.35
- Almacén ≥ 2,312 m <sup>2</sup> con un solo acceso	0.35
<b>F. Drenaje y control de derrames</b>	
- 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
<b>(El drenaje es plenamente adecuado si)</b>	
i. Pendiente > 2% (tierra) ó 1% (solera)	
ii. Balsa a > 8 m o un diámetro de tanque	
iii. Capacidad balsa > 75% capacidad unidad + agua contra incendio durante 30 minutos)	

### FACTORES GENERALES DE RIESGO

<b>A. Toxicidad del material</b>	
B. Operación a vacío (no utilizar C y D) 0, 300 00	
- Material sensible a la humedad o el O <sub>2</sub>	0.50
- Riesgo de formación de mezclas inflamables	0.50
<b>C. Operación dentro o cerca del rango de inflamabilidad</b>	
- En tanques de almacenamiento con pulmonación al aire que contienen líquidos con FP ≤ 37 °C (NF = 3 ó 4)	0.50
- En caso de fallas 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
<b>D. Presencia de polvos explosivos (partículas ≤ 420 micras según NFPA)</b>	
- Factor de reducción por uso de atmósfera inerte	0.50
<b>E. Presión de alivio (válvula de seguridad, disco de ruptura)</b>	
<b>Material</b>	
- Líquido inflamable/combustible con FP ≤ 60 °C	----
- Muy viscoso (brea, lubricantes, asfaltos)	----
- Gas comprimido	----
- Gas licuado (presión de vapor ≥ 2.8 bar a 37.8 °C)	----
<b>F. Bajas temperaturas</b>	
- Acero al carbono T < temperatura de transición	0.30
- Otros materiales a T < temperatura de transición	0.20
<b>G. Cantidad de material inestable o inflamable</b>	
- Líquidos o gases en proceso	
- Material estable de FP ≤ 60 °C o procesado a temperatura ≥ FP	----
- Material inestable (NF = 2, 3 ó 4)	----
- Líquidos o gases en almacenamiento	
- Material estable	
Gas licuado o gas	----
Líquido con FP ≤ 37 °C	----
Líquido con FP entre 37.8 - 60 °C	----
- Material inestable	----
- Sólidos en almacenamiento	
- Material estable	
Densidad ≥ 160 kg/m <sup>3</sup>	----
Densidad ≤ 150 kg/m <sup>3</sup>	----
- Material inestable (NF ≥ 2)	----
<b>H. Corrosión y erosión</b>	
- 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
<b>I. Fugas en juntas y empaques</b>	
- Pérdidas menores en sellos de equipos rotativos y juntas	0.10

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



- Pérdida regular en sellos de equipos rotativos y juntas	0.30	- Venteos conducidos a antorcha o tanque cerrado	0.96
- Procesos con ciclos de presión o temperatura	0.30	c Drenajes	
- Pérdidas de fluidos penetrantes o abrasivos	0.40	- Suelo con drenaje capaz de evacuar	
- Presencia de mirillas o juntas de expansión	1.50	- El 75% del contenido (pendiente $\geq$ 2%)	0.91
J Uso de equipo a fuego directo		- El 30% del contenido	0.95
- Quemador estándar (cámara a depresión)		- Cubeto con drenaje a balsa (a distancia > diám tanque)	0.95
- Material a temp entre FP - BP	****	d Sistema de bloqueo que impide flujo	
- Material a temp $\geq$ BP	****	incorrecto que podría dar reacciones indeseables	0.98
- Quemador a sobre presión Toma de aire elevada (>3 m)			
- Material a temp entre FP - BP	****		
- Material a temp $\geq$ BP	****		
K Sistemas de intercambio de calor con aceite térmico			
- Temp. operación entre FP - BP del aceite	****		
- Temp. operación > BP del aceite	****		
L Equipos en rotación de gran potencia.			
- Unidad de proceso con bomba $\geq$ 75 HP (56 kW)	0.50		
- Unidad de proceso con compresor $\geq$ 600 HP (447kW)	0.50		
- Agitadores y bombas de circulación cuyo falla puede desarrollar un proceso exotérmico	0.50		
- Equipos problemáticos con gran velocidad de giro (centrifugas, etc)	0.50		
<b>FACTORES DE BONIFICACIÓN POR CONTROL DE PROCESO</b>			
a 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 rotativos críticos (compresores, turbinas):			
- Manual por alarma de detectores de vibración	0.99		
- Automática por alarma de detectores de vibración	0.96		
e Control computarizado			
- Sólo para asistencia del operador	0.99		
- Con lógica "falla 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 Disponibilidad de gas inerte			
- Para "blanketing" o "padding"	0.96		
- Para inertización total rápida en caso de emergencia	0.94		
g Procedimientos y/o guías de operación			
- Puesta en marcha	0.50		
- Parada rutinario	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		
- Bonificación total calculada $(1-x)/150$	1.00		
h Programas de revisión de procesos y operaciones			
- Ocasional	0.98		
- Periódica y al día	0.91		
i Otros análisis de riesgo	0.91 a 0.98		
<b>FACTORES DE BONIFICACIÓN POR AISLAMIENTO DE MATERIAL</b>			
a Válvulas de control remoto			
- Con revisión anual	0.96		
- Sin revisión anual	0.98		
b Depósito transvase para emergencia o venteos conducidos			
- Depósito en el área de la unidad	0.98		
- Depósito fuera del área de la unidad	0.96		
<b>FACTORES DE BONIFICACIÓN POR PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO</b>			
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 $\leq$ 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 Suministro de agua contra incendio (autonomía $\geq$ 4 hrs, $\geq$ 50% con bombas diesel)			
- Presión $\leq$ 7 bar	0.97		
- Presión > 7 bar	0.94		
e Sistemas especiales: halón, CO <sub>2</sub> , detectores de humo y de llama	0.91		
f Sistema de rociadores:			
- Sistemas de inundación ("deluge")	0.97		
- Sistemas de pulverización:			
- Tubería húmeda:			
- Riesgo ligero Capacidad $\leq$ 8.5 L/(min m <sup>2</sup> )	0.87		
- Riesgo ordinario Capacidad 8.5 - 15 L/(min m <sup>2</sup> )	0.81		
- Riesgo extra Capacidad > 15 L/(min m <sup>2</sup> )	0.74		
- Tubería seca			
- Riesgo ligero Capacidad $\leq$ 8.5 L/(min m <sup>2</sup> )	0.87		
- Riesgo ordinario Capacidad 8.5 - 15 L/(min m <sup>2</sup> )	0.84		
- Riesgo extra Capacidad > 15 L/(min m <sup>2</sup> )	0.81		
- Factor multiplicador para área > 930 m <sup>2</sup> :			
930 - 1,860 m <sup>2</sup>	1.06		
1,860 - 2,790 m <sup>2</sup>	1.09		
> 2,790 m <sup>2</sup>	1.12		
g Cortinas de agua (distanciadas a $\geq$ 23 m):			
- 1 cortina de altura $\leq$ 5 m	0.98		
- 2 cortinas: 1a de altura H $\leq$ 5 m, 2a de altura $\leq$ H + 2 m	0.97		
h Espuma contra incendios			
- Por rociadores ("sprinklers") de funcionamiento			
- Manual	0.94		
- Automática	0.92		
- En juntas techos flotantes de depósitos con disparo			
- Manual	0.97		
- Automático (activado por detectores de llama)	0.94		
- En depósitos			
- Dentro de la cámara de aire	0.95		
- Automático sobre la carcasa (monitores, etc.)	0.97		
- Manual sobre la carcasa (mangueras, etc.)	0.94		
i Extintores manuales - monitores			
- Extintores portátiles	0.98		
- Extintores portátiles y monitores manuales	0.97		
- Extintores portátiles y monitores telecomandados	0.95		
j Protección de cables eléctricos y de instrumentación			
- Bandejas con sistemas de agua pulverizada	0.98		
- Bandejas enterradas	0.94		

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



**CORRECCIÓN DEL FACTOR MATERIAL POR TEMPERATURA**  
- Número "IFPA" de incendio (I-I) corregido  
- Número "IFPA" de reactividad (I-R) corregido  
- Factor material (FM) a la temperatura de operación

