

00579

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

UNAM  
POSGRADO



FACULTAD DE QUIMICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

6

METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DEL RIESGO DE  
UNA INSTALACION DE PRODUCCION TERRESTRE  
( C P Q R A )

296642

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERIA QUIMICA

(PROCESOS)

P R E S E N T A :

LUIS GUILLERMO LUNA MORALES



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## J U R A D O

Presidente: Dr. Mario Vizcarra Mendoza  
Primer Vocal: M. en I. Rafael Lázaro Melo González  
Secretario: Dr. Julio Ricardo Landgrave Romero  
Primer suplente: Dr. Reynaldo Sandoval González  
Segundo suplente: Dr. Alfonso Durán Moreno

Tutor:

Ing. Celestino Montiel Maldonado

Asesor:

M. en I. Rafael Lázaro Melo González

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue posible gracias al programa de apoyos económicos para la realización de estudios de Maestrías del Instituto Mexicano del Petróleo.

A mi tutor, el Ing. Celestino Montiel Maldonado por su asesoría y apoyo para la realización del presente trabajo.

A mi asesor, el Ing. Rafael Melo González por su orientación y consejos durante el desarrollo del presente trabajo.

## RESUMEN

Debido a las características de los hidrocarburos y las condiciones de operación que se maneja en las instalaciones de Pemex Exploración y Producción, éstas representan un riesgo para el personal y el medio ambiente. Por esta razón es necesario minimizar los riesgos y fallas, empleando una metodología que nos permita identificar y evaluar los riesgos, con el propósito de mejorar la seguridad en las instalaciones.

La hipótesis de la presente tesis es: Mediante una metodología de cálculo se pueden minimizar los riesgos y fallas de una planta industrial.

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de una metodología (denominada CPQRA por sus siglas en inglés) que nos permita estimar el riesgo en las instalaciones de producción primaria de Pemex Exploración y Producción, a través de estudios de análisis de riesgos. El alcance de la metodología CPQRA permite su aplicación en cualquier etapa del ciclo de vida de una planta, desde la fase de diseño, construcción, operación normal o desmantelamiento.

Para su elaboración se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva, para seleccionar los modelos más adecuados para la metodología de cálculo, la cual está formada de tres partes principales: identificación de peligros (análisis cualitativo), estimación de consecuencias (análisis cuantitativo) y análisis de frecuencias de fallas.

Para la identificación de peligros se emplean las técnicas de Lista de Verificación (Checklist), "¿Qué pasa si...?" (What-If) y Estudios de Peligro y Operabilidad (HazOp). Estas técnicas funcionan con el mismo tipo de información y conocimiento del proceso, y los resultados obtenidos dependen del tipo y calidad de la información usada, así como de la experiencia de los especialistas que participen en el estudio.

En la estimación de consecuencias se hace uso de los modelos de emisión, dispersión, modelos de fuego y explosión y también modelos de efectos (onda expansiva, toxicidad y radiación térmica). Estos modelos nos permiten simular y cuantificar el material liberado durante un accidente, cuantificar las consecuencias, las pérdidas económicas por derrame y producción diferida y los daños a la salud del personal y probabilidad de defunción.

En el análisis de frecuencia de fallas se determina la frecuencia de ocurrencia de los eventos no deseados con el método de análisis de árbol de fallas. Estos resultados son muy importantes, ya que el principal aspecto a considerarse es el costo asociado con la falla de componentes en equipos, sistemas y procesos de una instalación.

Para desarrollar este tipo de estudio es necesario contar con el software especializado PHAST-PRO V5.2.2 para simular la modelación de consecuencias y BRAVO 2.0a & IRRAS 1.0 para el análisis del árbol de fallas.

En la aplicación de la metodología CPQRA, se seleccionó la estación de compresión de gas amargo Samaria II como caso de estudio. Esta estación representa un riesgo para los recursos humanos, medio ambiente y la producción, debido a las características del gas, las condiciones de operación e inventarios manejados.

# CONTENIDO

RESUMEN.	iv
INDICE.	v
HIPOTESIS	ix
OBJETIVO	ix
ALCANCE	ix
METODOLOGIA DE TESIS	ix
INTRODUCCIÓN.	x
1.0 Generalidades.	1
2.0 Información requerida.	4
2.1. Descripción del Proceso.	4
2.2. Filosofía de operación.	4
2.3. Diagrama de flujo de proceso, diagrama de tubería e instrumentación, plano de localización general.	4
2.4. Balance de materia y energía.	4
2.5. Manual de Operación.	5
2.6. Análisis de la información documental.	5
2.7. Visita a la instalación.	5
2.7.1. Evaluación física e inspección.	5
2.7.2. Actualización de DTI's y PLG's.	5
2.8. Análisis de la bitácora de operación y mantenimiento.	5
3.0 Identificación de peligros.	6
3.1. Lista de verificación (Checklist).	6
3.2. ¿Qué pasa si...? (What-If).	15
3.3. Estudio de Peligro y Operabilidad (HazOp).	18
3.4. Matriz de riesgo.	24
4.0 Estimación de consecuencias.	27
4.1. Modelos de emisión.	28
4.1.1. Modelos de velocidad de descarga.	30
4.1.1.1. Descarga de gas a través de un orificio en un recipiente.	30
4.1.1.2. Descarga de líquido a través de un orificio en un recipiente.	32
4.1.1.3. Flujo a dos fases: fracción de vaporización.	33
4.1.1.4. Flujo a dos fases: descarga de líquido saturado en equilibrio a través de un orificio en un recipiente.	33
4.1.1.5. Flujo a dos fases: descarga de líquido saturado en no equilibrio a través de un orificio en un recipiente.	34
4.1.1.6. Descarga de gas de una tubería.	34
4.1.1.7. Descarga de líquido de una tubería.	35
4.1.1.8. Flujo a dos fases: descarga de líquido saturado en una tubería.	36
4.1.1.9. Descarga de válvulas de relevo.	37
4.1.2. Formación de alberca de líquidos y evaporación.	37

4.2.	Modelos de dispersión.	46
4.2.1.	Modelos masivos instantáneos (Puff) y modelos de pluma (continuos) flotante, neutral y positiva.	48
4.2.2.	Modelos de Pasquill Gifford.	49
4.2.2.1.	Emisión masiva e instantánea. Fuente de emisión a nivel del piso, coordenadas fijas al punto de emisión. Viento constante en la dirección x con una velocidad constante u.	51
4.2.2.2.	Emisión continua. Estado estable, fuente de emisión a nivel del piso. Viento constante en la dirección x con una velocidad constante u.	52
4.2.2.3.	Emisión continua. Estado estable, fuente de emisión a una altura Hr por encima del nivel del piso. Viento constante en la dirección x con una velocidad u.	53
4.2.2.4.	Emisión masiva e instantánea. Punto de emisión a una altura Hr por encima del nivel del piso. El sistema de coordenadas sobre el piso se mueve con la nube.	53
4.3.	Modelos de explosión.	54
4.3.1.	Explosión de nube de vapor no confinado (UVCE) y vaporización por fuego (Flash Fire).	58
4.3.1.1.	Modelo TNT.	58
4.3.1.2.	Modelo TNO.	60
4.3.2.	Explosión física.	62
4.3.3.	Explosión de vapor por expansión de un líquido en su punto de ebullición (BLEVE).	70
4.3.4.	Explosión confinada.	72
4.4.	Modelos de fuego.	75
4.4.1.	Modelos para fuego tipo alberca (Pool Fire).	81
4.4.2.	Modelos para chorro de fuego (Jet Fire).	91
4.4.3.	Modelos para bola de fuego (Fireball).	97
4.5.	Modelos de efecto.	99
4.5.1.	Efectos por onda expansiva.	100
4.5.2.	Efectos térmicos.	103
4.5.3.	Efectos de gas tóxico.	106
4.6.	Elaboración de Matriz de Consecuencias.	108
5.0	Probabilidad de eventos y análisis de frecuencia de fallas.	110
5.1.	Elaboración de la base de datos de tasa de fallas.	110
5.2.	Análisis de árbol de fallas.	111
5.2.1.	Conceptos básicos del análisis del árbol de fallas.	112
5.2.2.	Simbología para la construcción de bloques de un árbol de fallas.	113
5.2.3.	Fundamentos para la construcción del árbol de fallas.	115
5.2.3.1.	Álgebra Booleana y su aplicación para el análisis del árbol de fallas.	115

5.2.3.2.	Determinación de los conjuntos de corte mínimo de un árbol de fallas.	118
5.3.	Construcción del árbol de fallas.	118
5.4.	Técnicas para la evaluación del árbol de fallas.	119
5.4.1.	Parámetros de confiabilidad.	119
5.5.	Cuantificación del árbol de fallas.	123
6.0	Estimación del riesgo.	124
6.1.	Medidas de riesgo.	124
6.1.1.	Índices de riesgo.	124
6.1.2.	Riesgo individual.	125
6.1.3.	Riesgo social.	125
6.1.4.	Medidas del riesgo por daño.	126
6.2.	Presentación del riesgo.	127
6.2.1.	Índices de riesgo.	127
6.2.2.	Riesgo individual.	127
6.2.3.	Riesgo social.	128
6.3.	Selección de la medida del riesgo y formato de presentación.	128
6.3.1.	Selección de las medidas de riesgo.	128
6.3.2.	Selección del formato de presentación.	129
6.4.	Cálculo del riesgo.	130
6.4.1.	Riesgo individual.	130
6.4.1.1.	Contornos de riesgo individual y perfiles.	130
6.4.1.2.	Otras medidas de riesgo individual.	134
6.4.2.	Riesgo social.	135
6.4.2.1.	Procedimiento general.	135
6.4.2.2.	Procedimiento simplificado.	137
6.4.3.	Índices de riesgo.	137
6.4.3.1.	Tasa promedio de muerte.	135
6.4.3.2.	Costo social equivalente.	138
6.4.3.3.	Tasa de accidentes fatales (FAR).	138
7.0	Descripción de la metodología desarrollada (CPQRA).	139
8.0	Caso de estudio: Análisis de Riesgo para la Estación de Compresión Samaria II.	143
8.1.	Antecedentes.	143
8.2.	Objetivo.	143
8.3.	Alcance.	143
8.4.	Descripción de la Estación de Compresión Samaria II.	143
8.4.1.	Generalidades.	143
8.4.2.	Procedencia de la alimentación.	144
8.4.3.	Estación de Compresión Samaria II.	144
8.5.	Información requerida.	146
8.5.1.	Diagramas.	146



8.5.2.	Balance de Materia.	146
8.5.3.	Tasa de Fallas.	149
8.6.	Análisis de Peligro y Operabilidad (HazOp).	153
8.7.	Matriz de Riesgos.	153
8.8.	Modelación de Consecuencias.	157
8.8.1.	Modelación de Emisiones.	158
8.8.2.	Modelación de Dispersiones.	159
8.8.3.	Modelación de Explosión y Fuego.	160
8.8.4.	Modelación de efectos por Explosión, Radiación Térmica y Toxicidad.	160
8.8.5.	Resultados obtenidos de la modelación de consecuencias.	161
8.9.	Árbol de Fallas.	174
8.10.	Recomendaciones obtenidas a partir del caso de estudio.	180
9.0	Conclusiones.	182
GLOSARIO DE TÉRMINOS.		183
BIBLIOGRAFÍA.		186
ANEXO A	Diagramas.	190
ANEXO B	HazOp de la unidad de compresión 17 del área ampliación.	202
ANEXO C	Lista de categorías de consecuencias y frecuencias y niveles de riesgo.	217
ANEXO D	Matriz de Causas y Consecuencias y zonas de afectación.	224
ANEXO E	Árbol de Fallas.	235
ANEXO F	Valores IDLH y ERPG para sustancias tóxicas.	246

## **HIPOTESIS**

Mediante una metodología de cálculo se pueden minimizar los riesgos y fallas de una planta industrial.

## **OBJETIVO**

Desarrollar una metodología que nos permita estimar el riesgo en las instalaciones de producción primaria de Pemex Exploración y Producción, a través de estudios de análisis de riesgos.

## **ALCANCE**

La metodología CPQRA se puede aplicar en cualquier etapa del ciclo de vida de una planta, desde la fase de diseño, construcción, operación normal o desmantelamiento.

## **METODOLOGIA DE LA TESIS**

Para su elaboración se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva, para seleccionar los modelos más adecuados para la metodología de cálculo.

El desarrollo de la metodología de cálculo está formada de tres partes principales: identificación de peligros (análisis cualitativo), estimación de consecuencias (análisis cuantitativo) y análisis de frecuencias de fallas.

La identificación de peligros utiliza las técnicas de lista de verificación, ¿Qué pasa si...? y análisis de peligro y operabilidad (HazOp). En la estimación de consecuencias se hace uso de modelos de emisión, modelos de dispersión, modelos de fuego y explosión y modelos de efectos por onda expansiva, radiación térmica y toxicidad. Para el análisis de frecuencias de fallas se emplea la técnica de árbol de fallas.

En la aplicación de esta metodología se utilizó con el software especializado PHAST-PRO V5.2.2 para simular la modelación de consecuencias y el software BRAVO 2.0a & IRRAS 1.0 para el análisis de árbol de fallas.

En el caso de estudio para la aplicación de la metodología desarrollada, se seleccionó la estación de compresión de gas amargo Samaria II, ya que debido a las características del gas y condiciones de operación representa un riesgo para los recursos humanos, medio ambiente y la producción.

Para su validación, esta metodología está basada en la aplicación de las mejores prácticas recomendadas por El Center for Chemical Process Safety (CCPS) del American Institute of Chemical Engineers (AIChE) y el American Petroleum Institute (API).

## **HIPOTESIS**

Mediante una metodología de cálculo se pueden minimizar los riesgos y fallas de una planta industrial.

## **OBJETIVO**

Desarrollar una metodología que nos permita estimar el riesgo en las instalaciones de producción primaria de Pemex Exploración y Producción, a través de estudios de análisis de riesgos.

## **ALCANCE**

La metodología CPQRA se puede aplicar en cualquier etapa del ciclo de vida de una planta, desde la fase de diseño, construcción, operación normal o desmantelamiento.

## **METODOLOGIA DE LA TESIS**

Para su elaboración se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva, para seleccionar los modelos más adecuados para la metodología de cálculo.

El desarrollo de la metodología de cálculo está formada de tres partes principales: identificación de peligros (análisis cualitativo), estimación de consecuencias (análisis cuantitativo) y análisis de frecuencias de fallas.

La identificación de peligros utiliza las técnicas de lista de verificación, ¿Qué pasa si...? y análisis de peligro y operabilidad (HazOp). En la estimación de consecuencias se hace uso de modelos de emisión, modelos de dispersión, modelos de fuego y explosión y modelos de efectos por onda expansiva, radiación térmica y toxicidad. Para el análisis de frecuencias de fallas se emplea la técnica de árbol de fallas.

En la aplicación de esta metodología se utilizó con el software especializado PHAST-PRO V5.2.2 para simular la modelación de consecuencias y el software BRAVO 2.0a & IRRAS 1.0 para el análisis de árbol de fallas.

En el caso de estudio para la aplicación de la metodología desarrollada, se seleccionó la estación de compresión de gas amargo Samaria II, ya que debido a las características del gas y condiciones de operación representa un riesgo para los recursos humanos, medio ambiente y la producción.

Para su validación, esta metodología está basada en la aplicación de las mejores prácticas recomendadas por El Center for Chemical Process Safety (CCPS) del American Institute of Chemical Engineers (AIChE) y el American Petroleum Institute (API).

## **HIPOTESIS**

Mediante una metodología de cálculo se pueden minimizar los riesgos y fallas de una planta industrial.

## **OBJETIVO**

Desarrollar una metodología que nos permita estimar el riesgo en las instalaciones de producción primaria de Pemex Exploración y Producción, a través de estudios de análisis de riesgos.

## **ALCANCE**

La metodología CPQRA se puede aplicar en cualquier etapa del ciclo de vida de una planta, desde la fase de diseño, construcción, operación normal o desmantelamiento.

## **METODOLOGIA DE LA TESIS**

Para su elaboración se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva, para seleccionar los modelos más adecuados para la metodología de cálculo.

El desarrollo de la metodología de cálculo está formada de tres partes principales: identificación de peligros (análisis cualitativo), estimación de consecuencias (análisis cuantitativo) y análisis de frecuencias de fallas.

La identificación de peligros utiliza las técnicas de lista de verificación, ¿Qué pasa si...? y análisis de peligro y operabilidad (HazOp). En la estimación de consecuencias se hace uso de modelos de emisión, modelos de dispersión, modelos de fuego y explosión y modelos de efectos por onda expansiva, radiación térmica y toxicidad. Para el análisis de frecuencias de fallas se emplea la técnica de árbol de fallas.

En la aplicación de esta metodología se utilizó con el software especializado PHAST-PRO V5.2.2 para simular la modelación de consecuencias y el software BRAVO 2.0a & IRRAS 1.0 para el análisis de árbol de fallas.

En el caso de estudio para la aplicación de la metodología desarrollada, se seleccionó la estación de compresión de gas amargo Samaria II, ya que debido a las características del gas y condiciones de operación representa un riesgo para los recursos humanos, medio ambiente y la producción.

Para su validación, esta metodología está basada en la aplicación de las mejores prácticas recomendadas por El Center for Chemical Process Safety (CCPS) del American Institute of Chemical Engineers (AIChE) y el American Petroleum Institute (API).

## **HIPOTESIS**

Mediante una metodología de cálculo se pueden minimizar los riesgos y fallas de una planta industrial.

## **OBJETIVO**

Desarrollar una metodología que nos permita estimar el riesgo en las instalaciones de producción primaria de Pemex Exploración y Producción, a través de estudios de análisis de riesgos.

## **ALCANCE**

La metodología CPQRA se puede aplicar en cualquier etapa del ciclo de vida de una planta, desde la fase de diseño, construcción, operación normal o desmantelamiento.

## **METODOLOGIA DE LA TESIS**

Para su elaboración se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva, para seleccionar los modelos más adecuados para la metodología de cálculo.

El desarrollo de la metodología de cálculo está formada de tres partes principales: identificación de peligros (análisis cualitativo), estimación de consecuencias (análisis cuantitativo) y análisis de frecuencias de fallas.

La identificación de peligros utiliza las técnicas de lista de verificación, ¿Qué pasa si...? y análisis de peligro y operabilidad (HazOp). En la estimación de consecuencias se hace uso de modelos de emisión, modelos de dispersión, modelos de fuego y explosión y modelos de efectos por onda expansiva, radiación térmica y toxicidad. Para el análisis de frecuencias de fallas se emplea la técnica de árbol de fallas.

En la aplicación de esta metodología se utilizó con el software especializado PHAST-PRO V5.2.2 para simular la modelación de consecuencias y el software BRAVO 2.0a & IRRAS 1.0 para el análisis de árbol de fallas.

En el caso de estudio para la aplicación de la metodología desarrollada, se seleccionó la estación de compresión de gas amargo Samaria II, ya que debido a las características del gas y condiciones de operación representa un riesgo para los recursos humanos, medio ambiente y la producción.

Para su validación, esta metodología está basada en la aplicación de las mejores prácticas recomendadas por El Center for Chemical Process Safety (CCPS) del American Institute of Chemical Engineers (AIChE) y el American Petroleum Institute (API).

## INTRODUCCIÓN

Los estudios de análisis de riesgos proporcionan una herramienta al ingeniero para desarrollar estrategias de reducción al analizar y cuantificar el riesgo. Se pueden identificar y dar prioridad a las contribuciones individuales al riesgo global de un proceso. Se puede aplicar un rango de medidas de reducción del riesgo para las contribuciones del riesgo principal y hacer la evaluación usando métodos de costo-beneficio.

En el presente estudio se desarrolla una metodología de análisis de riesgos para la estimación del riesgo en una instalación de producción terrestre (ver figura 1). Esta metodología está basada en la aplicación de las mejores prácticas recomendadas por El Center for Chemical Process Safety (CCPS) del American Institute of Chemical Engineers (AIChE) y el American Petroleum Institute (API).

El desarrollo de la metodología se ha dividido en 6 capítulos. En el capítulo 1 se dan algunas generalidades, definiciones y componentes técnicos del análisis de riesgos. El capítulo 2 describe la información que se requiere para este tipo de estudios, como son diagramas, condiciones de operación, filosofía de operación, etc.

En el capítulo 3 se describen las técnicas para la identificación de peligros. Esta actividad es esencial en el estudio, ya que con estas técnicas se identifican los peligros importantes en la instalación; por lo tanto, si este estudio no selecciona adecuadamente entre los peligros más importantes y los menos importantes, los estudios subsecuentes nos proporcionarán un estimado de riesgo alejado de la realidad. Esta metodología utiliza las técnicas de Lista de Verificación, Análisis ¿Qué pasa si...? y Análisis de Peligro y Operabilidad (HazOp). Se recomienda combinar dos de estas técnicas, generalmente es el HazOp combinada con cualquiera de las otras dos técnicas.

El siguiente paso es determinar las consecuencias diversas de los peligros potenciales que se han identificado. En el capítulo 4 se proporciona la metodología para cuantificar los daños al personal, estructuras y equipos de proceso, a través de los modelos de emisión, modelos de dispersión, modelos de explosión y fuego, y modelos de efectos por onda expansiva, radiación térmica y toxicidad.

En el capítulo 5 se estima la frecuencia de ocurrencia de los eventos no deseados mediante la técnica de Análisis de Árbol de Fallas, el cual se basa en la combinación de fallas de los componentes más básicos del sistema. En el capítulo 6 se dan los procedimientos para la estimación del riesgo y en el capítulo 7 se da una descripción integral de la metodología desarrollada (CPQRA).

La aplicación de esta metodología se ejemplifica con un caso de estudio en el capítulo 8. El estudio de Análisis de Riesgos se aplicó a una Estación de Compresión de gas amargo. Debido a la complejidad del sistema se utilizó el software HYSYS V.1.2.4 para la elaboración del balance de materia, el PHAST V.5.2 se usó para la estimación de las consecuencias de toxicidad, fuego y explosión; para la construcción de los árboles de fallas se utilizó el IRRAS V.1.0; y por último, con el Software Bravo 2.0 se desarrolló la solución lógica del árbol de fallas, mediante modelos rigurosos soportados en la teoría de confiabilidad.

En el anexo A se proporcionan los diagramas de la instalación, en el anexo B se dan los resultados del HazOp, las categorías de frecuencias y consecuencias y niveles de riesgos se dan en el anexo C, la matriz de causas y consecuencias se encuentra en el anexo D, y en el anexo E se da una lista de los eventos básicos utilizados en la construcción del árbol de fallas.

En el Anexo F se proporcionan criterios toxicológicos de Emergency Response Planning Guidelines (ERPG) e Immediately Dangerous to Life Health (IDLH) que se utilizan para evaluar la probabilidad de un resultado adverso en los modelos de efectos por toxicidad.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones para la aplicación de esta metodología se dan en el capítulo 9.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

El análisis cuantitativo de riesgo para procesos químicos es una metodología relativamente nueva, que ha demostrado ser una herramienta de administración en el desempeño de la seguridad global de la industria de los procesos químicos (CPI). Aunque los sistemas de administración, tales como códigos de ingeniería, lista de verificación y las inspecciones realizadas por ingenieros especializados, han proporcionado una base sólida sobre la seguridad, los accidentes pueden ocurrir e involucran daños a las instalaciones, al medio ambiente y al personal. La técnica de Análisis Cuantitativo de Riesgos proporciona medios cuantitativos avanzados para complementar la identificación de peligros, análisis, valoración, control y métodos de administración para identificar el potencial de tales peligros y evaluar estrategias de control. Esta metodología ha evolucionado por 15 años desde sus inicios en la industria aeroespacial, electrónica y nuclear.

El término CPQRA (Chemical Process Quantitative Risk Analysis) se usa en este trabajo para enfatizar la singularidad de esta metodología que es practicada por la industria de procesos químicos. El análisis cuantitativo de riesgos continua siendo reforzado y ajustado a las necesidades particulares de la industria de procesos químicos. La base fundamental del análisis cuantitativo de riesgos es simple en su concepto, el cual es ofrecer métodos para responder las cuatro preguntas siguientes:

1. ¿Qué puede salir mal?
2. ¿Cuáles son las causas?
3. ¿Cuáles son las consecuencias?
4. ¿Cuál es la probabilidad?

La aplicación de una serie completa de técnicas de análisis cuantitativo de riesgos permite una inspección cuantitativa de los riesgos de una instalación, siendo desde lo frecuente o accidentes de baja consecuencia a lo raro o sucesos más grandes, usando una metodología uniforme y consistente. Una vez que se han identificado los riesgos del proceso, la técnica de análisis cuantitativo de riesgos ayuda a enfocar los estudios de control de riesgos. Se pueden identificar los principales contribuyentes al riesgo y se pueden hacer recomendaciones y tomar decisiones para acciones correctivas sobre una base consistente y objetiva.

Es conveniente (para fácil entendimiento y administración) dividir el procedimiento completo del análisis cuantitativo de riesgos en componentes técnicos. No todos los análisis cuantitativo de riesgos requieren el uso de todas las técnicas. En la figura 1 se da un esquema para la metodología completa del análisis cuantitativo de riesgos para un sistema de proceso. La lógica del análisis cuantitativo de riesgos involucra las siguientes técnicas:

- Definición del análisis cuantitativo de riesgos. Convierte los requerimientos del usuario en metas y objetivos de estudio. Las medidas y formatos de presentación del riesgo se seleccionan al finalizar el alcance de trabajo para el análisis cuantitativo de riesgos.
- Descripción del sistema. Es la compilación de la información de la planta/proceso necesaria para el análisis de riesgo.
- Identificación de peligros. Es un paso crítico en el análisis cuantitativo de riesgos. La omisión de un peligro es un peligro no analizado. Mucha ayuda está disponible, incluyendo experiencia, códigos de



ingeniería, lista de verificación, conocimiento detallado del proceso, experiencia en falla de equipo, técnicas de índice de peligros, análisis ¿Qué pasa si...? (What-If), estudios de peligro y operabilidad (HazOp), análisis de modos de fallas y efectos (FMEA) y análisis preliminar de peligro (PHA).

- Enumeración de accidentes. Es la identificación y tabulación de todos los accidentes sin considerar la importancia del evento inicial.
- Selección. Es el proceso mediante el cual se seleccionan uno o más accidentes significativos para representar todos los accidentes identificados, se identifican los resultados de accidentes y se desarrollan los casos de accidentes.
- Construcción del modelo de análisis cuantitativo de riesgos. Cubre la selección del modelo de consecuencia apropiado, métodos de estimación de la probabilidad y su integración dentro del algoritmo global para producir y representar el estimado de riesgo para el sistema en estudio.
- Estimación de consecuencias. Es la metodología que se usa para determinar el potencial de daño o lesión de un accidente específico. Un accidente puede tener muchos resultados distintos. Estos resultados se analizan usando modelos de emisión, modelos de dispersión, modelos de fuego y explosión. Los modelos de efectos se usan para determinar los daños a personas y/o estructuras. Las acciones evasivas, tales como refugio o evacuaciones, pueden reducir la magnitud de las consecuencias y estas se deben incluir en el análisis.
- Estimación de la probabilidad. Es la metodología usada para estimar la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de un accidente. El estimado se puede obtener de datos de accidentes históricos o frecuencia de fallas, o de modelos de secuencia de fallas, tales como árboles de falla y árboles de eventos. Muchos sistemas requieren la consideración de factores tales como fallas de causa-común.
- Estimación del riesgo. Combina la consecuencia y probabilidad de todos los resultados de los accidentes seleccionados para proporcionar una medida de riesgo. El riesgo de todos los accidentes seleccionados se estiman individualmente y se suman para dar una medida de riesgo global.
- Utilización del estimado de riesgo. Es el proceso por medio del cual los resultados de un análisis de riesgo se usan para tomar decisiones, a través de un orden relativo de estrategias de reducción de riesgos o a través de la comparación con blancos de riesgos específicos.

El último paso del análisis cuantitativo de riesgos es la etapa clave en la evaluación del riesgo. Esta etapa requiere comparar el estimado de riesgo del análisis cuantitativo de riesgos con los blancos de riesgo y decidir si es necesario aumentar las medidas de reducción del riesgo.

La modificación de sistemas involucra la propuesta y evaluación de estrategias de reducción del riesgo por personas con conocimiento en tecnologías de proceso. La estimación del riesgo proporciona una visión dentro del grado de reducción posible del riesgo y las áreas donde la reducción del riesgo puede ser más efectiva. La propuesta de estrategias de reducción de riesgo puede incorporar cambios para diseños de sistemas u operación, en orden para eliminar o reducir las consecuencias o frecuencias del accidente.

Muchas aplicaciones de la metodología de análisis cuantitativo de riesgos no necesitan usar todos los componentes técnicos disponibles. Los componentes técnicos del análisis cuantitativo de riesgos son flexibles y se pueden aplicar selectivamente en varios ordenes.

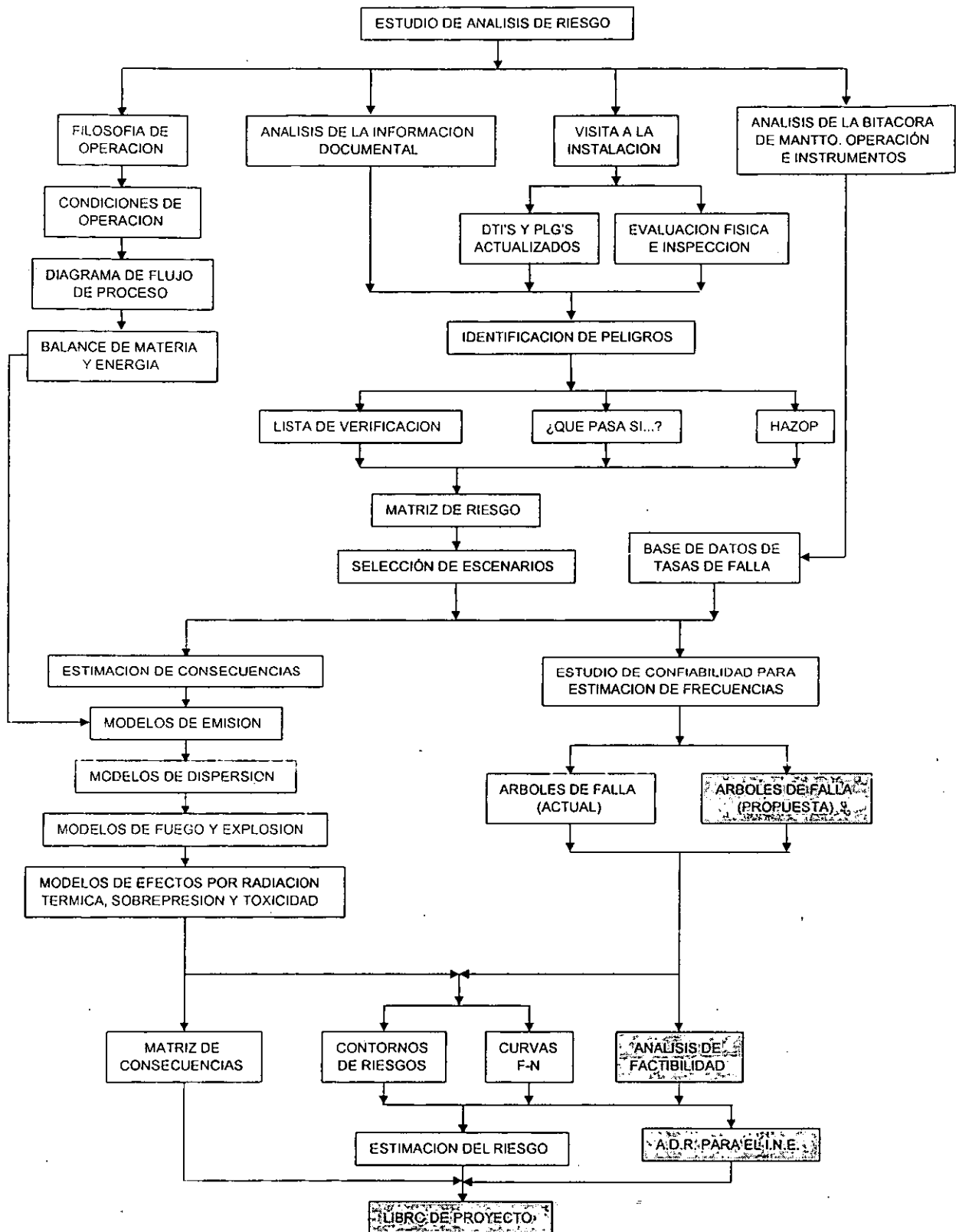


Figura 1. Metodología desarrollada (CPQRA) para la estimación del riesgo de una instalación de producción terrestre.

## **CAPITULO 2**

### **INFORMACIÓN REQUERIDA PARA ELABORAR ESTUDIOS DE ANÁLISIS DE RIESGOS.**

A continuación se mencionan los documentos necesarios para la elaboración de un análisis de riesgo.

#### **2.1. Descripción del proceso.**

La descripción del proceso es un documento que ayuda a la interpretación del diagrama de flujo de proceso, para que los especialistas que lo utilicen logren un total entendimiento del proceso. Este documento tiene como finalidad permitir un conocimiento de las características fundamentales del proceso para facilitar la interpretación de los diagramas de flujo correspondientes.

Básicamente debe incluir la información del proceso que sea relevante, haciendo hincapié en aquella que se refiera a características y condiciones de operación de los equipos así como aspectos que se consideren de utilidad que puedan anticipar posibles problemas operacionales.

#### **2.2. Filosofía de operación.**

La filosofía de operación es un documento en donde se presentan las filosofías básicas de operación de la planta, como parte de la ingeniería básica de un proyecto, para su posterior incorporación al manual de operación, y debe cubrir los siguientes puntos:

1. Variables de operación y control del proceso.
2. Operaciones anormales.
3. Operaciones especiales.
4. Requerimientos de control analítico del proceso.

#### **2.3. Diagrama de flujo de proceso, diagrama de tubería e instrumentación, plano de localización general.**

El diagrama de flujo de proceso es un documento en donde se muestra la secuencia seguida en el proceso, las operaciones unitarias que en él se efectúan y los flujos de materia y energía que se transfieren.

El diagrama de flujo de proceso es el mejor medio de transmisión de datos de ingeniería en forma completa y precisa, debido a que es una representación gráfica de todo el sistema, en la que se describe el proceso, se proporcionan datos de las entradas y salidas de materia y energía y se da información de los equipos que lo constituyen.

#### **2.4. Balance de materia y energía.**

El balance de materia y energía es la presentación de los balances del proceso que incluye todas las corrientes numeradas en el diagrama de flujo de proceso. Este balance incluye, además de flujos, composiciones, características básicas y condiciones de temperatura y presión de las corrientes, los valores de las propiedades termofísicas requeridas para el diseño de líneas y especificación de instrumentos.

En esta metodología, el balance de materia y energía se utiliza para determinar datos de flujos, composición química y propiedades termofísicas de las diferentes corrientes definidas en el Diagrama de Flujo de Proceso de la Instalación terrestre, las cuales se utilizan en la simulación de escenarios para especificar la composición y las condiciones de operación en la etapa del modelado de la emisión. Para la elaboración del balance de materia y energía se puede utilizar cualquier simulador comercial (Aspen Plus, Pro II, Hysys, Hysys Planet, etc.).

## **2.5. Manual de operación.**

En este manual se describen los equipos y procesos involucrados en la operación de una planta, así como también las instrucciones necesarias para la preparación y puesta en operación de la misma.

Adicionalmente se menciona la metodología de operación y filosofía de control, así como las actividades especiales que deberá efectuar el operador, que permiten analizar e identificar los síntomas, causas y correcciones a los problemas que pudieran presentarse durante el arranque u operación normal.

## **2.6. Análisis de la información documental.**

Una vez obtenida toda la información referente a la instalación, se procede a analizarla con el objetivo de familiarizarse con el proceso así como también con las variables de operación.

## **2.7. Visita a la instalación.**

Con el objetivo de confirmar los datos que se presentan en la información obtenida, es necesario realizar una visita a la instalación.

### **2.7.1. Evaluación física e inspección.**

En la visita a la instalación, el personal realiza una evaluación e inspección física con el objetivo de familiarizarse con la distribución de los equipos, verificar datos de operación y la interrelación de los equipos en el proceso.

### **2.7.2. Actualización de DTI's y PLG's.**

Otro de los objetivos de la visita es la actualización de los diagramas de tubería e instrumentación y del plano de localización general, ya que son de vital importancia para la elaboración del diagrama de integración de los nodos y estimación de consecuencias respectivamente.

## **2.8. Análisis de la bitácora de operación y mantenimiento.**

El Análisis de Datos de Bitácoras es una Técnica Cuantitativa auxiliar del Análisis de Riesgo para determinar las tasas de fallas y también para obtener los diferentes datos de confiabilidad de las unidades de proceso. Esta técnica es apropiada cuando se tienen documentados los datos históricos de las fallas que se han presentado durante un tiempo determinado de operación de la instalación.

Para la aplicación del Análisis de Datos de Bitácoras se requiere del documento en el cual se indican los tipos de fallas, tiempos fuera de operación por reparación, tiempos de disponibilidad y el tiempo de operación de cada uno de los equipos.

## CAPITULO 3

### IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS<sup>(1)(2)</sup>.

Un peligro es una característica física o química de un material, sistema, proceso o planta que tiene el potencial de causar daño. Así, la identificación de peligros involucra dos tareas claves:

- Identificación de consecuencias indeseables específicas.
- Identificación de características de materiales, sistemas, procesos e instalaciones que podrían producir esas consecuencias.

La primera tarea es relativamente fácil, pero es esencial ya que define el alcance de la segunda tarea. Las consecuencias indeseables se clasifican en: impacto humano, impacto ambiental, o impacto económico. Dentro de esta clasificación se pueden especificar las consecuencias por categorías, y cada una de estas categorías se puede dividir por el tipo de daño que provocan, de tal manera que entre más precisa sea la definición de las consecuencias de interés, será más fácil identificar el peligro.

Una vez que las consecuencias de interés están definidas, el especialista puede identificar las características de los sistemas, procesos e instalaciones que pueden ser un peligro de interés. Es esencial que la técnica de identificación de peligros sea lo suficientemente minuciosa para identificar todos los peligros importantes. Sin embargo, si el análisis no suministra una discriminación entre los peligros menos importantes y los más importantes, entonces las evaluaciones subsecuentes se inundarán con una cantidad importante de peligros potenciales que se tendrán que analizar. Los métodos más comunes de identificación de peligros incluyen el análisis de las propiedades del material y condiciones del proceso, la revisión de la organización y experiencia del proceso industrial, el desarrollo de matrices de interacción, y la aplicación de técnicas de evaluación de peligros.

Las técnicas usadas más comúnmente para la identificación de peligros son:

- Lista de Verificación (Checklist Analysis)<sup>(1)(2)</sup>.
- ¿Qué pasa si...? (What-If Analysis)<sup>(1)(2)</sup>.
- HazOp (Hazard and Operability Analysis)<sup>(1)(2)</sup>.

Todos estos análisis funcionan con el mismo conocimiento y datos del proceso usados en técnicas de identificación previas, los resultados obtenidos dependen del tipo y calidad de la información usada.

#### **3.1. Lista de verificación (Checklist)<sup>(1)(2)</sup>.**

La lista de verificación es una técnica cualitativa de análisis de riesgos, la cual utiliza una serie de preguntas escritas referidas a posibles fallas en el diseño de equipos y/o procedimientos operativos con el propósito de verificar el "status" del sistema a evaluar. Esta técnica de identificación de peligros puede variar dependiendo del nivel de detalle, utilizándose frecuentemente para indicar el cumplimiento del sistema con las normas, estándares y prácticas recomendadas.

La lista de verificación es una técnica fácil de usar y puede aplicarse en cualquier etapa de la vida de la instalación. Muchas organizaciones utilizan la lista de verificación para controlar el desarrollo del proyecto desde el diseño original hasta el desmantelamiento de la misma. También puede usarse para familiarizar al personal con poca experiencia con el proceso.

Generalmente se combina con alguna otra técnica de evaluación de peligros para la identificación plena de las situaciones peligrosas. Se recomienda que periódicamente esta técnica de identificación de peligros se audite y actualice.

La lista de verificación reconoce aspectos generales de seguridad de la instalación y sirve para identificar áreas en donde es preciso realizar estudios a mayor detalle. El desarrollo de esta técnica considera tres etapas principales:

- 1 Selección o desarrollo de la lista de verificación.
  - a) Para la selección de la lista de verificación se recurre a fuentes de información (normas internas, normas oficiales o en su caso, recomendaciones internacionales tales como las del API, ASME, etc.) con el fin de determinar cuál, de las listas de verificación encontradas, es la apropiada para el caso en estudio.
  - b) Si no hay una lista de verificación disponible, entonces el analista debe usar su propia experiencia y la información disponible de referencias autorizadas para generar una lista de verificación apropiada.
  - c) La lista de verificación deberá ser preparada por un ingeniero experimentado el cual está familiarizado con la operación general de la planta y con los procedimientos y políticas estándares de la compañía. Se desarrolla para que los aspectos del diseño u operación del sistema que no cumplan con los estándares industriales comunes o de la compañía, puedan ser descubiertos a través de respuestas a preguntas generadas en la lista de verificación.
- 2 Desarrollo del estudio.
  - a) La lista de verificación se aplica a través de recorridos por las instalaciones observando la condición en la cual ésta se encuentra y realizando anotaciones que detallen puntos fuera de norma, además de entrevistas con el personal de la Instalación.
  - b) Es preciso contar con información complementaria tal como diagramas de tubería e instrumentación (DTI's) actualizados, hojas de seguridad de materiales (MSDS), presiones máximas permisibles de trabajo de equipos (MAWP), puntos de calibración de sistemas de desfogue, y el diseño general de la instalación.
- 3 Documentación de los resultados.
  - a) El equipo de evaluación de riesgos que desarrolla el análisis debe resumir las deficiencias encontradas durante las visitas y reuniones; el reporte debe contener una copia de la lista de verificación que fue usada para realizar el análisis, y las recomendaciones específicas para mejorar la seguridad deben ser proporcionadas extensamente con explicaciones apropiadas.
  - b) Los resultados de la lista de verificación se presentan por instalación de la siguiente manera:
    - Instalación en General (ver figura 3.1.1).
      - General
      - Distribución General
      - Evacuación
      - Respuesta Médica
      - Desalojo y Rescate
    - Proceso (ver figura 3.1.2).
      - Carta de Seguridad

Tubería  
Válvulas Check  
Válvulas de Control  
Válvulas con Candado  
PSV's  
Desfogue y Quemado  
Sistemas de Drenado  
Líneas  
Recipientes a Presión  
Recipientes Atmosféricos  
Bombas Centrifugas  
Bombas de Desplazamiento Positivo  
Compresores Centrifugos  
Compresores de Desplazamiento Positivo  
Intercambiadores de Calor

- Sistemas de Proceso (ver figura 3.1.3).
  - Sistema de Seguridad de Superficie
  - Centro de Control de Motor
  - Sensores de Entrada
  - Hardware del Sistema
  - Lógica
  - Desarrollo Lógico
  - Sistema Eléctrico
- Detección de Gas y Fuego (ver figura 3.1.4).
  - Detección de Gas y Fuego Área de Proceso
  - Protección de Fuego y Gas Area de proceso
  - Detección de Gas y Fuego Edificios y Lugares Cerrados
  - Protección de Gas y Fuego Edificios y Lugares Cerrados
  - Detección de Gas y Fuego Habitaciones
  - Protección de Gas y Fuego Habitaciones
- Mecánico (ver figura 3.1.5).
  - Materiales de Construcción
  - Tubería
  - Arreglo General y Diseño de Cuartos de Control
  - Construcción y Materiales Cuartos de Control
  - Salidas de Emergencia Cuartos de Control
  - Iluminación Cuartos de Control
  - Servicios Cuartos de Control
- Factores Humanos (ver figura 3.1.6).
  - Limpieza y Ambiente General de Trabajo
  - Accesibilidad/Disponibilidad de Controles y Equipos
  - Resumen de Lista de Verificación.
  - Total de Desviaciones
  - Contribución de cada Instalación

Tipo de desviación Sistema evaluado	General	Distribución General	Evacuación	Respuesta Médica	Desalojo y Rescate	TOTALES
<b>TOTALES</b>						

Figura 3.1.1. Formato para Lista de Verificación de la Instalación en general.



Tipo de Desviación Sistema evaluado	Carta de Seguridad	Tubería	Válvulas Check	Válvulas de Control	Válvulas con Candado	PSV's	Desfogue y Quemado	Sistemas de Drenado	Lineas	Recipientes a Presión	Recipientes Atmosféricos	Bombas Centrífugas	Bombas Desplazamiento Positivo	Compresores Centrífugos	Compresores de Desplazamiento Positivo	Intercambiadores de Calor	TOTALES
<b>TOTALES</b>																	

Figura 3.1.2. Formato para Lista de Verificación de Proceso.

Tipo de Desviación Sistema Evaluado	Sistema Seguridad de Superficie	Control de Motor	Sensores de Entrada	Hardware del Sistema	Filosofía de Lógica	Desarrollo Lógico	Sistema Eléctrico	TOTALES
TOTALES								

**Figura 3.1.3.** Formato para Lista de Verificación de Sistemas de Proceso.

<div style="text-align: center;">Tipo de Desviación</div> <div style="text-align: left;">Sistema Evaluado</div>	Detección de Gas y Fuego Área de Proceso	Protección de Fuego y Gas Área de Proceso	Detección de Gas y Fuego Edificios y Lugares Cerrados	Protección de Gas y Fuego Edificios y Lugares Cerrados	Detección de Gas y Fuego Habitaciones	Protección de Gas y Fuego Habitaciones	TOTALES
<b>TOTALES</b>							

Figura 3.1.4. Formato para Lista de Verificación de Detección de Gas y Fuego.

Tipo de Desviación Sistema Evaluado	Materiales de Construcción	Tubería	Arreglo General y Diseño Cuartos de Control	Construcción y Materiales Cuartos de Control	Salidas de Emergencia Cuartos de Control	Iluminación Cuartos de Control	Servicios Cuartos de Control	TOTALES
<b>TOTALES</b>								

Figura 3.1.5. Formato para Lista de Verificación Mecánico.

<div style="text-align: center;">Tipo de Desviación</div> <div style="text-align: left;">Sistema Evaluado</div>	<div style="text-align: center;">Limpieza y Ambiente General de Trabajo</div>	<div style="text-align: center;">Accesibilidad / Disponibilidad de Controles y Equipos</div>	<div style="text-align: center;">TOTALES</div>
TOTALES			

Figura 3.1.6. Formato para Lista de Verificación de Factores Humanos.

### 3.2. ¿Que pasa si...? (What-If)<sup>(1)(2)</sup>.

La técnica de análisis What-If es una tormenta de ideas de un proceso u operación. El análisis de peligro revisa el proceso o actividad en reuniones que giran alrededor de problemas potenciales de seguridad identificado por el análisis. Cada miembro del equipo de evaluación de peligro es animado a mencionar las preguntas ¿Qué pasa si...? o especificar los problemas que conciernen a ellos. Esta técnica se puede usar para examinar virtualmente cualquier aspecto del diseño u operación. Es muy poderosa si el personal que participa en el análisis es muy experimentado, de otra forma, los resultados probablemente estarán incompletos. Un análisis What-If para sistemas simples puede ser conducido fácilmente por una o dos personas; para procesos más complejos se requieren equipos más grandes y más tiempo o más reuniones.

El análisis What-If revisa el proceso comenzando con la introducción del material de alimentación y sigue el flujo hasta el fin del proceso (o el límite definido por el alcance del análisis), aunque también se puede centrar en un tipo particular de consecuencia (seguridad del personal, seguridad pública o seguridad ambiental). Los resultados del análisis usualmente conducen a situaciones de accidentes potenciales denotado por las preguntas y problemas propuestos por el equipo. Estas preguntas y problemas frecuentemente sugieren causas específicas para las situaciones de accidentes identificados.

Después de que el alcance de estudio está definido, se procede a realizar el análisis ¿Qué pasa si...? el cual consiste de las siguientes etapas:

#### 1 Preparación del estudio.

- a) La información necesaria para un análisis ¿Qué pasa si...? incluye descripción del proceso, DTI's, DFP's, PLG's y procedimientos de operación.
- b) También se debe tener una entrevista con el personal responsable de la operación, mantenimiento y servicios auxiliares.
- c) Adicionalmente, se debe hacer una visita a la instalación para tener una mejor idea de su distribución, construcción y operación.
- d) Por la tanto, antes de que la revisión comience, se debe programar la visita a la instalación y la entrevista a su personal.
- e) La ultima parte de esta etapa es la preparación de preguntas preliminares de ¿qué pasa si...? para afinarlas en las reuniones.
- f) Si este análisis es una actualización de una revisión previa o un examen de la modificación de una planta, se puede usar las preguntas listadas en el reporte del estudio previo.
- g) Para plantas nuevas o aplicaciones por vez primera, los miembros del equipo deben desarrollar preguntas preliminares antes de las reuniones, aunque también es esencial la formulación de preguntas adicionales en las reuniones. El proceso de ideas de causa y efecto usado en la lista de verificación es de ayuda para la formulación de las preguntas.

#### 2 Desarrollo del estudio.

- a) Las reuniones de revisión deben comenzar con una explicación básica del proceso, impartido por el personal de la planta que tenga conocimiento global de la planta y el proceso. La presentación también debe describir las precauciones de seguridad de la planta, equipo de seguridad, y procedimientos de control de salud.

- b) El proceso es revisado por los miembros del equipo quienes expresan las preocupaciones de seguridad potenciales. Sin embargo, el equipo no se debe limitar en la preparación de las preguntas ¿Qué pasa si...? o restringirse en el momento de hacer sus declaraciones dentro de las preguntas. Es más, deben usar su experiencia combinada y la interacción del equipo para articular cualquier problema que ellos creen necesario para asegurar que la investigación es completa.
  - c) Hay dos maneras de conducir las reuniones: (a) una forma preferida por algunos es listar sobre un plano todos los problemas de seguridad y las preguntas que ellos consideraron. (b) otra forma es considerar cada una de las preguntas y problemas a la vez, el equipo determina la importancia de cada situación antes de analizar otra pregunta o problema.
  - d) Inicialmente, el líder del equipo debe bosquejar el alcance propuesto del estudio, después, generalmente se procede desde el comienzo del proceso hasta su final, aunque el líder del equipo puede ordenar el análisis en la forma lógica que él vea apropiado. Entonces el equipo responde cada pregunta y dirige cada problema (o indica la necesidad de mas información) e identifica el peligro, consecuencias potenciales, resguardos diseñados y soluciones posibles. En el proceso se adicionan nuevas preguntas ¿Qué pasa si...? que comienzan a aparecer durante el análisis.
- 3 Documentación de resultados.
- a) Como en cualquier estudio, la documentación es la clave para transformar los resultados del equipo en medidas para eliminar o reducir el riesgo. Un formato hace la documentación más fácil y organizada (ver figura 3.2.1).
  - b) Adicionalmente, para hacer más completo el formato, el equipo de evaluación de riesgo desarrolla una lista de sugerencias para mejorar la seguridad del proceso analizado basados en los resultados tabulados del análisis ¿Qué pasa si...?.

		IDENTIFICACION:	
		FECHA DE 1ª EMISION:	EDO. DE REV.:
		FECHA DE	
		FECHA PROXIMA REV.:	HOJA: DE
PROCESO:		ANALISIS WHAT-IF	
ESPECIALISTAS:			

¿QUE PASA SI?	CONSECUENCIA	PROTECCION	RECOMENDACION

Figura 3.2.1. Formato para documentar los resultados del análisis ¿Qué pasa si...?



### 3.3. Estudio de peligro y operabilidad (HazOp)<sup>(1)(2)</sup>.

El estudio de peligro y operabilidad (HazOp) es una técnica recomendada para identificar los problemas de seguridad y de operabilidad que se pudiesen presentar en una instalación durante su operación normal, arranque y paro. En este análisis, un grupo multidisciplinario de especialistas usa un enfoque sistemático, basado en la aplicación sucesiva de palabras guía a puntos o nodos de estudio (bombas, compresores, líneas, recipientes), para proporcionar una estructura de razonamiento lógico facilitando la identificación de posibles desviaciones en la intención de diseño del nodo de estudio, con el objeto de conocer sus causas, consecuencias y acciones requeridas para minimizar riesgos durante la operación.

El uso de la metodología de análisis cualitativo de riesgo HazOp requiere de una fuente de información detallada referente al diseño y operación del proceso. Esta práctica es aplicable a todas las fases de vida de la planta, tanto para un diseño o tecnología nueva como para instalaciones ya existentes.

**Tabla 3.3.1.** Terminología más común usada en el análisis HazOp.

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
Sección del proceso (o Nodos de estudio)	Secciones de equipo con fronteras bien definidas (ej. una línea entre dos recipientes) cuyos parámetros de proceso son analizados para diferentes desviaciones. La localización en Diagramas de Tubería e Instrumentación de equipos cuyos parámetros de proceso son analizados para diferentes desviaciones (ej. un reactor).
Pasos de operación	Acciones discretas en un proceso por lotes o en un procedimiento analizado por un equipo HazOp. Las desviaciones aplicadas a cada paso son un poco diferentes de las que se usan para un proceso continuo.
Intención de diseño	Definición de cómo se espera que la planta opere en ausencia de desviaciones. Esta se presenta en forma esquemática o descriptiva (ej. Diagrama de Flujo de Proceso, Diagrama de Tubería e Instrumentación, descripción del proceso, etc.).
Palabras guía	Palabras simples que son usadas para cualificar o cuantificar la intención del proceso con el fin de estimular una tormenta de ideas para identificar peligros del proceso.
Parámetros del proceso	Propiedades físicas o químicas asociadas con el proceso como son temperatura, presión, composición, flujo, etc.
Desviaciones	Son las desviaciones de la intención de diseño que resultan de aplicar las palabras guía a los parámetros de proceso resultando en una lista que el equipo debe repasar para cada sección del proceso (no-flujo, alta presión, etc)
Causas	Razones por las cuales las desviaciones pueden ocurrir. Una vez que una desviación ha sido mostrada y tiene una causa creíble esta debe ser tratada como una desviación importante. Estas causas pueden ser fallas en el hardware, errores humanos, variaciones del proceso (ej. cambio de composición), perturbaciones externas (ej. pérdida de la energía eléctrica), etc.
Consecuencias	Resultados de las desviaciones (ej. emisión de materiales tóxicos). Normalmente el equipo considera que las protecciones fallan. Consecuencias menores, o no relacionadas con el objetivo del estudio no son consideradas.

**Tabla 3.3.1.** Terminología más común usada en el análisis HazOp (Continuación).

Término	Definición
Protecciones	Sistemas de ingeniería o controles administrativos diseñados para prever las causas o mitigar las consecuencias de las desviaciones (ej. alarmas del proceso, procedimientos, etc.)
Acciones o recomendaciones	Sugerencias para cambios en el diseño, cambios en el procedimiento, o definición de áreas de estudio (ej. agregar una alarma de presión o revisar la secuencia de los pasos de operación).

**Tabla 3.3.2.** Palabras guía y significados.

Palabras Guía	Significado
No	Negación del Intento de Diseño
Menos	Decremento Cuantitativa
Más	Incremento Cuantitativo
Parte de	Decremento Cualitativo
Además de	Incremento Cualitativo
Reversa	Oposición Lógica del Intento
Otros que	Sustitución Completa

**Tabla 3.3.3.** Parámetros comunes del proceso.

Flujo	Tiempo	Frecuencia	Mezclado
Presión	Composición	Viscosidad	Adición
Temperatura	pH	Voltaje	Separación
Nivel	Velocidad	Información	Reacción

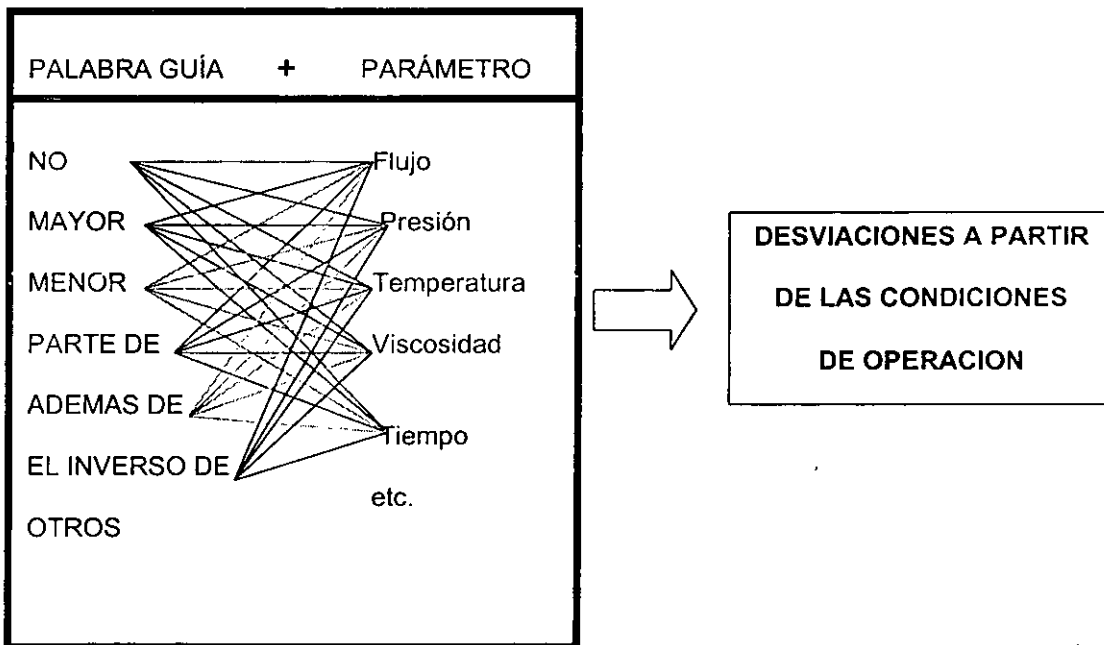
Esta técnica se desarrolla mediante 3 etapas principales:

- 1 Preparación del estudio.
  - a) Definir el propósito, objetivos y alcance del estudio de la manera más explícita posible.
  - b) Definir de manera específica las consecuencias que serán consideradas (daños al personal, daños al medio ambiente, pérdidas económicas, o una combinación).
  - c) Seleccionar a los miembros del equipo. El líder HAZOP debe asegurarse de la disponibilidad de un equipo de tamaño adecuado y experimentado. Un equipo de HazOp debe contar con un líder de grupo, un secretario, Ingeniero de proceso/supervisor, Ingeniero de mantenimiento mecánico y eléctrico/supervisor, Ingeniero instrumentista/supervisor, Ingeniero de seguridad/supervisor, ayudante de operación, miembros de apoyo.
  - d) Recopilar información del proceso. Diagramas de flujo de proceso, diagramas de tubería e instrumentación, planos de localización general de equipos, instructivos de operación, manuales de fabricación de equipos, puntos de ajuste de instrumentos, filosofía operacional, etc.

- e) Procesar la información y planear el estudio. Los nodos o secciones de estudio deben definirse siguiendo el flujo de proceso y haciendo uso de los DTIs. Los líderes desarrollarán una lista preliminar de desviaciones y prepararán una hoja de trabajo para guardar las respuestas a las desviaciones de los miembros del equipo.
- f) Organizar las sesiones. Cada sección o nodo de estudio tomará un promedio de 30 a 60 minutos. Cada sesión debe durar al menos de 4 a 6 horas (de preferencia por la mañana).

**2 Desarrollo del estudio.**

- a) Seleccionar puntos o nodos de estudio (líneas de proceso, recipientes y/o equipos de proceso, en líneas de transferencia siempre que cambie un parámetro) siguiendo el sentido de flujo del proceso y continuando con servicios auxiliares.
- b) Establecer la intención de diseño del equipo. Esta incluye una descripción del diseño y operación normal en cada nodo de estudio, así como, funciones de nodo, composiciones del proceso y rangos de valores numéricos de todos los parámetros de importancia. (Cabe mencionar que si la instalación está funcionando fuera de la capacidad de su intención de diseño, esto representa un riesgo potencial).
- c) Seleccionar la palabra guía combinada con un parámetro de proceso para definir la desviación en un nodo de estudio (escenario) y asignarle un número de identificación (revisar todas las palabras guía con cada parámetro y entonces, cambiar de parámetro).



- d) Evaluar las posibles consecuencias (asumiendo que todas las protecciones fallan).
- e) Listar las causas que originan la desviación.
- f) Listar todas las protecciones existentes (la protección mitiga las consecuencias para una desviación dada).
- g) Considerar y recomendar las acciones necesarias para mitigar la desviación.
- h) Por último, se pondera la frecuencia del escenario (frecuencia de la causa - efectividad de la protección) y la severidad de la consecuencia de la desviación analizada con el fin de jerarquizar el riesgo identificado.

- i) El riesgo identificado es representado dentro de una Matriz de Riesgo en la cual se definen regiones que abarcan diferentes periodos de tiempos. Estos tiempos son periodos en los cuales una acción correctiva debe ser tomada para cada escenario, ya sea un plan de acción, la definición de una solución o la asignación de un responsable para realizar una tarea específica que corrija o disminuya el valor de riesgo de dicho escenario.
- j) Se establece la siguiente desviación del nodo, hasta concluir con todas las combinaciones posibles.
- k) Analizar un nuevo nodo o punto de estudio.

### 3 Documentación de los resultados.

- a) Los resultados de las reuniones de HAZOP se documentan en forma tabular considerando un formato estandarizado en donde se indica el nombre, el número de nodo, su intención de diseño y 5 columnas con los conceptos descritos anteriormente (ver figura 3.3.1).
- b) Desviación por desviación. En la forma de presentar los resultados del estudio HAZOP como desviación por desviación (DBD, por sus siglas en ingles Deviation By Deviation), todas las causas, consecuencias, protecciones, y acciones son relacionadas a una desviación en particular. No hay correlación entre las causas individuales, consecuencias y protecciones para dichas desviaciones analizadas. Todas las causas listadas para la desviación no necesariamente resultan en todas las consecuencias listadas.
- c) Causa por causa. En la forma de presentar los resultados del estudio HAZOP como causa por causa (CBC, por sus siglas en ingles Cause-by-Cause) todas las consecuencias, protecciones, y acciones son relacionadas a cada una de las causas de una desviación.
  - Cada causa tiene un juego independiente de consecuencias, protecciones, y acciones relacionado con esta.
  - CBC es mas preciso en el tratamiento de datos que desviación por desviación.
  - CBC puede reducir ambigüedad.
  - CBC requiere que las protecciones sean definidas claramente para cada causa.
- d) La documentación del análisis HAZOP puede incluir:
  - Una breve descripción del proceso.
  - Una lista de los Diagramas de Tubería e Instrumentación o procedimientos cubiertos.
  - Los nombres, afiliaciones y fechas en las que participaron los miembros del equipo.
  - Una breve descripción de la técnica de HAZOP utilizada.
  - Notas de las reuniones de HAZOP.
  - Una lista de las recomendaciones generadas para que sean evaluadas por la dirección.
  - Una matriz de riesgos.

La figura 3.3.2 muestra el diagrama de flujo de la metodología HazOp.

**ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)**

<b>COMPAÑÍA:</b>			
<b>INSTALACION:</b>			<b>FECHA:</b>
<b>EVALUACION DEL SISTEMA:</b>			
<b>ELABORO:</b>	<b>REVISO:</b>	<b>APROBO:</b>	<b>REVISION</b>

HOJA de

<b>NODO</b>	
<b>INTENCION DE DISEÑO:</b>	

<b>DESVIACION</b>	<b>CAUSAS POSIBLES</b>	<b>CONSECUENCIAS</b>	<b>PROTECCIONES</b>	<b>ACCIONES REQUERIDAS</b>

**Figura 3.3.1.** Formato para la documentación de resultados del análisis HazOp.

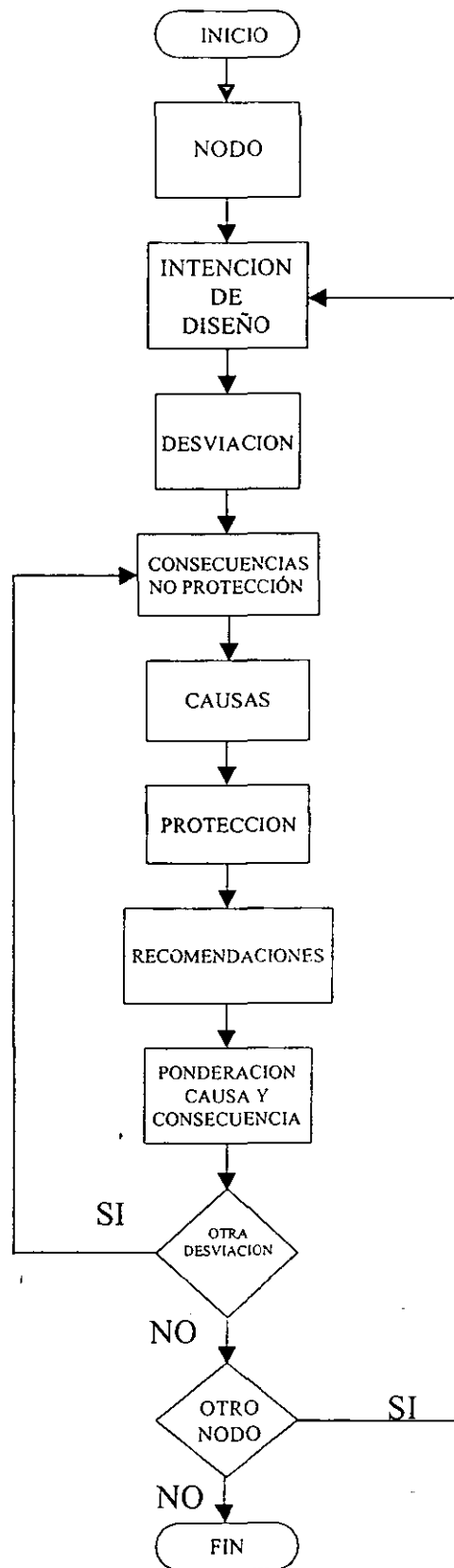


Figura 3.3.2. Diagrama de Flujo de la técnica HazOp.

### 3.4. Matriz de Riesgo<sup>(1)(2)</sup>.

Una vez desarrollados los nodos y con el fin de jerarquizar los posibles riesgos encontrados, se procede a realizar la ponderación tanto de la frecuencia como de la consecuencia de cada una de las desviaciones analizadas. La ponderación de la frecuencia se muestra en la Tabla 3.4.1, en donde se asigna un valor desde +1 a -4 para la desviación, dependiendo del orden de magnitud de la causa (cuantas veces ha ocurrido o bien cuantas veces puede ocurrir).

**Tabla 3.4.1.** Ponderación de la Frecuencia de la causa.

Valor	Orden de la magnitud de la frecuencia	Descripción cualitativa
+1	Una vez al mes.	Ocurrencia frecuente o regular
0	Una vez al año.	Ocurrencia ocasional/algunas veces durante el tiempo de vida de la planta
-1	10% de probabilidad en un año.	Probablemente ocurrirá más de una vez durante el tiempo de vida de la planta
-2	1% de probabilidad en un año.	No se espera que ocurra durante el tiempo de vida de la planta, pero puede ocurrir
-3	Una vez en 10 000 años	Sería sorprendente si ocurriera alguna vez durante el tiempo de vida de la planta
-4	Una vez en 1000 años	Remotamente posible

La ponderación de la efectividad de la protección se asigna conforme a la Tabla 3.4.2. Esta Tabla muestra la probabilidad de éxito de la protección y le asigna un valor de 0 a 4.

**Tabla 3.4.2.** Ponderación de la efectividad de la protección.

Valor	Probabilidad de protección no adecuada	Probabilidad de éxito de la protección	Ejemplo
0	1 (100%)	0 (0%)	No protección.
1	0.1 (10%)	0.9 (90%)	Protección por un operador con tiempo de respuesta adecuado.
2	0.01 (1%)	0.99 (99%)	Protección por un dispositivo simple, funcionalmente probado.
3	0.001 (0.1%)	0.999 (99.9%)	Protección por medio de un dispositivo pasivo (ejemplo: válvula de relevo regularmente probada) o un dispositivo simple respaldado por un operador.
4	0.0001 (0.01%)	0.9999 (99.99%)	Protección por medio de dos dispositivos independientes y redundantes.

Los valores ponderados de frecuencia por consecuencia para cada una de las desviaciones en el análisis HazOp, se denomina un escenario, y así se tiene un valor de riesgo para cada uno de ellos el cual está definido por la siguiente fórmula:

$$\text{RIESGO} = (\text{CONSECUENCIA}) \times (\text{FRECUENCIA})$$

Este valor de riesgo de cada escenario es representado dentro de una matriz de riesgo en la cual se definen regiones que abarcan diferentes periodos de tiempos. Estos tiempos son periodos en los cuales una acción correctiva debe ser tomada para cada escenario, ya sea un plan de acción, la definición de una solución o la asignación de un responsable para realizar una tarea específica que corrija o disminuya el valor de riesgo de dicho escenario. Estos tiempos son enunciativos, y deberán ser conciliados con el usuario del estudio.

Cabe mencionar que estos periodos no toman en cuenta qué se necesita para solucionar el escenario como tal, más bien es una medida de tiempo en el cual desde el punto de vista de riesgos debe ser tomada una acción.

La ponderación de la severidad de la consecuencia por efectos a la salud se asigna conforme a la Tabla 3.4.3.

**Tabla 3.4.3.** Ponderación de la severidad de la consecuencia por efectos a la salud.

En sitio		Efectos razonablemente esperados si ocurren eventos accidentales dadas ciertas medidas de mitigación	Ejemplos de efectos por exposición a radiación térmica	Ejemplos de efectos por exposición a onda expansiva	Ejemplos de efectos por exposición a materiales tóxicos y corrosivos	Ambiente externo	
Sev	Descriptor cualitativo					Sev	Descriptor cualitativo
6	Extremadamente alto	Múltiples fatalidades				7	Desastroso
5	Muy alto	Fatalidad o efectos múltiples permanentes	Quemaduras de tercer grado en una gran parte del cuerpo	Colapso interior de edificios, desplome de estructuras elevadas	Dosis letal inhalada, resucitación no exitosa	6	Extremadamente alta
4	Alto	Efectos a la salud permanentes (daños múltiples con pérdida de tiempo)	Quemaduras de tercer grado en menor proporción	Pérdida de extremidades, pérdida total del oído, colapso de pulmones.	Capacidad pulmonar reducida, daño permanente por químicos	5	Muy alta
3	Intermedio	Pérdida de tiempo importante, daño severo requiriendo hospitalización (casos múltiples de tratamiento médico)	Quemaduras de tercer grado y/o quemaduras de segundo grado en menor proporción	Laceraciones severas o extremidades rotas, daño interno de órganos	Permanencia extensa en el hospital, pero no permanente	4	Alta
2	Bajo	Casos de tratamiento médico (casos múltiples de primeros auxilios)	Quemaduras de segundo grado y/o quemaduras de primer grado en menor proporción	Irritación severa, terapia de oxígeno, quemaduras por químicos menores	Irritación severa, terapia de oxígeno, quemaduras por químicos menores	3	Intermedia
1	Muy bajo	Daño menor (casos múltiples de primeros auxilios)	Quemaduras de primer grado	Heridas menores	Irritación en piel y pulmones	2	Baja
0	Despreciable	Probablemente ninguno	Fuego visible o flama inusual	Ruido fuerte	Nube visible y olor fácilmente apreciable	0-1	Despreciable a muy baja



La figura 3.4.1 muestra la matriz de riesgos y acciones en donde se representa en forma gráfica los valores de riesgo que pueden tomar cada uno de los escenarios evaluados.

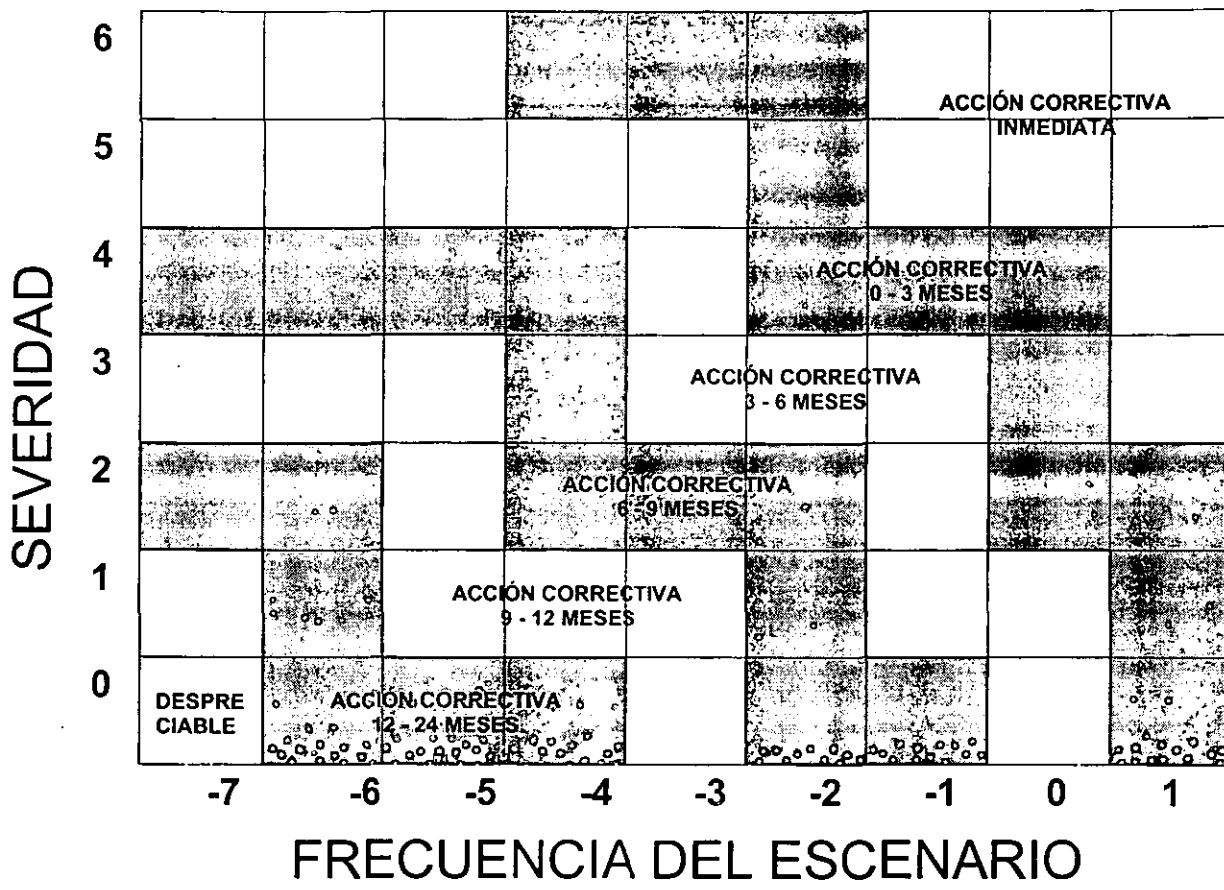


Figura 3.4.1. Matriz de Riesgos y Acciones

## CAPITULO 4

### ESTIMACIÓN DE CONSECUENCIAS<sup>(1)(3)(4)</sup>

La evaluación cuantitativa de riesgos (estimación de las consecuencias de los escenarios) tiene como finalidad determinar las posibles consecuencias de un accidente o grupo de accidentes durante la operación de una instalación. Un accidente en la operación de una instalación generalmente implica la emisión o liberación del material de proceso al medio ambiente. Algunas de las causas principales que originan un accidente son:

- a) Errores humanos (personal de operación).
- b) Fallas en el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS).
- c) Corrosión y desgaste de las líneas y equipos de proceso.

La duración del accidente depende en gran medida de la confiabilidad y disponibilidad del sistema instrumentado de seguridad y del personal de seguridad que en esos momentos se encuentre disponible.

Dependiendo de la composición del material liberado, puede formarse una nube tóxica, inflamable y/o explosiva. Esta nube puede generar diversas consecuencias, tales como, daños a equipos y estructuras de proceso, daños a la salud del personal e incluso la muerte, así como, pérdidas económicas por derrame y producción diferida. Por lo tanto, para determinar la magnitud del riesgo, es de vital importancia simular y cuantificar el material liberado a través de los modelos siguientes:

- a) Modelos de emisión.
- b) Modelos de dispersión.
- c) Modelos de explosión y fuego.

La Figura 4.1 representa en forma esquemática la manera en la cual se hace uso de estos modelos.

Metodología para la realización de este estudio:

1. Obtener información validada de la ingeniería de la instalación. Diagramas de flujo de proceso (DFP's), diagramas de tuberías e instrumentación (DTI's), planos de localización general (PLG's).
2. Obtener datos meteorológicos de la zona donde se ubica la instalación.
3. Descripción de Escenarios: El primer paso dentro de esta secuencia está el conocer o establecer el estado físico del material que se emitirá al ambiente. Se pueden distinguir tres grandes escenarios:
  - Derrame de líquido con una subsecuente evaporación.
  - Emisión presurizada en dos fases.
  - Emisión en fase gaseosa.
4. Definición de los parámetros de Entrada: Para efectuar la simulación de los diferentes escenarios es necesario conocer la composición química del líquido y/o gas, la presión y la temperatura, (balance de materia y energía). Además es necesario determinar la geometría de la tubería o tanque del que se libera el material y las características de la superficie sobre la que se evaluarán las consecuencias.
5. Planteamiento de los escenarios de mayor peligro en la instalación (HAZOP).

6. Identificación de los puntos más probables de emisión o derrame en corrientes y/o equipo de proceso, asignando valores de diámetros de fugas probables para cuantificar el flujo emitido (Modelación de Emisiones).
7. Determinación de las zonas con mayor riesgo de inflamabilidad, explosividad y toxicidad empleando modelos de dispersión y las condiciones meteorológicas de la zona (modelación de consecuencias).
8. Estimación de los daños por toxicidad, explosión y fuego tanto a las instalaciones como al personal.