**A ÍNDICE DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN**

F1 Factor general de riesgo  
F2 Factor especial de riesgo  
F3 Factor de riesgo (F1 x F2)  
A1 Índice de incendio y explosión (F3 x FM)  
A2 Radio de exposición (m)  
A3 Valor del área de exposición (millones de S de 1986)

**B FACTOR DE DAÑO**

**C MPPD Básico (A3 x B, en millones de S de 1986)**

**D FACTOR DE BONIFICACIÓN EFECTIVO**

C1 Factor de bonificación por control de proceso  
C2 Factor de bonificación por aislamiento de material  
C3 Factor de bonificación por protección contra incendio  
Factor de bonificación (C1 x C2 x C3)

**E MPPD Electivo (C x D, en millones de S de 1986)**

**F DÍAS PERDIDOS (MPDO)**

Margen superior con un 70% de probabilidad  
Valor medio  
Margen inferior con un 70% de probabilidad

**G INTERRUPCIÓN DE NEGOCIOS (BI)**

Margen superior con un 70% de probabilidad  
Valor medio  
Margen inferior con un 70% de probabilidad

El símbolo "\*\*\*\*\*" indica que el factor depende de una representación gráfica o función, y por lo tanto no tiene un valor fijo para ese concepto. Su valor debe ser consultado en la guía original.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## Apéndice C. Conceptos básicos de álgebra booleana. <sup>(22)</sup>

A mediados del siglo XIX, George Boole (1815-1864), en sus libros: "*The Mathematical Analysis of Logic*" (1847) y "*An Investigation of the Laws of Thought*" (1854), desarrolló la idea de que las proposiciones lógicas podían ser tratadas mediante herramientas matemáticas. Las proposiciones lógicas (asertos, frases o predicados de la lógica clásica) son aquellas que únicamente pueden tomar valores Verdadero/Falso, o preguntas cuyas únicas respuestas posibles sean Sí/No. Según Boole, estas proposiciones pueden ser representadas mediante símbolos y la teoría que permite trabajar con estos símbolos, sus entradas (variables) y sus salidas (respuestas) es la Lógica Simbólica desarrollada por él. Dicha lógica simbólica cuenta con operaciones lógicas que siguen el comportamiento de reglas algebraicas. Por ello, al conjunto de reglas de la Lógica Simbólica se le denomina **ÁLGEBRA DE BOOLE**.

Todas las variables y constantes del álgebra booleana admiten sólo uno de dos valores en sus entradas y salidas: Sí/No, 0/1 o Verdadero/Falso. Estos valores bivalentes y opuestos pueden ser representados por números binarios de un dígito (bits), por lo cual el álgebra booleana se puede entender como el álgebra del sistema binario. Al igual que en álgebra tradicional, también se trabaja con letras del alfabeto para denominar variables y formar ecuaciones para obtener el resultado de ciertas operaciones mediante una ecuación o expresión booleana. Evidentemente los resultados de las correspondientes operaciones también serán binarios.

Todas las operaciones (representadas por símbolos determinados) pueden ser materializadas mediante elementos físicos de diferentes tipos (mecánicos, eléctricos, neumáticos o electrónicos) que admiten entradas binarias o lógicas y que devuelven una respuesta (salida) también binaria o lógica. Ejemplos de dichos estados son: Abierto/Cerrado (interruptor), Encendida/Apagada (bombilla), Cargado/Descargado (condensador), Nivel Lógico 0/Nivel lógico 1 (salida lógica de un circuito semiconductor), etc. Los dispositivos con los cuales se implementan las funciones lógicas son llamados puertas (o compuertas) y, habitualmente, son dispositivos electrónicos basados en transistores.

### **Propiedades del álgebra de Boole.**

Formalmente, el álgebra de Boole es un sistema matemático compuesto por un conjunto de elementos,



llamado normalmente B, junto a dos operaciones binarias, que se pueden escribir con los símbolos  $\oplus$  y  $\otimes$ . Dichos símbolos equivalen a las compuertas "O" y "Y" respectivamente de un árbol de fallas. Estas operaciones están definidas en el conjunto B y satisfacen los siguientes axiomas:

1. Ambas operaciones  $\oplus$  y  $\otimes$  son conmutativas. Esto es, para cualquier pareja de elementos x, y del conjunto B, se cumple que  $x \oplus y = y \oplus x$ ;  $x \otimes y = y \otimes x$ .
2. Las dos operaciones  $\oplus$  y  $\otimes$  son asociativas. Esto es, para cualquier terna de elementos x, y, z del conjunto B, se cumple que

$$(x \oplus y) \oplus z = x \oplus (y \oplus z) = x \oplus y \oplus z \quad \& \quad (x \otimes y) \otimes z = x \otimes (y \otimes z) = x \otimes y \otimes z.$$

3. Cada una de las operaciones  $\oplus$  y  $\otimes$  es distributiva con respecto a la otra. Esto es, para tres elementos cualesquiera x, y, z del conjunto B, se cumple que

$$x \otimes (y \oplus z) = (x \otimes y) \oplus (x \otimes z) \quad \text{y que} \quad x \oplus (y \otimes z) = (x \oplus y) \otimes (x \oplus z).$$

4. En el conjunto B existe un elemento neutro bien definido para cada una de las operaciones  $\oplus$  y  $\otimes$ . Estos elementos se representan normalmente con los símbolos 0 y 1 tal que  $0 \neq 1$ , y tienen la propiedad de que  $0 \oplus x = x$ ;  $1 \otimes x = x$  para cualquier elemento x del conjunto B.
5. A cada elemento x del conjunto B le corresponde otro elemento llamado complementario de x, que normalmente se representa con el símbolo  $x'$ . El elemento  $x'$  cumple las siguientes propiedades con respecto a las dos operaciones  $\otimes$  y  $\oplus$ :

$$x \otimes x' = 0 \quad \text{y} \quad x \oplus x' = 1.$$

Las dos operaciones  $\oplus$  y  $\otimes$  se pueden representar con otra pareja cualquiera de símbolos; +,  $\vee$  y  $\cup$  se usan a veces en vez de  $\oplus$ ;  $\times$ ,  $\cap$ , \* , ; en vez de  $\otimes$ . Otras propiedades importantes del álgebra booleana se muestran a continuación:

–Regla del cero y la unidad:  $1 \oplus x = 1 \quad 0 \otimes x = 0$

–Idempotencia o potencias iguales:  $x \oplus x = x \quad x \otimes x = x$

–Leyes de absorción:  $x \otimes (x \oplus y) = x \quad x \oplus (x \otimes y) = x$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**





## Apéndice D. Hojas de seguridad de sustancias y generalidades del HF. (20)

### Hoja de datos de seguridad del 2,2,4-trimetilpentano

#### 1. Identificación de la sustancia.

Nombre de la sustancia	2,2,4-trimetilpentano	Número CAS	540-84-1
Nombres alternativos	iso-octano, isobutiltrimetilmetano	Número ICSC	0496
Fórmula	$\text{CH}_3\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2/\text{C}_8\text{H}_{18}$	Número NU	1262
Masa molecular	114.3	Número CE	601-009-00-8
Código NFPA	H=0, F=3, R=0	Número RTECS	SA3320000

#### 2. Identificación de riesgos.

Tipos de riesgo	Riesgo	Prevención	Lucha contra incendios
Incendio	Altamente inflamable	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar.	Polvos, AFFF, espuma, dióxido de carbono. Los bomberos deben emplear equipo autónomo de respiración.
Explosión	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones por pulverización con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.

#### 3. Tipos de medios de exposición.

Medios de exposición	Síntomas agudos	Prevención	Primeros auxilios
Inhalación	Confusión mental, vértigo, dolor de cabeza, náusea, vómitos.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicado y someter a atención médica.
Piel	Enrojecimiento, dolor.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar y lavar la piel con agua y jabón y solicitar atención médica.
Ojos	Enrojecimiento.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
Ingestión	Vómitos (para mayor información véase Inhalación).	No comer, beber ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca, NO provocar el vómito y someter a atención médica.