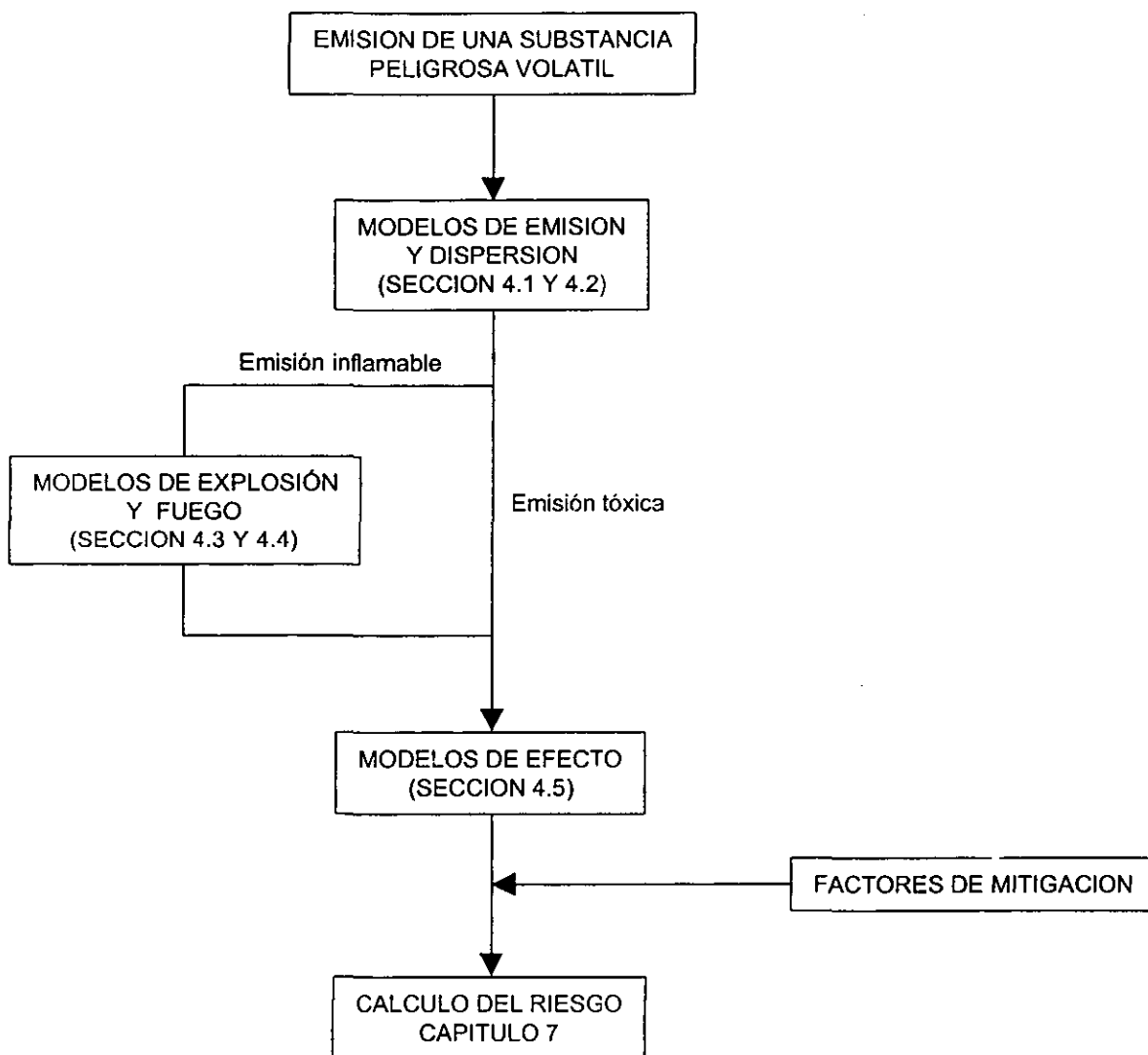


Figura 4.1. Diagrama lógico global para modelos de consecuencia para emisiones volátiles peligrosas.

#### 4.1. Modelos de emisión<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Los modelos de emisión se utilizan para definir cuantitativamente el escenario de emisión para estimar la velocidad de descarga (sección 4.1.1) y la magnitud de la evaporación y vaporización súbita de una concentración de líquido (sección 4.1.2). Los modelos de dispersión convierten los resultados del término

de emisión a campos de concentración, viento abajo de la emisión. La relación entre varios tipos de modelos se muestra en la figura 4.1.1.

El modelo de emisión se utiliza para determinar el flujo de descarga, la cantidad total emitida y el estado físico del material liberado. Esta información es importante en la determinación de las consecuencias de un accidente y nos permite evaluar nuevos diseños del proceso, mejoras del proceso y la seguridad existente del proceso.

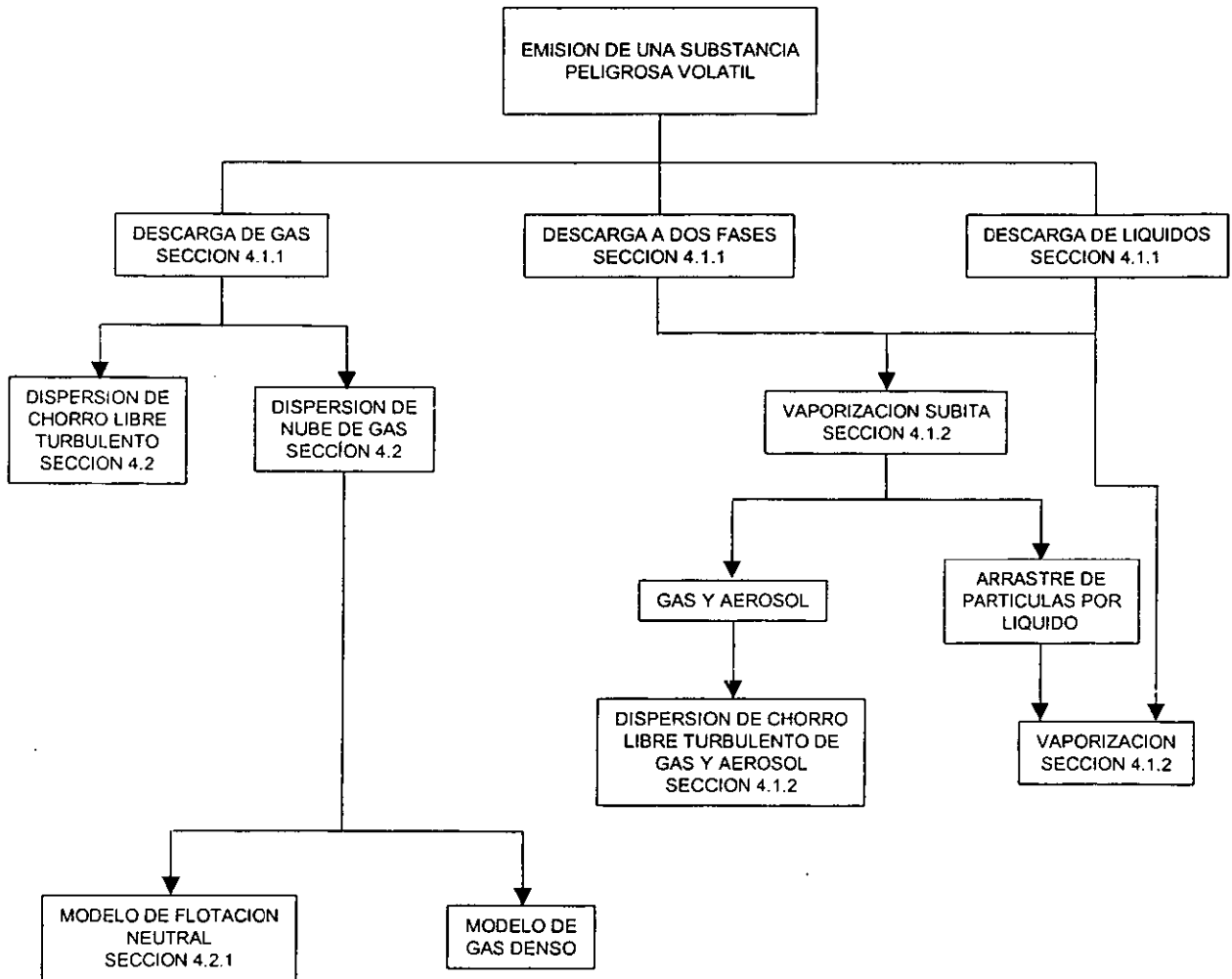


Figura 4.1.1. Diagrama lógico para modelos de emisión y dispersión.

Las emisiones accidentales de materiales peligrosos pueden ser de diferentes tipos; gas, líquido o emisión a dos fases, instantáneo o continuo, de tanques de almacenamiento o de tuberías, refrigerado o presurizado, sobre tierra o agua, confinada o no confinada. Obviamente existe una gran diferencia en el comportamiento de la concentración de gas con respecto al tiempo de las emisiones y en el método de cálculo para una falla catastrófica en un tanque de almacenamiento (emisión instantánea) en comparación con una pequeña falla puntual en el mismo tanque (emisión continua).

Los fundamentos de los modelos de emisión se basan en ecuaciones empíricas que representan el proceso físico-químico que ocurre durante la liberación del material.

Los modelos de emisión considerados en este documento son:

- Modelos de velocidad de descarga.
- Formación de alberca de líquidos y evaporación.

#### 4.1.1. Modelos de velocidad de descarga<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Muchos incidentes peligrosos inician con la descarga de un material tóxico o inflamable, debido a la fractura o fisura en recipientes de proceso o tubería, o provocado por la apertura de una válvula o un desfogue de emergencia. Hay diferentes modelos que son apropiados para cada una de estas situaciones. El estimado de la velocidad de descarga y la duración de la emisión es esencial como dato para otros modelos.

Método.

- a) Determinar la fase correcta de la emisión para estimar la velocidad del flujo en la ruptura en un recipiente, tubería u otro dispositivo de contención.
- b) Definir el punto de inicio de este examen de acuerdo a las condiciones iniciales del material de proceso liberado anteriormente. Pueden ser las condiciones normales del proceso o un estado anormal alcanzado por el material del proceso antes de su emisión.
- c) Estimar el punto final de la trayectoria. La presión final del material normalmente será de una atmósfera. Asumir que el proceso de emisión es adiabático, y determinar la temperatura y composición correspondiente a la presión atmosférica, usando un modelo de flash en equilibrio.
- d) Si la trayectoria permanece como fase líquida o gas, su modelado será de acuerdo a la fase. Sin embargo, si ocurre cambio de fase, entonces es necesario considerar flujo a dos fases en el modelo de la emisión.

##### 4.1.1.1. Descarga de gas a través de un orificio en un recipiente<sup>(1)(3)(4)</sup>.

- a) Hay dos régimen de flujo en la descarga de un gas dependiendo de la presión corriente arriba o de almacenamiento del mismo, el régimen de flujo sónico para altas caídas de presión, y el régimen flujo subsónico para bajas caídas de presión. La transición entre los dos régimen de flujo ocurre en la relación de presión crítica, la cual está relacionada a la relación de la capacidad calorífica y mediante la ecuación:

$$\left(\frac{P}{P_S}\right)_{CR} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (4.1.1)$$

Donde:

$$\left(\frac{P}{P_S}\right)_{CR} = \text{relación de presión del flujo crítico}$$

b) El flujo de gas a través de un orificio en régimen sónico está dado por ( $P_{sat} \geq P_s \geq P_a$ ):

para  $\frac{P_a}{P_s} \leq \left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR}$

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c MW}{R_g T_s} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4.1.2)$$

c) El flujo de gas a través de un orificio en régimen subsónico está dado por ( $P_{sat} \geq P_s \geq P_a$ ):

para  $\frac{P_a}{P_s} > \left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR}$

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{2 g_c MW}{R_g T_s} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[ \left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (4.1.3)$$

Donde:

- $\dot{Q}$  = velocidad de descarga del gas (lb<sub>m</sub>/s)
- $C_D$  = coeficiente de descarga (adimensional).
- MW = peso molecular del gas, (lb<sub>m</sub>/lb<sub>mol</sub>)
- A = área de la sección transversal de la ruptura, (ft<sup>2</sup>)
- $g_c$  = constante gravitacional, 32.2, (lb<sub>m</sub>-ft/lb<sub>f</sub>-s<sup>2</sup>)
- $P_s$  = presión de almacenamiento absoluta, (lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>)
- $T_s$  = temperatura de almacenamiento absoluta, (R)
- $R_g$  = constante universal de los gases, 1545, (ft-lb<sub>f</sub>/lb<sub>mol</sub>-R)
- $\gamma$  = relación de los calores específicos, ( $C_p/C_v$ )
- $P_a$  = presión atmosférica absoluta, (lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>)

d) Para flujo turbulento, el coeficiente de descarga  $C_D$  es constante para varios tipos de dispositivos de descarga<sup>(5)</sup>.

Dispositivo de descarga	$C_D$
Tubo Venturi / boquilla / Válvula de relevo	0.95 a 0.99 (sónico y subsónico)
	0.61 a 0.67 (subsónico)
	0.75 para $\frac{P_a}{P_s} \approx \left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR}$ (sónico)
	0.84 para $P_s \gg P_a$

Para flujo y situaciones donde  $C_D$  es incierto, se recomienda un valor conservador de  $C_D=1.0$

e) Consideraciones y limitaciones del modelo.

- El gas se considera como gas ideal.

- El flujo es sin fricción.
- El flujo es adiabático.

#### 4.1.1.2. Descarga de líquido a través de un orificio en un recipiente<sup>(1)(3)(4)</sup>.

a) La descarga de un líquido puro a través de un orificio se expresa como<sup>(6)</sup> ( $P_s \geq P_a > P_{sat}$ ):

$$\dot{Q} = C_D \rho_l A \sqrt{\frac{2g_c(P_s - P_a)}{\rho_l} + 2gh} \quad (4.1.4)$$

Donde:

$\rho_l$  = densidad del líquido almacenado, (lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup>)

$h$  = altura vertical del líquido por encima del punto de ruptura, (ft)

$g$  = aceleración debido a la gravedad, 32.2 (ft/s<sup>2</sup>).

b) El coeficiente de descarga,  $C_D$ , es función del número de Reynolds del fluido que se escapa a través del orificio.

- Para  $Re > 30,000$ ,  $C_D$  se aproxima a 0.61.
- Para un orificio bien redondeado, el coeficiente de descarga es  $\approx 1$ .
- Para secciones de tubería cortas unidas a un recipiente (con una relación de longitud-radio  $< 3$ )  $C_D \approx 0.81$ .
- Para casos donde se desconoce el coeficiente de descarga o es incierto, use el valor de 1.0 para maximizar los cálculos.

c) Flujo de líquido a través de orificio en un tanque en función del tiempo.

$$Q_m = \rho_l C_o A \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_o}{\rho_l} + gh \right)} - \frac{\rho_l g C_o^2 A^2}{A_t} t \quad (4.1.5)$$

Donde:

$$C_o = C_D \sqrt{\alpha}$$

$Q_m$  = velocidad de descarga del líquido, (lb<sub>m</sub>/s)

$\alpha$  = factor de corrección, (0.5 para flujo laminar y 1.0 para flujo turbulento)

$A_t$  = área de sección transversal constante del recipiente, (ft<sup>2</sup>)

- El tiempo necesario para que el recipiente se vacíe al nivel de la fuga se encuentra cuando  $Q_m = 0$
- Si el recipiente se encuentra a presión atmosférica  $P_o = 0$ .

d) Consideraciones y limitaciones.

- El fluido es incompresible.

#### 4.1.1.3. Flujo a dos fases: fracción de vaporización<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Cuando un líquido presurizado arriba de su punto de ebullición es liberado a la presión atmosférica, se vaporiza súbitamente (flash) dando como resultado un flujo a dos fases.

- a) Para una descarga a dos fases, la fracción del líquido que se vaporiza se conoce como fracción de vaporización  $f$ , y está dada por la siguiente ecuación ( $P_s \geq P_{sat} > P_a$ ):

$$f = 1 - \exp\left[-\frac{\overline{C}_{pl}(T_s - T_b)}{\Delta H_v}\right] \quad (4.1.6)$$

Donde:

$T_b$  = temperatura de ebullición del líquido a la presión atmosférica, (R)

$\overline{C}_{pl}$  = calor específico del líquido a presión constante, (promedio de valores obtenidos a  $T_s$  y  $T_b$ ), (Btu/lb<sub>m</sub>-R)

$\Delta H_v$  = calor latente de vaporización (promedio de valores obtenidos a  $T_s$  y  $T_b$ ), (Btu/lb<sub>m</sub>)

- b) Consideraciones y limitaciones.

- El proceso de vaporización es adiabático.

#### 4.1.1.4. Flujo a dos fases: descarga de líquido saturado en equilibrio a través de un orificio en un recipiente<sup>(1)(3)(4)</sup>.

- a) La velocidad de descarga inicial para la vaporización de líquido saturado a través de un orificio en un recipiente está dada por la siguiente ecuación ( $P_s = P_{sat} > P_a$ ):

$$\dot{Q} = C_D \left[ \frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \sqrt{\frac{778 g_c}{T_s C_{pl}}} \quad (4.1.7)$$

Donde:

$\Delta H_v$  = calor latente de vaporización a las condiciones dentro del recipiente, (Btu/lb<sub>m</sub>)

$\rho_v$  = densidad del vapor a las condiciones de presión dentro del recipiente, (lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup>)

$C_{pl}$  = calor específico del líquido a las condiciones dentro del recipiente, (Btu/lb<sub>m</sub>-R)

778 = factor de conversión para convertir Btu a ft-lb<sub>f</sub>

- b) Consideraciones y limitaciones del modelo.

- El flujo es restringido.
- Se establece el equilibrio en las dos fases.
- El material está almacenado a su presión de vapor.
- La vaporización de la porción de líquido en la descarga a dos fases no es significativa.

$$f < P_s (\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}) / (778 \Delta H_v^2)$$



**4.1.1.5. Flujo a dos fases: descarga de líquido saturado en no equilibrio a través de un orificio en un recipiente<sup>(1)(3)(4)</sup>.**

a) La velocidad de descarga inicial para un flujo a dos fases en no-equilibrio, está dada por la siguiente ecuación<sup>(7)</sup> ( $P_s = P_{sat} > P_a$ ):

$$\dot{Q} = \left[ \frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \sqrt{\frac{778 g_c}{T_s C_{pl} N}} \quad (4.1.8)$$

para  $L_p < 4$  in

$$N = \frac{778 \Delta H_v^2}{2(P_s - P_a) \rho_l C_D^2 (\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1})^2 T_s C_{pl}} + \frac{L_p}{L_e} \quad (4.1.9)$$

Donde:

$L_p$  = longitud del tubo al punto de descarga, (ft)

$L_e$  = constante derivada empíricamente, 0.33, (ft)

b) Consideraciones y limitaciones del modelo.

- El flujo es restringido.
- El equilibrio a dos fases no está totalmente establecido.
- El material está almacenado a su presión de vapor.

**4.1.1.6. Descarga de gas de una tubería<sup>(1)(3)(4)</sup>.**

a) Determine el factor de rugosidad del tubo de los valores presentados en la tabla 4.1.1 para estimar la relación  $\epsilon/d$ <sup>(6)</sup>.

**Tabla 4.1.1.** Factor de rugosidad para tubos de diferentes materiales.

Tipo de tubo (limpio)	$\epsilon$ (ft)
Acero revestido	$3 \times 10^{-3}$ a $3 \times 10^{-2}$
Concreto	$10^{-3}$ a $10^{-2}$
Hierro moldeado	$8.5 \times 10^{-4}$
Hierro galvanizado	$4.9 \times 10^{-4}$
Acero comercial	$1.5 \times 10^{-4}$
Hierro forjado	$1.5 \times 10^{-4}$
Vidrio	0
Plástico	0

b) Determine el factor de fricción de fanning  $f_p$  de la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{\sqrt{f_p}} = -4 \log_{10} \left[ \frac{1}{3.7} \left( \frac{\epsilon}{d} \right) \right], \text{ para } \epsilon > 0; f_p = 0 \text{ para } \epsilon = 0 \quad (4.1.10)$$

c) Determine el número de Mach (Ma) para verificar si el flujo es sónico.

$$\frac{\gamma+1}{2} \log_e \left[ \frac{2+(\gamma-1)Ma^2}{(\gamma+1)Ma^2} \right] - \left( \frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + \gamma \left( \frac{4f_p L_p}{d} \right) = 0 \quad (4.1.11)$$

El número de Mach se define como la relación de la velocidad del gas con la velocidad del sonido en el gas.

- d) Determine la presión para flujo crítico de la razón  $(P/P_s)_{CR}$  de la siguiente ecuación.

$$\left( \frac{P}{P_s} \right)_{CR} = Ma \sqrt{\frac{2+(\gamma-1)Ma^2}{\gamma+1}} \quad (4.1.12)$$

Si  $\left( \frac{P_a}{P_s} \right) \leq \left( \frac{P}{P_s} \right)_{CR}$ , el flujo de salida del gas es sónico y la tasa inicial de descarga está dada por la siguiente ecuación ( $P_{sat} \geq P_s \geq P_a$ ).

$$\dot{Q} = A Ma P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c MW}{R_g T_s}} \quad (4.1.13)$$

Si  $\left( \frac{P_a}{P_s} \right) \geq \left( \frac{P}{P_s} \right)_{CR}$ , el flujo de salida del gas es subsónico y la temperatura del fluido es determinado por la siguiente ecuación.

$$\left( \frac{\gamma+1}{\gamma} \right) \log_e \left( \frac{P_s T}{P_a T_s} \right) - \left( \frac{\gamma-1}{2\gamma} \right) \left( \frac{P_s^2 T^2 - P_a^2 T_s^2}{T - T_s} \right) \left( \frac{1}{P_s^2 T} - \frac{1}{P_a^2 T_s} \right) + \left( \frac{4f_p L_p}{d} \right) = 0 \quad (4.1.14)$$

- e) Determine la tasa de descarga (flujo subsónico) mediante la siguiente ecuación.

$$\dot{Q} = A \sqrt{\left( \frac{2g_c MW}{R_g} \right) \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left[ \frac{T - T_s}{\left( \frac{T_s}{P_s} \right)^2 - \left( \frac{T}{P_a} \right)^2} \right]} \quad (4.1.15)$$

- f) Consideraciones y limitaciones:

- El comportamiento del gas es ideal.
- El flujo es adiabático.
- El flujo esta totalmente desarrollado y completamente turbulento ( $f_p$  es constante e independiente del número de Reynolds).
- La tubería no tiene restricciones.

#### 4.1.1.7. Descarga de líquido de una tubería<sup>(1)(3)(4)</sup>.

- a) Determine  $\varepsilon/d$  de la tabla 4.1.1.

- b) Determine  $Re \sqrt{f_p}$  de la siguiente ecuación derivada de Crowl and Louvar<sup>(6)</sup>.

$$\text{Re} \sqrt{f_p} = \frac{d\rho_l}{\mu_l} \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[ \frac{g_c(P_s - P_a)}{\rho_l} + gh \right]} \quad (4.1.16)$$

Donde:

$\mu_l$  = viscosidad del líquido, (lb<sub>m</sub>/ft-s)

- c) Determine la tasa de descarga de una de las siguientes ecuaciones derivadas por Crowl and Louvar<sup>(6)</sup>.

para  $\text{Re} \sqrt{f_p} \leq 180$  (flujo laminar).

$$\dot{Q} = \frac{A\rho_l (\text{Re} \sqrt{f_p}) \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[ \frac{g_c(P_s - P_a)}{\rho_l} + gh \right]}}{16} \quad (4.1.17)$$

para  $\text{Re} \sqrt{f_p} \geq 525$  (flujo turbulento).

$$\dot{Q} = -4A\rho_l \log_{10} \left[ \frac{1}{3.7} \left( \frac{\varepsilon}{d} \right) + \frac{1255}{\text{Re} \sqrt{f_p}} \right] \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[ \frac{g_c(P_s - P_a)}{\rho_l} + gh \right]} \quad (4.1.18)$$

- d) Consideraciones y limitaciones.

- El fluido es incompresible.
- La tubería no tiene restricciones.
- No se realiza trabajo por o sobre el líquido.
- El flujo es adiabático.
- El flujo está totalmente desarrollado.

#### 4.1.1.8. Flujo a dos fases: descarga de líquido saturado en una tubería<sup>(1)(3)(4)</sup>.

- a) La velocidad de descarga inicial para un líquido saturado en una tubería está dado por la siguiente ecuación<sup>(8)</sup> ( $P_s = P_{\text{sat}} > P_a$ ):

$$\dot{Q} = F_{\text{red}} \left[ \frac{A\Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \sqrt{\frac{778gc}{T_s C_p l}} \quad (4.1.19)$$

Donde:

$F_{\text{red}}$  = factor de reducción de flujo, (adimensional).

- b)  $F_{\text{red}}$  toma en cuenta las pérdidas por fricción y varía con  $L_p/d$ .

$$F_{\text{red}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.006 \left( \frac{L_p}{d} \right)}} \quad (4.1.20)$$

Donde:

$d$  = diámetro interior de la tubería, (ft)

$L_p$  = longitud del tubo al punto de descarga, (ft).

c) Consideraciones y limitaciones.

- El flujo esta en la condición de choque.
- La longitud del tubo es  $\geq 4$  pulgadas.
- El material esta almacenado a su presión de vapor.
- La fracción de vaporización del líquido en la descarga a dos fases no es significativa.

$$f < P_s (\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}) (T_s C_{pl}) / (778 \Delta H_v^2)$$

#### 4.1.1.9. Descarga de válvulas de relevo<sup>(1)(3)</sup>.

Una caso importante de descarga de gas es el flujo a través de una válvula de relevo de presión. Cuando hay desfogue debido a la exposición por fuego en un sistema sin reacción, se utiliza el método empírico de la NFPA 30 y NFPA 58 para estimar las velocidades de desfogue, o también se puede utilizar las prácticas recomendadas en el API 520 y API 521. Una suposición clave para estos métodos es que el flujo es únicamente gas.

a) La NFPA 58 se basa en las siguientes ecuaciones para predecir el flujo de calor:

$$Q_f = 34,500 F A^{0.82} \quad (4.1.21)$$

Donde:

$Q_f$  = calor que pasa a través de la pared del recipiente desde el fuego (Btu/hr)

$A$  = área de la superficie total (ft<sup>2</sup>)

$F$  = factor del medio ambiente, (adimensional)

b) La velocidad de descarga de la válvula de relevo,  $Q_v$ , se calcula usando la siguiente formula:

$$Q_v = \frac{Q_f}{\Delta H_v} \quad (4.1.22)$$

Donde:

$Q_v$  = velocidad de descarga del gas de la válvula de relevo (lb<sub>m</sub>/s)

$\Delta H_v$  = calor latente de vaporización en el desfogue, (Btu/lb<sub>m</sub>)

#### 4.1.2. Formación de alberca de líquidos y evaporación<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Un líquido sobrecalentado sufre una vaporización súbita cuando es liberado a la atmósfera. El vapor que se produce puede arrastrar cantidades significativas de líquido en forma de gotas. Parte de este líquido puede precipitar al suelo, y parte puede permanecer suspendido como aerosol. Cuando se derrama un líquido volátil o de tipo criogénico, se genera una gran cantidad de emisión de gas debido a que el líquido derramado genera una superficie de evaporación. El propósito de estos modelos es estimar la fracción del líquido liberado que forma una nube, para usarse como dato para los modelos de dispersión (figura 4.1). El diagrama lógico se muestra en la figura 4.1.3.

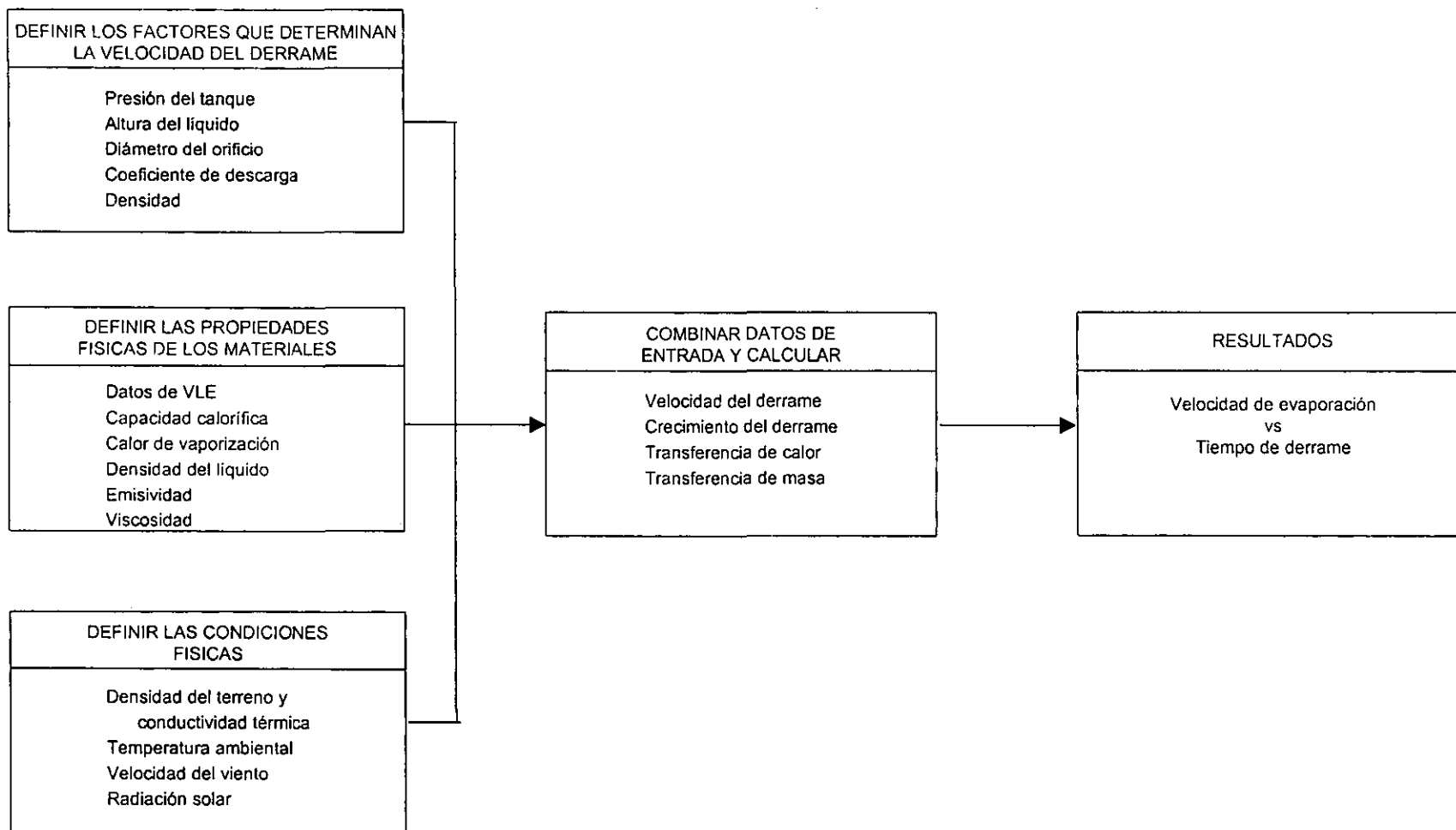


Figura 4.1.3. Diagrama lógico para la evaporación de un derrame.

Generalmente los líquidos derramados están categorizados como:

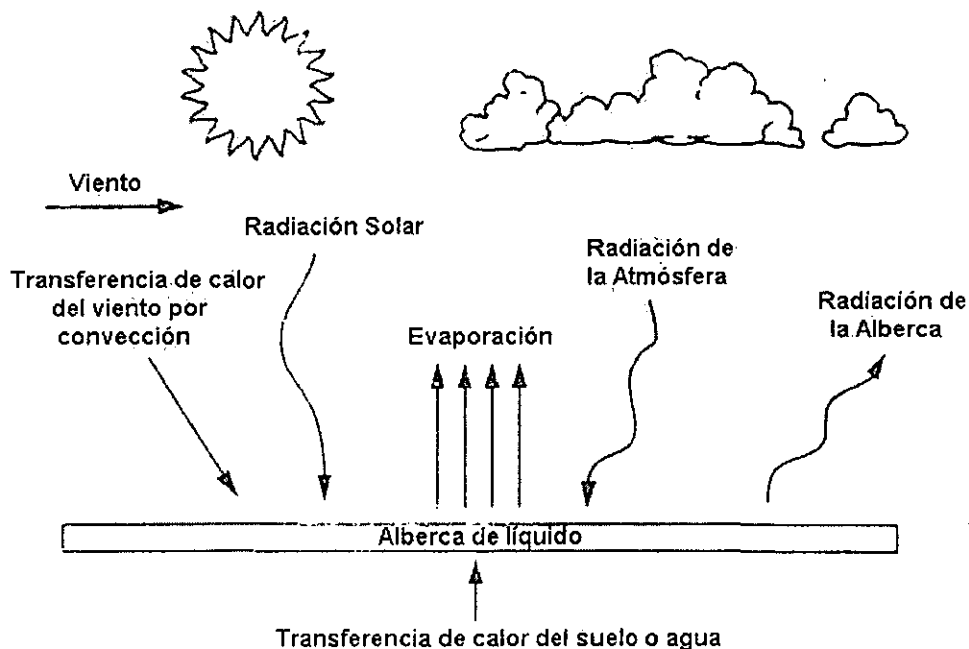
- Líquidos volátiles, los cuales tienen un punto de ebullición por debajo de la temperatura ambiente a la presión atmosférica (cloro, propano, etc.).
- Líquidos no volátiles, estos tienen un punto de ebullición por encima de la temperatura ambiente a la presión atmosférica (benceno, gasolina, etc.).
- Y pueden estar confinados o no confinados.

Metodología para estimar la formación de alberca de líquidos y evaporación.

a) Determinar si el derrame involucra un líquido volátil o un líquido no volátil.

Características de los líquidos volátiles.

- Normalmente se modelan en estado vapor a la temperatura y presión ambiente.
- Se almacenan como gas licuado o líquido criogénico.
- Una liberación de gas licuado se expande adiabáticamente y, debido a su calor latente, parte del gas licuado se vaporiza. Después de la expansión adiabática, el gas licuado restante forma una alberca de líquido a su temperatura de ebullición.
- La liberación de líquido criogénico forma una alberca de líquido a su temperatura de ebullición, y se evapora por intercambio de calor con los alrededores.
- Durante el periodo inicial de evaporación, el gas licuado o el líquido criogénico en la alberca, absorbe la cantidad de calor necesaria para la evaporación por conducción de calor de la superficie en donde se encuentra el derrame (suelo, agua, etc.).
- Las fuentes de calor para la evaporación pueden ser: el suelo o el agua (a través de la transferencia de calor por conducción), la atmósfera (a través de la transferencia de calor por convección y/o radiación), el sol (a través de la transferencia de calor por radiación).



- Adicionalmente a la transferencia de calor, la alberca se extiende al incrementarse su área de superficie, afectando la velocidad de evaporación total. En albercas con áreas de superficies muy grandes, la transferencia de calor es mayor, y por lo tanto, la velocidad de evaporación se incrementa.

Características de líquidos no volátiles.

- La velocidad de evaporación en derrames de líquidos no volátiles, no dependen de la transferencia de calor por conducción.
- La velocidad de evaporación depende más de la transferencia de masa.

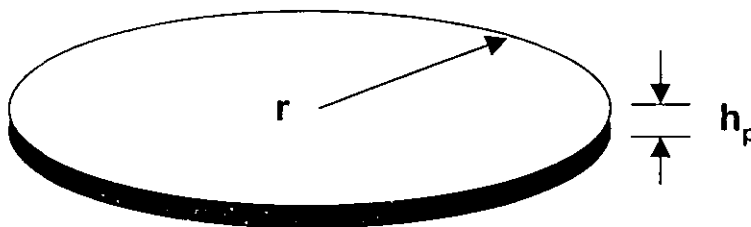
b) Determinar si el derrame es confinado o no confinado.

- En un derrame no confinado, este se extenderá hasta que la velocidad de extensión sea igual a la velocidad de evaporación, o hasta que la superficie del terreno impida que la alberca se siga extendiendo.
- TNO<sup>(9)</sup> sugiere que un líquido detiene su extensión de derrame cuando este alcance un espesor mínimo el cual es característico de la superficie sobre la cual ocurre el derrame. Un espesor mínimo de 5 mm para superficies uniformes y varios centímetros para superficies no tan uniformes.
- La siguiente tabla proporciona valores más específicos para espesores mínimos.

Superficie	espesor mínimo $h_{min}$ (mm)
Tierra arenosa áspera	25
Pastizales	20
arena uniforme, grava	10
arena uniforme, piedra, concreto	5
agua en calma	1.8

c) Si el derrame involucra un líquido volátil, usar el modelo de Shaw y Briscoe (SB)<sup>(10)</sup> para derrame de líquido sobre tierra, y usar la velocidad de evaporación más alta dada por el modelo.

- Una alberca de líquido en el tiempo  $t$ , se puede representar como un disco de radio  $r$  y altura uniforme  $h_p$ .



- Usar las siguientes ecuaciones (SB)<sup>(10)</sup> para derrame de líquido volátil sobre la tierra.

$$V_p = V_{po} + \dot{V}_p t - \frac{m_p}{\rho_l} \quad (4.1.23)$$

$$h_p = \frac{V_p}{\pi r^2} \quad (4.1.24)$$

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{2gh_p} \quad (4.1.25)$$

$$m_p = \frac{2\pi X K_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s}} \int_b^{r(t)} \frac{r'' dr''}{\sqrt{t' - t''}} \quad (4.1.26)$$

Donde:

$V_p$  = volumen del líquido en la alberca, (m<sup>3</sup>)

$V_{po}$  = volumen del líquido liberado instantáneamente, (m<sup>3</sup>)

$\dot{V}_p$  = flujo volumétrico del líquido en la alberca, (m<sup>3</sup>/s)

$t$  = tiempo medido a partir del instante en que ocurre la emisión, (s)

$m_p$  = masa total del líquido evaporado de la alberca en un tiempo  $t$ , (kg)

$\rho_l$  = densidad del líquido derramado, (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = aceleración de la gravedad, 9.81, (m/s<sup>2</sup>)

$m_p$  = velocidad de evaporación de la masa del líquido en la alberca, (kg/s)

$r$  = radio de la alberca del líquido, (m)

$h_p$  = espesor o profundidad de la alberca, (m)

$X$  = factor de corrección por rugosidad de la superficie, (adimensional)

$K_s$  = conductividad térmica de la superficie, (W/m-k)

$T_g$  = temperatura de la superficie, (K)

$T_b$  = temperatura de ebullición del líquido a la presión atmosférica, (K)

$\Delta H_v$  = calor latente de vaporización a la temperatura de ebullición, (J/kg)

$\alpha_s$  = difusividad térmica de la superficie, (m<sup>2</sup>/s)

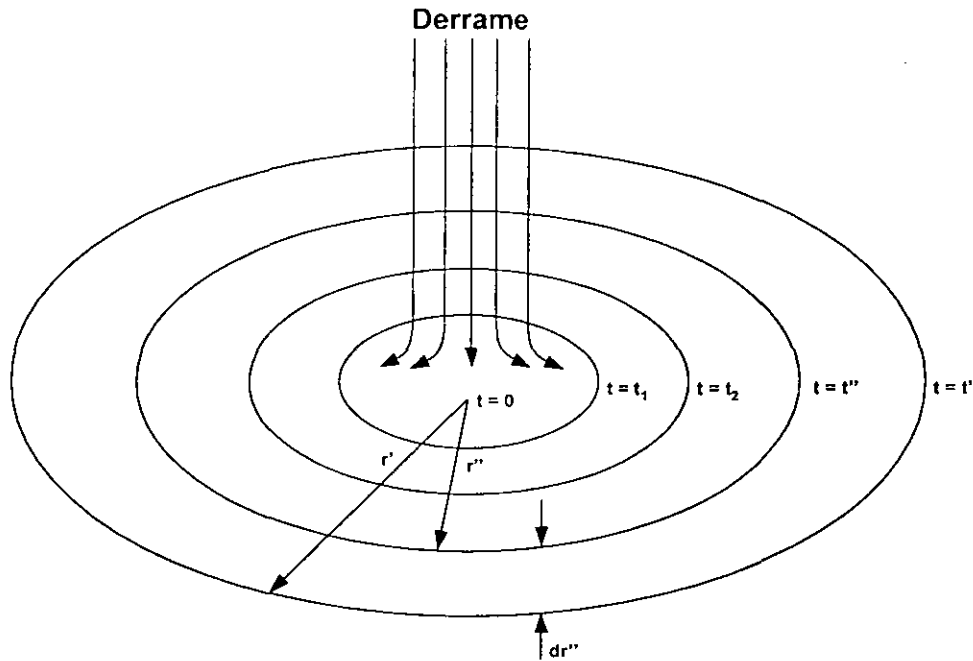
$r'$  = radio de la alberca de líquido en el tiempo  $t'$ , (m)

$r''$  = radio de la alberca de líquido en el tiempo  $t''$ , (m)

$t'$  = tiempo en el cual la extensión de la alberca tiene un radio  $r'$ , (s)

$t''$  = tiempo en el cual la extensión de la alberca tiene un radio  $r''$ , (s)





- Las ecuaciones (4.1.23) - (4.1.26) se resuelven simultáneamente con técnicas numéricas. Una forma aproximada para resolverlas, es considerar que el líquido derramado se extiende instantáneamente a su máximo tamaño. De esta manera, la velocidad de evaporación de la masa  $\dot{m}_p$  está dada por la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_p = \frac{A_p X K_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s t}} \quad (4.1.27)$$

Donde:

$A_p$  = área del derrame suponiendo que se expande instantáneamente, ( $m^2$ )

- La ecuación (4.1.27) sobreestima la tasa de evaporación porque el efecto de extensión de la alberca es despreciable. También se puede obtener una solución analítica aproximada si se considera que el término de pérdidas de evaporación másica,  $\dot{m}_p$ , es despreciable en la ecuación (4.1.23), de esta forma  $r$  y  $\dot{m}_p$  se consideran variables independientes.
- En un derrame instantáneo sobre tierra, el radio  $r$  de la alberca de líquido es:

$$r = \sqrt{\left( \frac{8 g V_{p0}}{\pi} \right)^{0.5} t + r_0^2} \quad (4.1.28)$$

Donde:

$r_0$  = radio inicial de la alberca, (m)

La tasa de evaporación  $\dot{m}_p$  es:

$$\dot{m}_p = \frac{4 X K_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s}} \sqrt{2 \pi g V_{p0} t} \quad (4.1.29)$$

La masa total evaporada  $m_p$  es:

$$m_p = \frac{8}{3} \left[ \frac{X K_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s}} \right] (2 \pi g V_{p0})^{0.5} t^{1.5} \quad (4.1.30)$$

- Derrames sobre tierra con una velocidad de descarga finita.