#### 4. Medidas en caso de derrames o fugas.

Evacuar la zona de peligro. Eliminar fuentes de ignición. Asegurar ventilación del aire. Recoger en la medida de lo posible el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. Intentar parar el derrame o fuga. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).

#### 5. Almacenamiento.

A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar frío; mantener en una habitación bien ventilada.

#### 6. Datos importantes.

Peligros físicos	El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.	
Peligros químicos	El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. Reacciona con oxidantes fuertes.	
Límites de exposición	TLV no establecido.	
Vías de exposición	La sustancia se puede absorber por inhalación y por ingestión.	
Riesgo de inhalación	Por la evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire. No puede indicarse la velocidad a la que se alcanza una concentración nociva en el aire en la evaporación de esta sustancia a 20°C.	
Efectos de exposición de corta duración	La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La sustancia puede tener efectos sobre los riñones y posiblemente el hígado. La exposición a altas concentraciones puede producir pérdida de conocimiento. La exposición puede producir la muerte.	
Efectos de exposición prolongada o repetida	El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede tener efectos sobre los riñones y posiblemente el hígado.	

#### 7. Propiedades físicas.

Estado físico:	Líquido incoloro, de olor característico.	Solubilidad en agua:	Inmiscible
Punto de ebullición:	99°C	Punto de fusión:	-107°C
Punto de inflamación:	-12°C	Temperatura de autoignición:	417°C
Presión de vapor, kPa a 20°C:	5.1	Densidad relativa (agua = 1):	0.69
Límites de inflamabilidad, % en volumen en el aire:	1.1-6.0	Densidad relativa de vapor (aire = 1):	3.9



## Hoja de datos de seguridad del isobutano

### 1. Identificación de la sustancia.

Nombre de la sustancia	isobutano	Número CAS	75-28-5
Nombres alternativos	2-metilpropano	Número ICSC	-
Fórmula	CH <sub>3</sub> CH(CH <sub>3</sub> )CH <sub>2</sub> /C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Número NJ	1969, 1075
Masa molecular	58.12	Número CE	200-857-2
Código NFPA	H=1, F=4, R=0	Número RTECS	TZ4200000

### 2. Identificación de riesgos.

Tipos de riesgo	Riesgo	Prevención	Lucha contra incendios
Incendio	Altamente inflamable	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar.	Polvos, AFFF, espuma, dióxido de carbono. Los bomberos deben emplear equipo autónomo de respiración.
Explosión	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones por pulverización con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.

### 3. Tipos de medios de exposición.

Medios de exposición	Síntomas agudos	Prevención	Primeros auxilios
Inhalación	A elevadas concentraciones causa asfixia con pérdida de conciencia. A bajas concentraciones produce vértigos, dolor de cabeza, náuseas y pérdida de coordinación.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicado y someter a atención médica.
Piel y ojos	Enrojecimiento.	Evitar salpicaduras mediante guantes y gafas de seguridad.	Lavar con agua durante al menos 15 min.
Ingestión	No considerada como vía potencial de exposición		

### 4. Medidas en caso de derrames o fugas.

Evacuar la zona de peligro. Eliminar fuentes de ignición. Asegurar ventilación del aire. Recoger en la medida de lo posible el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. Intentar parar el derrame o fuga. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).

### 5. Almacenamiento.

A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar frío; mantener en una habitación bien ventilada.

### 6. Datos importantes.

Peligros físicos	El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.	
Peligros químicos	El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. Reacciona con oxidantes fuertes.	
Límites de exposición	TLV no establecido.	
Vías de exposición	La sustancia se puede absorber por inhalación.	
Riesgo de inhalación	Por la evaporación de esta sustancia a -12°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire. No puede indicarse la velocidad a la que se alcanza una concentración nociva en el aire en la evaporación de esta sustancia a -12°C.	
Efectos de exposición de corta duración	No disponibles.	
Efectos de exposición prolongada o repetida	No disponibles.	

### 7. Propiedades físicas.

Estado físico:	Gas incoloro, de olor algo dulce.	Solubilidad en agua:	54 mg/L
Punto de ebullición:	-12°C	Punto de fusión:	-255.3°C
Punto de inflamación:	-107°C	Temperatura de autoignición:	460°C
Presión de vapor, kPa a 20°C:	300	Densidad relativa (agua = 1):	0.59
Límites de inflamabilidad, % en volumen en el aire:	1.8-8.5	Densidad relativa de vapor (aire = 1):	2.0



## Hoja de datos de seguridad del 2-buteno

**1. Identificación de la sustancia.**

Nombre de la sustancia	2-buteno (mezcla de cis y trans)	Número CAS	107-01-7
Nombres alternativos	beta-butileno, 1,2-dimetiletileno	Número ICSC	0838
Fórmula	CH <sub>3</sub> CH=CHCH <sub>3</sub> /C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	Número NU	1012
Masa molecular	56.1	Número CE	601-012-00-4
Código NFPA	H=1, F=4, R=0	Número RTECS	EM2932000

**2. Identificación de riesgos.**

Tipos de riesgo		Riesgo	Prevención	Lucha contra incendios
Incendio	Extremadamente inflamable	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar.		Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo. En otros casos apagar con agua pulverizada, espuma o polvo.
	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.		En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.

**3. Tipos de medios de exposición.**

Medios de exposición	Síntomas agudos	Prevención	Primeros auxilios
Inhalación	Vértigo, pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo y proporcionar asistencia médica.
Piel	En contacto con líquido: congelación.	Guantes aislantes del frío.	En caso de congelación: aclarar con abundante agua, no quitar la ropa y proporcionar asistencia médica.
		Pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
Ojos			
Ingestión		No comer, ni beber ni fumar durante el trabajo.	

**4. Medidas en caso de derrames o fugas.**

Evacuar la zona de peligro. Eliminar fuentes de ignición. Consultar a un experto. Ventilar. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. Intentar parar el derrame o fuga. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).

**5. Almacenamiento.**

A prueba de incendio. Separado de ácidos. Mantener en lugar fresco.

**6. Datos importantes.**

Peligros físicos	El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.	
Peligros químicos	La sustancia puede polimerizar en contacto con ácidos orgánicos e inorgánicos, halógenos y sus derivados.	
Límites de exposición	TLV no establecido.	
Vías de exposición	La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor.	
Riesgo de inhalación	Al producirse pérdidas en zonas confinadas este gas puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno del aire.	
Efectos de exposición de corta duración	La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La exposición a altas concentraciones podría causar disminución de la conciencia.	
Efectos de exposición prolongada o repetida	No disponible.	

**7. Propiedades físicas.**

Estado físico:	Gas licuado comprimido incoloro.	Solubilidad en agua:	Inmiscible
Punto de ebullición:	3.7°C (cis) y 0.9°C (trans)	Punto de fusión:	-139°C (cis) y -106°C (trans)
Punto de inflamación:	Gas inflamable	Temperatura de autoignición:	324°C (cis y trans)
Densidad relativa (agua = 1):	0.6213 (cis) y 0.6042 (trans)	Densidad rel. de vapor (aire = 1):	> 1
Límites de inflamabilidad, % en vol. en el aire:	1.6-10 (cis y trans)		

**8. Notas.**

En esta ficha se hace referencia a la mezcla de cis-2-buteno y trans-2-buteno. Las recomendaciones aplican también a ambas sustancias.