El radio de la alberca es

$$r = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ \frac{8 g \dot{V}_p}{\pi} \right]^{0.25} t^{0.75} \quad (4.1.31)$$

La tasa de evaporación  $\dot{m}_p$  es:

$$\dot{m}_p = \pi^{1.5} \left[ \frac{X K_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s}} \right] (2 g \dot{V}_p)^{0.5} t \quad (4.1.32)$$

La masa total de evaporación  $m_p$  es:

$$m_p = \pi^{1.5} \left[ \frac{X K_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s}} \right] \left( \frac{g \dot{V}_p}{2} \right)^{0.5} t^2 \quad (4.1.33)$$

- Variables de superficie.

Con las variables  $X$ ,  $K_s$  y  $\alpha_s$  se toma en cuenta la interacción del líquido con la superficie sobre la que se encuentra la alberca. El factor de corrección por rugosidad de la superficie  $X$ , considera el incremento de la superficie del área disponible, como resultado de la textura áspera de la superficie.

Cremer y Warner<sup>(11)</sup> compararon los resultados teóricos del modelo SB<sup>(10)</sup> con datos obtenidos experimentalmente y recomiendan que  $X=1$  para superficies impenetrables (ejemplo concreto) y  $X=3$  para otras superficies (ejemplo sólidos).

Los valores de Cremer y Warner<sup>(11)</sup> para  $k_s$  y  $\alpha_s$  son los siguientes.

Superficie	Conductividad térmica $k_s$ (W/m <sup>2</sup> K)	Difusividad térmica, $\alpha_s$ (m <sup>2</sup> /s)
Concreto	0.92	4.16 x 10 <sup>-7</sup>
Tierra (promedio)	0.96	4.59 x 10 <sup>-7</sup>
Tierra (arenosa, seca)	0.26	1.98 x 10 <sup>-7</sup>
Tierra (húmeda, 8% de agua, arenosa)	0.59	3.36 x 10 <sup>-7</sup>

TNO<sup>(9)</sup> también da valores adicionales para  $k_s$  y  $\alpha_s$ .

Superficie	Conductividad térmica $k_s$ (W/m <sup>2</sup> K)	Difusividad térmica, $\alpha_s$ (m <sup>2</sup> /s)
Tierra promedio (8% de agua)	0.9	$4.3 \times 10^{-7}$
Arena (seca)	0.3	$2.3 \times 10^{-7}$
Tierra arenosa (seca)	0.3	$2.0 \times 10^{-7}$
Tierra arenosa (8% de agua)	0.6	$3.3 \times 10^{-7}$
Madera	0.2	$4.5 \times 10^{-7}$
Arena gruesa (grava)	2.5	$1.1 \times 10^{-7}$
Acero al carbón	45	$1.3 \times 10^{-7}$

- Suposiciones y limitaciones del modelo SB<sup>(10)</sup>.
  - El derrame ocurre en un nivel, superficie uniforme.
  - El modelo SB no considera la contribución a la vaporización de la transferencia de calor por convección y radiación.
  - La alberca que se forma es muy superficial.
  - La velocidad de derrame para una liberación finita es constante.
  - Las ecuaciones para el modelo SB tienen solución analítica.
  - Una solución numérica más precisa debe considerar la evaporación y la extensión de la alberca simultáneamente. El radio  $r$  de la alberca y la masa evaporada  $m_p$  se tratan como variables dependientes.

d) Si el derrame involucra líquidos no volátiles, usar el modelo de Sutton<sup>(12)</sup> para derrames sobre tierra.

- Modelo de Sutton<sup>(11)(12)</sup> con la modificación de Pasquill para la velocidad de evaporación en una atmósfera turbulenta.

Para un área circular de radio  $r$ .

$$\dot{m}_p(r) = K' u^{(2-n_s)/(2+n_s)} r^{(4+n_s)/(2+n_s)} \quad (4.1.34)$$

Para una forma rectangular, de largo  $X_o$  y ancho  $Y_o$ .

$$\dot{m}_p(X_o, Y_o) = K u^{(2-n_s)/(2+n_s)} X_o^{2/(2+n_s)} Y_o \quad (4.1.35)$$

$$K' = a' \kappa_o D_V^{2n_s/(2+n_s)} Z_1^{(-n_s)(2+n_s)} \quad (4.1.36)$$

$$K = a \kappa_o D_V^{2n_s/(2+n_s)} Z_1^{(-n_s)(2+n_s)} \quad (4.1.37)$$

$$\kappa_o = \frac{P_v MW_s}{R_g T_p} \quad (4.1.38)$$

Donde:

$\dot{m}_p$  = velocidad de evaporación de la alberca, (kg/s)

$X_o$  = longitud viento debajo de la alberca rectangular, (m)

$Y_o$  = ancho de la alberca, (m)

$u$  = velocidad del viento, (m/s)

$r$  = radio de la alberca, (m)

$D_v$  = difusividad del vapor, ( $m^2/s$ )

$P_v$  = presión de vapor en la superficie del líquido, ( $N/m^2$ )

$MW_s$  = peso molecular, (kg/kg<sub>mol</sub>)

$R_g$  = constante universal de los gases, (8314 J/Kg<sub>mol</sub>-K)

$T_p$  = temperatura del líquido de la alberca, (K)

$Z_1$  = altura a la que se tomo la velocidad del viento, normalmente 10 m

$n_s$  = parámetro de estabilidad atmosférica de Sutton, (adimensional)

$\alpha$  = constante empírica (en función de la estabilidad atmosférica)

$\alpha'$  = constante empírica (en función de la estabilidad atmosférica)

- La difusividad del vapor tiene una característica para cada material, pero para muchos hidrocarburos no varía considerablemente<sup>(11)</sup>. Pasquill recomienda un valor promedio de  $D_v = 7.95 \times 10^{-6} m^2/s$ .

Usando el valor promedio de  $D_v$  y suponiendo que la velocidad del viento está medida a una altura estándar de 10 m, su pueden utilizar los siguientes datos para las constantes

estabilidad	$n_s$ (adimensional)	$\alpha$ (constante adimensional)	$\alpha'$ (constante adimensional)	$K/\kappa_o$ (constante adimensional)	$K'/\kappa_o$ constante adimensional)
inestable	0.20	$1.332 \times 10^{-2}$	$4.010 \times 10^{-2}$	$1.278 \times 10^{-3}$	$3.846 \times 10^{-3}$
neutral	0.25	$2.756 \times 10^{-2}$	$8.223 \times 10^{-2}$	$1.579 \times 10^{-3}$	$4.685 \times 10^{-3}$
estable	0.30	$5.161 \times 10^{-2}$	$1.527 \times 10^{-1}$	$1.786 \times 10^{-3}$	$5.285 \times 10^{-3}$

- Rearreglando las ecuaciones (4.1.34) y (4.1.35) para permitir el uso de los valores para permitir el uso de los valores para  $K'/\kappa_o$  y  $K/\kappa_o$  tenemos:

Para área circular.

$$\dot{m}_p(r) = (K'/\kappa_o) \frac{P_v MW_s}{R_g T_p} u^{(2-n_s)/(2+n_s)} r^{(4+n_s)/(2+n_s)} \quad (4.1.39)$$

Para área rectangular.

$$\dot{m}_p(X_o, Y_o) = (K'/\kappa_o) \frac{P_v MW_s}{R_g T_p} u^{(2-n_s)/(2+n_s)} X_o^{2/(2+n_s)} Y_o \quad (4.1.40)$$

- Suposiciones y limitaciones para el modelo de Sutton<sup>(12)</sup>.

- Las condiciones atmosféricas son turbulentas.

- La velocidad de transferencia de masa es baja.
- La temperatura del líquido permanece constante a la temperatura ambiente durante el proceso de evaporación.
- Se usa un valor promedio para la difusividad del vapor de  $7.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , el cual es típico para muchos hidrocarburos.
- La alberca no se extiende, su área es constante.

e) Hacer uso de datos experimentales, si están disponibles.

## 4.2. Modelos de dispersión<sup>(4)(6)(13)(14)</sup>

La dispersión describe el proceso por el cual los materiales peligrosos liberados a la atmósfera son diluidos por el aire y transportados lejos de la fuente. El grado de dilución es dependiente de la cantidad de turbulencia presente en la atmósfera o generado por la emisión del material, este último depende del tipo de emisión, momentum, si es más denso ó más ligero que el aire, etc.

La mayoría de los combustibles que son liberados a la atmósfera a sus condiciones de presión y temperatura son más densos que el aire. En caso de una liberación mayor e instantánea, la gravedad propaga rápidamente al vapor en una gran extensión.

En el proceso de dispersión de una nube se pueden distinguir dos etapas: una etapa inicial está caracterizada por la generación de fluctuaciones a gran escala debida al movimiento turbulento; y una segunda etapa que es caracterizada por una disminución gradual de las fluctuaciones de concentración.

El grado de homogeneidad de una mezcla de aire-combustible determina en gran medida si podrá mantener un proceso de combustión detonativo.

Los modelos de dispersión se utilizan para predecir el área afectada (tamaño y forma de la nube), la distancia a la cual se alcanza una concentración de interés (límite de explosividad inferior, LFL) de los vapores corriente abajo del punto de emisión y en todas direcciones, para evaluar efectos por fuego y explosión, estimar datos de concentración en función del tiempo a distancias dadas para evaluar efectos tóxicos en trabajadores y al público en general. También se utiliza para:

1. Desarrollar planes de emergencia con los alrededores de la comunidad.
2. Desarrollar modificaciones a la ingeniería para eliminar fuentes de emisión.
3. Aislar la emisiones potenciales e instalar venteos apropiados u otros equipos de remoción de vapores.
4. Reducir el inventario de materiales peligrosos.
5. Agregar monitores al área para detectar fugas incipientes y proveer válvulas de bloqueo.

Los factores que afectan la dispersión atmosférica de materiales tóxicos son:

- a) Velocidad del viento. Conforme la velocidad del viento se incrementa, la pluma se hace más larga y más puntiaguda, la sustancia es acarreada viento abajo más rápido pero se diluye más rápido por una gran cantidad de aire.
- b) Estabilidad atmosférica. La estabilidad atmosférica relaciona el mezclado vertical del aire. Durante el día la temperatura disminuye rápidamente con la altura debido al movimiento vertical. Durante una inversión, la temperatura se incrementa con la altura resultando en un mínimo movimiento vertical.

Esto ocurre frecuentemente en la noche cuando el piso se enfría rápidamente debido a la radiación térmica como se muestra en la figura 4.2.1.

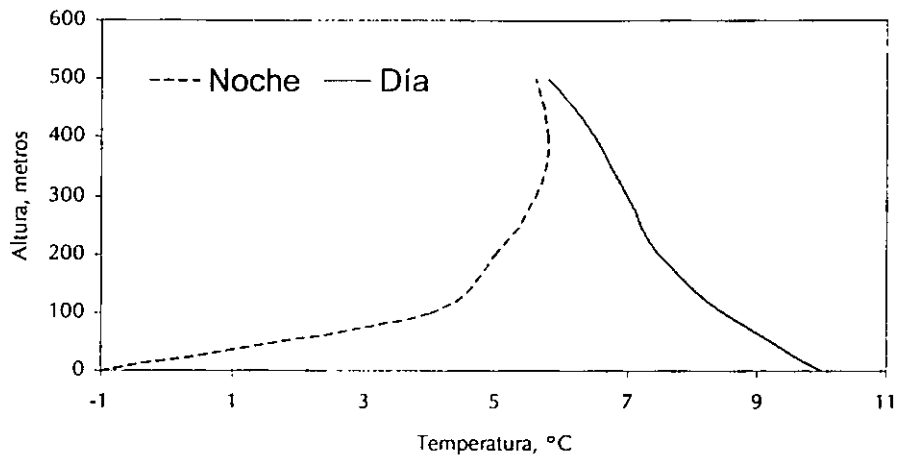


Figura 4.2.1. Temperatura del aire en función de la altitud para el día y la noche.

- c) Condiciones del terreno, construcciones, agua, arboles. Las condiciones del piso afectan el mezclado mecánico en la superficie y el perfil de la velocidad del viento con la altura. Arboles y edificios incrementan el mezclado, mientras que lagos y áreas abiertas lo decrementan.

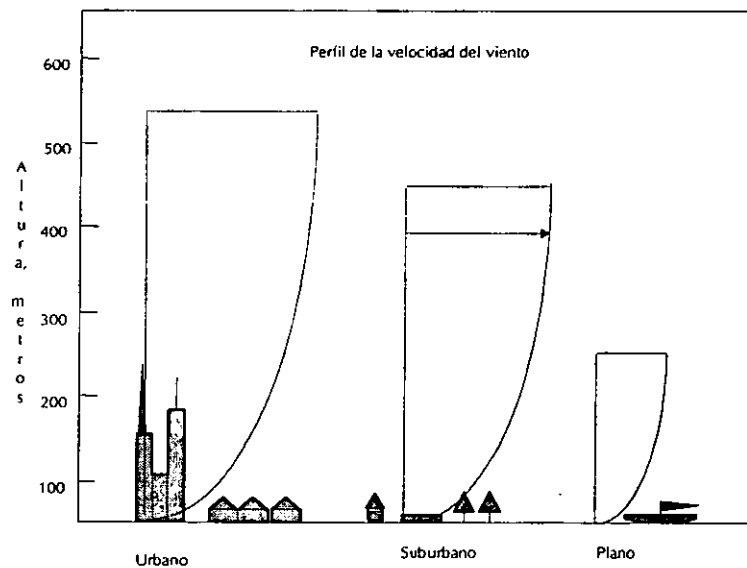
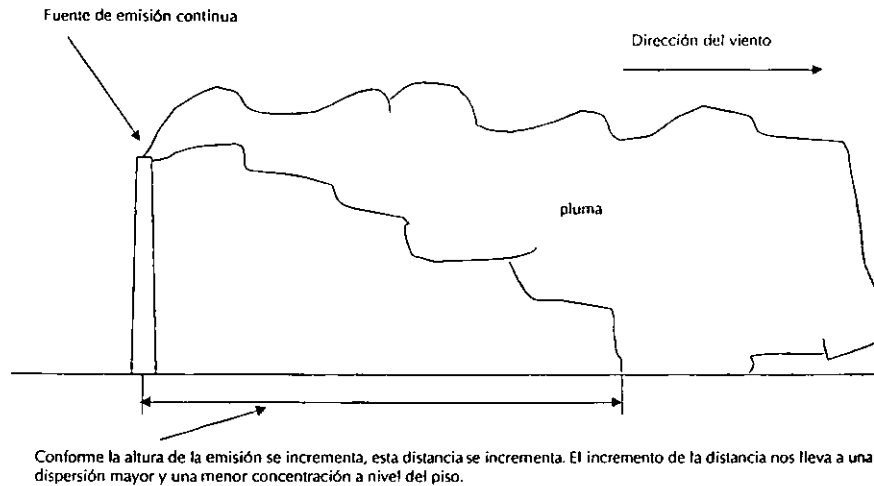


Figura 4.2.2. Perfiles de velocidad del viento para diferentes tipos de terrenos.

- d) La altura de la emisión por encima del nivel del piso. La altura de la emisión afecta la concentración a nivel del piso. Conforme la altura se incrementa, las concentraciones a nivel del piso son reducidas ya que la pluma debe de dispersarse a una distancia mayor verticalmente.



**Figura 4.2.3.** Comportamiento de la pluma de acuerdo a la altura de la emisión.

- e) Momentum y flotación inicial del material liberado. El momentum y la flotación inicial del material liberado cambian la altura efectiva de la emisión. Después de que el momentum y la flotación inicial se han disipado, el mezclado turbulento de la atmósfera será el efecto dominante.

#### 4.2.1. Modelos masivos instantáneos (puff) y modelos de pluma (continuos) flotante, neutral y positiva<sup>(6)(13)(14)</sup>.

Comúnmente se usan dos modelos de dispersión de nubes de vapor: Los modelos de emisión continua (pluma) y los modelos de emisión instantánea (puff). El modelo Pluma describe la concentración en estado estable del material liberado de una fuente continua. El modelo instantáneo (puff) describe la concentración temporal del material de una emisión en particular de una cantidad fija de material. Un ejemplo típico para un modelo tipo pluma es la emisión continua de gases de una chimenea. Para un modelo instantáneo (puff), un ejemplo es la liberación súbita de una cantidad fija de material debido a la ruptura de un recipiente de almacenamiento.

Considere la emisión instantánea de una masa fija de material,  $Q_m^*$  en un espacio infinito de aire. El origen del sistema de coordenadas es la fuente. Considere que no hay reacción o difusión molecular, la concentración,  $C$ , del material liberado esta dada por la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j C) = 0 \quad (4.2.1)$$

Donde  $u_j$  es la velocidad del aire y el subíndice  $j$  son todas las direcciones de las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Si la velocidad promedio del viento es substituida en la ecuación anterior y esta se resuelve, se puede demostrar que el material se dispersa más rápidamente que lo predicho. Lo anterior se debe a la turbulencia en el campo de velocidad. Si se pudiese especificar la velocidad del viento exactamente con el tiempo y la posición, incluyendo los efectos de la turbulencia se podría predecir correctamente la concentración. Desafortunadamente no existen modelos disponibles que describan adecuadamente la turbulencia. Por lo anterior se usa una aproximación.

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K_j \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} \right) \quad (4.2.2)$$

El término  $K_j$  es la difusividad por efecto del flujo turbulento. El sistema de coordenadas usado por los modelos de dispersión se muestra en la figura 4.2.4.

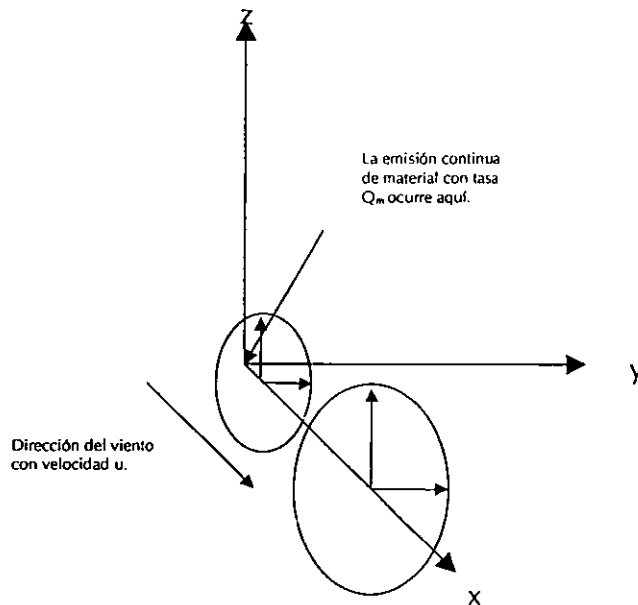


Figura 4.2.4. Emisión continua en estado estable con viento.

El eje x es el centro de línea viento abajo del punto de emisión. El eje z es la elevación por encima del punto de emisión, el eje y es la distancia alejada del centro de línea.

Las coordenadas  $(x,y,0)$  representan el nivel del punto de liberación, y las coordenadas  $(x,0,0)$  son el largo de la línea central, o eje-x.

Dentro de los modelos de dispersión más utilizados se encuentran los de Pasquill-Gifford<sup>(32)</sup>, los cuales se presentan a continuación para diferentes casos con diferentes consideraciones.

#### 4.2.2. Modelos de Pasquill-Gifford<sup>(6)(13)(14)</sup>.

Estos modelos están basados en la ecuación de difusión gausseana, que describe la dispersión de un gas en dirección vertical y horizontal y para su aplicación es necesario establecer una concentración máxima permisible de exposición, lo cual permite estimar el área de evacuación en caso de una contingencia.



La difusividad por efecto del flujo turbulento cambia con la posición, tiempo, velocidad del viento y las condiciones meteorológicas. La difusividad por efecto del flujo turbulento es una aproximación usualmente teórica. Sutton resolvió esta dificultad proponiendo coeficientes de dispersión definidos de la siguiente manera.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{2} \langle C \rangle^2 \langle ut \rangle^{2-n} \quad (4.2.3)$$

con relaciones similares dadas para  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$

Los coeficientes de dispersión,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  representan la desviación estándar de la concentración en la dirección del viento corriente abajo, dirección horizontal y dirección vertical, respectivamente. Son función de las condiciones atmosféricas y la distancia corriente abajo de la fuente de emisión. Las condiciones atmosféricas son clasificadas de acuerdo a seis clases de estabilidad atmosférica como se muestra en la tabla 4.2.1. La clase de estabilidad depende de la velocidad del viento y de la cantidad de luz solar.

**Tabla 4.2.1.** Condiciones meteorológicas que definen la clase de estabilidad de Pasquill-Gifford<sup>(32)</sup>.

CATEGORIAS DE ESTABILIDAD DE PASQUILL						
VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL VIENTO M/S	RADIACIÓN SOLAR DURANTE EL DÍA			COBERTURA DE NUBES EN LA NOCHE		A CUALQUIER HORA
	FUERTE	MODERADA	LIGERA	LIGERAMENTE NUBLADO > 4/8 NUBES BAJAS	≥3/8 NEBULOSOS NIEBLA	NUBLADO ESPESO
< 2	A	A - B	B	F	F	D
2 - 3	A - B	B	C	E	F	D
3 - 4	B	B - C	C	D	E	D
4 - 6	C	C - D	D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D	D

A Condiciones extremadamente inestables.	D Condiciones neutras.
B Condiciones moderadamente inestables.	E Condiciones ligeramente estables.
C Condiciones ligeramente inestables.	F Condiciones moderadamente estables.

En la tabla 4.2.2 se dan las formulas recomendadas por Hanna, Briggs and Hosker<sup>(33)(34)</sup> para el cálculo de los coeficientes de dispersión,  $\sigma_y(x)$  y  $\sigma_z(x)$  ( $10m < x < 10 km$ ) para emisiones continuas en terreno urbano y rural.

**Tabla 4.2.2.** Ecuaciones y datos para el cálculo de coeficientes de dispersión de Pasquill-Gifford<sup>(32)</sup> para una emisión continua.

Clase de Estabilidad de Pasquill-Gifford	$\sigma_y(x)$	$\sigma_z(x)$
<b>Condiciones rurales</b>		
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	0.20x
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	0.12x
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1+0.0003x)^{-1}$
<b>Condiciones urbanas</b>		
A - B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1+0.001x)^{-1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	0.20x
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1+0.003x)^{-1/2}$
E - F	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$

Los coeficientes de dispersión para el modelo intermitente se dan en la tabla 4.2.3 aunque se debe considerar que no son muy precisos.

**Tabla 4.2.3.** Ecuaciones y datos para el cálculo de coeficientes de dispersión de Pasquill-Gifford<sup>(35)</sup> para una emisión masiva e instantánea.

Clase de estabilidad	A	B	C	D	E	F
$\sigma_y$ o $\sigma_x$	$0.18x^{0.92}$	$0.14x^{0.92}$	$0.10x^{0.92}$	$0.06x^{0.92}$	$0.04x^{0.92}$	$0.02x^{0.89}$
$\sigma_z$	$0.60x^{0.75}$	$0.53x^{0.73}$	$0.34x^{0.71}$	$0.15x^{0.70}$	$0.10x^{0.65}$	$0.05x^{0.61}$

Pasquill presenta la solución de la ecuación 4.2.2 con las correlaciones de los coeficientes de dispersión para los siguientes casos.

**4.2.2.1. Emisión masiva e instantánea. Fuente de emisión a nivel del piso, coordenadas fijas en el punto de emisión. Viento constante en la dirección x con una velocidad constante  $u$ <sup>(6)(13)(14)</sup>.**

a) La concentración promedio corriente abajo del punto de emisión esta dada por la siguiente ecuación.

$$(C)(x, y, z, t) = \frac{Q_m}{\sqrt{2\pi^{3/2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-ut}{\sigma_x}\right)^2 + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (4.2.4)$$

b) La concentración a nivel del piso,  $z = 0$ .

$$\langle C \rangle(x, y, 0, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi^{1.5}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x-ut}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right] \right\} \quad (4.2.5)$$

c) La concentración en el centro de la nube a nivel del piso esta dada cuando  $z = y = 0$ :

$$\langle C \rangle(x, 0, 0, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi^{3/2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x-ut}{\sigma_x} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.2.6)$$

d) Frecuentemente la frontera de la nube esta limitada por una concentración fija que es requerida.

e) La línea que conecta puntos de igual concentración alrededor de la frontera de la nube es llamada isopleta. Para una concentración especifica,  $\langle C \rangle^*$ , la isopleta a nivel del piso está determinada por la siguiente ecuación.

$$y = \sigma_y \sqrt{2 \ln \frac{\langle C \rangle(x, 0, 0, t)}{\langle C \rangle(x, y, 0, t)}} \quad (4.2.7)$$

f) El procedimiento es:

- Especificar  $\langle C \rangle^*$ ,  $u$  y  $t$ .
- Determine las concentraciones,  $\langle C \rangle(x, 0, 0, t)$ , a lo largo del eje  $x$  usando la ecuación (4.2.7). Defina la frontera de la nube a lo largo del eje  $x$ .
- Fija  $\langle C \rangle(x, y, 0, t) = \langle C \rangle^*$  en la ecuación y determine los valores de  $y$  para cada punto del centro de línea determinado en el punto 2.
- El procedimiento es repetido para cada valor de  $t$  requerido.

#### 4.2.2.2. Emisión continua. Estado estable, fuente de emisión a nivel del piso. Viento constante en la dirección $x$ con una velocidad constante $u$ <sup>(6)(13)(14)</sup>.

a) La concentración promedio corriente abajo del punto de emisión esta dada por la siguiente ecuación.

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (4.2.8)$$

b) La concentración a nivel del piso esta dada por  $z=0$ :

$$\langle C \rangle(x, y, 0) = \frac{Q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \quad (4.2.9)$$

c) La concentración a lo largo del centro de la nube corriente abajo esta dada cuando  $y=z=0$ .

$$\langle C \rangle(x, 0, 0) = \frac{Q_m}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \quad (4.2.10)$$

- d) Las isopletras son encontradas usando un procedimiento similar al caso 4.2.2.1.  
 e) Para emisiones continuas a nivel del piso, la máxima concentración ocurre en el punto de emisión.

**4.2.2.3. Emisión continua. Estado estable, fuente de emisión a una altura  $H_r$  por encima del nivel del piso. Viento constante en la dirección x con una velocidad  $u$ <sup>(6)(13)(14)</sup>.**

- a) La concentración corriente abajo del punto de emisión esta dada por la siguiente ecuación.

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (4.2.11)$$

- b) La concentración a nivel del piso se encuentra para el valor de  $z=0$ .

$$\langle C \rangle(x, y, 0) = \frac{Q_m}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (4.2.12)$$

- c) La concentración del centro de la pluma es encontrada seleccionando  $y=z=0$ .

$$\langle C \rangle(x, 0, 0) = \frac{Q_m}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (4.2.13)$$

- d) La concentración máxima a nivel del piso a lo largo del eje x se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\langle C \rangle_{max} = \frac{2Q_m}{e\pi u H_r^2} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right) \quad (4.2.14)$$

La distancia viento abajo a la cual la máxima concentración a nivel del piso se encuentra mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma_z = \frac{H_r}{\sqrt{2}} \quad (4.2.15)$$

**4.2.2.4. Emisión masiva e instantánea. Punto de emisión a una altura  $H_r$  por encima del nivel del piso. El sistema de coordenadas sobre el piso se mueve con la nube<sup>(6)(13)(14)</sup>.**

- a) La concentración promedio esta dada por la siguiente ecuación.

$$\langle C \rangle(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi}^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (4.2.16)$$

- b) A nivel del piso,  $z=0$ , y la concentración es calculada usando.

$$\langle C \rangle(x, y, 0, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi^{3/2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{H_r}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.2.17)$$

c) La concentración a lo largo del piso en el centro de la pluma esta dada cuando  $y=z=0$ .

$$\langle C \rangle(x, 0, 0, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi^{3/2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H_r}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.2.18)$$

d) La dosis integrada total a nivel del piso esta dada por la siguiente ecuación.

$$D_{iid}(x, y, 0) = \frac{Q_m^*}{\pi \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{H_r}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.2.19)$$

### 4.3. Modelos de explosión<sup>(1)(3)(4)(15)</sup>.

Las explosiones de gas son caracterizadas por rápida combustión, en la cual la alta temperatura de los productos de combustión se expanden y afectan a sus alrededores. De este modo el calor de combustión de una mezcla aire-combustible (energía química) es parcialmente convertido en una expansión (energía mecánica). La energía mecánica es transferida a los alrededores en la forma de una onda de choque. En la atmósfera, una onda de choque es experimentada como un cambio transiente de los parámetros de presión, densidad y velocidad de las partículas de un gas. Generalmente estos parámetros se incrementan y decrecientan rápidamente.

Un objeto al ser chocado por una onda de choque experimenta una carga. Esta carga tiene dos aspectos. Primero, la onda incidente induce una distribución de presión trasiente sobre el objeto la cual es altamente dependiente de la forma del objeto. Esta componente es determinada primeramente por la reflexión y la ramificación lateral de la sobrepresión reflejada. La altura y la duración de la sobrepresión reflejada son determinados por el pico de la onda y por las dimensiones laterales del objeto. La segunda componente es una fuerza de arrastre inducida por la velocidad de las partículas en la onda.

La conducta de una explosión es muy difícil caracterizarla, muchas aproximaciones a los problemas tienen que ser comprometidas, incluyendo teóricas semiempíricas y estudios empíricos.

La conducta de las explosiones depende de un gran número de parámetros, como son:

- Temperatura del ambiente.
- Presión del ambiente.
- Composición del material explosivo.
- Propiedades físicas del material explosivo.
- Naturaleza de la fuente de ignición: tipo, energía y duración.
- Geometría de los alrededores (confinado o no confinado).
- Cantidad de material combustible.
- Turbulencia del material combustible.
- Tiempo antes de la ignición.
- Tasa de emisión del material combustible.

Los modelos de explosión se usan para determinar radios y/o zonas de afectación para ciertos niveles de sobrepresión, por ejemplo, el INE marca 0.5 psi para la zona de amortiguamiento y 1 psi para la zona de alto riesgo.

Las explosiones se clasifican de la siguiente manera (ver figura 4.3.1):

- a) Las explosiones físicas son aquellas que se originan de fenómenos estrictamente físicos (ruptura de un cilindro presurizado de gas, BLEVE, etc.).
- b) Las explosiones químicas son aquellas que se originan de una reacción química (ejemplo; combustión de gas). Las reacciones químicas se clasifican en reacciones uniformes y de propagación.
- c) Las reacciones uniformes son aquellas en la cual la reacción química ocurre más o menos uniformemente a través de la masa del material.
- d) Las reacciones de propagación son aquellas en la cual la reacción química se origina dentro de la masa del material y se propaga de ese punto como frente de reacción a través del material no reaccionado.
- e) Las reacciones de propagación se clasifican en deflagraciones y detonaciones, dependiendo del mecanismo de transferencia de energía de la zona de reacción al material no reaccionado.
- f) Deflagraciones son reacciones de propagación en la cual la energía se transfiere de la zona de reacción al medio no reaccionado a través de un proceso de transporte (transferencia de masa y calor). La velocidad de dicha transferencia es menor que la velocidad del sonido.
- g) Detonaciones son reacciones de propagación en la cual la energía se transfiere de la zona de reacción al medio no reaccionado vía una onda de choque reactiva. La velocidad de dicha transferencia excede la velocidad del sonido.

La figura 4.3.2 muestra la descripción lógica de explosiones accidentales y escenarios de fuego.

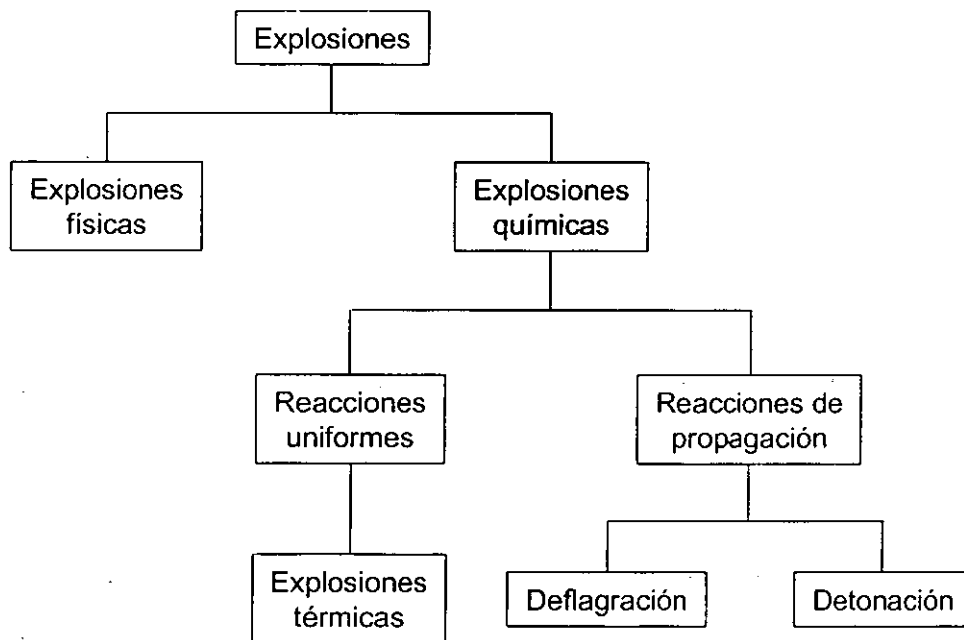


Figura 4.3.1. Clasificación de las explosiones.

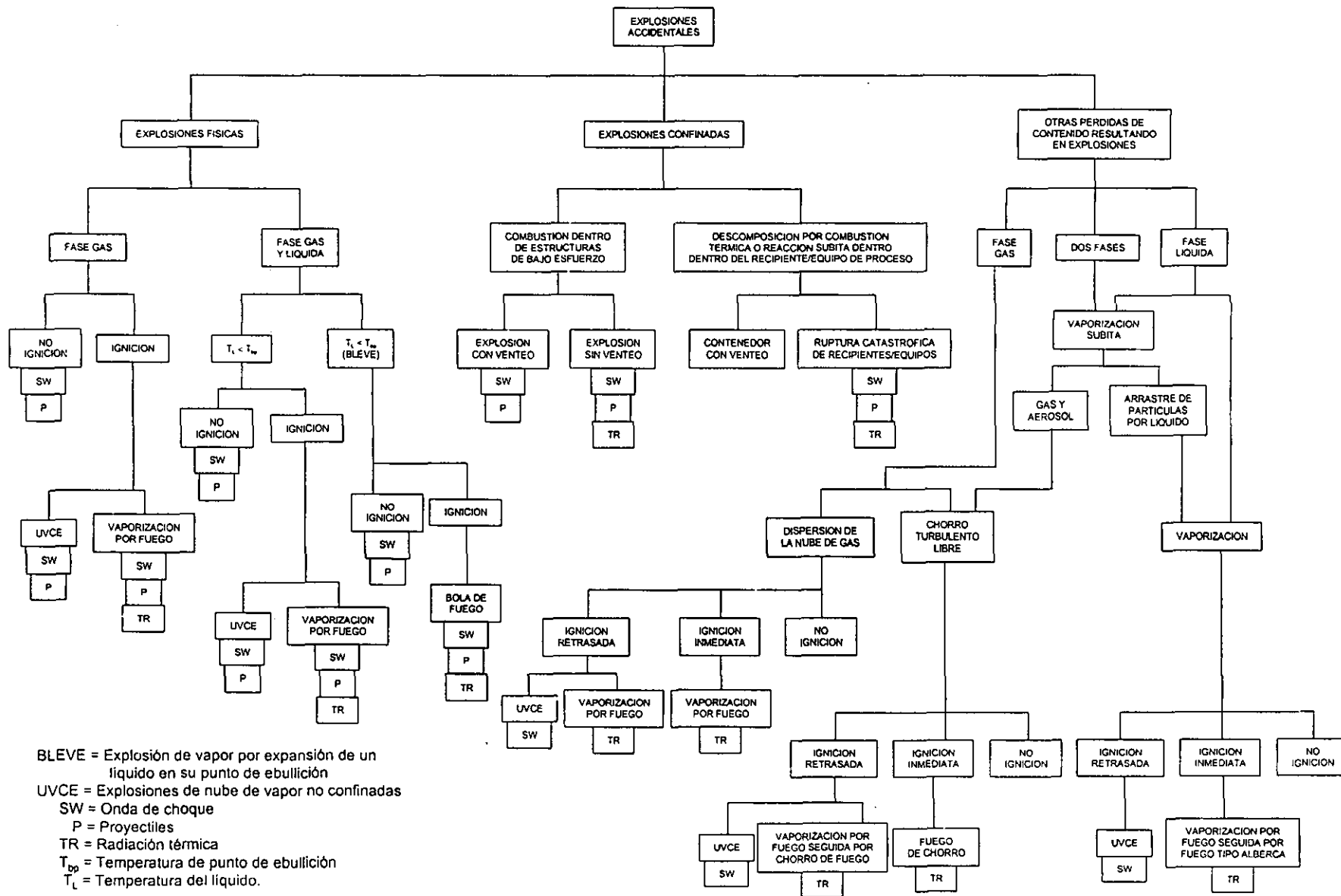


Figura 4.3.2. Representación lógica para eventos de explosión.

### 4.3.1. Explosión de nube de vapor no confinado (UVCE) y vaporización por fuego (Flash Fire)<sup>(3)(4)(15)</sup>.

Cuando una gran cantidad de material volátil inflamable se libera rápidamente a la atmósfera, se forma una nube de vapor, la cual se dispersa. Si la nube se incendia antes de que se diluya hasta un valor menor de su límite inferior de explosividad (LFL), entonces ocurre una explosión de nube de vapor no confinada (UVCE). En términos generales necesitan presentarse diferentes características para que pueda ocurrir la explosión de la nube de vapor:

**Primero:** El material emitido debe ser inflamable en las condiciones de presión y temperatura de la emisión.

**Segundo:** Una nube de vapor de suficiente tamaño debe formarse antes de que se presente la ignición (fase de dispersión). Si la ignición ocurre inmediatamente puede presentarse una bola de fuego (fireball), chorro de fuego (jet fire) o un fuego grande con una baja probabilidad de sobrepresión. Si se permite la formación de la nube y la ignición ocurre posteriormente el efecto de sobrepresión puede ser muy grande con consecuencias muy severas. Igniciones retardadas con un tiempo de 1 a 5 minutos son las más probables de ocurrir aunque también se han presentado igniciones con un tiempo de retardo de 30 minutos.

**Tercero:** Una suficiente cantidad de material de la nube debe estar dentro de la región inflamable del material para que cause la explosión. La nube de vapor generalmente presenta tres regiones: una región rica, cercana al punto de emisión; la región pobre, al final de la nube y una región que se encuentra entre estos rangos de inflamabilidad. La porción de la nube de vapor en cada región depende de muchos factores que incluyen el tipo y cantidad del material emitido, tamaño del orificio, grado de confinamiento de la nube y las condiciones ambientales.

**Cuarto:** Los efectos de la onda de choque producidos por la explosión de una nube de vapor puede variar grandemente y son determinados por la velocidad de propagación de la flama. En la mayoría de los casos el modo de propagación es la deflagración. Una deflagración puede ser descrita como la combustión del material emitido en el cual la velocidad de propagación es dominada por los fenómenos de transporte molecular y turbulento. En la ausencia de turbulencia (esto es, bajo condiciones de flujo laminar o cercanas al laminar), la velocidad de la flama para hidrocarburos esta en el orden de 5 a 30 m/s. Esta velocidad es muy lenta para producir efectos de sobrepresión significantes, por lo que la nube de vapor únicamente se quemará en forma rápida (Flash Fire). Bajo condiciones extraordinarias, la detonación puede presentarse, debido al efecto de la turbulencia.

Basado en accidentes previos, la máxima sobrepresión dentro de la nube de vapor es aproximadamente 15 psi para áreas congestionada y 1.5 psi para terrenos planos y áreas sin obstáculos.

Los modelos de UVCE se basan principalmente en tres grandes aproximaciones:

- a) Equivalencia de explosivos de alta detonación (modelo TNT).
- b) Correlaciones con UVCE observados (modelo TNO).
- c) Modelo dinámico de gas idealizado (modelo acústico)<sup>(16)</sup>.

La figura 4.3.3 muestra el diagrama lógico para determinar zonas de afectación por sobrepresión debido a UVCE.



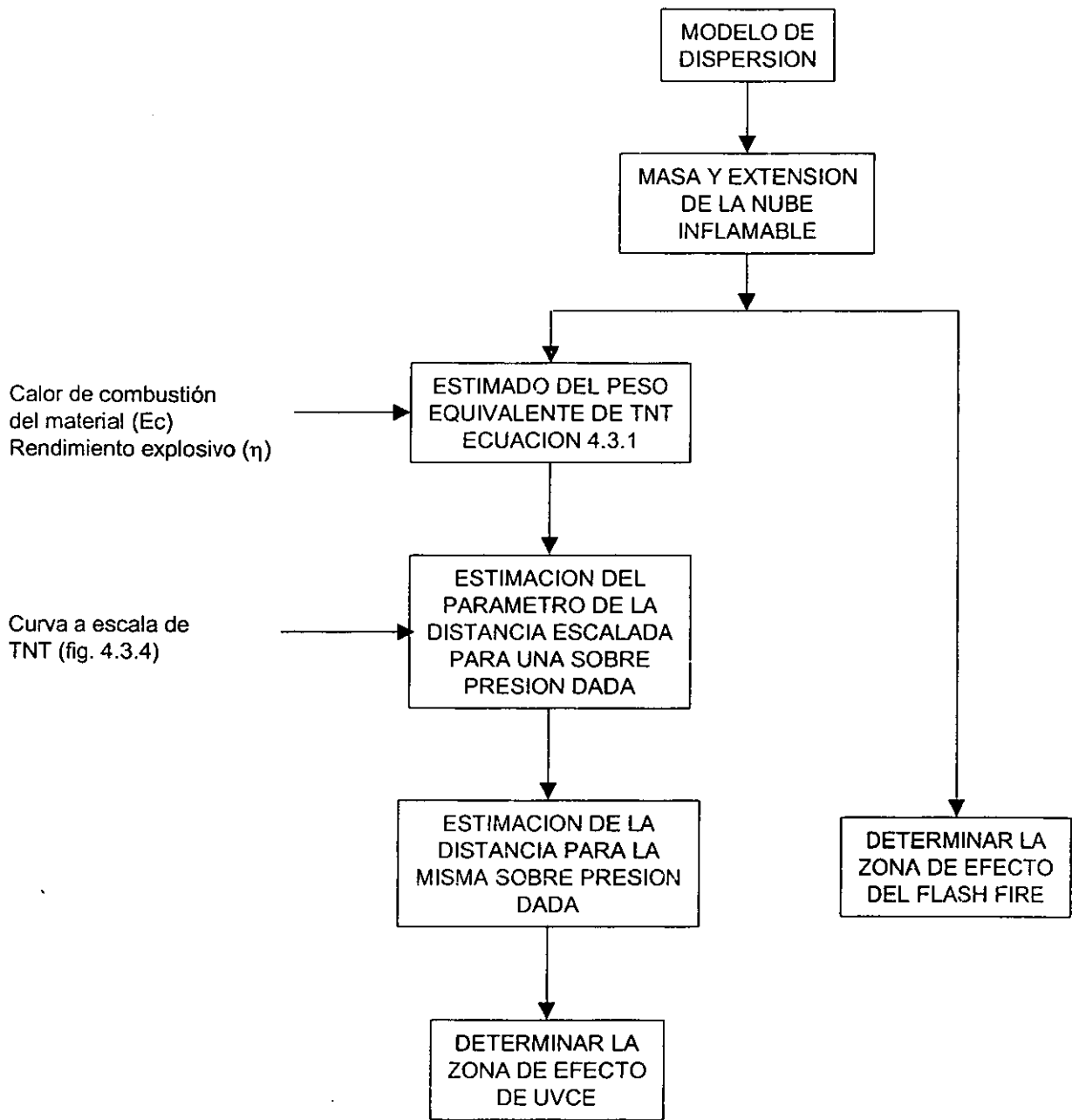


Figura 4.3.3. Diagrama lógico para el cálculo de UVCE.

#### 4.3.1.1. Modelo TNT<sup>(3)(4)</sup>.

El modelo TNT es fácil de usar y se ha aplicado para muchos análisis cuantitativo de riesgos. Relaciona la cantidad del material inflamable a una cantidad equivalente de TNT basado en el calor de combustión, factorizado por un término de rendimiento de explosión.

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{cTNT}} \quad (4.3.1)$$

Donde:

W = masa equivalente de TNT (Kg o lb).

M = masa del material inflamable liberado (Kg o lb).

$\eta$  = rendimiento empírico de la explosión (o eficiencia) (rango de 0.01 a 0.10).

$E_c$  = Calor neto de combustión del gas inflamable (KJ/Kg o Btu/lb).

$E_{cTNT}$  = calor de combustión del TNT (4437 - 4765 KJ/Kg o 1943 - 2049 Btu/lb).

Procedimiento del modelo de equivalencia de TNT para estimar la sobrepresión a una distancia R.

a) Estimar la masa del material inflamable M.

Estimando la masa del material inflamable, M.

- La masa del material inflamable en la nube es función de la tasa de emisión, la dispersión de la nube y el tiempo de ignición.
- Para ignición temprana de la nube de vapor (a los pocos minutos de la emisión), la masa inflamable puede ser tomada como la cantidad total de vapor liberado previa ignición.
- Para ignición tardía de la nube de vapor considere lo siguiente:
  - Desarrolle los cálculos de dispersión atmosférica y determine los valores de los límites superior e inferior de inflamabilidad, UFL y LFL respectivamente.
  - Estime el volumen de la nube entre el UFL y LFL.
  - Multiplique la densidad promedio de la nube por el volumen calculado y obtenga el valor de M.

b) Determinar el calor neto de combustión  $E_c$  para el material inflamable.

c) Determine un valor apropiado para el factor de eficiencia de la explosión (el INE marca un valor de 0.10).

d) Calcular la masa equivalente de TNT, W (Kg o lb).

e) Estime la distancia escalada, Z para una distancia de interés, R.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (4.3.2)$$

f) Use las curvas de ondas de explosión para estimar las sobrepresiones o impulsos a una distancia R (ver figura 4.3.4).

g) Suposiciones y limitaciones del modelo TNT.

- La fuente de la explosión puede ser representada por un punto.
- Se asume que el decaimiento de la sobrepresión con la distancia será similar a la asociada con altos explosivos (TNT).
- Sobrestima valores de sobrepresión en locaciones cercanas a la fuente de la explosión.
- Para locaciones lejanas a la fuente de la explosión los valores de sobrepresión son subestimados.
- No toma en cuenta para los efectos de terreno, construcciones y obstáculos

Nota: La EPA considera que para estimar la masa de la nube explosiva es recomendable considerar la dispersión hasta 0.5 LFL.

#### 4.3.1.2. Modelo TNO<sup>(1)(3)(4)(9)</sup>.

El modelo de correlación TNO fue desarrollado para evitar la necesidad de desarrollar equivalencias de alta explosividad para la nube de vapor, ya que los efectos de sobrepresión de un UVCE son un poco diferentes que los efectos de sobrepresión por alta explosividad. El modelo TNO se aplica a muchos materiales inflamables de mediana reactividad. Este modelo predice la distancia para cuatro niveles de daño por sobre presión, basado en la formula de la ley de fuerza usando la masa del material inflamable en la nube.

El modelo calcula la distancia para diferentes consecuencias de la siguiente ecuación.

$$R(S) = C(S) \left[ \eta E_f \right]^{1/3} \quad (4.3.3)$$

Donde:

R(S) = radio asociado con un tipo específico de daño S, (m).

C(S) = constante empírica asociada con un tipo específico de daños S, (m/J<sup>1/3</sup>).

η = eficiencia empírica de la explosión, ≈0.1 (adimensional).

E<sub>f</sub> = energía total asociada con la nube de vapor, (J).

**Tabla 4.3.1.** constante empírica asociada con un tipo específico de daño.

Valor de C(S) en (m/J <sup>1/3</sup> )	Tipos de daños
0.03	Daños fuerte a construcciones y equipos de proceso.
0.06	Daños reparables a construcciones o fachadas
0.15	Rompimiento de cristales, causando daños, (1 psi)
0.40	Se rompen el 10% de los cristales (0.3 psi)

Procedimiento de la correlación TNO.

- Estimar la masa M del vapor inflamable entre el UFL y el LFL (modelos de dispersión).
- Determinar el calor neto de combustión E<sub>c</sub> para el material inflamable.
- Estimar la energía total liberada E<sub>f</sub> disponible para la explosión como M X E<sub>c</sub>.
- Estimar la distancia para diferentes tipos de daños de la ecuación R(S).
- Consideraciones y limitaciones de la correlación TNO.
  - La energía total de la explosión es  $\geq 5 \times 10^9$  J y  $\leq 5 \times 10^{12}$  J.
  - Aplica a materiales de potencial explosivo medio (etano, etileno, propano, propileno, butano e isobutano)
  - Provee resultados conservadores para explosiones de nube de vapor (sobrestima los daños para una distancia dada).
  - El modelo TNO se enfoca en las características del sitio más que el tamaño de la emisión.
  - Se basa en la premisa que solamente las porciones de vapor parcialmente confinadas pueden dar origen a una explosión.

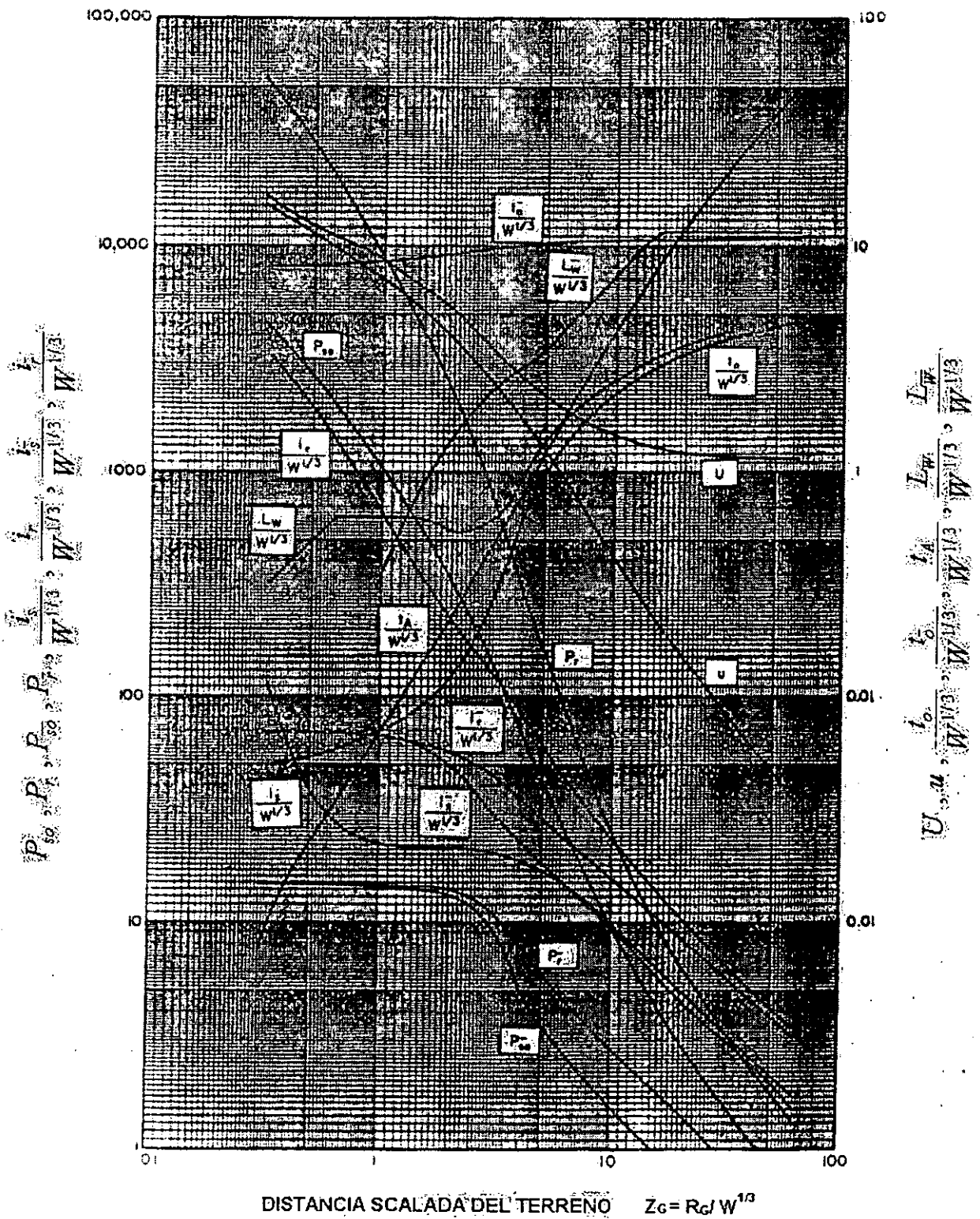


Figura 4.3.4. Parámetros de onda de choque para explosiones TNT en superficies hemisféricas a nivel del mar<sup>(17)</sup>.

### 4.3.2. Explosión física<sup>(1)(3)(4)(15)</sup>.

Cuando un recipiente que contiene un gas presurizado se rompe, la energía almacenada se libera produciendo una onda de choque y proyectiles de fragmentos del recipiente. Si el contenido es inflamable es posible que la ignición del gas liberado resulte con consecuencias de efectos adicionales. La ruptura puede ocurrir debido a las siguientes razones:

- Falla en la regulación de la presión y del sistema de desfogue (sobrepresurización física).
- Reducción en el espesor del recipiente debido a la corrosión, erosión o ataque químico.
- Reducción en la resistencia del recipiente debido a sobrecalentamiento, fatiga del material con el subsecuente desarrollo de fracturas, o ataques químicos especiales.

La extensión de la onda de choque depende de la fase del contenido del recipiente. La siguiente tabla describe varios escenarios posibles.

Tipo	Energía de la onda de choque
Recipiente lleno de gas	Expansión del gas
Recipiente lleno de líquido $T_{\text{líquido}} < T_{\text{punto ebullición líquido}}$	Expansión del gas contenido en el volumen del vapor, arrastre de líquidos.
Recipiente lleno de líquido $T_{\text{líquido}} > T_{\text{punto ebullición líquido}}$	Expansión de gas junto con líquido vaporizado

Hay una cantidad máxima de energía que se libera en la explosión de un recipiente, la cual puede ser clasificada como:

- Fragmentos de energía cinética.
- Energía en onda de choque.
- Energía perdida (calentamiento del aire circundante).
- Energía potencial en fragmentos.

En general, la explosión física de la ruptura catastrófica de un recipiente produce explosiones direccionales. Esto es debido a que usualmente la fisura de la falla inicia su propagación en un punto. Si la fisura de la falla fuera quebradiza, daría como resultado un gran número de fragmentos y la explosión sería menos direccional.

Baker<sup>(16)</sup> describe la siguiente técnica para estimar la sobrepresión para una ruptura de un recipiente lleno de gas basado en estudios experimentales a escala.

- a) Ecuación para calcular la energía liberada cuando un gas, que inicialmente tiene un volumen  $V$ , se expande en respuesta a la disminución de la presión, desde la presión  $P_1$  a la presión atmosférica  $P_o$ . Considerando que la expansión ocurre isotérmicamente y que aplica la ley de los gases ideales, se tiene la siguiente ecuación.

$$W = 1.4 \times 10^{-6} V \left[ \frac{P_1}{P_o} \right] \left[ \frac{T_o}{T_1} \right] R T_1 \ln \left[ \frac{P_1}{P_2} \right] \quad (4.3.4)$$

Donde:

W = energía en lb TNT

V = volumen del gas comprimido, psia

P<sub>1</sub> = presión inicial del gas comprimido, psia

P<sub>2</sub> = presión final del gas expandido, psia

P<sub>0</sub> = presión atmosférica, 14.7 psia

T<sub>1</sub> = temperatura del gas comprimido, °R

T<sub>0</sub> = temperatura atmosférica, 492°R

R = constante del gas, 1.987 Btu/lb mol - °R

1.4 X 10<sup>-6</sup> = factor de conversión (este factor asume que 2000 Btu = 1 lb TNT)

- b) La analogía de la explosión de un contenedor de gas presurizado a una explosión de TNT, en donde la fuente es una fase condensada, no es apropiada. Por lo tanto se sugiere un método de corrección usando una distancia virtual desde el centro de la explosión.
- c) La presión de la explosión, P<sub>s</sub>, en la superficie de un recipiente a presión durante la explosión, se estima con la siguiente expresión:

$$P_b = P_s \left\{ 1 - \frac{[3.5(\gamma - 1)(P_s - 1)]}{\left[ \left( \frac{\gamma T}{M} \right) (1 + 5.9P_s) \right]^{0.5}} \right\}^{\frac{-2\gamma}{(\gamma - 1)}} \quad (4.3.5)$$

Donde:

P<sub>s</sub> = presión en la superficie del recipiente, bar

P<sub>b</sub> = presión de estallido del recipiente, bar

γ = relación de calor específico, C<sub>p</sub>/C<sub>v</sub>

T = temperatura absoluta, °K

M = peso molecular del gas, lb/lb<sub>mol</sub>

La ecuación de arriba supone que la expansión ocurre en el aire a la presión atmosférica y a una temperatura de 25°C. Se requiere una solución de prueba y error porque la ecuación no es explícita para P<sub>s</sub>.

- d) Conociendo la presión de estallido en la superficie, P<sub>s</sub>, la distancia Z para la explosión, se puede obtener de la figura 4.3.4. Muchos recipientes a presión están a nivel del suelo y la figura 4.3.4 es apropiada. Sin embargo, si el recipiente se encuentra elevado, es necesario usar una curva TNT para la explosión de aire libre, como la de la figura 4.3.5.
- e) Para calcular el valor de la distancia R desde el centro de la explosión, se utiliza la ecuación:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (4.3.6)$$

Donde la energía equivalente de TNT, W, ha sido calculada de la ecuación (4.3.1). Se puede calcular la distancia desde el centro del contenedor de gas presurizado, hasta su superficie, y restándole de la distancia R, se obtiene una distancia virtual que se adiciona a la distancia para la evaluación de la onda de choque.

- f) A menos que la energía almacenada sea muy grande, el principal peligro en la ruptura de un recipiente lleno de gas, no es el efecto de la onda de choque, sino el efecto de los proyectiles.

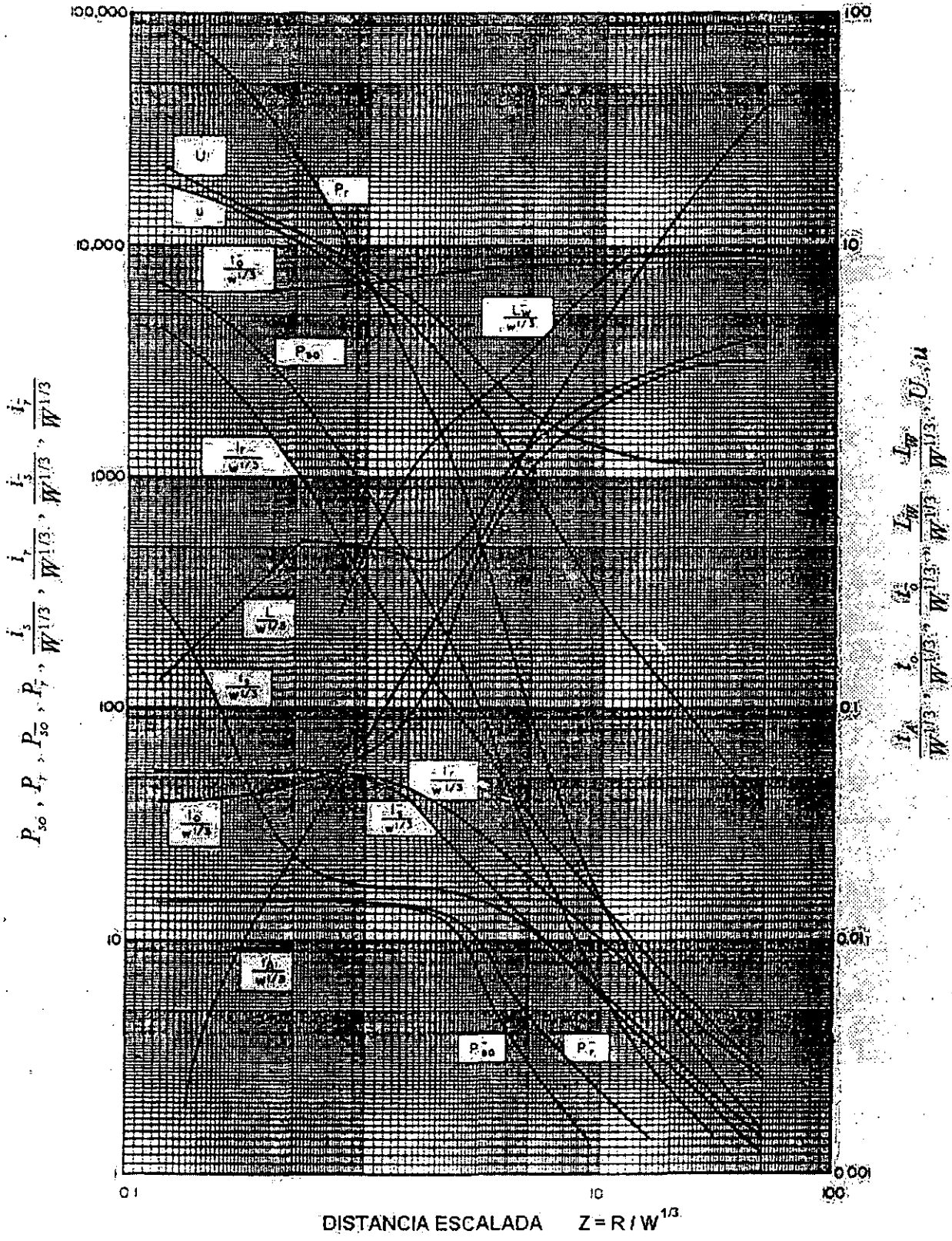


Figura 4.3.5. Parámetros de onda de choque para explosiones TNT esféricas en aire libre a nivel del mar<sup>(17)</sup>.

Baker<sup>(16)</sup> y Brown<sup>(18)(19)</sup> consideran que los recipientes cilíndricos y esféricos se fracturan en 2, 10 y 100 fragmentos.

La primera parte del cálculo involucra la estimación de una velocidad inicial. Una vez que los fragmentos son acelerados, volarán a través del aire hasta impactarse en otro objeto o blanco sobre el suelo. La segunda parte del cálculo involucra la estimación de la distancia que el proyectil viaja.

La información que se requiere para predecir la velocidad inicial de fragmentos producidos por el estallamiento de recipientes cilíndricos o esféricos, es la presión interna (P), volumen interno (V<sub>o</sub>), masa del contenedor (M<sub>c</sub>), relación del calor específico del gas (γ), constante de los gases ajustada para el gas (R<sub>m</sub>) (tabla 4.3.2), y la temperatura absoluta del gas en la explosión (T<sub>o</sub>).

**Tabla 4.3.2.** Valores de γ y R<sub>m</sub> para varios gases.

Gas	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$	Rm ft <sup>2</sup> / s <sup>2</sup> X °R
Hidrógeno	1.4	24,650
Aire	1.4	1,716
Argón	1.67	1,244
Helio	1.67	12,420
Bióxido de carbono	1.225	1,130

$$Presion\ escalada = \frac{144(P - P_o)V_o g}{M_c \gamma R_m T_o} \quad (4.3.7)$$

$$Velocidad\ escalada\ del\ fragmento = \frac{u}{K \sqrt{\gamma R_m T_o}} \quad (4.3.8)$$

Donde:

u = velocidad del fragmento, ft/s

K = factor de ajuste de la velocidad escalada (figura 4.3.7)

γ = relación de calores específicos, C<sub>p</sub>/C<sub>v</sub>

R<sub>m</sub> = constante (tabla 4.3.2)

T<sub>o</sub> = temperatura del gas, °K

P = presión a la que explota el recipiente, psia

P<sub>o</sub> = presión atmosférica, 14.7 psia

V<sub>o</sub> = volumen del recipiente, ft<sup>3</sup>

g = constante, 32.17 ft-lb<sub>m</sub>/lb<sub>f</sub>-s<sup>2</sup>

M<sub>c</sub> = masa del recipiente, lb<sub>m</sub>

- g) Con la información de arriba y suponiendo como se romperá el recipiente, se utiliza la figura 4.3.6 junto, la tabla 4.3.2, la figura 4.3.7 y las ecuaciones (4.3.7) y (4.3.8) para estimar la velocidad inicial, u, de los fragmentos.



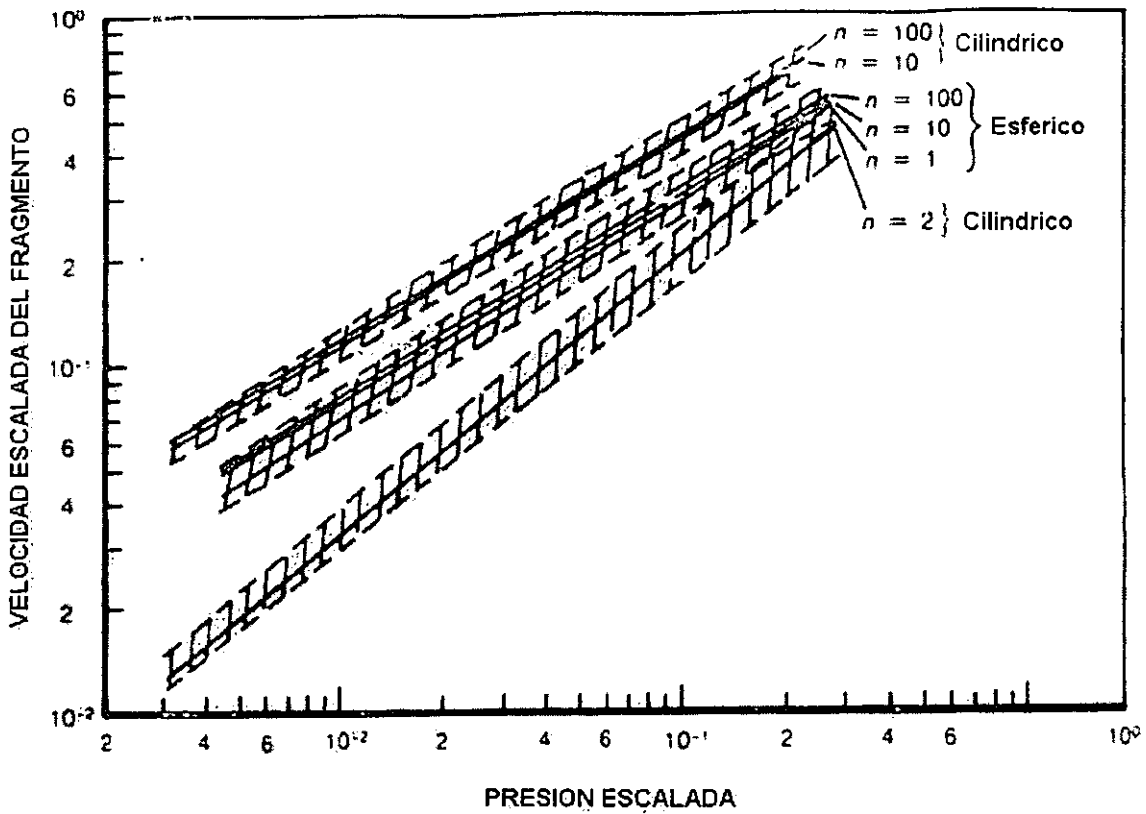


Figura 4.3.6. Velocidad escalada del fragmento vs presión escalada<sup>(16)</sup>.

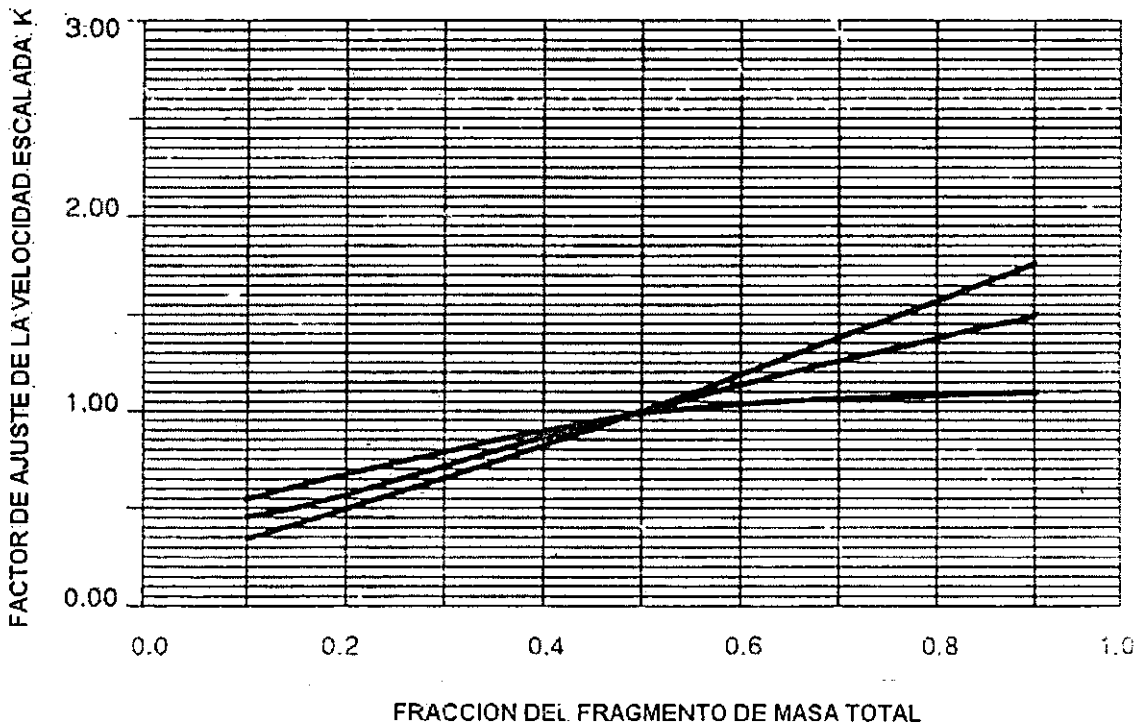


Figura 4.3.7. Factor de ajuste para fragmentos de masa desiguales<sup>(16)</sup>.



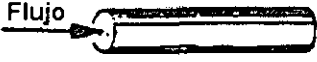


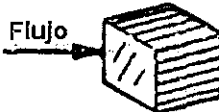

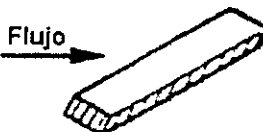
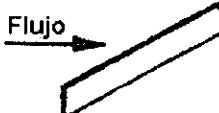
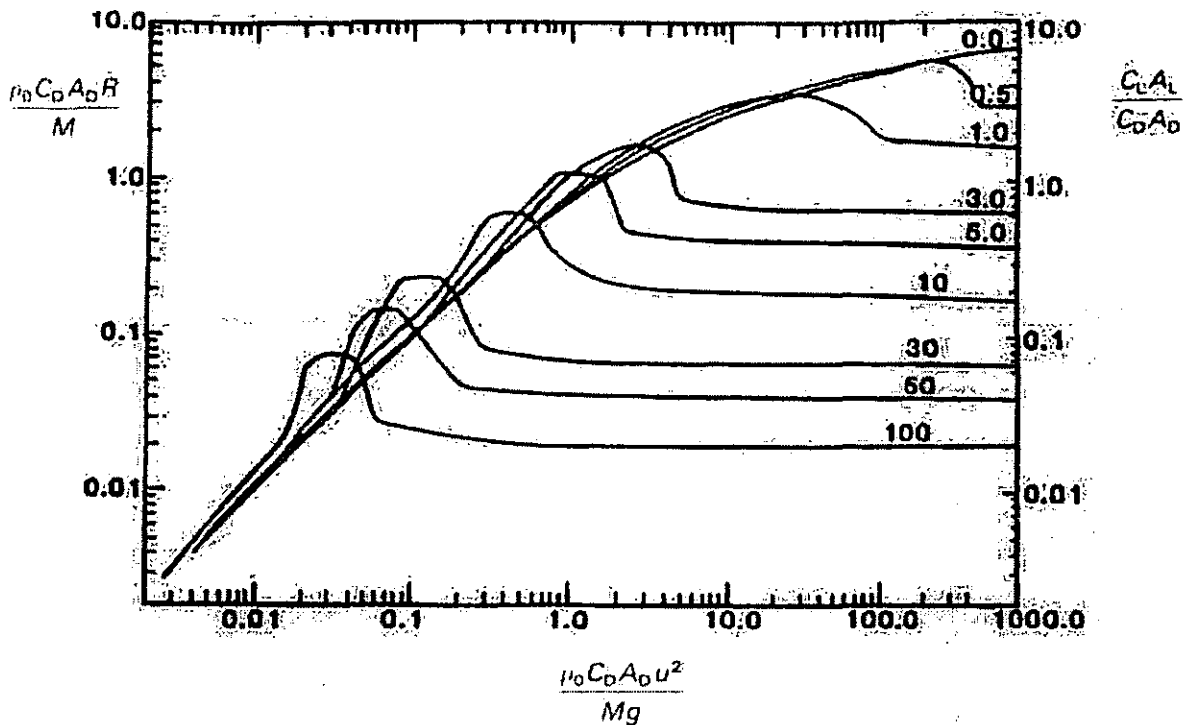
FORMA	ESQUEMA	$C_D$
Cilindro circular recto (barra larga), de lado		1.20
Esfera		0.47
Barra, en punta		0.82
Disco, de frente		1.17
Cubo, de frente		1.05
Cubo, en el borde		0.80
Miembro rectangular largo, de frente.		2.05
Miembro rectangular largo, en el borde		1.55
Cinta delgada, de frente		1.98

Figura 4.3.8. Coeficiente de arrastre,  $C_D$ , para diferentes formas<sup>(16)</sup>.



- $\rho_0$  = densidad del aire,  $lb_m / ft^3$
- $C_D$  = coeficiente de arrastre
- $A_D$  = área expuesta del fragmento,  $ft^2$
- $R$  = alcance máximo del fragmento,  $ft$
- $M$  = masa del fragmento,  $lb_m$
- $u$  = velocidad del fragmento,  $ft / s$
- $g$  = constante gravitacional,  $32.17 ft - lb_m / lb_f - s^2$

Figura 4.3.9. Alcance escalado del fragmento vs fuerza escalada<sup>(16)</sup>.

Un método alternativo simplificado para calcular la velocidad inicial es por medio de la ecuación de Moore<sup>(20)</sup>:

$$u = 2.05 \left( \frac{P D^3}{W} \right)^{0.5} \quad (4.3.9)$$

Donde:

- $u$  = velocidad inicial,  $ft/s$
- $P$  = presión de ruptura,  $psig$
- $D$  = diámetro del fragmento,  $in$
- $W$  = peso del fragmento,  $lb$

- h) El siguiente paso es estimar la relación elevación/arrastre,  $C_L A_L / C_D A_D$ , para el fragmento. Para fragmentos cortos y gruesos, una suposición razonable es considerar  $C_L A_L / C_D A_D = 0$ . El valor de  $C_D$  se selecciona de la figura 4.3.8, y con la figura 4.3.9 se puede estimar el rango máximo,  $R$ .

Una formula simple que se puede utilizar como alternativa para estimar la distancia segura de una explosión es<sup>(21)</sup>:

$$r = 120 w^{1/3} \quad (4.3.10)$$

Donde:

r = distancia, m

w = peso de TNT, kg.

La figura 4.3.10 muestra la secuencia del modelo de una ruptura catastrófica de un recipiente presurizado lleno de gas.