## Hoja de datos de seguridad del 1,3-butadieno

1. Identificación de la sustancia.			
Nombre de la sustancia	1,3-butadieno	Número CAS	106-99-0
Nombres alternativos	buta-1,3-dieno, divinilo, viniletileno	Número ICSC	0017
Fórmula	$\text{CH}_2=(\text{CH})_2-\text{CH}_2/\text{C}_4\text{H}_6$	Número NU	1010
Masa molecular	54.1	Número CE	601-013-00-X
Código NFPA	H=2, F=4, R=2	Número RTECS	E19275000
2. Identificación de riesgos.			
Tipos de riesgo	Riesgo	Prevención	Lucha contra incendios
Incendio	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro, si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo. En otros casos apagar con agua pulverizada, polvo, dióxido de carbono
Explosión	Las mezclas gas/aire son explosivas. Si los vapores de 1,3-butadieno no son inhibidos, pueden formar polímeros, causando el bloqueo de los sistemas de venteo o apagallamas de los tanques de almacenamiento.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
3. Tipos de medios de exposición.			
Medios de exposición	Síntomas agudos	Prevención	Primeros auxilios
Inhalación	Tos, somnolencia, visión borrosa, náuseas, dolor de garganta, pérdida del conocimiento y parálisis respiratoria	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria. ¡Evitar todo contacto!	Aire limpio, reposo y proporcionar asistencia médica.
Piel	En contacto con líquido: congelación.	Guantes aislantes del frío. ¡Evitar todo contacto!	EN CASO DE CONGELACION. aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa y proporcionar asistencia médica
Ojos	Enrojecimiento, dolor, visión borrosa.	Gafas ajustadas de seguridad. ¡Evitar todo contacto!	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
Ingestión		No comer, ni beber ni fumar durante el trabajo ¡Evitar todo contacto!	
4. Medidas en caso de derrames o fugas.			
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Intentar parar el derrame o fuga. No verter nunca chorros de agua sobre el líquido (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración)			
5. Almacenamiento.			
A prueba de incendio. Separado de sustancias incompatibles. Mantener en lugar fresco			
6. Datos importantes.			
Peligros físicos	El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. El 1,3-butadieno en forma líquida flota y hierve sobre el agua		
Peligros químicos	La sustancia puede formar peróxidos en circunstancias específicas, iniciando una polimerización explosiva. La sustancia puede polimerizar debido al calentamiento suave con peligro de incendio o explosión. Se forman compuestos inestables frente al choque con el cobre y sus aleaciones (véanse Notas). La sustancia se descompone explosivamente al calentarla intensamente a presión. Reacción vigorosamente con oxidantes y muchas otras sustancias, originando peligro de incendio y explosión.		
Límites de exposición	10 ppm; 22 mg/m <sup>3</sup> (como TWA, A2).		
Vías de exposición	La sustancia se puede absorber por inhalación.		
Riesgo de inhalación	Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.		
Efectos de exposición de corta duración	La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a una disminución del conocimiento.		
Efectos de exposición prolongada o repetida	La sustancia puede afectar al hígado y a la médula ósea. Esta sustancia es probablemente carcinógena para los seres humanos. Puede originar lesión genética de carácter hereditario en los seres humanos. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana.		
7. Propiedades físicas.			
Estado físico:	Gas licuado comprimido incoloro.	Solubilidad en agua:	Ninguna (<0.1 g/100 ml)
Punto de ebullición:	-4°C	Punto de fusión:	-109°C
Punto de inflamación:	-76°C	Temperatura de autoignición:	414°C
Densidad relativa (agua = 1):	0.6	Densidad rel. de vapor (aire = 1):	1.9
Límites de inflamabilidad, % en vol. en el aire:	1.1-16.3	Presión de vapor, kPa a 20°C:	245



## Hoja de datos de seguridad del fluoruro de hidrógeno

**1. Identificación de la sustancia.**

Nombre de la sustancia	fluoruro de hidrógeno	Número CAS	7664-39-3
Nombres alternativos	ácido fluorhídrico	Número ICSC	0283
Fórmula	HF	Número NU	1052
Masa molecular	20	Número CE	009-002-00-6
Código NFPA	H=4, F=0, R=1	Número RTECS	MW7875000

**2. Identificación de riesgos.**

Tipos de riesgo	Riesgo	Prevención	Lucha contra incendios
Incendio	No combustible. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	(Véanse Riesgos Químicos).	En caso de incendio en el entorno: ningún agente hídrico.
Explosión			En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua pero NO en contacto con ella. Combatir el incendio desde un lugar protegido.

**3. Tipos de medios de exposición.**

Medios de exposición	Síntomas agudos	Prevención	Primeros auxilios
Inhalación	Corrosivo. Sensación de quemazón, tos, dificultad respiratoria, dolor de garganta. (Síntomas no inmediatos: véanse Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria. ¡EVITAR TODO CONTACTO!	Aire limpio, reposo, posición de semi-incorporado y proporcionar asistencia médica.
Piel	¡PUEDE ABSORBERSE! Corrosivo, enrojecimiento, dolor, ampollas.	Guantes protectores y traje de protección. ¡EVITAR TODO CONTACTO!	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.
Ojos	Corrosivo. Enrojecimiento, dolor, quemaduras profundas graves.	Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria. ¡EVITAR TODO CONTACTO!	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Corrosivo. Calambres abdominales, sensación de quemazón, diarrea, vómitos y colapso.	No comer, ni beber ni fumar durante el trabajo. ¡EVITAR TODO CONTACTO!	Enjuagar la boca, NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica.

**4. Medidas en caso de derrames o fugas.**

Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Intentar parar el derrame o fuga. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).

**5. Almacenamiento.**

Separado de bases fuertes y alimentos. Mantener en lugar fresco y bien ventilado.

**6. Datos importantes.**

Peligros físicos	
Peligros químicos	La disolución en agua es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva. Reacciona violentamente con muchos compuestos originando peligro de fuego y explosión. En contacto con el aire desprende humos corrosivos más pesados que el aire los cuales se desplazarán a ras del suelo. Ataca al vidrio y a los compuestos que contengan siliceo
Límites de exposición	TLV (como F): 3 ppm; 2.6 mg/m <sup>3</sup> .
Vías de exposición	La sustancia se puede absorber por inhalación y a través de la piel y por ingestión.
Riesgo de inhalación	Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.
Efectos de exposición de corta duración	Corrosivo. La sustancia es corrosiva de los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La inhalación de este gas puede originar edema pulmonar (véanse Notas). La sustancia puede causar efectos en la calcemia, induciendo hipocalcemia, dando lugar a alteraciones cardíacas y renales. La exposición por encima de OEL puede producir la muerte. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica
Efectos de exposición prolongada o repetida	La sustancia puede causar fluorosis.

**7. Propiedades físicas.**

Estado físico:	Gas o líquido incoloro, olor acre.	Solubilidad en agua:	Elevada
Punto de ebullición:	20°C	Punto de fusión:	-83°C
Densidad relativa (agua = 1):	1.0	Densidad rel. de vapor (aire = 1):	0.7

**8. Notas.**

Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son por ello, imprescindibles. Debe considerarse la inmediata administración de un aerosol adecuado por un médico o persona por él autorizada. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape.



### Generalidades del ácido fluorhídrico. (25)

El ácido fluorhídrico (HF) es un líquido fumante y corrosivo a bajas temperaturas relativamente, pero su punto de ebullición (aproximadamente 20°C) es a menudo excedido por las temperaturas a las cuales es usado en las refinerías. Se evapora rápidamente a la presión atmosférica y temperaturas arriba de 20°C, formando un evidente vapor blanquecino el cual tiene un característico olor picante e irritante. Ambos, el líquido y sus vapores son extremadamente peligrosos, cuando se manejan en forma inadecuada. El HF líquido reacciona inmediatamente con el contacto de la piel causando serias quemaduras. Los vapores son irritantes a los ojos y membranas mucosas por lo que deberá ser evitado.

Los principales efectos fisiológicos del HF son los siguientes:

1. El HF líquido es corrosivo y ataca los tejidos de la piel y ojos rápidamente, produciendo daños parecidos a quemaduras. Los vapores de HF son también irritantes a piel, ojos y vías respiratorias y pueden producir lesiones tan severas como las que se tienen con el líquido.
2. La acción del HF produce tres tipos de lesiones: un efecto deshidratante, un efecto corrosivo y un efecto tóxico específico del ion fluoruro.
3. Quemaduras producidas por el HF líquido pueden ser inmediatas o lentas dependiendo de la concentración del ácido. En cualquier caso, la lesión es muy dolorosa y está acompañada por una sensación de pulsaciones alrededor del área afectada.
4. Quemaduras inmediatas son causadas por contacto con HF anhidro y con soluciones de HF acuoso en concentraciones, sobre 20% en volumen (20% en volumen de HF o mayores de agua). Dolor y formación de ampollas son inmediatos.
5. Lesiones menores son causadas por contacto con soluciones acuosas de HF en concentraciones menores a 20% en volumen. Tales concentraciones bajas pueden probablemente encontrarse en sedimentos de ácido, ácido disuelto en aceite, agua estancada cercana a equipo en servicio ácido, en herramientas y equipo contaminado o algo semejante. La sensación de dolor y la formación de ampollas después de un contacto puede sentirse después de varias horas.
6. La inhalación de vapores de HF concentrado puede producir cierta irritación pulmonar, la cual puede continuar con una congestión pulmonar.