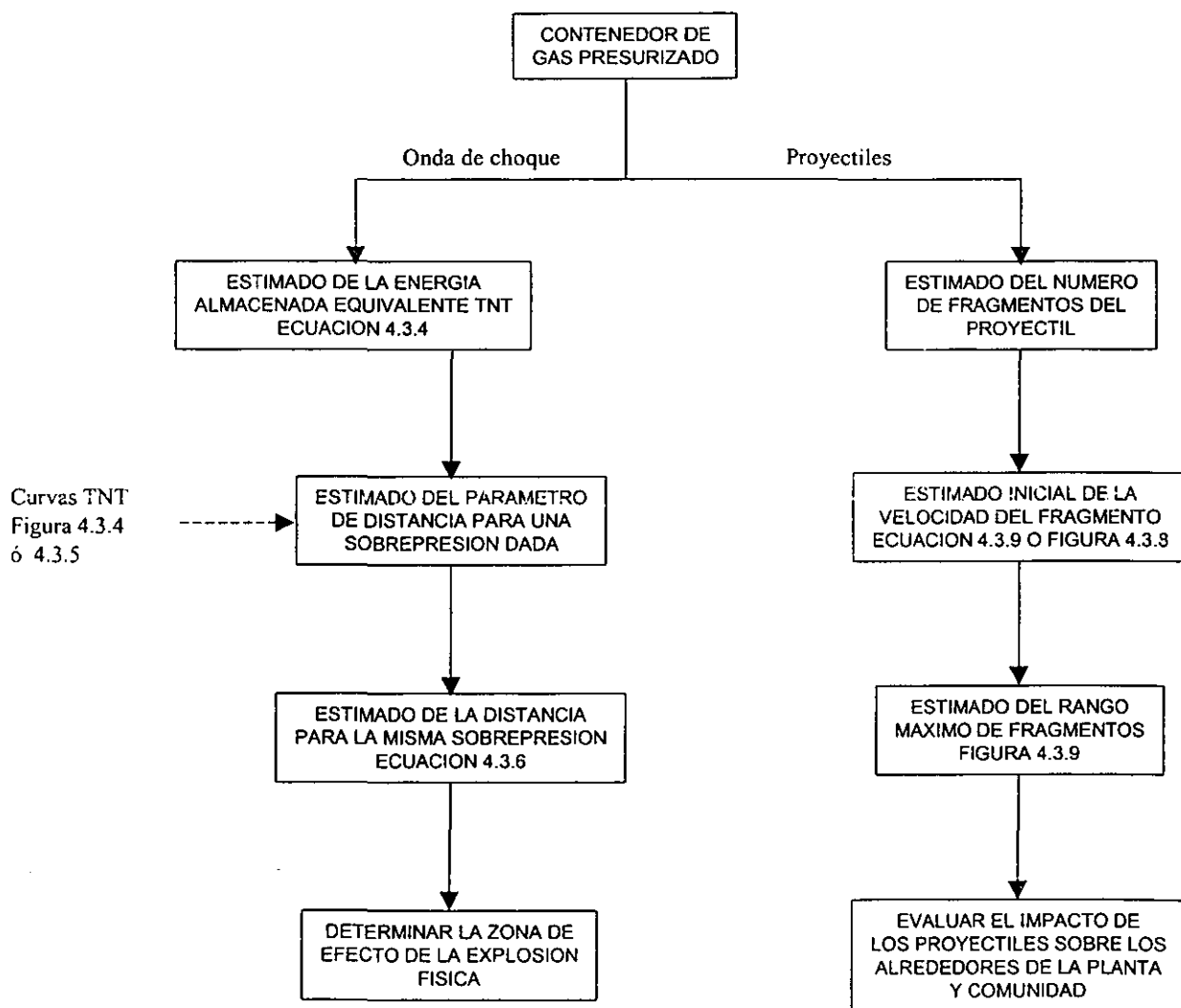


Figura 4.3.10. Diagrama lógico para el cálculo de los efectos de onda de choque y proyectil para la ruptura de un contenedor presurizado lleno de gas.

### 4.3.3. Explosión de vapor por expansión de un líquido en su punto de ebullición (BLEVE)<sup>(1)(3)(4)(15)</sup>.

Un caso especial de ruptura catastrófica de un recipiente a presión es un BLEVE, la cual ocurre cuando hay una liberación repentina a la atmósfera de la masa de un líquido sobrecalentado presurizado. Usualmente, la causa primaria es un calentamiento externo sobre el cuerpo del recipiente por arriba del nivel de líquido, debilitando el contenedor y provocando una falla en la soldadura del cuerpo. Una válvula de desfogue no protege contra este tipo de falla. Sin embargo, una BLEVE puede ocurrir debido a cualquier mecanismo que resulte en la falla repentina del contenedor, que permita un sobrecalentamiento del líquido provocando un flasheo e incrementando su volumen 200 veces. Esto es suficiente para generar una onda de presión y fragmentación. Si el líquido liberado es inflamable, se produce fuego.

Método.

- El primer paso es la determinación de la presión y fragmentación (sección 4.3.2). Para materiales inflamables también se debe considerar la predicción de la intensidad térmica producida por fuego.
- Los efectos de presión usualmente están limitados en magnitud, y es de interés primario para la predicción del efecto dominó en recipientes adyacentes, en lugar del daño a comunidades vecinas.
- La predicción de los efectos por fragmentos también es importante, ya que muchas muertes y daños por efectos dominó se atribuyen a fragmentos. Los fragmentos no se distribuyen uniformemente, la dirección del eje axial del recipiente recibe mas fragmentos que en los lados. El número total de fragmentos es una función aproximada del tamaño del recipiente, la siguiente correlación está basada en siete accidentes:

$$\text{Número de fragmentos} = -3.77 + 0.0096 \left[ \text{capacidad del recipiente} (m^3) \right] \quad (4.3.11)$$

Rango de validación: 700 - 2500 m<sup>3</sup>

- Para estimar los parámetros físicos de la BLEVE se usan las siguientes formulas:

$$\text{diámetro máximo del área incandescente (m)} \quad D_{max} = 6.48M^{0.325} \quad (4.3.12)$$

$$\text{duración del fuego (s)} \quad t_{BLEVE} = 0.825M^{0.26} \quad (4.3.13)$$

$$\text{altura del centro del área incandescente (m)} \quad H_{BLEVE} = 0.75D_{max} \quad (4.3.14)$$

$$\text{nivel inicial del terreno del diámetro del hemisferio (m)} \quad D_{inicial} = 1.3D_{max} \quad (4.3.15)$$

Donde:

M = masa inicial del líquido inflamable (kg)

- La radiación recibida por un blanco (para la duración del accidente BLEVE) está dada por la formula

$$Q_R = \tau E F_{21} \quad (4.3.16)$$

Donde:

$Q_R$  = radiación recibida por un cuerpo negro (kW/m<sup>2</sup>)

$\tau$  = transmisividad (adimensional)

E = flujo emitida en la superficie (kW/m<sup>2</sup>)

$F_{21}$  = factor de vista (adimensional)

La transmisividad atmosférica es un factor importante, ya que la radiación térmica es absorbida y dispersada por la atmósfera, por lo tanto esto causa una reducción en la radiación recibida en el blanco localizado.

La siguiente correlación toma en cuenta la humedad.

$$\tau = 2.02(P_w X)^{-0.09} \quad (4.3.17)$$

Donde:

$\tau$  = transmisividad atmosférica (fracción de energía transmitida: 0 a 1)

$P_w$  = presión parcial del agua (Pascal, N/m<sup>2</sup>)

$X$  = longitud de la trayectoria, distancia de la superficie de la flama al blanco (m)

- f) La radiación térmica se calcula usando el flujo emitido en la superficie,  $E$ . La siguiente ecuación se utiliza para estimar el flujo de calor en la superficie basado en la fracción de radiación del calor total de combustión:

$$E = \frac{F_{rad} M H_c}{\pi (D_{max})^2 t_{BLEVE}} \quad (4.3.18)$$

Donde:

$E$  = flujo emitido en la superficie (kW/m<sup>2</sup>)

$M$  = masa del LPG en la BLEVE (kg)

$H_c$  = calor de combustión (kJ/kg)

$D_{max}$  = diámetro máximo del fuego (m)

$F_{rad}$  = fracción de la radiación, valor típico de 0.25 - 0.40.

$t_{BLEVE}$  = duración del fuego (s)

- g) En los efectos de una BLEVE, principalmente relacionado a lesiones humanas, se debe usar un factor de vista geométrica para una esfera.

$$F_{21} = \frac{D^2}{4x^2} \quad (4.3.19)$$

Donde:

$F_{21}$  = factor de vista entre la esfera y la superficie del blanco.

$D$  = diámetro de la esfera (m)

$x$  = distancia desde el centro de la esfera al blanco (m)

Una vez que la radiación recibida está calculada, los efectos se pueden determinar en la sección 4.5.2.

- h) La figura 4.3.11 muestra la secuencia de cálculo para determinar la onda de choque, efectos térmicos y por fragmentación en un BLEVE de un material inflamable.

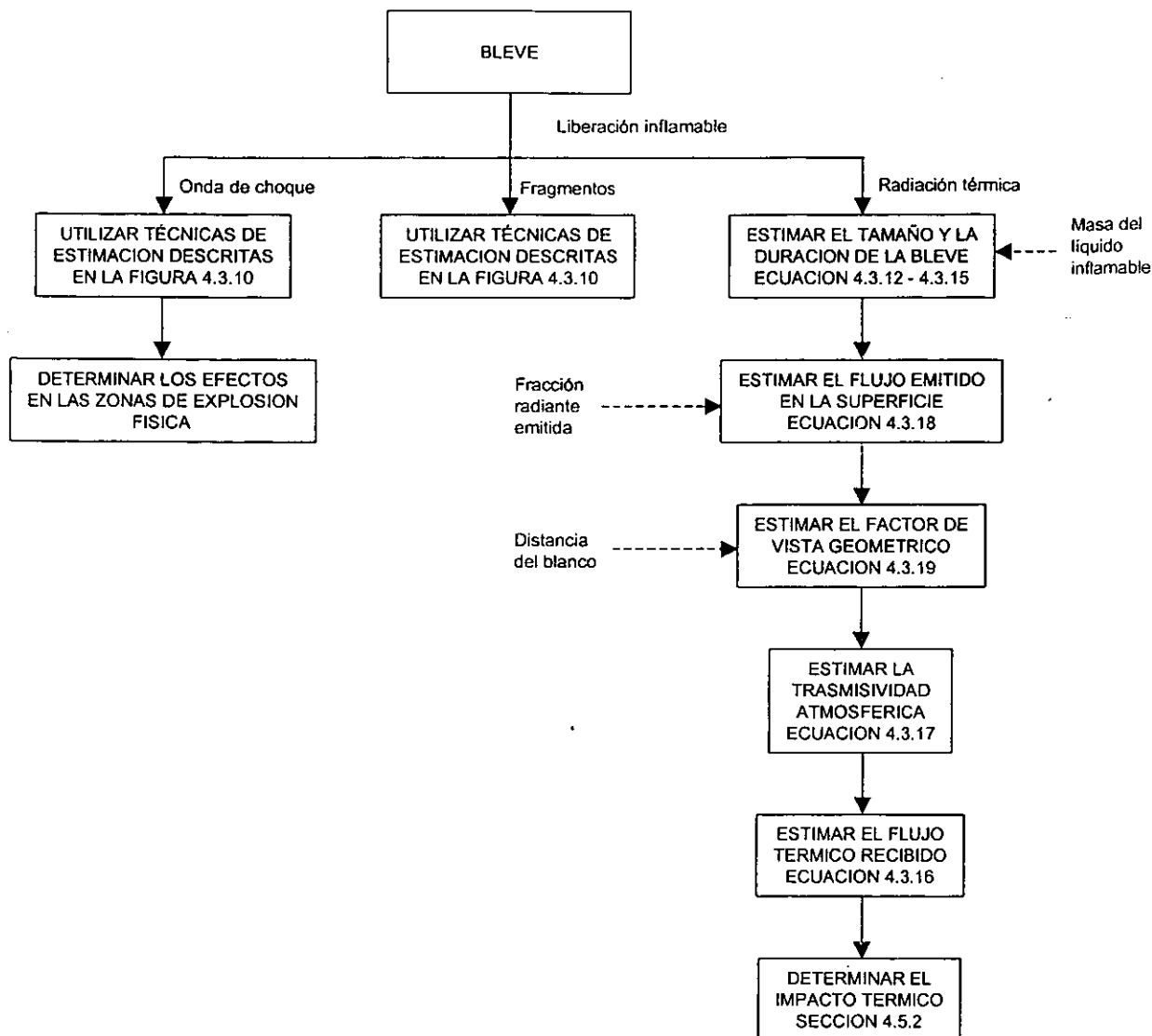


Figura 4.3.11. Diagrama lógico para el cálculo de la explosión físico e intensidad térmica en un BLEVE.

#### 4.3.4. Explosión confinada<sup>(1)(3)(4)(15)</sup>.

Las explosiones confinadas incluyen deflagración u otras fuentes de rápida reacción química que se encuentran contenidas dentro de recipientes y construcciones. Las explosiones por polvo orgánico y las explosiones de vapor dentro de contenedores de baja resistencia, es una categoría principal de explosión confinada. Otra categoría de explosión confinada son las reacciones de combustión, descomposición térmica y las reacciones no controladas dentro de recipientes y equipos de proceso. La explosión de una mezcla inflamable en un recipiente de proceso o tubería, puede ser del tipo deflagración o detonación. Una deflagración es un proceso de combustión a baja velocidad, pero puede experimentar una transición a detonación. La transición a detonación generalmente ocurre en tuberías, y se considera improbable que ocurra en recipientes de proceso.

Para determinar las zonas de afectación para niveles de sobrepresión de interés se siguen los siguientes pasos:

- Determinar la presión máxima. De acuerdo al código ASME la presión mínima de explosión en un recipiente es al menos cuatro veces la presión de trabajo máxima permisible (MAWP).
- Deflagraciones. La siguiente ecuación se utiliza para estimar la máxima presión que se da en un recipiente esférico, para deflagraciones de mezclas de gas inflamable<sup>(22)</sup>.

$$\frac{P_{2(max)}}{P_1} = \frac{n_2 T_2}{n_1 T_1} = \frac{PM_1 T_2}{PM_2 T_1} \quad (4.3.20)$$

Donde:

$PM_1$  = peso molecular de la mezcla de gas en las condiciones iniciales, kg/kg<sub>mol</sub>.

$PM_2$  = peso molecular de la mezcla de gas en las condiciones finales, kg/kg<sub>mol</sub>.

$n_1$  = número de moles en la fase gas a las condiciones iniciales.

$n_2$  = número de moles en la fase gas a las condiciones finales.

$T_1$  = temperatura absoluta inicial de la fase gas, (°K).

$T_2$  = temperatura absoluta final de la fase gas, (°K)

$P_1$  = presión inicial de la mezcla de gas, (N/m<sup>2</sup>).

$P_{2(max)}$  = presión máxima de la mezcla de gas a las condiciones de estado finales, (N/m<sup>2</sup>).

Basado en datos experimentales y las relaciones desarrolladas por Zebetakis<sup>(22)</sup>, la máxima presión que se origina en la mayoría de las deflagraciones es típicamente:

$$\frac{P_{2(max)}}{P_1} = 8 \quad \text{para mezclas de hidrocarburos-aire.} \quad (4.3.21)$$

$$\frac{P_{2(max)}}{P_1} = 16 \quad \text{para mezclas de hidrocarburos-oxígeno.} \quad (4.3.22)$$

NFPA 68<sup>(23)</sup> presenta la siguiente relación para estimar la velocidad del incremento de la presión para una deflagración.

$$\left( \frac{dP}{dt} \right)_{max} (V^{1/3}) = K_c \quad (4.3.23)$$

Donde:

$\left( \frac{dP}{dt} \right)_{max}$  = máxima velocidad de presión, (bar/s).

$V$  = volumen del recipiente, (m<sup>3</sup>)

$K_c$  = constante (depende del material inflamable), (bar-m/s).



SFPE/NFPA<sup>(23)(36)</sup> presenta los siguientes datos experimentales para gases seleccionados los cuales están involucrados en deflagraciones de recipientes cerrados (la presión inicial es de 1 bar).

Gas inflamable	$P_{max}$ (bar)	$K_c$ (bar-m/s)
Butano	8.0	92
Etano	7.8	106
Etilbenceno	6.6	94
Etileno	8.0	150
Hidrogeno	6.9	660
Metano	7.05	64
Pentano	7.65	104
Propano	8.30	70 - 165

- c) Detonación. La teoría de detonación puede ser usada para predecir las propiedades de la presión pico y la onda de choque. La presión pico para una detonación en un contenedor, el cual inicialmente está a la presión atmosférica, puede ser cerca de 20 bar. Esta presión puede ser mucho más grande si se refleja contra una superficie sólida<sup>(24)</sup>.

$$\frac{P_{2(max)}}{P_1} = 20 \quad (4.3.24)$$

Lees<sup>(24)</sup> presenta la siguiente lista parcial de sustancias que son capaces de alcanzar detonación en una mezcla de gas y aire.

Acetona	Dietil eter
Acetileno	Etileno
Benceno	Hidrogeno
Tetracloruro de carbono	Metano
Cloroformo	Metanol
Ciclohexano	Naftaleno
n-Decano	Tricloroetileno

- d) El diagrama lógico para el modelado de una explosión confinada se muestra en la figura 4.3.12.

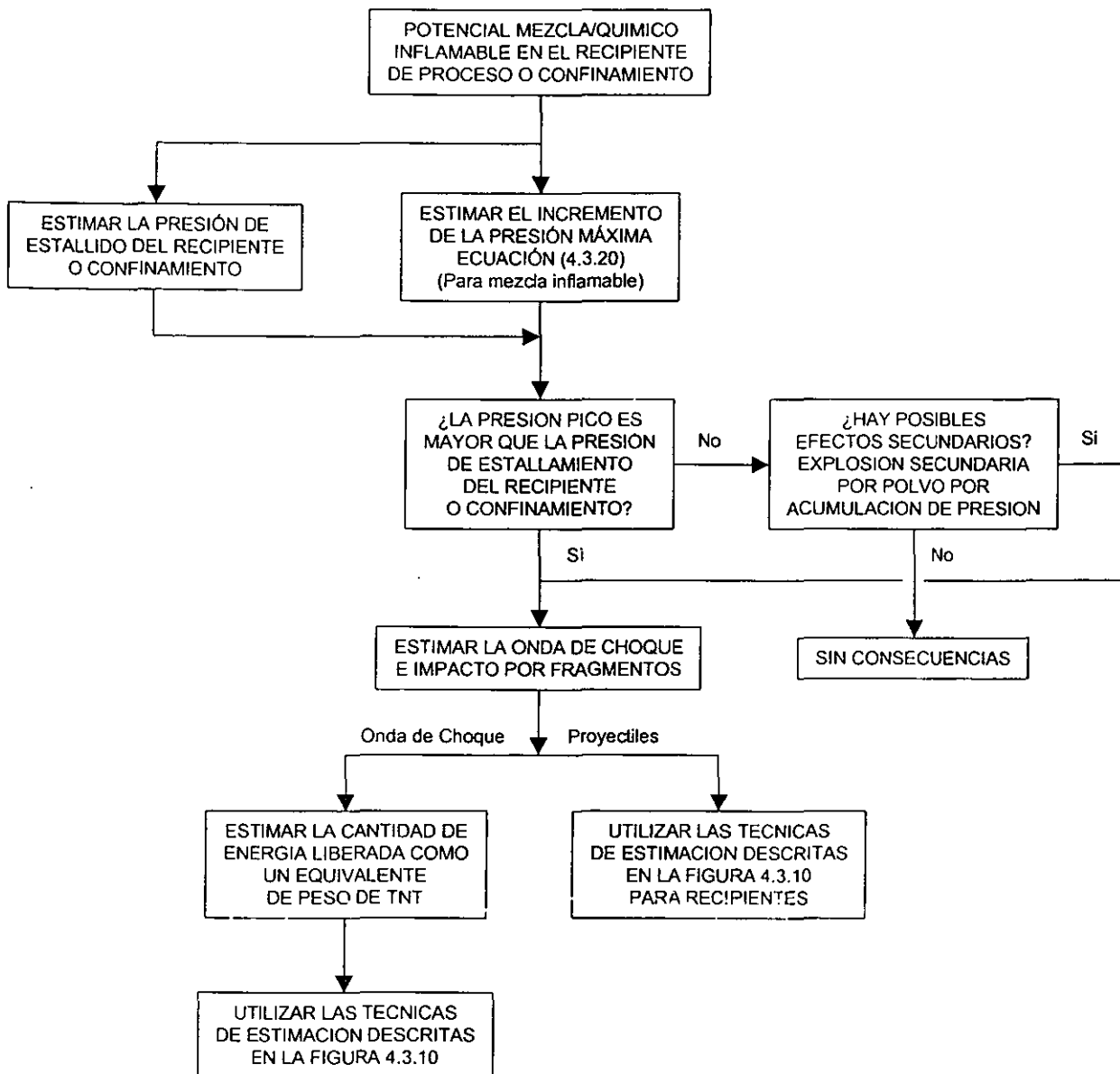


Figura 4.3.12. Diagrama lógico para el análisis de explosión confinada.

#### 4.4. Modelos de fuego<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Los accidentes que involucran fuego han ocurrido desde que el hombre comenzó a usar líquidos o gases inflamables.

La probabilidad de dichos accidentes puede ser reducida por diseño del proceso aplicando ingeniería de confiabilidad la cual puede estar de acuerdo o exceder las practicas de los códigos de ingeniería. Estas practicas incluyen dispositivos de relevo de presión y sistemas de corte bien diseñados, adecuados programas de mantenimiento e inspección, manejo de factores humanos en el diseño de los sistemas, desarrollo de la administración del riesgo, etc.

No obstante, a pesar de todas estas precauciones, los accidentes pueden ocurrir, algunas veces resultan en muertes, incapacidades temporales y parciales, daños a las instalaciones, pérdidas de producción, y daños a la reputación en la comunidad.

Los modelos matemáticos para el cálculo de consecuencias de dichos eventos deben ser empleado en orden de apoyar los esfuerzos para mitigar sus consecuencias.

Los elementos esenciales para la combustión se muestran en la siguiente figura.

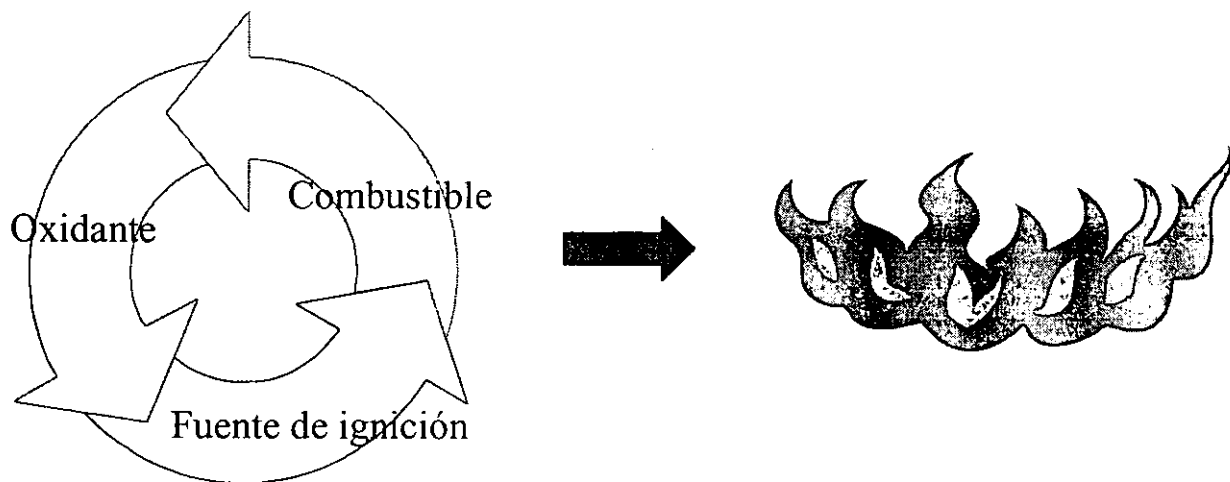
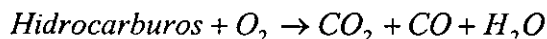


Figura 4.4.1. Elementos esenciales para llevar a cabo la combustión.

La combustión es la rápida oxidación exotérmica de un combustible que está en contacto con una fuente de ignición. La reacción que tiene lugar durante la combustión de hidrocarburos es:



El combustible puede estar en estado sólido, líquido o vapor. La combustión siempre ocurre en la fase vapor; los líquidos se volatilizan y los sólidos son descompuestos en vapor.

Combustibles.

Líquidos: Gasolinas, acetona, eter, pentano.

Sólidos: Plásticos, madera, fibras.

Gases: Acetileno, propano, monóxido de carbono, hidrógeno.

Oxidantes.

Líquidos: Peróxido de hidrógeno, ácido nítrico, ácido perclórico.

Sólidos: Peróxido de metal, nitrito de amonio.

Gases: Oxígeno, flúor, cloro.

Fuentes de ignición.

Chispas, flamas, electricidad estática, calor.

## Características de inflamabilidad de líquidos y vapores.

### 1 Líquidos:

- a) Punto de vaporización. El punto de vaporización de un líquido, es la temperatura más baja donde se origina bastante vapor para formar una mezcla combustible con aire.

### 2 Vapores:

- a) Límites de inflamabilidad o explosividad de mezclas combustible

Las mezclas aire - combustible solamente se encenderán y quemarán dentro de un rango específico de composición. La mezcla no se quemará cuando la composición es más baja que el límite inferior de inflamabilidad ó explosividad (LFL). La mezcla no es combustible cuando la composición está por encima del límite superior de inflamabilidad o explosividad (UFL). Una mezcla es inflamable solamente cuando la composición está entre el LFL y el UFL. Estos límites de inflamabilidad ó explosividad son determinados experimentalmente. Para mezclas estos límites pueden ser calculados a partir de la ecuación de Le Chatelier.

$$LFL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{LFL_i}} \quad (4.4.1)$$

Donde:

$LFL_i$  = límite inferior de inflamabilidad del componente  $i$  expresado en % en volumen del componente  $i$  en combustible y aire.

$y_i$  = fracción mol del componente  $i$  en el combustible.

$n$  = número de componentes en el combustible.

Similarmente.

$$UFL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{UFL_i}} \quad (4.4.2)$$

Donde:

$UFL_i$  = límite superior de inflamabilidad del componente  $i$  expresado en % en volumen del componente  $i$  en combustible y aire.

Para algunas situaciones puede ser muy necesario estimar los límites de inflamabilidad más allá de datos experimentales. Estos son fácilmente medibles: la determinación experimental es siempre recomendada.

Jones estableció que para muchos vapores de hidrocarburos los LFL y UFL son función de la concentración estequiométrica (CESTQ) del combustible.

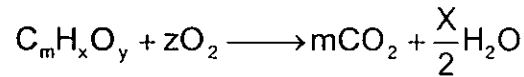
$$LFL = 0.55 C_{ESTQ}$$

$$UFL = 3.50 C_{ESTQ}$$

Donde :

$C_{ESTQ}$  : es % volumen de combustible de la mezcla aire - combustible.

La concentración estequiométrica para la mayor parte de orgánicos es determinada, usando la reacción general de combustión.



$$\text{donde LFL} = \frac{0.55(100)}{4.76m + 1.19x - 2.38y + 1}$$

$$\text{y UFL} = \frac{3.50(100)}{4.76m + 1.19x - 2.38y + 1}$$

b) Concentración mínima de oxígeno (MOC) e inertizado.

El oxígeno es el ingrediente clave y hay una concentración mínima de oxígeno requerida para propagar la flama. Esto resulta especialmente aplicable porque las explosiones y fuegos se pueden prever reduciendo la concentración de oxígeno independientemente de la concentración del combustible (inertizado).

$$MOC = \left( \frac{\text{moles de combustible}}{\text{moles de combustible} + \text{moles de aire}} \right) \left( \frac{\text{moles de } O_2}{\text{moles de combustible}} \right)$$

$$MOC = LFL \left( \frac{\text{moles de oxígeno}}{\text{moles de combustible}} \right)$$

c) Energía de ignición

La energía mínima de ignición (MIE) es la energía mínima requerida para iniciar la combustión. La MIE depende de la composición de la mezcla, la concentración, presión y temperatura.

Datos experimentales indican que:

- La MIE disminuye con un incremento de presión.
- La MIE de polvos en general es comparable a la de gases combustibles.
- Un incremento en la concentración de nitrógeno incrementa la MIEs.

Muchos hidrocarburos tienen MIEs de cerca de 0.25 mJ. Este es bajo comparado con fuentes de ignición, por ejemplo, una descarga estática de 22 mJ es generada al caminar a través de una alfombra, una chispa ordinaria de un enchufe descarga una energía de 25 mJ.

Tabla 4.4.1. Energía mínima de ignición<sup>(22)</sup>

Combustible	Presión (atm)	Energía mínima ( mJ )
Metano	1	0.29
Propano	1	0.26
Heptano	1	0.25
Hidrogeno	1	0.03

**Tabla 4.4.1.** Energía mínima de ignición<sup>(22)</sup> (continuación).

Combustible	Presión (atm)	Energía mínima ( mJ )
Propano (% mol )		
1.0	1	0.004
0.5	1	0.012
0.21	1	0.150
1.0	0.5	0.01
Polvos de almidón de maíz		0.3
Polvos de hierro		0.12

d) Autoignición

La Temperatura de Autoignición de un vapor (AIT), llamado también ignición espontánea (SIT), es la temperatura a la cual el vapor se enciende espontáneamente en el medio ambiente.

**Tabla 4.4.2.** Características de inflamabilidad de líquidos y gases<sup>(25)</sup>.

COMPUESTO	PUNTO FLASH (°F)	LFL % EN AIRE	UFL % EN AIRE	TEMPERATURA DE AUTOIGNICION, AIT (°F)
ACETONA	0.0*	2.5	13	1000
ACETILENO	GAS	2.5	100	
ACROLEINA	-14.8	2.8	31	
ACRILONITRILO	32	3.0	17	
ANILINA	158	1.3	11	
BENCENO	12.0**	1.3	7.9	1044
BUTANO	-76	1.6	8.4	761
CLOROBENCENO	85**	1.3	9.6	1180
CICLOHEXANO	-1	1.3	8	473
DIBORANO	GAS	0.8	88	
DIOXANO	53.6	2.0	22	
ETANO	-211	3.0	12.5	959
ALCOHOL ETILICO	55	3.3	19	793
ETILENO	GAS	2.7	36.0	914
OXIDO DE ETILENO	-20*	3.0	100	800
ETER ETILICO	-49.0**	1.9	36.0	180
FORMALDEHIDO		7.0	73	
GASOLINA	-45.4	1.4	7.6	
HEPTANO	24.8	1.1	6.7	
HEXANO	-15	1.1	7.5	500
HIDROGENO	GAS	4.0	75	1075

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

**Tabla 4.4.2.** Características de inflamabilidad de líquidos y gases<sup>(25)</sup> (continuación).

COMPUESTO	PUNTO FLASH (°F)	LFL % EN AIRE	UFL % EN AIRE	TEMPERATURA DE AUTOIGNICION, AIT (°F)
ALCOHOL ISOPROPILICO	53*	2.0	12	850
ETER ISOPROPILICO	0	1.4	7.0	830
METANO	-306	5	15	1000
ACETANO DE METIL	15	3.1	16	935
ALCOHOL METILICO	54*	6	36	867
CLORURO DE METILO	32	8.1	17.4	1170
METIL ETIL CETONA	24*	1.4	11.4	960
METIL ISOBUTIL CETONA	73	1.2	8.0	860
METIL METACRILATO	50*	1.7	8.2	790
METIL PROPILCETONA	45	1.5	7.2	941
NAPHTHA	-57	1.2	6.0	550
OCTANO	55.4	1.0	6.5	
MONOXIDO DE CARBONO	GAS	12.5	74	
PENTANO	-40	1.51	7.8	588
FENOL	174	1.8	8.6	
PROPANO	GAS	2.1	9.5	
PROPILENO	-162	2.0	11.1	927
DICLORURO DE PROPILENO	61	3.4	14.5	1035
OXIDO DE PROPILENO	-35	2.3	36	869
ESTIRENO	87**	1.1	7.0	914
TOLUENO	40	1.2	7.1	997

\* PUNTO DE FLASHEO CON COPA ABIERTA.

\*\*PUNTO DE FLASHEO CON COPA CERRADA.

e) Compresión adiabática.

Un medio adicional de ignición es la compresión adiabática. Por ejemplo, gasolina y aire en el cilindro de un automóvil se encenderá si los vapores son comprimidos a una temperatura adiabática la cual excede la temperatura de Autoignición.

Para un gas ideal se puede aplicar la ecuación de compresión adiabática.

$$T_f = T_i \left( \frac{P_f}{P_i} \right)^{\left( \frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (4.4.3)$$

f) Fuentes de ignición.

La meta es eliminar o minimizar las fuentes de ignición, la probabilidad de rapidez con que se presente un fuego o explosión es incrementada con el número de fuentes de ignición. El esfuerzo requerido se incrementa significativamente con el tamaño de la planta, las fuentes potenciales de ignición pueden ser miles.

**Tabla 4.4.3.** Fuentes de ignición de fuegos mayores<sup>(25)</sup>.

	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA
Eléctrica (alambrado de motores)	23%
Fumar	8%
Fricción	10%
Materiales a altas temperaturas	8%
Flamas de quemadores	7%
Chispas de combustión (chispas, brazas)	5%
Ignición espontanea (basura)	4%
Cortar y soldar (chispas, arcos, calor, etc.)	4%
Chispas estáticas (liberación de energía acumulada)	1%
Rayo (donde los pararrayos no son usados )	1%
Chispas estáticas	1%

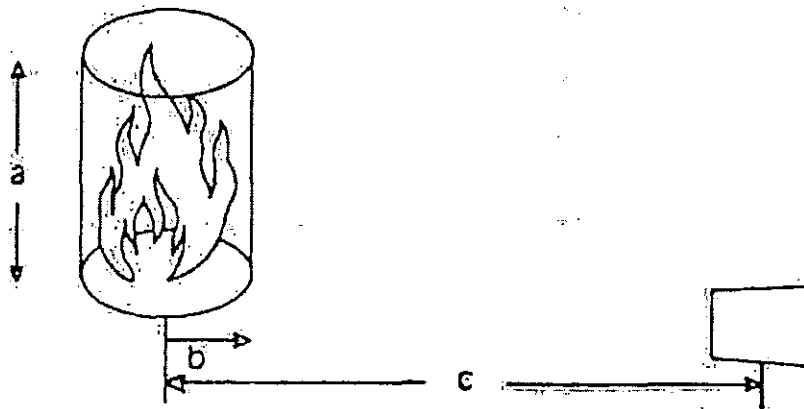
#### 4.4.1. Modelos para fuego tipo alberca (Pool Fire)<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Cuando líquido inflamable es liberado de un tanque de almacenamiento o tubería, se puede formar una alberca de líquido. Conforme la alberca se forma, parte del líquido se evaporara y si la nube de vapor se pone en contacto con una fuente de ignición puede ocurrir un fuego tipo alberca.

La radiación térmica de un fuego tipo alberca se usa para estimar los daños potenciales en áreas cercanas a la alberca.

A continuación se da la técnica para el cálculo de fuego tipo alberca (ver diagrama 4.4.2):

a) El fuego tipo alberca se puede representar como un cilindro vertical



a = altura de la flama

b = radio de la flama

c = distancia desde el centro de la flama al objeto



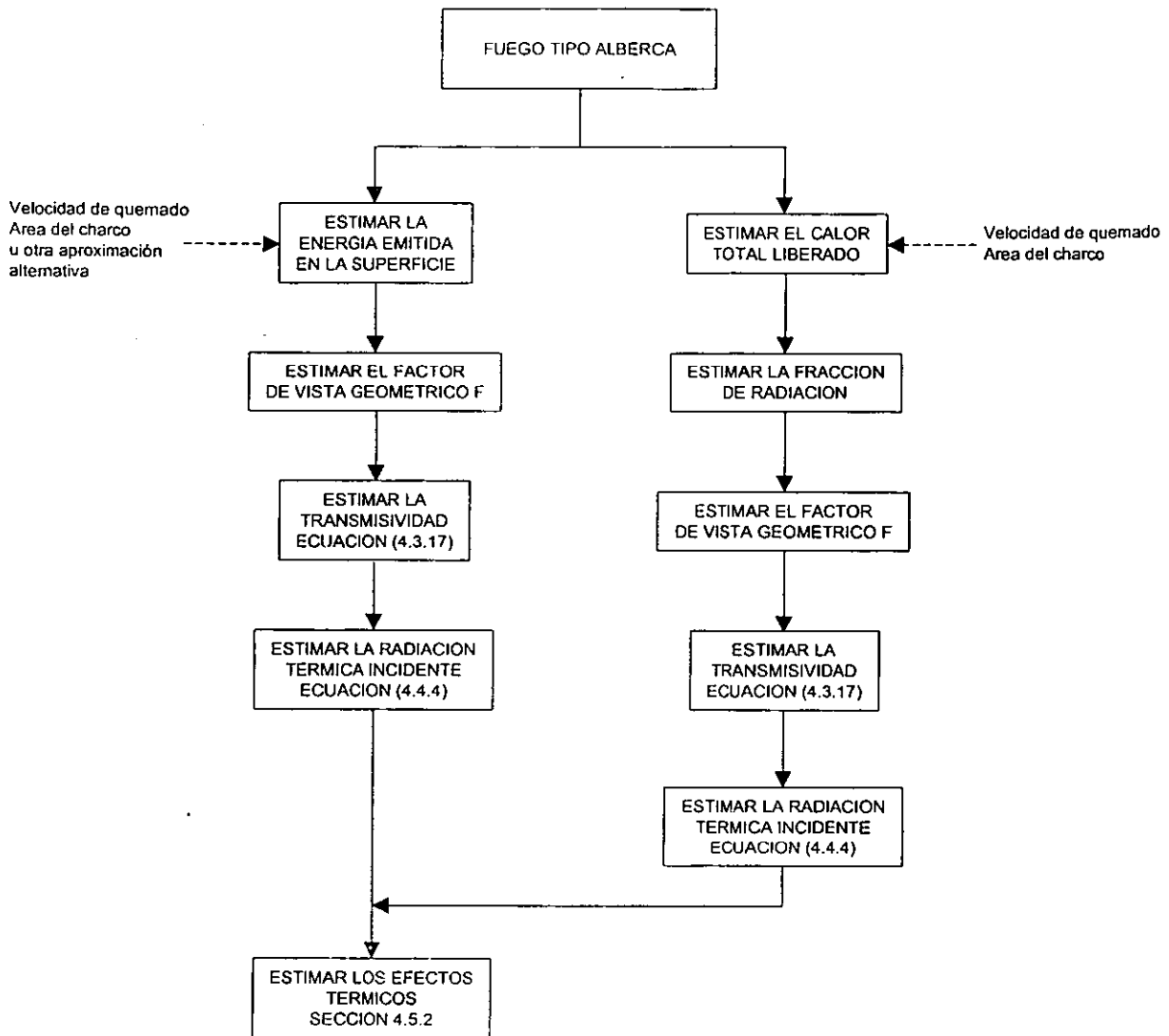


Figura 4.4.2. Diagrama lógico para calcular los efectos de radiación por fuego de alberca.

TNO<sup>(9)</sup> sugiere usar la siguiente aproximación

$$I_{th} = \tau F E_s \quad (4.4.4)$$

Donde:

$I_{th}$  = radiación térmica recibida a la distancia X, (W/m<sup>2</sup>)

$\tau$  = transmisividad atmosférica, (adimensional)

F = factor de vista geométrico, de la superficie de la flama al blanco (adimensional)

$E_s$  = flujo de radiación térmica emitida en la superficie (W/m<sup>2</sup>)

b) Flujo emitido en la superficie  $E_s$ .

Para algunos casos, el flujo emitido en la superficie  $E_s$  se puede determinar de las siguientes curvas.