## Apéndice E. Estabilidad ambiental. <sup>(3)</sup>

La estabilidad ambiental o también conocida estabilidad atmosférica, es una variable que se establece para caracterizar la capacidad que la atmósfera tiene para dispersar un contaminante; en realidad, lo que representa es el grado de turbulencia existente en un momento determinado. Se ha establecido una clasificación en categorías (denominadas a menudo "categorías de Pasquill"), tal como se muestra en la tabla AE.1.

Tabla AE.1 Definición del tipo de estabilidad atmosférica.

Tipo de estabilidad	Definición
A	Muy inestable
B	Inestable
C	Ligeramente inestable
D	Neutra
E	Ligeramente estable
F	Estable

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El tipo de estabilidad atmosférica es, pues, una estimación del estado de la atmósfera, que no se puede medir directamente como la temperatura, la presión, la velocidad del viento, etc. La estabilidad se estima en función de la velocidad del viento y la radiación solar. La radiación solar es, en última instancia, una función del ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre la superficie, de la estación del año y de la cantidad de nubes presentes en el momento de su determinación.

Durante el día, la temperatura del aire disminuye con la altura. Así, si una masa de aire se eleva verticalmente, se enfría de manera adiabática por efecto de la disminución de presión. Este enfriamiento, para aire seco, es de aproximadamente 1°C por cada 100 metros. Este comportamiento del aire provoca que el aire caliente, de menor densidad, tenga tendencia a subir y el frío a bajar, y que se produzca una mezcla en sentido vertical.

Una condición atmosférica inestable se caracteriza por la existencia de un movimiento vertical importante de la masa de aire, un gradiente vertical de temperatura negativo (la temperatura disminuye con la altura), fluctuaciones frecuentes en la dirección del viento, una fuerte insolación, etc. En cambio, una condición estable se caracteriza por un flujo laminar de las capas del aire (ausencia de turbulencia), un gradiente vertical de temperatura positivo (inversión térmica), fluctuaciones mínimas en la dirección del viento, un bajo nivel de insolación, etc.



Un ejemplo de inestabilidad atmosférica sería un día de verano muy soleado en el que la radiación solar calienta la superficie de la tierra y ésta las capas bajas de la atmósfera, lo que genera corrientes verticales de aire ("térmicas"); o sea, existe una elevada turbulencia a ras de suelo. Un ejemplo de estabilidad atmosférica sería una noche clara de verano en la que la tierra se enfría rápidamente por radiación con el espacio exterior y produce un enfriamiento de las capas bajas de la atmósfera; esto genera ligeras brisas de aire de componente horizontal que no producen turbulencias.

Existen diversos métodos para estimar la clase de estabilidad a partir de variables meteorológicas tradicionales:

- según el gradiente térmico vertical (tabla AE.2);
- según la fluctuación de la dirección del viento (tabla AE.3);
- según la radiación solar y la velocidad del viento (tabla AE.4).

Todas estas estimaciones no pueden ser utilizadas para la caracterización de la estabilidad atmosférica sobre el mar, tan sólo sirven para estimar la estabilidad sobre tierra firme.

Tabla AE.2 Clase de estabilidad según el gradiente térmico vertical.

Clase de estabilidad	Gradiente térmico vertical (°C/100 m)
A	Menos de -1.9
B	De -1.9 a -1.7
C	De -1.7 a -1.5
D	De -1.5 a -0.5
E	De -0.5 a +1.5
F	Más de +1.5

Tabla AE.3 Clase de estabilidad según la oscilación horaria de la dirección del viento.

Tipo de estabilidad	Definición
A	25.0
B	20.0
C	15.0
D	10.0
E	5.0
F	2.5

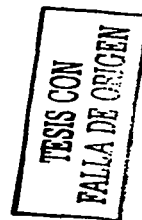






Tabla AE.4 Determinación de la clase de estabilidad atmosférica según la velocidad del viento y la radiación solar.

Velocidad del viento en la superficie m/s (nudos)	Día Nivel de radiación solar			Noche Cobertura del cielo	
	Elevado	Moderado	Bajo	Más del 50%	Menos del 50%
< 2 (4)	A	A - B	B	E	F
2 - 3 (4 - 7)	A - B	B	C	E	F
3 - 5 (7 - 11)	B	B - C	C	D	E
5 - 6 (11 - 13)	C	C - D	D	D	D
> 6 (13)	C	D	D	D	D

El término *noche* se refiere a desde una hora antes de la puesta del sol hasta una hora después de la salida.

El grado de cobertura del cielo se define como el fragmento del cielo situado por encima del horizonte local aparente que está cubierto de nubes.

Se considera estabilidad D (neutra) cuando el cielo está completamente cubierto, independientemente de la velocidad del viento y de la radiación solar (día o noche).

El nivel de insolación se determina según el criterio de las tablas AE.5 y AE.6.

Tabla AE.5 Nivel de insolación según la radiación solar recibida.

Insolación	Nivel de radiación (cal/h*cm <sup>2</sup> )
Elevada	> 50
Moderada	50 - 25
Baja	< 25

Tabla AE.6 Nivel de insolación según la altura del sol.

Insolación	Altura del sol
Elevada	> 60
Moderada	35 - 60
Baja	< 35

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



---

## GLOSARIO.

**Accidente.** En el ámbito de la industria química, evento no premeditado aunque muchas veces previsible, que se presenta de forma súbita, que altera las condiciones de diseño de un sistema en menor o mayor grado, causando daño a las personas, al equipo, a los materiales y al medio ambiente de acuerdo a la gravedad del evento.

**Accidente mayor.** Suceso inesperado y súbito (en particular, emisión, incendio o explosión importante), resultante de acontecimientos anormales durante una actividad industrial, que supone un peligro grave para los trabajadores, la población o el medio ambiente, sea inminente o no, dentro o fuera de la instalación, y en el que intervienen una o más sustancias peligrosas.

**Aceite soluble en ácido.** Mezcla de hidrocarburos líquidos y ácido fluorhídrico acuoso que constituyen un subproducto indeseable de la planta de alquilación. Dicha mezcla se compone de butadieno y ácido fluorhídrico principalmente.

**Aceptación del riesgo.** Método de administración de riesgos que consiste en admitir ciertos riesgos tras haberse realizado un análisis riguroso de dichos riesgos. Éstos, por lo general, tienen valores muy bajos de gravedad y/o frecuencia.

**Administración del riesgo.** El conjunto de medidas tomadas para lograr, mantener o mejorar la seguridad de la instalación y de su funcionamiento.

**Alquilación.** En términos de la refinación del petróleo, la alquilación se refiere a las reacciones de olefinas de bajo peso molecular con una isoparafina, para dar isoparafinas de mayor peso molecular.

**Análisis de riesgos.** Determinación de los acontecimientos no deseados que conducen a la materialización del riesgo; análisis de los mecanismos por los que esos acontecimientos no deseados podrían sobrevenir y, generalmente, estimación del alcance, magnitud y probabilidad relativa de cualesquiera efectos nocivos.

**ASA.** Véase Aceite Soluble en Ácido.

**Aterrizamiento.** Es la acción y efecto de unir eléctricamente ciertos elementos de un equipo o circuito a un electrodo o a una red de tierras.

**BI.** Del inglés *Business Interruption*. Véase interrupción de negocios.

**Causa.** En términos del análisis HazOp, la causa se refiere a todas aquellas situaciones capaces de producir una desviación.

**Cavitación.** Fenómeno que se produce cuando la presión del líquido que se está bombeando disminuye hasta la de su presión de vapor a la temperatura de funcionamiento. En ese momento, el



líquido se vaporiza, formándose cavidades o bolsas de vapor que son arrastradas hacia zonas con una presión superior donde se vuelven a condensar generando sobrepresiones puntuales muy elevadas. Las consecuencias más directas del fenómeno anteriormente descrito son fuertes vibraciones en la máquina, oxidación, desprendimiento del material y disminución tanto de la altura manométrica como del rendimiento.

**Circuito.** En términos del análisis HazOp, es la forma en se divide una planta para facilitar su estudio. Dicha división se hace de acuerdo a una serie de criterios y bajo los lineamientos del grupo de trabajo del análisis HazOp.

**Clase.** En términos del análisis HazOp, la clase es el nivel de riesgo asignado a las desviaciones identificadas en base a la matriz de riesgos.

**Concentración letal 50.** Es la concentración de una sustancia como gas, vapor, neblina o polvo en el aire, calculada estadísticamente, a cuya exposición se espera que mueran el 50% de los animales de experimentación. Cuando se trata de vapores o gases, se expresa en ppm y cuando son polvos o neblinas se expresa en mg/l o en mg/m<sup>3</sup>.

**Conjunto de camino.** Es un conjunto de eventos básicos que si ninguno de los eventos en el conjunto ocurre, se garantiza que el evento tope no ocurre.

**Conjunto de corte.** Es un conjunto de eventos básicos tal que si todos ellos ocurren, la ocurrencia del evento tope está garantizada.

**Conjuntos mínimos de corte.** Son los diferentes conjuntos de fallas críticas que al producirse provocan la anomalía global del sistema.

**Consecuencia.** En términos del análisis HazOp, son todos aquellos sucesos que se producirían tanto como efecto de la desviación y si es apropiado, efectos de la causa por sí misma. También se refiere al resultado de un evento no deseado, medido por sus efectos en los empleados, público en general, el medio ambiente, la producción y/o las instalaciones (equipo y maquinaria).

**Daño máximo probable a la propiedad.** Es el costo máximo esperado de pérdida de las instalaciones como consecuencia de un incendio o una explosión.

**Deflagración.** Es una explosión en la que la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es menor a la velocidad del sonido.

**Defluorinación.** Proceso mediante el cual se busca separar residuos de HF y fluoruros orgánicos de una carga de hidrocarburo mediante el uso de un catalizador.

**Desviación.** En términos del análisis HazOp, es la combinación de palabras clave primarias y secundarias que se está aplicando. Una desviación consiste en la no realización del intento de diseño o



propósito de los equipos de una instalación industrial.

**Detonación.** Es una explosión en la que la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es mayor a la velocidad del sonido.

**Disponibilidad.** En términos del análisis de árbol de fallas, la disponibilidad es la probabilidad de que no se presente la falla de un componente del árbol de fallas, es decir, que el componente en cuestión del sistema esté en funcionamiento satisfactorio.

**Dosis letal 50.** Es la cantidad de una sustancia tóxica (miligramos o gramos por kilogramo corporal del sujeto de prueba) obtenida estadísticamente, y que administrada por vía oral o dérmica, matará al 50% de un grupo de animales de experimentación.

**Efecto dominó.** Concatenación de efectos que multiplica las consecuencias debido a que los fenómenos peligrosos pueden afectar, además de los elementos vulnerables exteriores, otros recipientes, tuberías o equipos de la instalación provocando otros fenómenos peligrosos con consecuencias adicionales.

**Electricidad estática.** Tipo de electricidad que se genera por el almacenamiento de cargas eléctricas en los cuerpos.

**Eliminación de riesgo.** Método de administración de riesgos que consiste en la "erradicación" del riesgo de una actividad.

**Escenario de riesgo.** Determinación de un evento hipotético en el cual se toma en consideración la ocurrencia de un accidente bajo condiciones determinadas, definiendo mediante la aplicación de modelos matemáticos y criterios acordes a las características de los procesos y/o materiales, las zonas potencialmente afectadas.

**Espárrago.** Vástago metálico roscado que, pasando a través de una pieza, sirve para sujetar ésta por medio de una tuerca.

**Evento tope.** Es aquella falla de sistema que se considera de gran importancia como para hacer un análisis de árbol de fallas de ella.

**Explosión.** Es una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras se va disipando su energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genere sea audible.

**Factor de bonificación.** En términos del índice DOW, es el producto de los factores de bonificación por control de proceso (C1), por aislamiento de material (C2) y por protección contra incendio (C3).

**Factor de daño.** En términos del índice DOW, es una cantidad que representa el daño producido por un incendio o una explosión. Esta cantidad es función del factor de riesgo y el factor material.



**Factor de riesgo.** En términos del índice DOW, es una cantidad que nos indica la probabilidad de ocurrencia de un accidente en la unidad de proceso de la que se trata. Se obtiene como el producto del factor de riesgo general de proceso (F1) y el factor de riesgo especial de proceso (F2).

**Factor material.** En términos del índice DOW, es una medida de las propiedades intrínsecas de potencial de liberación de energía en un incendio o explosión producida por combustión o reacción química de una sustancia o una mezcla.

**Fiabilidad.** En términos del análisis de árbol de fallas, la probabilidad de que una persona, dispositivo y/o sistema realicen correctamente una actividad requerida por el sistema mismo durante un periodo de tiempo dado (si el tiempo es importante) sin llevar a cabo ninguna actividad extraña que pueda degradar el sistema.

**Frecuencia.** En términos del análisis de riesgos, se denomina así al número de accidentes que ocurren en un lapso determinado de tiempo.

**Fuentes de ignición.** Se llama así a los focos iniciadores de una ignición.

**Función de estructura.** Es la representación matemática del árbol de fallas y que se obtiene mediante el álgebra de Boole.

**Gasolina.** La gasolina es una mezcla de compuestos orgánicos que procede de una fracción del petróleo. Esta mezcla de compuestos comprende cuatro tipos diferentes de hidrocarburos, todos ellos con un número de carbonos de entre 4 y 11, y que son los siguientes: parafínicos o saturados (cadenas en las que el enlace C-C es siempre sencillo), olefínicos (en los existe algún enlace C-C múltiple), nafténicos o cíclicos (las cadenas de enlaces C-C se cierran formando anillos) y aromáticos (formadas básicamente por anillos de enlaces C-C entre los cuales se conforma una estructura electrónica compleja que se extiende por todo el anillo. Un ejemplo de este tipo de compuestos es el benceno  $C_6H_6$ )

**Golpe de ariete.** Es una fuerza vibradora generada en un conducto cuando un fluido no compresible es parado abruptamente. Cuando se tiene una desaceleración brusca en un fluido no compresible, debido a un cierre rápido de un ducto, la energía cinética que traía el fluido choca contra una barrera que puede ser una válvula, una compuerta y se convierte en energía elástica que viaja en la dirección contraria al flujo hasta que encuentre otra barrera. Pero ahí no para, sino que se devuelve en menor cantidad hasta que luego de unos ciclos se disipa. En un sistema de tuberías, para disipar rápidamente la cantidad de movimiento, es necesario colocar conductos que aguanten muy altas presiones.

**Gravedad.** En términos del análisis HazOp, es el nivel de daño originado por las consecuencias de un accidente.



**IDLH.** Del inglés *Immediately Dangerous to Life or Health*. Véase Peligro inmediato para la salud o la vida.

**Ignición.** Constituye el fenómeno del encendido de una mezcla inflamable.

**Inflamabilidad.** Es la propiedad que tienen las sustancias de arder en presencia de un comburente, en especial de oxígeno.

**Interrupción de negocios.** En términos del índice DOW, es el costo que se tiene por el paro de actividades como consecuencia de un incendio o una explosión de la unidad de proceso y que afecta a la instalación en la que se encuentra.