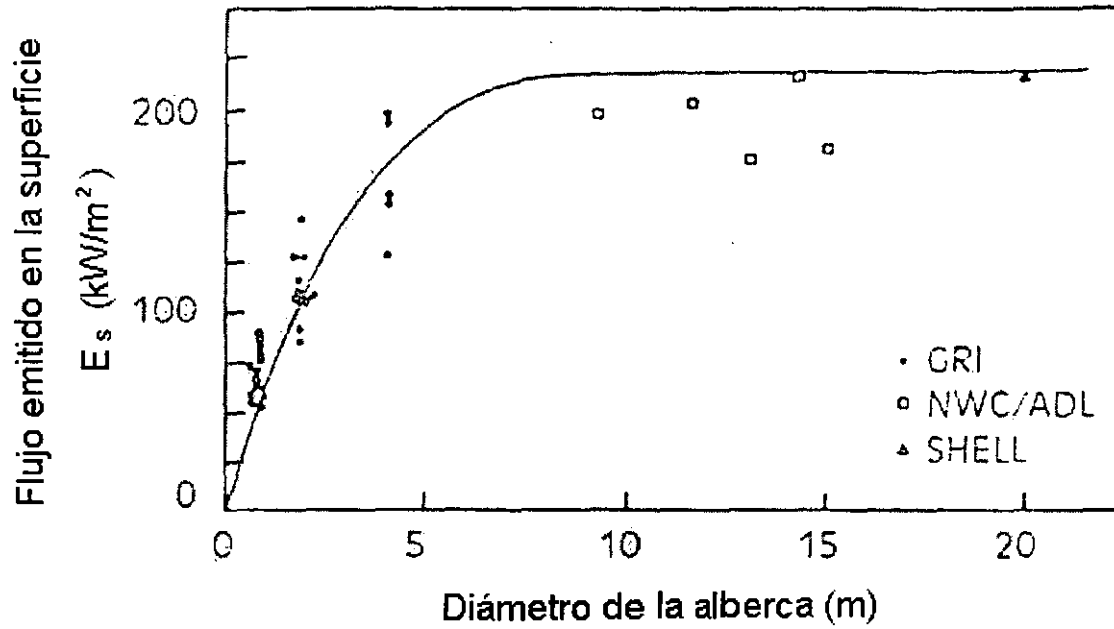


Figura 4.4.3. Curva para determinar el flujo emitido en la superficie  $E_s$  asociado con fuego tipo alberca de gas LN.

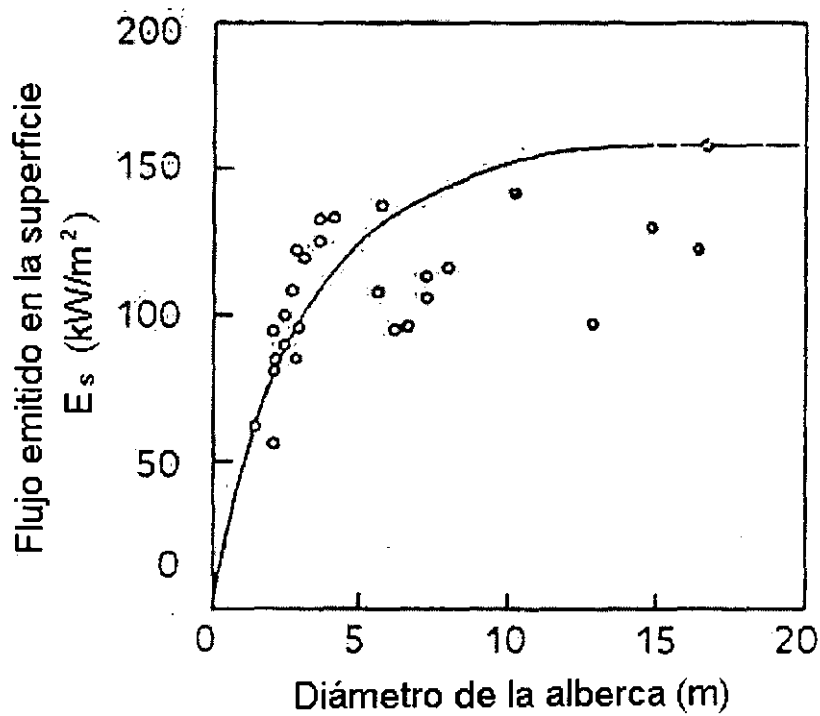
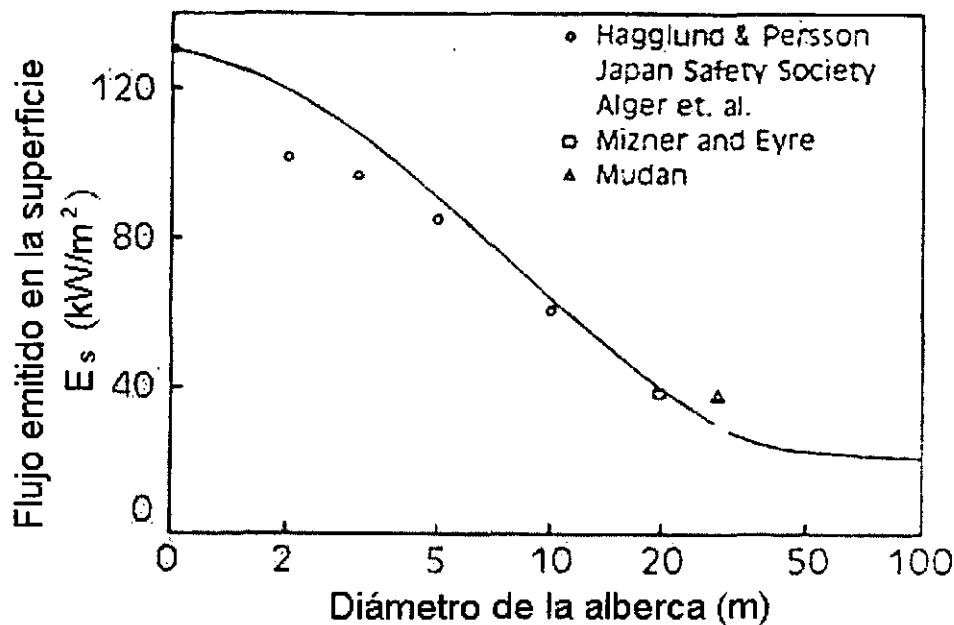


Figura 4.4.4. Curva para determinar el flujo emitido en la superficie  $E_s$  asociado con fuego tipo alberca de gas LP.



**Figura 4.4.5.** Curva para determinar el flujo emitido en la superficie  $E_s$  asociado con gasolina y kerosene.

Otra forma de estimar  $E_s$ , es utilizando la siguiente ecuación<sup>(9)</sup>:

$$E_s = \frac{\beta \dot{m}_b H_c (\pi b^2)}{2\pi b a + \pi b^2} \quad (4.4.5)$$

Donde:

$E_s$  = flujo de radiación térmica emitida en la superficie, (W/m<sup>2</sup>)

$\beta$  = fracción de la radiación de calor total, (adimensional)

$\dot{m}_b$  = velocidad de quemado de la alberca, (kg/m<sup>2</sup>-s)

$H_c$  = calor neto de combustión del líquido, (J/kg)

$a$  = altura de la flama, (m)

$b$  = radio de la alberca, (m)

c) Velocidad de quemado. La velocidad de quemado es la rapidez con que un líquido en una alberca se evapora durante un fuego tipo alberca. La tasa de evaporación depende de dos fuentes:

- Transferencia de calor convectivo y conductivo.
- Transferencia de calor por radiación de la flama.

Para un líquido cuyo punto de ebullición  $T_b$  es mayor a la temperatura atmosférica  $T_a$ , TNO<sup>(9)</sup> recomienda la siguiente ecuación para derrames en tierra.

$$\dot{m}_b = \frac{0.001 H_c}{C_{pl}(T_b - T_a) + \Delta H_v} \quad (4.4.6)$$

Para un líquido cuyo punto de ebullición  $T_b$  es menor a la temperatura atmosférica  $T_a$ , TNO<sup>(9)</sup> recomienda la siguiente ecuación para derrames en tierra.

$$\dot{m}_b = \frac{0.001H_c}{\Delta H_v} \quad (4.4.7)$$

Donde:

$\dot{m}_b$  = velocidad de quemado, (kg/m<sup>2</sup>-s).

$C_{pi}$  = calor específico del líquido que forma la alberca, (J/Kg-K)

$H_c$  = calor neto de combustión del líquido, (J/Kg).

$\Delta H_v$  = calor latente de vaporización del líquido, (J/Kg).

$T_a$  = temperatura del ambiente, (K).

$T_b$  = punto de ebullición del líquido a la presión atmosférica, (K).

Para derrames de hidrocarburos en agua cuyos puntos de ebullición se alcanzan a temperaturas mayores a la atmosférica, la velocidad de quemado se puede estimar mediante la ecuación (4.4.4).

Experimentos a gran escala han demostrado que la velocidad de quemado para derrames de gas natural licuado en agua es típicamente tres veces la velocidad de quemado para derrames en tierra.

La velocidad de quemado para derrames de gas licuado propano en agua es típicamente dos veces la velocidad de quemado para derrames en tierra.

La velocidad de quemado para una mezcla de materiales inflamables se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_b = \sum_{i=1}^N MF_i \dot{m}_{bi} \quad (4.4.8)$$

donde:

$\dot{m}_{bi}$  = velocidad de quemado del componente i.

$MF_i$  = fracción mol del componente i.

N = número total de componentes en la mezcla.

Fuegos de alberca de gran tamaño se queman a una velocidad constante vertical, lo cual es característico de los materiales. El conocimiento de la velocidad de quemado permite estimar la producción de calor por unidad de área y la duración del fuego.

- d) Tamaño del charco. En muchos casos el tamaño del charco es fijado por el tamaño de la emisión y por las barreras físicas locales. Para una fuga continua, sobre un plano infinito, el diámetro máximo se alcanza cuando el producto de la velocidad de quemado y el área de superficie igualan la velocidad de la fuga. Normalmente se considera que el charco es circular; cuando los diques presentan forma cuadrada o rectangular, se toma un diámetro equivalente.
- e) Altura de la flama. Muchas observaciones de fuego de alberca muestran que hay proporción aproximada entre la altura de la flama y el diámetro del charco. La mejor correlación que se conoce para esta relación es<sup>(28)</sup>:

$$a = 84b \left[ \frac{\dot{m}_b}{\rho_a \sqrt{2gb}} \right]^{0.61} \quad (4.4.9)$$

Donde:

$a$  = altura de la flama visible, (m)

$b$  = radio de la alberca, (m)

$\dot{m}_b$  = velocidad de quemado, (kg/m<sup>2</sup>s)

$\rho_a$  = densidad del aire, (1.2 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = aceleración de la gravedad, (9.81 m/s<sup>2</sup>)

La siguiente correlación para la altura de la flama, toma en cuenta la inclinación de la flama.

$$a = 110b \left[ \frac{\dot{m}_b}{\rho_a \sqrt{2gb}} \right]^{0.67} u^{-0.21} \quad (4.4.10)$$

$$u = \frac{u_w}{\left[ \frac{2g\dot{m}_b b}{\rho_v} \right]^{1/3}} \quad \text{para} \quad u_w \geq \left[ \frac{2g\dot{m}_b b}{\rho_v} \right]^{1/3} \quad (4.4.11)$$

$$u = 1 \quad \text{para} \quad u_w < \left[ \frac{2g\dot{m}_b b}{\rho_v} \right]^{1/3} \quad (4.4.12)$$

Donde:

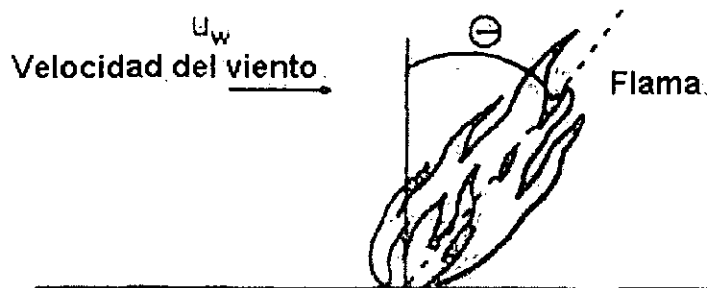
$u$  = velocidad del viento, (adimensional)

$u_w$  = velocidad del viento a una altura de 1.6m, (m/s)

$\rho_v$  = densidad del vapor de la alberca a la temperatura del punto de ebullición, (kg/m<sup>3</sup>)

- f) Inclinación y arrastre de la flama. El fuego tipo alberca frecuentemente se inclina debido al viento, y bajo un viento muy fuerte, la base del fuego puede ser arrastrado viento abajo. Este efecto altera la radiación recibida en los alrededores. El análisis de riesgo puede o no incluir el efecto de inclinación y arrastre, aunque la inclinación de la flama es más importante. Frecuentemente se considera que el fuego de alberca es vertical y su calor de radiación es igual en todas direcciones. Si una estructura vulnerable se localiza cerca y la inclinación de la flama puede afectarla, el Análisis Cuantitativo de Riesgos deberá considerar los efectos de inclinación y combinarlos con la frecuencia apropiada permitida para la dirección de la inclinación.

La siguiente correlación se utiliza para determinar la inclinación de la flama<sup>(27)</sup>:



$$\theta = 0 \quad \text{para} \quad \dot{u} \leq 1 \quad (4.4.13)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\dot{u}} \quad \text{para} \quad \dot{u} > 1 \quad (4.4.14)$$

Donde:

$\dot{u}$  = velocidad del viento sin dimensión, calculada usando la velocidad del viento a una altura de 1.6m y la ecuación (4.4.9), (adimensional)

g) Fracción de radiación de calor total  $\beta$  para un fuego tipo alberca.

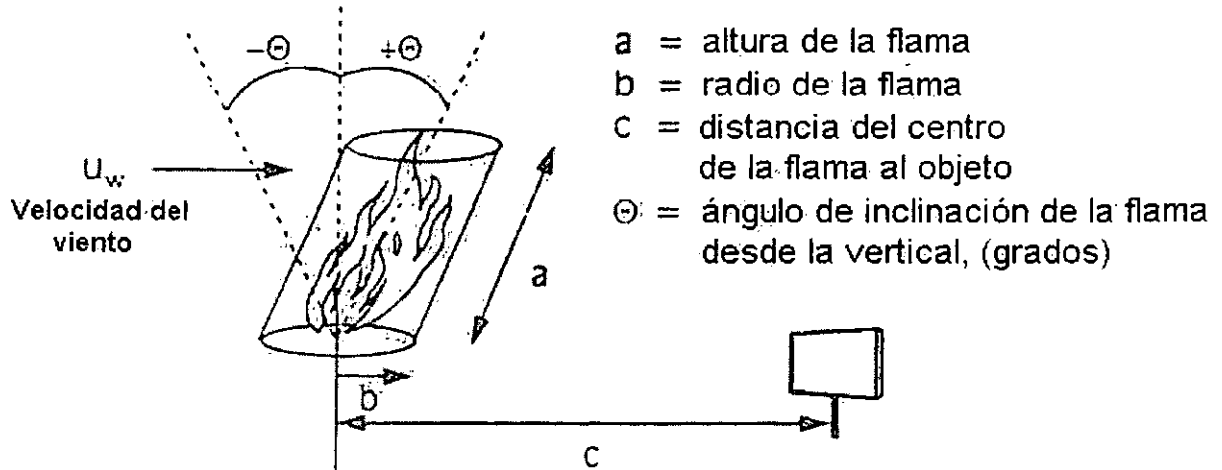
La siguiente tabla muestra datos de la fracción de radiación  $\beta$  para la combustión de diferentes albercas de líquidos<sup>(9)</sup>.

Material	Diámetro de la alberca (cm)	$\beta$
Metanol	7.6	0.162
	15.2	0.165
	122.0	0.170
Metano	30.5	0.21
	76.0	0.23
Gas LNG	153.0	0.15 - 0.24
	305.0	0.24 - 0.34
	610.0	0.20 - 0.27
Butano	30.5	0.199
	45.7	0.205
	76.0	0.269
Gasolina	122.0	0.30 - 0.40
	153.0	0.16 - 0.27
	305.0	0.13 - 0.14
Benceno	7.6	0.35
	45.7	0.345
	76.0	0.35
	122.0	0.36

En el caso de fuego tipo alberca de hidrocarburos, TNO<sup>(9)</sup> recomienda usar un valor conservador para  $\beta$  de 0.35

- h) El factor de vista geométrico toma en cuenta los efectos de la forma de la flama y la localización y orientación de un objeto expuesto a la flama.

TNO<sup>(9)</sup> proporciona el siguiente método para estimar el factor de vista geométrico para fuego tipo alberca modelado como un cilindro vertical.



Factor de vista vertical  $F_v$  (flama sin inclinación) para una superficie vertical al nivel de terreno.

$$F_v = \frac{1}{\pi Y} \tan^{-1} \left( \frac{X}{Y^2 - 1} \right) + \frac{X}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2Y)}{Y \sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{(Y-1)A}}{\sqrt{(Y+1)B}} \right] - \frac{1}{Y} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{(Y-1)}}{\sqrt{(Y+1)}} \right] \right\} \quad (4.4.15)$$

Donde:

$X = a/b$ , (adimensional)

$Y = c/b$ , (adimensional)

$A = (1 + Y)^2 + X^2$

$B = (1 - Y)^2 + X^2$

El resultado de la operación  $\tan^{-1}$  es en radianes, no en grados.

Factor de vista horizontal  $F_h$  (flama sin inclinación) para una superficie horizontal al nivel de terreno.

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{Y+1}}{\sqrt{Y-1}} \right] - \frac{X^2 + (Y+1)(Y-1)}{\sqrt{BA}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(Y-1)}}{\sqrt{B(Y+1)}} \right] \right\} \quad (4.4.16)$$

$\tan^{-1}$  = radianes

Factor de vista vertical  $F_v$  tomando en cuenta la inclinación de la flama (Mudan, 1987).

$$F_v = \frac{X \cos \theta}{Y - X \sin \theta} \frac{X^2 + (Y + 1)^2 - 2Y(1 + X \sin \theta)}{\pi \sqrt{A' B'}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A'(Y-1)}}{\sqrt{B'(Y+1)}} \right] + \frac{\cos \theta}{\pi \sqrt{C'}} \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{XY - (Y^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{Y^2 - 1} \sqrt{C'}} \right] + \tan^{-1} \left[ \frac{\sin \theta \sqrt{Y^2 - 1}}{\sqrt{C'}} \right] \right\} - \frac{X \cos \theta}{\pi(Y - X \sin \theta)} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{Y-1}}{\sqrt{Y+1}} \right] \quad (4.4.17)$$

Donde:

$$A' = X^2 + (Y + 1)^2 - 2 X (Y + 1) \sin \theta$$

$$B' = X^2 + (Y - 1)^2 - 2 X (Y - 1) \sin \theta$$

$$C' = 1 + (Y^2 - 1) \cos^2 \theta$$

$\tan^{-1}$  = radianes

Factor de vista horizontal  $F_h$  tomando en cuenta la inclinación de la flama.

$$F_h = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{Y+1}}{\sqrt{Y-1}} \right] - \frac{X^2 + (Y + 1)^2 - 2(Y + 1 + XY \sin \theta)}{\pi \sqrt{A' B'}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A'(Y-1)}}{\sqrt{B'(Y+1)}} \right] + \frac{\sin \theta}{\pi \sqrt{C'}} \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{XY - (Y^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{Y^2 - 1} \sqrt{C'}} \right] + \tan^{-1} \left[ \frac{\sin \theta \sqrt{Y^2 - 1}}{\sqrt{C'}} \right] \right\} \quad (4.4.18)$$

$\tan^{-1}$  = radianes

Factor de vista geométrico máximo.

$$F = \sqrt{F_v^2 + F_h^2} \quad (4.4.19)$$

Donde:

F = factor de vista geométrico máximo, (adimensional)

$F_v$  = factor de vista vertical, (adimensional)

$F_h$  = factor de vista horizontal, (adimensional)

- i) Transmisividad  $\tau$ . La transmisividad es una medida de la cantidad de radiación de calor que no es absorbido/reflejado por la atmósfera entre el fuego y el objeto expuesto. La magnitud del coeficiente de transmisividad depende principalmente de la cantidad de vapor de agua en el aire, entre el fuego y el objeto expuesto.

La transmisividad se puede estimar de la siguiente ecuación<sup>(1)</sup>

$$\tau = 2.02 (P_w RH X_s)^{-0.09} \quad (4.4.20)$$

Donde:

$\tau$  = transmisividad atmosférica, (adimensional)

$X_s$  = distancia de la superficie de la flama al blanco, (m)

$P_w$  = presión de vapor del agua, (N/m<sup>2</sup>)

$R_H$  = humedad relativa



La siguiente tabla proporciona la presión de vapor saturado  $P_w$  del agua a diferentes temperaturas.

Presión de vapor saturado $P_w$					
Temp °C	presión de vapor (N/m <sup>2</sup> )	Temp °C	Presión de vapor (N/m <sup>2</sup> )	Temp °C	Presión de vapor (N/m <sup>2</sup> )
0	610	18	2060	30	4240
2	705	19	2200	31	4490
4	815	20	2340	32	4760
6	935	21	2490	33	5030
8	1070	22	2640	34	5320
10	1230	23	2810	35	5620
11	1310	24	2980	36	5940
12	1400	25	3170	37	6280
14	1600	26	3360	38	6630
15	1700	27	3570	39	6990
16	1820	28	3780	40	7380
17	1940	29	4000	41	7780

La transmisividad también se puede estimar de la siguiente gráfica:

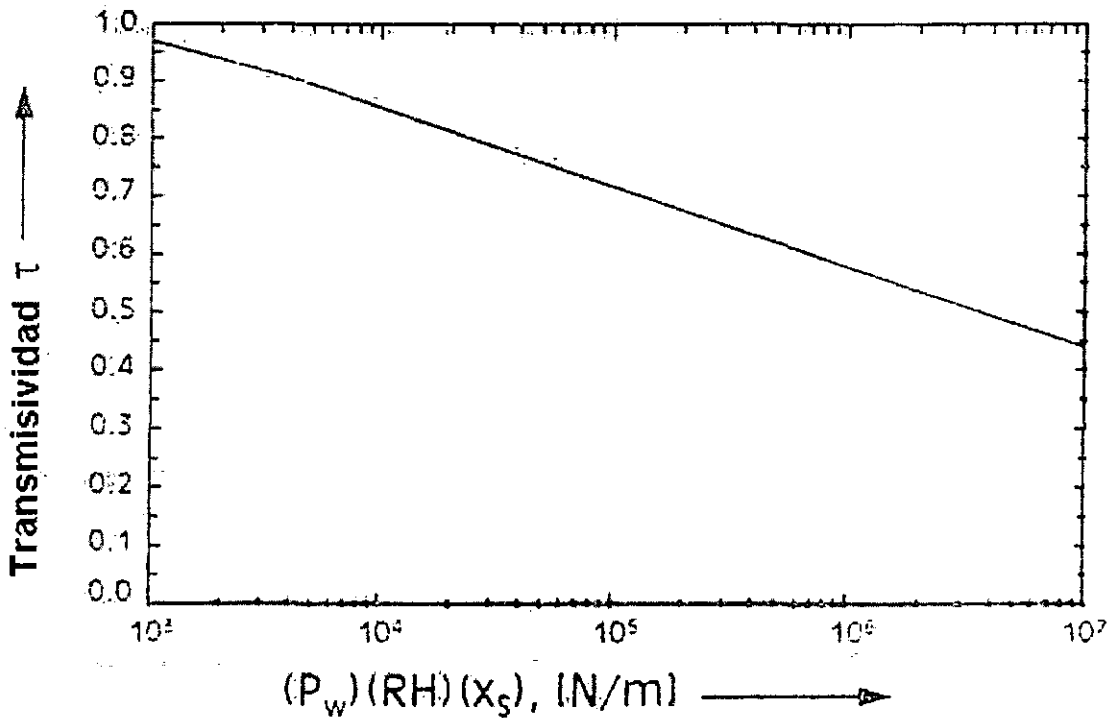


Figura 4.4.5. Transmisividad  $\tau$

j) Consideraciones y limitaciones del modelo de fuego tipo alberca.

- Aplica principalmente para fuego tipo alberca en tierra.
- Supone que no hay obstáculos que impidan el suministro de oxígeno.
- Supone el área de la superficie de la alberca constante.
- Supone que el fuego tipo alberca está bien desarrollado.
- Supone una combustión completa.
- Ignora la reducción en la transmisividad, como resultado del CO<sub>2</sub> y partículas en el aire.

#### 4.4.2. Modelos para chorro de fuego (Jet Fire)<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Si se libera gas comprimido o licuado de tanques de almacenamiento o ductos, el material que se libera a la atmósfera a través de un orificio forma un chorro que se mezcla con el aire. Si el material inflamable encuentra una fuente de ignición puede ocurrir un chorro de fuego (Jet Fire).

Uno de los métodos relativamente simples es el método API 521<sup>(29)</sup>, este método fue desarrollado originalmente para análisis de llamaradas, se basa en la fracción de radiación de la energía total de combustión, la cual se considera que se incrementa desde el punto de emisión hasta la trayectoria del chorro de la flama, figura 4.4.7.

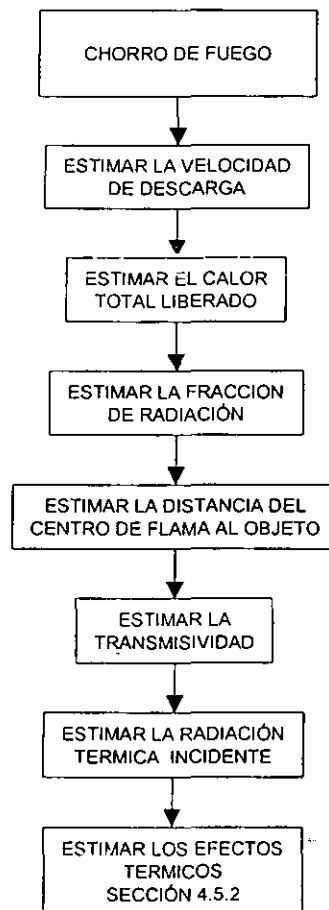


Figura 4.4.7. Diagrama lógico para calcular los efectos de radiación por chorro de fuego.

Metodología API-521

- a) API RP-521<sup>(29)</sup> usa una aproximación por Brzustowski y Sommers (1973) para calcular la radiación térmica.

$$I_{th} = \frac{\tau\beta Q_{th}}{4\pi D^2} \quad (4.4.21)$$

donde:

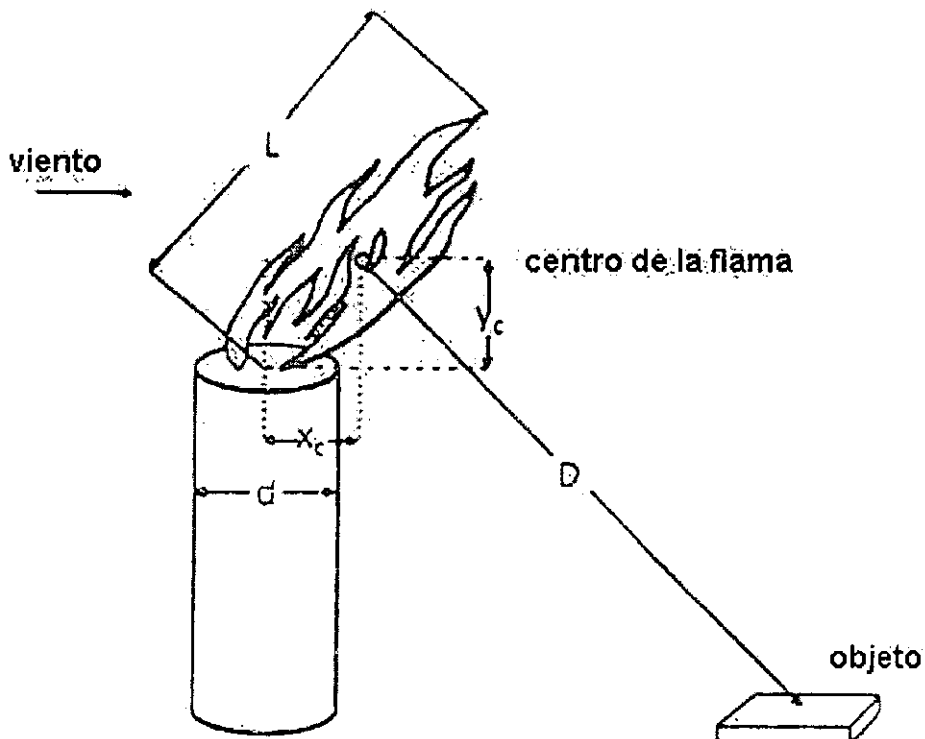
$I_{th}$  = radiación térmica, (kW/m<sup>2</sup>)

$\tau$  = transmisividad, (adimensional)

$Q_{th}$  = calor total liberado, (kW)

$\beta$  = fracción del calor radiado, (adimensional)

$D$  = Distancia del centro de flama al objeto, (m)



**Figura 4.4.8.** Modelo de chorro de fuego API.

Donde:

$x_c$  = Distancia horizontal del punto de emisión al centro de la flama, (m).

$y_c$  = Distancia vertical del punto de emisión al centro de la flama, (m).

$D$  = Distancia del centro de la flama al objetivo, (m).

$d$  = Diámetro del punto de emisión (m).

$L$  = Longitud de la flama, (m).

- b) El calor total liberado por el chorro de fuego esta dado por la siguiente ecuación.

$$Q_{th} = \dot{Q} H_c \quad (4.4.22)$$

Donde:

$Q_{th}$  = calor total liberado, (KW).

$\dot{Q}$  = Tasa de emisión del material, (Kg/seg)

$H_c$  = calor de combustión del material liberado, (KJ/Kg)

c) La Transmisividad  $\tau$  se determina de la misma manera que para el modelo de fuego tipo alberca, ecuación (4.4.20).

d) Fracción de radiación de calor  $\beta$  para chorro de fuego<sup>(4)</sup>

Para hidrógeno,  $\beta = 0.15$ .

Para metano,  $\beta = 0.2$ .

Para otros hidrocarburos,  $\beta = 0.3$ .

También se puede usar la siguiente correlación que depende de la velocidad del chorro de gas,  $V$  (m/s)<sup>(30)</sup>.

$$\beta = 0.321 - 0.000418V \quad (4.4.23)$$

Para un gas natural típico, bajo condiciones de flujo sónico,  $V \approx 350$  m/s y  $\beta \approx 0.17$

e) Estimación del centro de la flama ( $x_c, y_c$ ).

- Calcular la velocidad sónica de la emisión,  $V_{sonic}$ .

$$V_{sonic} = 91.2 \sqrt{\frac{\gamma T_s}{MW_s}} \quad (4.4.24)$$

Donde:

$\gamma$  = razón de los calores específicos del material liberado (adimensional).

$T_s$  = temperatura del material liberado, (°K).

$MW_s$  = peso molecular del material liberado, (kg/kg<sub>mol</sub>).

$V_{sonic}$  = velocidad del sonido en el gas liberado, (m/seg).

- Calcular el número de Mach para la emisión,  $Ma$ .

$$Ma = \left(11.61 \times 10^{-2}\right) \frac{\dot{Q}}{P_s d^2} \sqrt{\frac{T_s}{\gamma MW_s}} \quad (4.4.25)$$

Donde:

$Ma$  = número de mach, (adimensional)

$\dot{Q}$  = flujo másico de la emisión, (kg/seg).

$P_s$  = presión de almacenamiento absoluta, (kN/m<sup>2</sup>).

$d$  = diámetro del punto de emisión, (m).

- Calcular la velocidad de salida de la emisión.

$$V = MaV_{sonic} \quad (4.4.26)$$

Donde:

V = velocidad de salida de la emisión, (m/s)

- Calcular el límite inferior de explosividad como parámetro de concentración.

$$C_{LP} = C_L \left( \frac{V}{U_a} \right) \left( \frac{MW_s}{MW_a} \right) \quad (4.4.27)$$

Donde:

$C_{LP}$  = parámetro de concentración del límite inferior de explosividad, (adimensional)

$C_L$  = límite inferior de explosividad como fracción volumen, (adimensional)

$U_a$  = velocidad del viento a la altura de la emisión, (m/s)

$MW_a$  = peso molecular del aire, 29 kg/kgmol.

- Calcular el parámetro  $d_jR$  que considera el empuje del chorro y del viento.

$$d_jR = d \left( \frac{V}{U_a} \right) \sqrt{\frac{T_a MW_s}{T_s}} \quad (4.4.28)$$

Donde:

$T_a$  = temperatura ambiente, (°K).

- Estimar el centro de la flama ( $X_c, Y_c$ ) usando  $C_{LP}$  y  $d_jR$  y las figuras 4.4.9 y 4.4.10.

f) El siguiente paso es calcular la localización de la punta de la flama ( $X_t, Y_t$ ) (Brzustowski, 1976).

- Usando  $C_{LP}$ , calcular  $\bar{S}_t$  de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{S}_t = 2.04 C_{LP}^{-1.03} \quad \text{Para} \quad C_{LP} \leq 0.5 \quad (4.4.29)$$

$$\bar{S}_t = 2.17 C_{LP}^{-0.625} \quad \text{Para} \quad C_{LP} > 0.5 \quad (4.4.30)$$

- Usando  $\bar{S}_t$ , calcular  $\bar{X}_t$  de las siguientes ecuaciones.

$$\bar{S}_t = 1.04 \bar{X}_t^2 + 2.05 \bar{X}_t^{0.28} \quad \text{para} \quad \bar{S}_t \leq 2.35 \quad (4.4.31)$$

$$\bar{X}_t = \bar{S}_t - 1.65 \quad \text{para} \quad \bar{S}_t > 2.35 \quad (4.4.32)$$

- Usando  $\bar{X}_t$ , estimar la localización de la punta de la flama mediante las siguientes ecuaciones.

$$X_t = \bar{X}_t d \left( \frac{V}{U} \right) \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_a}} \quad (4.4.33)$$

$$Y_t = 2.04 \bar{X}_t^{0.28} d \left( \frac{V}{U} \right) \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_a}} \quad (4.4.34)$$

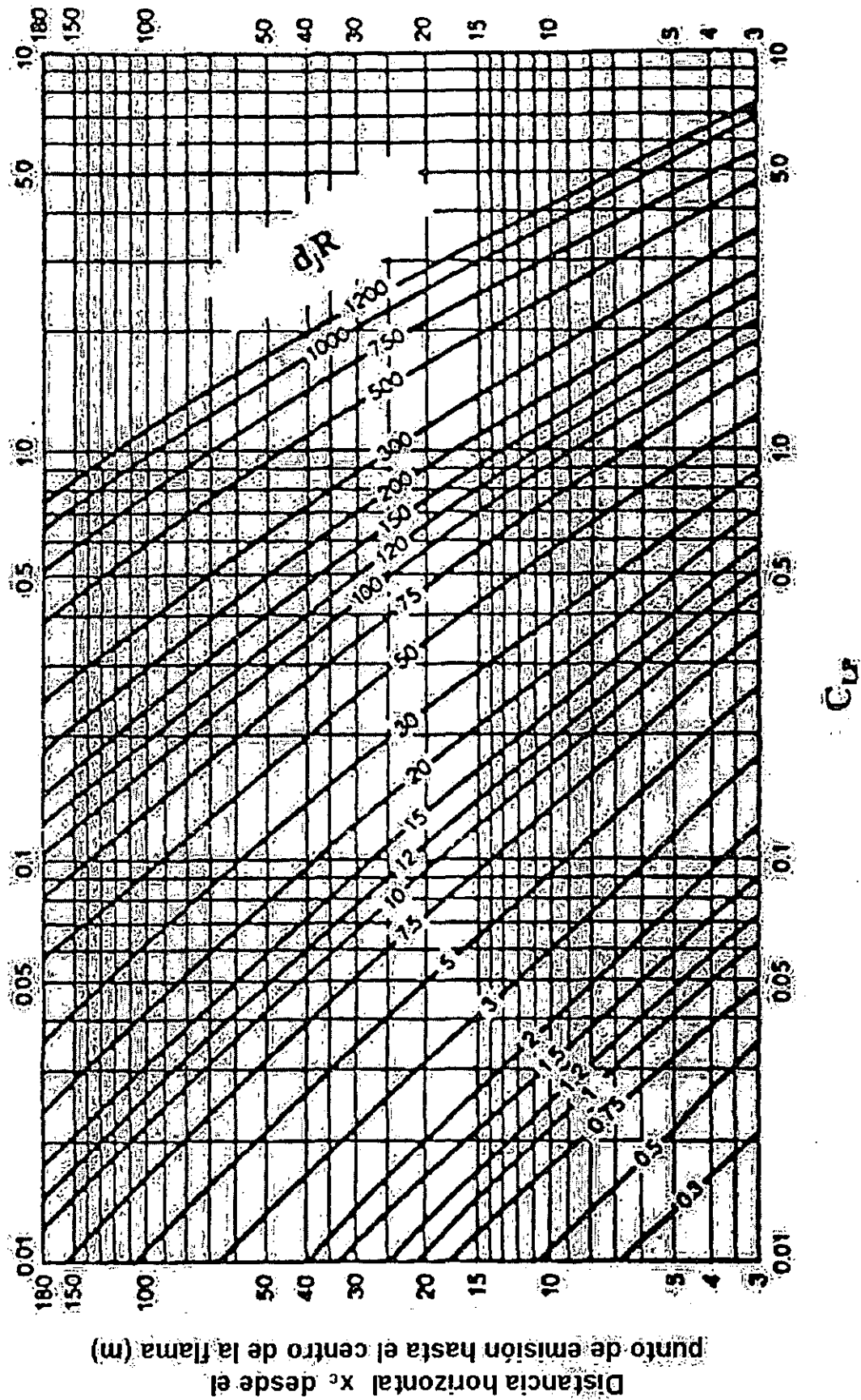


Figura 4.4.9. Localización horizontal del centro de la flama  $x_c$ .