**LC<sub>50</sub>.** Del inglés *Letal Concentration*. Véase Concentración letal 50.

**LD<sub>50</sub>.** Del inglés *Letal Dose 50*. Véase Dosis letal 50.

**Límites de inflamabilidad.** Esta propiedad se utiliza en combustibles gaseosos o vapores de líquidos inflamables. Establece la proporción de gas y aire necesaria para que se produzca la combustión, mediante un límite inferior y un límite superior. Por debajo del límite inferior o por encima del límite superior no hay posibilidad de ignición.

**Límite máximo permisible de exposición.** Es la concentración de un contaminante del medio ambiente laboral, que no debe superarse durante la exposición de los trabajadores en una jornada de trabajo en cualquiera de sus tres tipos y que son el límite máximo permisible de exposición de corto tiempo (TLV-STEL), el límite máximo permisible de exposición pico (TLV-C) y el límite máximo permisible de exposición promedio ponderado en tiempo (TLV-TWA). El límite máximo permisible de exposición se expresa en mg/m<sup>3</sup> o ppm, bajo condiciones normales de temperatura y presión.

**Límite máximo permisible de exposición de corto tiempo.** Es la concentración máxima del contaminante del medio ambiente laboral, a la cual los trabajadores pueden estar expuestos de manera continua durante un periodo máximo de quince minutos, con intervalos de al menos una hora de no exposición entre cada periodo de exposición y un máximo de cuatro exposiciones en una jornada de trabajo y que no sobrepase el TLV-TWA.

**Límite máximo permisible de exposición pico.** Es la concentración de un contaminante del medio ambiente laboral que no debe rebasarse en ningún momento durante la exposición del trabajador.

**Límite máximo permisible de exposición ponderado en tiempo.** Es la concentración promedio ponderada en tiempo de un contaminante del medio ambiente laboral para una jornada de ocho horas diarias y una semana laboral de cuarenta horas, a la cual se pueden exponer la mayoría de los trabajadores sin sufrir daños a su salud.



**Máximos días probables de indisponibilidad.** Es el número de días máximo en los que la actividad en la unidad de proceso será inexistente debido a un incendio o explosión.

**MCS.** Del inglés *Minimal Cut Sets*. Véase Conjuntos mínimos de corte.

**Monel.** Aleación cuyos principales componentes son el níquel y el cobre (también puede estar presente el hierro y el manganeso en cantidades menores). Esta aleación tiene una excelente resistencia a la corrosión en ambientes extremadamente alcalinos y ácidos. Especialmente recomendada para reducir situaciones agresivas. También tiene buena ductibilidad y conductividad térmica. Las aplicaciones incluyen ingeniería naval, equipos para procesos químicos e hidrocarburos, intercambiadores térmicos, válvulas y bombas.

**MPDO.** Del inglés *Maximum Probable Days Outage*. Véase Máximos días probables de indisponibilidad.

**MPPD.** Del inglés *Maximum Probable Property Damage*. Véase Daño máximo probable a la propiedad.

**Nodo.** En términos del análisis HazOp, es una parte del proceso lo suficientemente pequeño para poderse manejar y lo suficientemente grande para ser significativo, es decir, se considera como un nodo un equipo con sus líneas de alimentación y descarga o aquella parte del proceso en la cual un parámetro de la operación varía.

**Octanaje.** Es una medida de la calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas para evitar las detonaciones y explosiones en las máquinas de combustión interna, de tal manera que se libere o se produzca la máxima cantidad de energía útil.

**Palabras guía primarias.** En términos del análisis HazOp, son aquellas palabras que se refieren a un aspecto particular del intento de diseño o una condición o parámetro asociado con el proceso.

**Palabras guía secundarias.** En términos del análisis HazOp, son aquellas palabras que indican ciertas características que en combinación con las palabras guía primarias, sugieren desviaciones o problemas potenciales.

**Peligro inmediato para la salud o la vida.** Concentración máxima a la cual puede escaparse de un lugar en los 30 minutos siguientes sin que se presenten síntomas irreversibles a la salud. Se usa para determinar el tipo de respirador. No se consideran efectos cancerígenos.

**Peligro.** Situación física que puede ocasionar lesiones a las personas, daños a la propiedad o al medio ambiente, o alguna combinación de estas contingencias.

**Polimerización.** Es una reacción química en la que dos o más moléculas de la misma sustancia química o al contacto con otras, se combinan para formar moléculas de mayor tamaño.

**Presión de alivio.** Es la presión a la cual un dispositivo de seguridad desahoga la sobrepresión que haya en algún recipiente.



**Probabilidad.** Es la posibilidad matemática de que un evento ocurra y se expresa en fracciones entre 0 y 1. La absoluta imposibilidad es de 0 y la absoluta certeza es de 1.

**Protección.** En términos del análisis HazOp, es cualquier dispositivo protector, ya sea que prevenga la causa o salvaguarde contra consecuencias adversas. También se incluyen procedimientos, tales como inspecciones regulares de la planta siempre y cuando haya seguridad de que se estén llevando a cabo.

**Radio de exposición.** En términos del índice DOW, se refiere al alcance hipotético del incendio o la explosión de la unidad de proceso que se esté estudiando.

**Recomendación correctiva.** En términos del análisis HazOp, es aquella recomendación que busca reducir o mitigar las consecuencias de los posibles accidentes o desviaciones.

**Recomendación preventiva.** En términos del análisis HazOp, es aquella recomendación que busca reducir la frecuencia o la probabilidad de las causas de los posibles accidentes o desviaciones.

**Recomendación.** En términos del análisis HazOp, es la acción o medida que se puede implementar para reducir o mitigar la probabilidad de que ocurra una desviación o un accidente.

**Refinación.** Es el proceso de separar por destilación fraccionada los distintos componentes del petróleo: combustibles, aceites, asfaltos, etc., para facilitar su comercialización o su posterior fraccionamiento.

**Riesgo convencional.** Son aquellos riesgos relacionados con la actividad y el equipo existentes en cualquier sector.

**Riesgo específico.** Son aquellos riesgos asociados a la manipulación o utilización de productos que, por su naturaleza, pueden ocasionar daños.

**Riesgo mayor.** Son aquellos riesgos relacionados con accidentes y situaciones excepcionales. Sus consecuencias pueden presentar una especial gravedad ya que la rápida expulsión de productos peligrosos o de energía podría afectar áreas considerables.

**Riesgo.** Grado de probabilidad de que se produzca un acontecimiento no deseado con consecuencias determinadas, dentro de cierto período o en circunstancias especificadas. Puede ser expresado tanto como una frecuencia (el número de hechos específicos en la unidad de tiempo) como una probabilidad (la probabilidad de que un hecho específico suceda a un hecho precedente), de acuerdo con las circunstancias.

**Sistema de tierra.** Es un conjunto de conductores, electrodos, accesorios y otros elementos que interconectados eficazmente entre sí, tienen por objeto conectar a tierra a elementos que pueden generar o acumular electricidad estática.





**Temperatura de autoignición.** Es la temperatura mínima a la que una sustancia química entra en combustión en ausencia de chispa o llama.

**Temperatura de inflamación.** Es la temperatura mínima a la cual los materiales combustibles o inflamables desprenden una cantidad suficiente de vapores para formar una mezcla inflamable, la cual se enciende aplicando una fuente de ignición, pero que no es suficiente para sostener una combustión.

**Tiempo de contacto.** Es el tiempo necesario que deben permanecer juntos los reactivos y el catalizador para que así se lleve a cabo la reacción.

**Tiempo de residencia.** Es el tiempo que permanece en recirculación un componente o una corriente dentro de un circuito del proceso.

**TLV.** Del inglés *Threshold Limit Value*. Véase Límite máximo permisible de exposición.

**TLV-C.** Del inglés *Threshold Limit Value – Ceiling*. Véase Límite máximo permisible de exposición pico.

**TLV-STEL.** Del inglés *Threshold Limit Value – Short Term Exposure Limit*. Véase Límite máximo permisible de exposición de corto tiempo.

**TLV-TWA.** Del inglés *Threshold Limit Value – Time Weighted Average*. Véase Límite máximo permisible de exposición ponderado en tiempo.

**Toxicidad.** Es la capacidad de una sustancia para causar daño a la salud de un organismo vivo.

**Transferencia del riesgo.** Método de administración de riesgos que consiste en trasladar a otro el control de los riesgos

**Tratamiento del riesgo.** Método de administración de riesgos que consiste en adoptar los medios y los sistemas para tener un adecuado control de riesgos.

**Unidad de proceso.** En términos del índice DOW, la unidad de proceso puede consistir en equipos individuales de proceso (columnas, reactores, tanques, etc.) o líneas de proceso que presenten condiciones operatorias semejantes y con implicación de las mismas sustancias.

**Valor de sustitución.** Es el costo económico del accidente debido a la pérdida de instalaciones. Se evalúa como una fracción del costo de las instalaciones afectadas por el área de exposición.

**Zona de alerta.** Es la zona donde las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, a pesar de que no son perceptibles por la población, no justifican la intervención, a excepción de grupos críticos.

**Zona de intervención.** Es la zona en donde las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifican la aplicación inmediata de medidas de protección.



---

**BIBLIOGRAFÍA.**

1. Booley, Jack W. **A guide to effective industrial safety.** Gulf Publishing Company. Impreso en E.U. 1977. 120 pp.
2. Carson, Philip A. & Clive J. Mumford. **The safe handling of chemicals in industry.** John Wiley & Sons. Volumen II. 1era. Edición. Impreso en E.U. Longman Scientific & Technical. 1988. 490 pp.
3. Casal, Joaquim et al. **Análisis del riesgo en instalaciones industriales.** Editorial Alfaomega. Impreso en Colombia. Ediciones UPC. 2001. 361 pp.
4. Castro Delgado, Rafael y Pedro Arcos González. **El riesgo de desastre químico como cuestión de salud pública.** Universidad de Oviedo. Departamento de Medicina. Área de Medicina Preventiva y Salud Pública. Unidad de Investigación en Emergencias y Desastres. Oviedo, España. 17 pp.  
<http://www.uniovi.es/~uied/publicaciones/quimico.pdf>  
<http://www.proteccioncivil.net/PDF/Riesgo-Quimico-1.pdf>
5. Colling, David A. **Industrial safety: Management & Technology.** Prentice Hall. Impreso en E.U. 1990. 306 pp.
6. Creus Sole, Antonio. **Fiabilidad y seguridad: su aplicación en procesos industriales.** Marcombo Boixareu Editores. Impreso en España. 1992. 283 pp.
7. Cheremisinoff, Nicholas P. & Madelyn Grafia. **Safety management. Practices for hazardous materials.** Marcel Dekker Inc. Impreso en E.U. 1996. 350 pp.
8. De la Cruz Guerra, Cornelio et al. **Análisis de Riesgos de Procesos (ARP). Un esquema de mejora de la técnica HazOp.** Facultad de Química, U.N.A.M. Departamento de Ing. Química. México D.F. 2000. 17 pp.
9. De Régules, Carlos. **Campaña SIASPA de ahorro de energía y protección ambiental.** Taller sobre contratos de desempeño y empresas de servicios energéticos en México. Pemex. Méx. 2000. 14 pp.  
<http://www.conae.gob.mx/work/secciones/241/imagenes/deregu.pdf>



10. Dinámica Heurística. **Conceptos básicos y metodología del análisis HazOp.** Monterrey, Nvo. León  
<http://www.heuristicos.com/scri/hazopconceptos.htm>
11. Dirección General de Protección Civil (trad). **Guías técnicas para el análisis y la comunicación de riesgos. Métodos cualitativos para el análisis de riesgos. Índice DOW de incendio y explosión.** Tomado del DOW's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide. 6ta. Edición. 1987.  
[http://www.proteccioncivil.org/centrodoc/guiatec/Metodos\\_cualitativos/cuali\\_221.htm](http://www.proteccioncivil.org/centrodoc/guiatec/Metodos_cualitativos/cuali_221.htm)
12. Galván González, Blas J. **Análisis de árbol de fallas. Conceptos, definiciones y metodología.** Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (U.L.P.G.C.) Las Palmas, España. 2001. 77 pp.  
<http://ingenet.ulpgc.es/~ablesa/arboldefallas/arbolindex.htm>
13. Gary, James H. & Glenn E. Handwerk. **Petroleum refining. Technology and Economics.** Marcel Dekker Inc. 3era. Edición. Impreso en E.U. 1994. 465 pp.
14. Gloss, David S. & Miriam Gayle Wardle. **Introduction to safety engineering.** John Wiley & Sons. Impreso en E.U. 1984. 612 pp.
15. Goetsch, David L. **Industrial safety and health in the age of high technology.** Macmillan Publishing Company. Impreso en E.U. 1993. 563 pp.
16. González Cubero, Francisco et al. **Riesgo industrial: análisis, cálculos y representación de consecuencias.** XVII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos – Murcia. Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (A.E.I.PRO.). Barcelona, España. 2001. 16 pp.  
[http://www.unizar.es/aeipro/finder/5\\_prevention.htm](http://www.unizar.es/aeipro/finder/5_prevention.htm)
17. Greenberg, Harris R. & Joseph J. Cramer (comp.) **Risk assessment and risk management for the chemical process industry.** Editorial Van Nostrand Reinhold. Impreso en E.U. 1991. 369 pp.
18. Grimaldi, John V. & Rollin H. Simonds. **La seguridad industrial: su administración.** Editorial Alfaomega. 2da. Edición. Impreso en México, D.F. 1991. 760 pp.



19. Herrera Carrillo, Jorge. **Los sistemas de manejo ambiental ante la transición administrativa gubernamental**. Sistemas de Manejo Ambiental. Petróleos Mexicanos (PEMEX). México. 2000. 16 pp.  
[http://www.semarnat.gob.mx/sma/Material/Seminarios/plenaria\\_4.doc](http://www.semarnat.gob.mx/sma/Material/Seminarios/plenaria_4.doc)
20. Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. **Fichas internacionales de seguridad química**. España. 1999.  
<http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn0000.htm>
21. Moreno, Domingo y Mario Grau. **La seguridad industrial ante los accidentes graves**. Fundación para el fomento de la innovación industrial. Santander, España.  
[http://www.ffii.nova.es/f2i2/publicaciones/libro\\_seguridad\\_industrial/LSI\\_Cap06.pdf](http://www.ffii.nova.es/f2i2/publicaciones/libro_seguridad_industrial/LSI_Cap06.pdf)
22. Navarro Canut, Josep M. **Lógica digital. Álgebra de Boole**. Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. España. 2001.  
[http://descartes.cnice.mecd.es/taller\\_de\\_matematicas/logica\\_digital/Logica%20Digital\\_1.htm](http://descartes.cnice.mecd.es/taller_de_matematicas/logica_digital/Logica%20Digital_1.htm)
23. Organización Internacional del Trabajo (OIT). **Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo**. Oficina Internacional del Trabajo. Volumen II. 3era edición. España. Edición electrónica. 2001.  
<http://www.mtas.es/insht/EncOIT/Index.htm>
24. Organización Internacional del Trabajo (OIT). **Prevención de accidentes industriales mayores**. Oficina Internacional del Trabajo. 1era. Edición. Impreso en Ginebra. 1991. 84 pp.
25. Phillips Petroleum Co. **Manual de operación de las unidades de proceso Phillips-Alquilación ácido fluorhídrico y Hydrisom®**. Refinería "Ing. Antonio Dovali Jaime". 1996. 132 pp.
26. Rodellar Lisa, Adolfo. **Seguridad e higiene en el trabajo**. Marcombo Boixareu Editores. Impreso en Barcelona, España. 1988. 164 pp.
27. Sánchez Vieyra, Jesús. **Análisis de riesgos en la sección de carga de una planta isomerizadora**. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, U.N.A.M. México, D.F. 2002. 161 pp.
28. Santamaría Ramiro, J.M. y P.A. Braña Aisa. **Análisis y reducción de riesgos en la industria química**. Editorial MAPFRE. 2da. Edición. Impreso en España. 1998. 526 pp.