Distancia Vertical  $y_c$  desde el punto de emisión al centro de la flama (m)

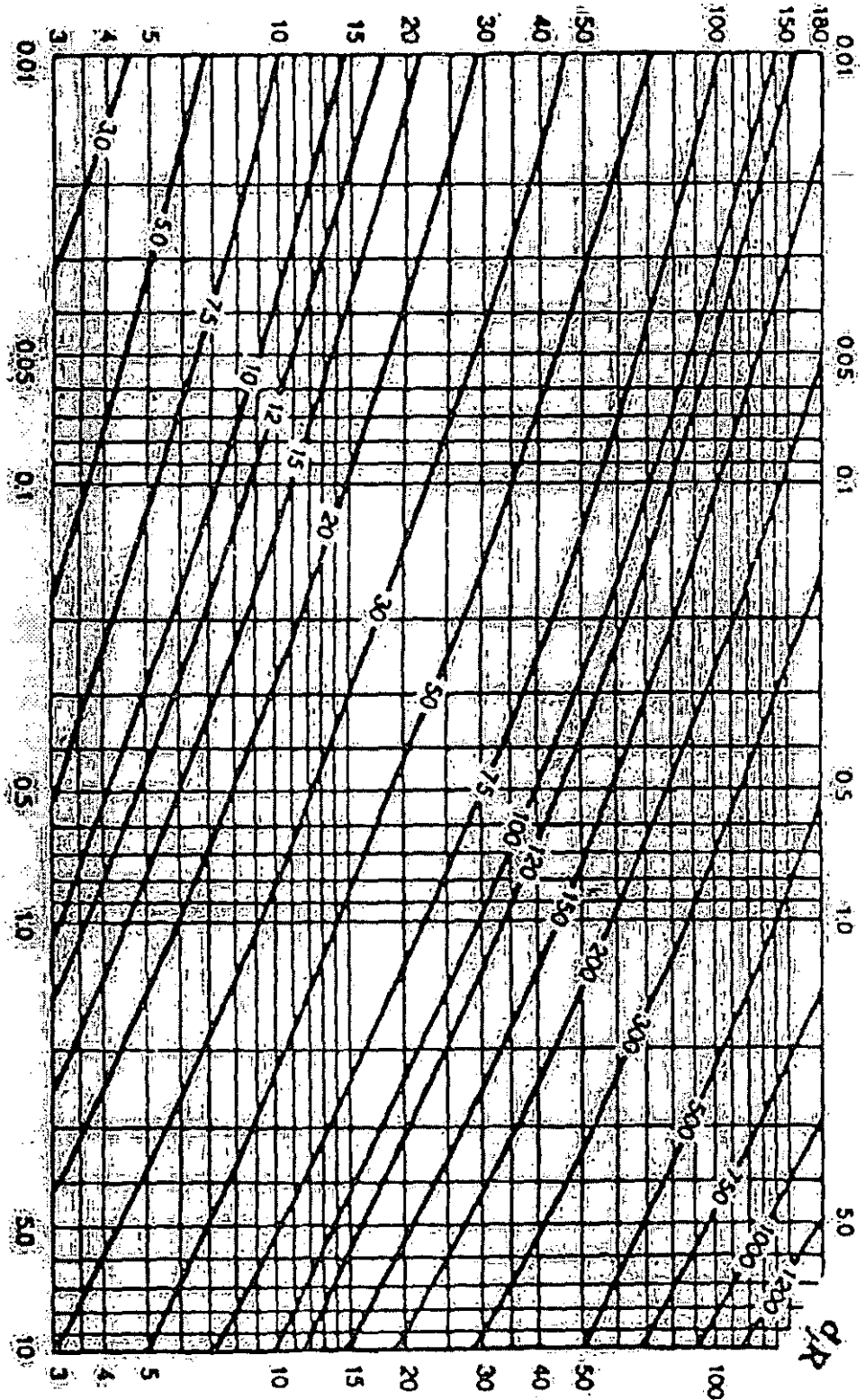


Figura 4.4.10. Localización vertical del centro de la flama  $y_c$ .

- g) Otra manera de calcular la localización del centro de la flama, es a partir de la localización de la punta de la flama, y utilizando las siguientes relaciones.

$$X_c = \frac{X_t}{2} \quad (4.4.35)$$

$$Y_c = \frac{Y_t}{2} \quad (4.4.36)$$

- h) La longitud de la flama esta dada por la siguiente ecuación:

$$L = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} \quad (4.4.37)$$

- i) Suposiciones y limitaciones del modelo API Jet Fire.

- La tasa de emisión es constante.
- El modelo fue desarrollado para descargas verticales (ejemplo quemadores).
- El modelo es una correlación empírica.
- No considera choques de la flama lo cual podría dar origen a mayor transferencia de calor.
- Asume combustión completa.
- No toma en cuenta la reducción de la transmisividad debido a la formación de CO<sub>2</sub> y partículas en el aire.

#### 4.4.3. Modelos para bola de fuego (Fireball)<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Una bola de fuego resulta de la ignición de una mezcla inflamable de un liquido o vapor sobrecalentado liberado a la atmósfera. Frecuentemente ocurre después de un BLEVE.

A continuación se describe la metodología de cálculo para modelos de bola de fuego.

- a) La radiación recibida por un objeto (para la duración del accidente por bola de fuego) está dada por<sup>(1)</sup>:

$$I_{th} = \tau F E_s \quad (4.4.38)$$

Donde:

$I_{th}$  = radiación térmica recibida por el objetivo, (kW/m<sup>2</sup>).

$E_s$  = flujo de radiación térmica emitida por la superficie, (kW/m<sup>2</sup>).

$\tau$  = transmisividad atmosférica, (adimensional)

$F$  = factor de configuración geométrica, (adimensional)



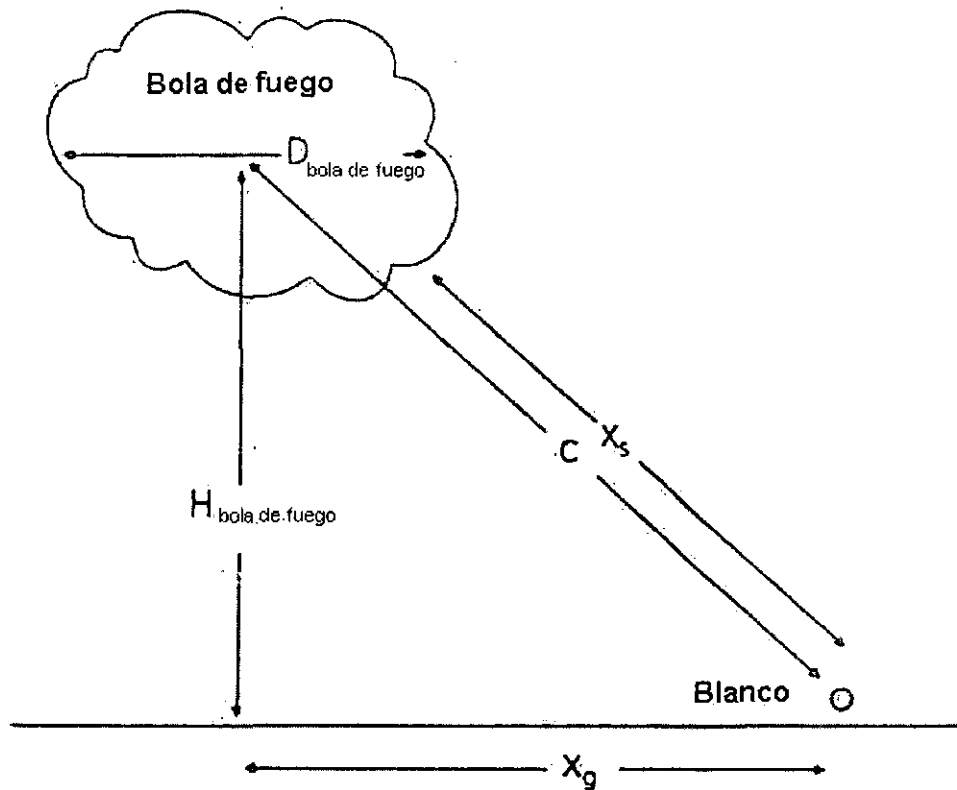


Figura 4.4.11. Modelo para bola de fuego.

- b) El Flujo de emitida por la superficie está dado por:

$$E_s = \frac{\beta M_{bola\ de\ fuego} H_c}{\pi D_{bola\ de\ fuego}^2 t_{bola\ de\ fuego}} \quad (4.4.39)$$

Donde:

$E_s$  = flujo de radiación térmica emitida por la superficie, (kW/m<sup>2</sup>).

$\beta$  = fracción del calor total radiado, típicamente entre 0.25 - 0.4.

$H_c$  = calor de combustión neto, (kJ/kg).

- c) Factor de configuración geométrica para una bola de fuego esférica esta dado por:

$$F = \frac{D_{bola\ de\ fuego}^2}{4C^2} \quad (4.4.40)$$

Donde:

$D_{bola\ de\ fuego}$  = máximo diámetro de la bola de fuego, (m)

$C$  = distancia del centro de la bola de fuego al blanco, (m)

- d) La transmisividad se calcula conforme a la ecuación (4.4.15) presentada en el modelo para fuego tipo alberca (sección 4.4.1).
- e) CCPS<sup>(15)</sup> presenta las siguientes relaciones empíricas para bolas de fuego:

$$D_{\text{bola de fuego}} = 5.8 M_{\text{bola de fuego}}^{1/3} \quad (4.4.41)$$

$$t_{\text{bola de fuego}} = 0.45 M_{\text{bola de fuego}}^{1/3} \quad \text{para } M_{\text{bola de fuego}} < 30,000 \text{ kg.} \quad (4.4.42)$$

$$t_{\text{bola de fuego}} = 2.6 M_{\text{bola de fuego}}^{1/6} \quad \text{para } M_{\text{bola de fuego}} \geq 30,000 \text{ kg.} \quad (4.4.43)$$

$$H_{\text{bola de fuego}} = 0.5 D_{\text{bola de fuego}} \quad (4.4.44)$$

Donde:

$M_{\text{bola de fuego}}$  = masa inicial de líquido inflamable, (kg).

$D_{\text{bola de fuego}}$  = diámetro máximo de la bola de fuego, (m)

$t_{\text{bola de fuego}}$  = duración de la bola de fuego, (s)

$H_{\text{bola de fuego}}$  = altura máxima desde el centro de la bola de fuego, (m)

f) Suposiciones y limitaciones del modelo de bola de fuego.

- Las ecuaciones son correlaciones empíricas.
- Se ignora la reducción en la transmisividad que resulta del  $\text{CO}_2$  y partículas en el aire.

#### 4.5. Modelos de efecto<sup>(1)(3)(4)</sup>.

El siguiente paso en un Análisis Cuantitativo de Riesgos es evaluar las consecuencias de los resultados de los accidentes. Las consecuencias dependen del objeto de estudio. Un método de evaluación de las consecuencias de los resultados de accidentes es el modelo de efecto directo, el cual predice los efectos sobre las personas o estructuras basados en criterios predeterminados. En realidad, las consecuencias pueden no tomar la forma de funciones discretas, pero en cambio pueden acomodarse a la función de distribución de probabilidad. Un método estadístico para evaluar consecuencias es el método Probit. El método Probit (unidad de probabilidad) refleja en forma general la relación dependiente del tiempo para cualquier variable que tiene un resultado probabilístico y que puede ser definido por una distribución normal.

El valor Probit Pr está relacionado a la probabilidad por la siguiente ecuación.

$$\text{Pr obabilidad} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}-5} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (4.5.1)$$

Pr es una distribución Gaussiana de variable aleatoria, con una media de 5.0 y desviación estándar de 1.0

La siguiente tabla da la relación entre Pr y % (probabilidad).

**Tabla 4.5.1.** Transformación de Probits a Porcentajes.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Los valores en el último renglón son para 99.0 hasta 99.9%

#### 4.5.1. Efectos por onda expansiva<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Los modelos de efectos por onda expansiva predicen el impacto de ondas de sobrepresión y proyectiles sobre personas y objetos. Los modelos de efectos por onda expansiva están basados en modelos de explosión TNT. Las características de una onda de expansiva difieren para una explosión de una nube de vapor, porque las explosiones TNT son detonaciones y las explosiones UVCE generalmente son deflagraciones.

Método.

- a) La tabla 4.5.2 resume los efectos por onda expansiva por sobre presión. La duración de la sobre presión es importante para determinar los efectos en las estructuras.
- b) Las personas que se encuentran afuera de edificios o estructuras son susceptibles a lesiones por efectos de onda de choque directa (onda de choque a sobrepresión), y a lesiones por onda de choque indirecto (impacto de fragmentos).
- c) Las personas que se encuentran dentro de edificios o estructuras son susceptibles a lesiones por efectos de onda de choque indirecto que resultan por el colapso de la estructura del edificio.
- d) Las lesiones en personas debido a fragmentos ocurren por la penetración de pequeños fragmentos o por traumas debido a fragmentos grandes. La penetración de la piel está en función de  $A/M$ , donde  $A$  es el área de la sección transversal del proyectil a lo largo de su trayectoria, y  $M$  es la masa del proyectil. Las lesiones por proyectiles sin filo es una función de la masa del fragmento y su velocidad.

**Tabla 4.5.2.** Efectos por onda de choque para cada valor de sobrepresión.

Presión (psig)	Daño
0.02	Ruido molesto (137 dB de frecuencia 10-15 Hz)
0.03	Ruptura ocasional de grandes ventanales bajo tensión
0.04	Ruido fuerte (143 dB), falla de cristales por ondas sónicas
0.1	Ruptura de ventanas pequeñas bajo tensión
0.15	Presión típica para ruptura de cristales
0.3	"Distancia segura" (probabilidad 0.95 sin daño serio más allá de este valor), límite de proyectiles; algún daño a techos de casas; 10% de ventanas rotas
0.4	Daño estructural secundario limitado
0.5 - 1.0	Generalmente se estrellan grandes y pequeñas ventanas, daño ocasional a marcos de ventanas
0.7	Daño menor a estructuras de casas
1.0	Demolición parcial de casas, se vuelven inhabitables, máxima velocidad de viento de 79.7 km/h
1-2	Destrozo de asbesto corrugado; ceden fijaciones de paneles de aluminio o acero corrugado, falla segura seguida por deformamiento; ceden fijaciones de paneles de madera (estándar en viviendas), golpe en paneles
1.3	Marcos de acero de edificios con revestimiento levemente distorsionados
2	Colapso parcial de paredes y techos de casas
2-3	Muros de blocks y concreto, no reforzadas, destruidas
2.3	Límite inferior de daño estructural serio
2.5	50 % de destrucción de casas de ladrillo
3	Máquinas pesadas (3000 lb en edificios industriales sufren daños pequeños, estructuras de acero torcidos y desprendidos de sus cimientos, máxima velocidad de viento de 178.6 km/h
3-4	Edificios de paneles de acero sin estructura o de autoformación demolidos; ruptura de tanques de almacenamiento de petróleo
4	Ruptura de revestimiento de edificios industriales ligeros
5	Postes de teléfono de madera se rompen; prensa hidráulica alta (40 000 lb) en edificios levemente dañada, máxima velocidad de viento de 260.8 km/h
5-7	Destrucción casi completa de casas
7	Vagones de ferrocarril de carga pesada volcados
7-8	Paneles de ladrillo de 8-12 pulgadas de grosor, no reforzados, ceden por deslizamiento o curvatura
9	Furgones con carga totalmente destruidos
10	Probable destrucción de edificios, maquinaria pesada (7000 lb) desplazada y muy dañada, maquinaria muy pesada (12 000 lb) sobrevive, máxima velocidad de viento de 294 km/h.
300	Límite de orilla de cráter.

e) Modelos Probit para lesiones del personal que resultan de los efectos por onda de choque directa<sup>(9)(3)</sup>.

$$\text{Pr} = 5.0 - 5.74 \log_e \left( \frac{4.2}{\bar{P}} + \frac{1.3}{\bar{I}} \right) \quad \text{para fatalidades por daño en pulmones} \quad (4.5.2)$$

$$\text{Pr} = -12.6 + 1.524 \log_e P_s \quad \text{para ruptura de tímpano} \quad (4.5.3)$$

$$\bar{P} = \frac{P}{P_a} \quad \text{y} \quad \bar{I} = \frac{I_s}{P_a^{1/2} m_b^{1/3}} \quad (4.5.4)$$

Donde:

P = presión actual ejercida sobre el cuerpo (dependiente de la posición de la persona), (N/m<sup>2</sup>)

P<sub>a</sub> = presión atmosférica, 1.013 X 10<sup>5</sup>, (N/m<sup>2</sup>)

I<sub>s</sub> = impulso positivo del accidente, (N-seg/m<sup>2</sup>)

m<sub>b</sub> = masa del cuerpo humano, (kg)

f) Modelos Probit para fatalidades del personal que resultan de los efectos por onda de choque indirecta<sup>(9)(3)</sup>.

(P<sub>s</sub> < 4X10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>)

$$\text{Pr} = 5.0 - 8.49 \log_e \left( \frac{2.43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s I_s} \right), \quad \text{para impacto en la cabeza} \quad (4.5.5)$$

$$\text{Pr} = 5.0 - 2.44 \log_e \left( \frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_s I_s} \right), \quad \text{para impacto en todo el cuerpo} \quad (4.5.6)$$

g) Modelos Probit para fatalidades del personal debido al vuelo de fragmentos de masa m<sub>frag</sub> y velocidad V<sub>o</sub><sup>(9)(3)</sup>.

$$\text{Pr} = -13.19 + 10.54 \log_e V_o \quad \text{para } m_{\text{frag}} > 4.5 \text{ kg} \quad (4.5.7)$$

$$\text{Pr} = -17.56 + 5.3 \log_e \left( \frac{1}{2} m_{\text{frag}} V_o^2 \right) \quad \text{para } 0.1 < m_{\text{frag}} \leq 4.5 \text{ kg} \quad (4.5.8)$$

$$\text{Pr} = -29.15 + 2.1 \log_e (m_{\text{frag}} V_o^{5.115}) \quad \text{para } 0.001 < m_{\text{frag}} \leq 0.1 \text{ kg} \quad (4.5.9)$$

h) TNO<sup>(9)</sup> sugiere que los proyectiles con energía cinética de 100 J pueden causar fatalidades.

i) El daño a equipos/estructuras resulta de las fuerzas producidas por diferentes presiones que actúan sobre superficies separadas del equipo/estructura.

j) La duración de la sobre presión es importante para determinar los efectos sobre las estructuras.

k) Si la duración de la onda de choque es menor que el tiempo de respuesta característica de la estructura, es posible que el equipo/estructura sobreviva a altas sobrepresiones.

l) Modelos Probit para daños en estructuras tipo departamento ≤ 4 pisos de altura<sup>(9)(3)</sup>.

$$\text{Pr} = 5.0 - 0.26 \log_e \left[ \left( \frac{4600}{P_s} \right)^{3.9} + \left( \frac{110}{I_s} \right)^{5.0} \right] \text{ para da\~{n}o menor} \quad (4.5.10)$$

$$\text{Pr} = 5.0 - 0.26 \log_e \left[ \left( \frac{17500}{P_s} \right)^{8.4} + \left( \frac{290}{I_s} \right)^{9.3} \right] \text{ para da\~{n}o estructural mayor} \quad (4.5.11)$$

$$\text{Pr} = 5.0 - 0.22 \log_e \left[ \left( \frac{40000}{P_s} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I_s} \right)^{11.3} \right] \text{ para colapso} \quad (4.5.12)$$

#### 4.5.2. Efectos t\u00e9rmicos<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Tiene como prop\u00f3sito estimar la probabilidad de lesi\u00f3n o da\u00f1o a personas y objetos por radiaci\u00f3n t\u00e9rmica, como resultado de alg\u00fan accidente. El modelado de efectos t\u00e9rmicos es m\u00e1s preciso que el modelado de efectos t\u00f3xicos. Existe una cantidad considerable de datos experimentales que forman la base para la estimaci\u00f3n de los efectos. Se usan dos maneras para estimar los efectos t\u00e9rmicos:

- Tabulaci\u00f3n simple o gr\u00e1ficas basadas en resultados experimentales.
- Modelos te\u00f3ricos basados en la fisiolog\u00eda de respuestas a quemaduras en la piel.

M\u00e9todo.

- En la tabla 4.5.3 se dan datos de tiempo para el umbral del dolor. Se observa que las quemaduras siguen el umbral del dolor r\u00e1pidamente. Basados en estos datos, el API 521<sup>(29)</sup> sugiere criterios t\u00e9rmicos (Tabla 4.5.4), fija la zona de exclusi\u00f3n, o determina la altura del destello para la exposici\u00f3n personal. Otros criterios para da\u00f1os por radiaci\u00f3n t\u00e9rmica se muestran en la tabla 4.5.5. La figura 4.5.1 muestra los datos para un rango de lesiones por quemadura, fatalidad y para quemaduras de segundo grado.
- Modelos Probit para estimar los efectos t\u00e9rmicos sobre el personal debido a la exposici\u00f3n por fuego tipo alberca y fuego por vaporizaci\u00f3n s\u00fabita.

$$\text{Pr} = -39.83 + 3.0186 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para quemaduras de 1er grado} \quad (4.5.13)$$

$$\text{Pr} = -43.14 + 3.0186 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para quemaduras de 2\u00b0 grado} \quad (4.5.14)$$

$$\text{Pr} = -36.38 + 2.56 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para fatalidades por quemaduras} \quad (4.5.15)$$

Donde:

$t_e$  = duraci\u00f3n de la exposici\u00f3n, (seg)

$I_{th}$  = intensidad de la radiaci\u00f3n t\u00e9rmica, ( $W/m^2$ )

Pr = valor Probit, (adimensional)

**Tabla 4.5.3.** Tiempo de exposición necesario para alcanzar el umbral de dolor<sup>(29)</sup>

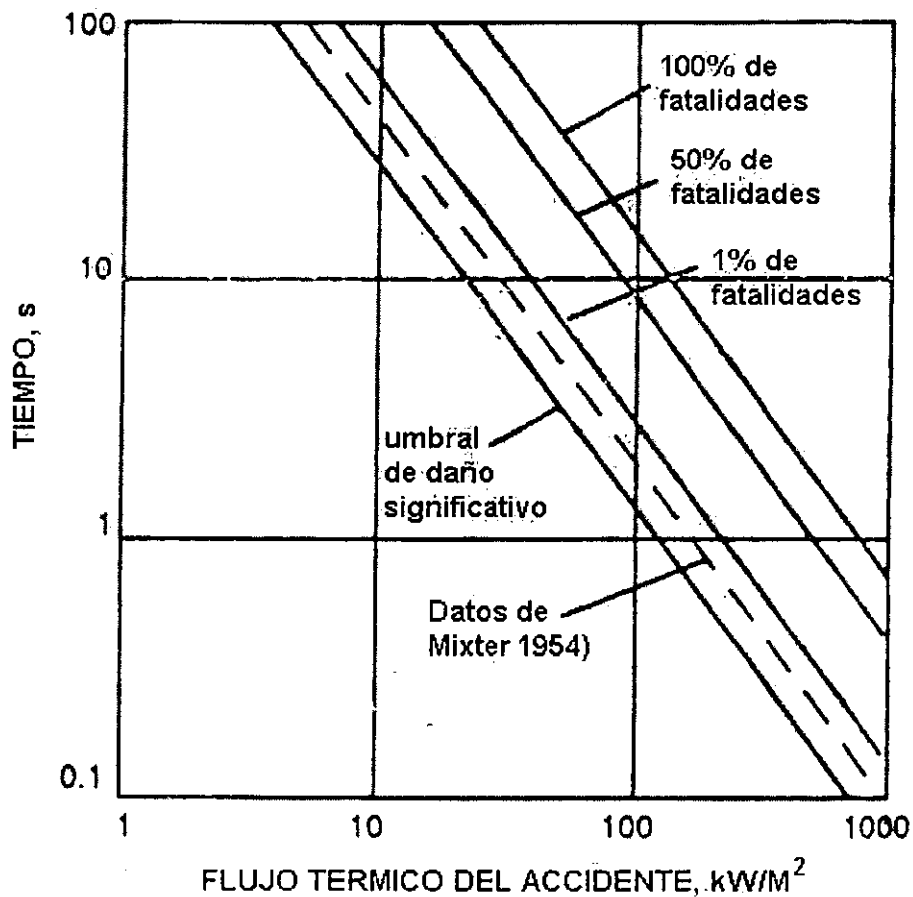
Intensidad de radiación (Btu/hr/ft <sup>2</sup> )		Tiempo para el umbral de dolor (s)	
	kW/m <sup>2</sup>		
500	1.74	60	
740	2.33	40	
920	2.90	30	
1500	4.73	16	
2200	6.94	9	
3000	9.46	6	
3700	11.67	4	
6300	19.87	2	

**Tabla 4.5.4.** Recomendaciones de diseño para niveles de radiación de calor<sup>(29)</sup>

Nivel de diseño permisible (k)		Condiciones
Btu/hr/ft <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	
5000	15.77	Intensidad de calor sobre estructuras y áreas en donde probablemente los operadores no realizan labores, y donde hay disponibilidad de protección de la radiación de calor, por ejemplo, detrás de algún equipo.
3000	9.46	Valor de K en el diseño de emisión de calor en cualquier situación en la cual las personas tienen acceso, por ejemplo, un desnivel bajo el calor o sobre una plataforma de servicio de una torre cercana. La exposición debe ser limitada a pocos segundos, la suficiente para escapar.
2000	6.31	Intensidad de calor en áreas donde la acción de emergencia, con 1 min de duración, es llevada a cabo por personal sin protección pero con ropa adecuada.
1500	4.73	Intensidad de calor en áreas donde la acción de emergencia, con varios minutos de duración, es llevada a cabo por personal sin protección pero con ropa apropiada.
500	1.58	Valor de K en diseño de emisión de calor en cualquier situación donde el personal esta expuesto continuamente.

**Tabla 4.5.5.** Efectos de radiación térmica.

Intensidad de Radiación (KW/m <sup>2</sup> )	Efecto observado
1.6	No causará molestias por exposición prolongada
4	Suficiente para ocasionar dolor al personal si no alcanzan a ponerse a salvo en 20 segundos, sin embargo, es probable la aparición de ampulas (quemaduras de segundo grado); letalidad de 0%
9.5	Umbral de dolor alcanzado luego de 8 segundos, quemaduras de segundo grado luego de 20 segundos
12.5	Energía mínima requerida para el encendido guiado de madera, fusión de tubería de plástico
25	Energía mínima requerida para encender madera a exposiciones indefinidamente prolongadas (no guiadas)
37.5	Suficiente para ocasionar daño a equipo de proceso



**Figura 4.5.1.** Niveles serios de daño/fatalidad para radiación térmica<sup>(28)</sup>.



### 4.5.3. Efectos de gas tóxico<sup>(1)(3)(4)</sup>.

Los modelos de efectos tóxicos se emplean para evaluar las consecuencias para la salud humana, como resultado de la exposición a gases tóxicos. Muchas medidas están disponibles para usarse como referencias para predecir la probabilidad de que esa emisión resulte en serios daños o muertes. La información concentración-tiempo para nubes de gas tóxico se pueden estimar usando modelos de dispersión (sección 4.2). De acuerdo a la figura 4.5.2, los modelos probit se pueden usar para estimar la exposición para situaciones que involucran emisiones continuas o emisiones masivas instantáneas. El objetivo de los modelos de efectos tóxicos es determinar si se espera un resultado adverso a la salud de una emisión, y si los datos permiten estimar la extensión de daños o fatalidades que tiene probabilidad de ocurrir.

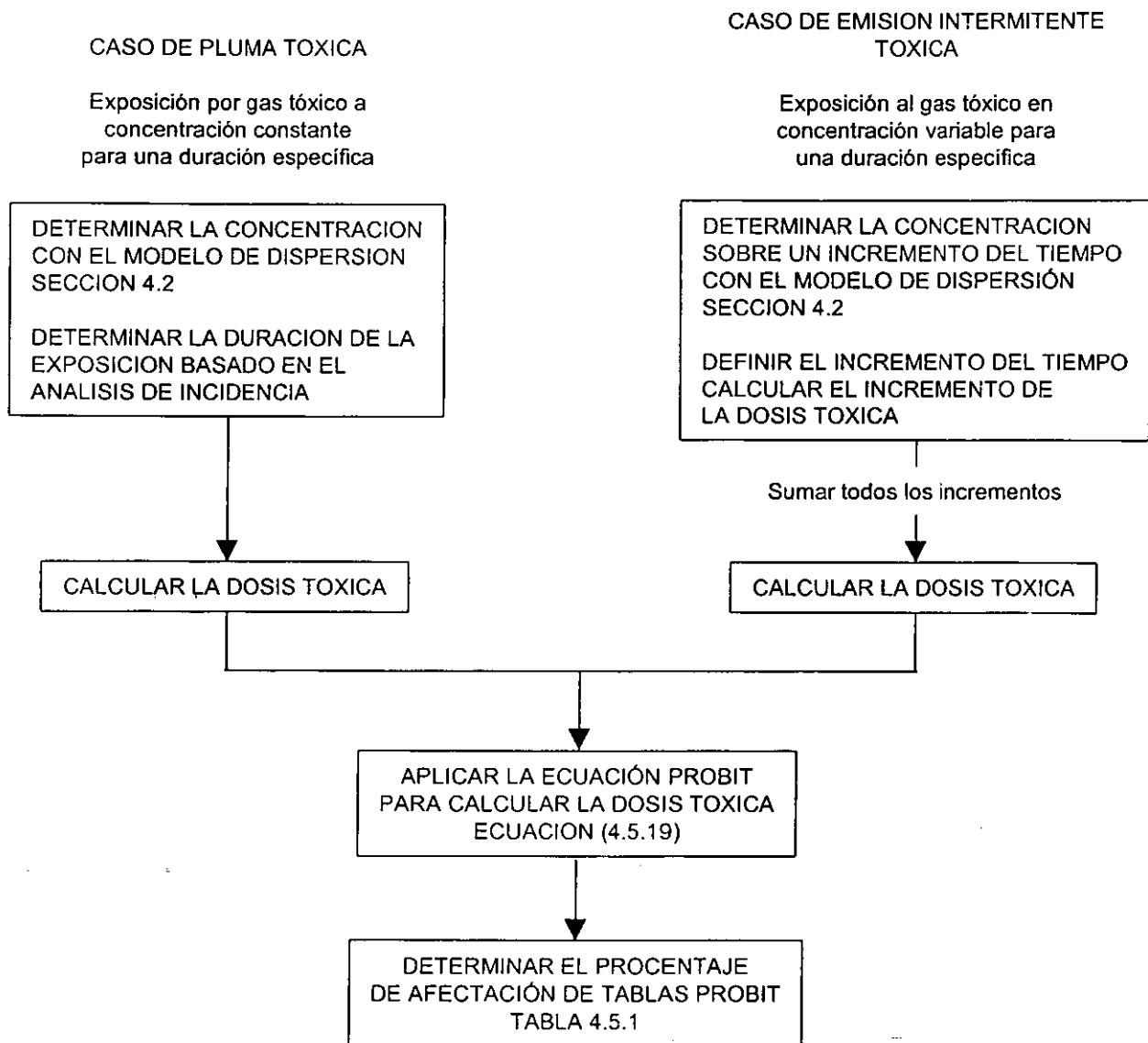


Figura 4.5.2. Estimado de la exposición para emisiones tóxicas usando modelos Probit.

Métodología para determinar los efectos por gas tóxico.

- a) Usar modelos de dispersión (sección 4.2) para determinar las posibles consecuencias en la salud como resultado de un suceso, y desarrollar el contorno de un área que describa la concentración de gas como función del tiempo, localización, y distancia desde el punto de emisión.
- b) Una vez que se obtiene la información concentración-tiempo del modelo de dispersión, se usan criterios toxicológicos establecidos (Emergency Response Planning Guidelines, Immediately Dangerous to Life Health o Short-Term Public Emergency Guidance Levels) para evaluar que la probabilidad de un resultado adverso es relativamente cierto (ver Anexo F).
- c) Las zonas de efectos se identifican con áreas en la cual la concentración de gas y duración de la exposición excede los criterios.
- d) Estimar la magnitud del daño al personal como resultado de la exposición al material tóxico.
  - Calcular la carga tóxica mediante la siguiente ecuación:

$$Carga\ Tóxica = \int_0^{t_e} [C(t)]^n dt \quad (4.5.16)$$

Donde:

$C(t)$  = concentración del material tóxico en función del tiempo  $t$ , (ppm)

$n$  = exponente, el cual está en función del material tóxico específico, (adimensional)

$t_e$  = tiempo total de exposición, (min)

Para exposición a una concentración constante  $C(t) = C$ , la carga tóxica está dada por la ecuación:

$$Carga\ Tóxica = C^n t_e \quad (4.5.17)$$

Para exposición a una concentración que varía con el tiempo, la carga tóxica se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$Carga\ Tóxica \cong \sum_{i=1}^m C_i^n t_{ei} \quad \text{para toda } C_i \neq 0 \quad (4.5.18)$$

Donde:

$C_i$  = concentración del material tóxico para un tiempo de exposición  $t_{ei}$  (ppm)

$t_{ei}$  = tiempo de exposición para un intervalo de tiempo  $i$ , (min)

- Calcular la probabilidad de los efectos entre la población usando la siguiente ecuación Probit.

$$Pr = A_t + B_t \log_e [Carga\ Tóxica] \quad (4.5.19)$$

Donde:

$Pr$  = Probit, (adimensional)

$A_t, B_t$  = coeficientes asociados con un material tóxico específico, (adimensional)

$Carga\ Tóxica = ppm^n \cdot min$

El método probit usa esta expresión logarítmica para relacionar la dosis tóxica a la variable probit, desde la cual se puede estimar el porcentaje de la población afectada (o estimar el número de fatalidades) usando tablas estándares de probit.

En la tabla 4.5.6 se encuentran estimados de coeficientes probit para varias sustancias.

**Tabla 4.5.6.** Constantes de la ecuación Probit para toxicidad letal.

Substancia	$A_i^*$	$B_i^*$	$n^*$
Acroleína	-9.931	2.049	1
Acilonitrilo	-29.42	3.008	1.43
Amoniaco	-35.90	1.85	2
Benceno	-109.78	5.3	2
Bromo	-9.04	0.92	2
Monóxido de Carbono	-37.98	3.7	1
Tetracloruro de Carbono	-6.29	0.408	2.50
Cloro	-8.29	0.92	2
Formaldehído	-12.24	1.3	2
Acido clorhídrico	-16.85	2.00	1.00
Cianuro	-29.42	3.008	1.43
Acido fluorhídrico	-25.87	3.354	1.00
Acido sulfhídrico	-31.42	3.008	1.43
Bromuro de metilo	-56.81	5.27	1.00
Metil isocianato	-5.642	1.637	0.653
Dióxido de nitrógeno	-13.79	1.4	2
Fósforo	-19.27	3.686	1
Oxido de propileno	-7.415	0.509	2.00
Dióxido de sulfuro	-15.67	2.10	1.00
Tolueno	-6.794	0.408	2.50

\* Estas constantes aplican únicamente cuando la concentración está en ppm y el tiempo de exposición está en minutos.

#### 4.6. Elaboración de Matriz de consecuencias<sup>(4)</sup>.

Una vez estimadas las consecuencias por fuego, explosión y toxicidad, los resultados se plasman en una matriz en donde se identifica el escenario simulado, especificando las condiciones de presión y temperatura, tamaño del orificio y la masa relevada en kg/s, ya sea líquido vapor o amabas.

Posteriormente se plasman las zonas de afectación en metros, para cada una de las consecuencias analizadas.

Finalmente se expresa la zona de inflamabilidad en metros y la distancia a la cual el material tóxico alcanza el IDLH.

La siguiente figura muestra la matriz de causas y consecuencias utilizada en esta metodología.



## CAPITULO 5

### PROBABILIDAD DE EVENTOS Y ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE FALLAS<sup>(1)(31)</sup>.

En esta etapa se determina la frecuencia de ocurrencia de los eventos no deseados así como los parámetros de confiabilidad de los equipos e instalaciones involucradas. Aunque existen diferentes métodos para cuantificar las características de confiabilidad de equipos, sistemas, componentes y operaciones de proceso, tales como; Análisis de Markov, Análisis de Árbol de Fallas, Efectos de Modo Común, Diagramas Causa-Consecuencia, Factores Humanos, Análisis de Modos de Falla y Efectos, en esta metodología se utiliza la opción del Análisis de Árbol de Fallas (FTA).

Los resultados de frecuencias y parámetros de confiabilidad son muy importantes en el ámbito industrial ya que el principal aspecto a considerarse es el costo asociado con la falla de componentes en equipo, sistemas o procesos de una instalación. Por esto, aunque el cálculo de los parámetros de confiabilidad es probabilístico, es una medida de cuantificar que tan cercano se encuentra un diseño dado a sus objetivos y permite hacer comparaciones entre diferentes propuestas de diseño o modificaciones a los diseños existentes (propuestas de mitigación). Dentro de estos beneficios están:

En diseño permite:

- Una reducción de complejidad en arreglos o configuraciones de los sistemas
- Una duplicidad proporcionando tolerancia a fallas
- Establecer que componentes o áreas en un diseño contribuyen en un mayor porcentaje a la no-confiabilidad
- Una retroalimentación de información de fallas para proporcionar evolución en el proceso de confiabilidad

En operación permite:

- Un control en materiales, métodos, cambios
- Adecuados procedimientos de operación y mantenimiento
- Una retroalimentación de información de fallas en campo
- Estrategias de reemplazo y repuesto (por ejemplo, reemplazo de componentes con características de desgaste conocidas)
- Realizar interacciones entre confiabilidad y mantenimiento para lograr una disponibilidad dada
- Permite una evaluación de los costos del ciclo de vida del equipo

Para la valoración cuantitativa de la frecuencia es necesario contar con información de:

- Tasas de falla de los elementos que conforman el sistema
- Tiempos promedio de reparación por tipo de falla de los elementos
- Periodos de mantenimiento
- Probabilidad de error humano

#### 5.1. Elaboración de la base de datos de tasa de fallas<sup>(1)(31)</sup>.

La tasa de fallas es la obtención de la probabilidad de ocurrencia de cada falla en: instrumentos, intercambiadores de calor, recipientes a presión, sistemas de control, compresores, bombas, servicios auxiliares, etc. Para estimar la tasa de fallas se divide el número de incidentes registrados entre el tiempo

de operación. Una base de datos de fallas es un conjunto de información para registrar todas las fallas del equipo y del proceso que llevaron el equipo a paro.

La secuencia para la elaboración de una base de datos de tasa de fallas es la siguiente.

a) Recopilación de Información:

Para la realización de esta etapa se utilizan las bitácoras de operación y mantenimiento de la instalación, con las cuales se identifican y cuantifican las fallas que se han presentado en los equipos durante los últimos años de operación. Además, se recopila el tiempo de operación, tiempo fuera de operación provocado por cada falla y el tiempo en que cada equipo se encontraba disponible.

b) Clasificación del Tipo de Falla:

Una vez que se recopiló información sobre todas las fallas que se presentaron en los equipos, se procede a clasificarlas de acuerdo al efecto que provocaron en las variables de operación, los instrumentos de control, los dispositivos, los equipos, etc. Esto es con el fin de determinar la frecuencia de fallas (F), que es el número de veces que se presentó cada falla durante el período analizado.

c) Cuantificación del Tiempo de Operación (TTF):

La cuantificación del tiempo de operación, consistió en sumar las horas en que los equipos se encontraron en funcionamiento sin presentar avería que hiciera necesario su paro.

d) Cuantificación del Tiempo Fuera de Operación (MDT):

La cuantificación del tiempo fuera de operación consiste en sumar las horas en la que los equipos se encontraron sin operar para corregir las desviaciones que causaron las fallas.

e) Cuantificación del Tiempo Disponible (TD):

La cuantificación del tiempo disponible consiste en sumar las horas en la que los equipos se encuentran disponibles.

f) Cálculo de la Tasa de Fallas ( $\lambda$ ):

El cálculo de la tasa de fallas consiste en dividir el número de veces en que se presenta una falla en un equipo entre el tiempo de operación del equipo durante el período analizado.

g) Cálculo de Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF):

El tiempo medio entre fallas es el inverso de la tasa de fallas,  $1/\lambda$ .

h) Cálculo de Tiempo Medio de Reparación (MTR):

El tiempo medio de reparación se obtiene dividiendo el tiempo fuera de operación por reparación entre la frecuencia de fallas,  $MDT/F$ .

## 5.2. Análisis de árbol de fallas<sup>(1)(31)</sup>.

El análisis de Árbol de Fallas permite estimar la frecuencia de eventos peligrosos (evento principal) de un sistema. El modelo se basa en la combinación de fallas de los componentes más básicos del sistema, sistema de seguridad y confiabilidad humana.

La base de la tecnología es el uso de una combinación de compuertas lógicas, para sintetizar un modelo de falla de la planta. La frecuencia del evento principal o probabilidad, se calcula de datos de falla de eventos más simples. El evento principal puede ser un BLEVE, la descarga de una válvula de relevo a la atmósfera, o una reacción incontrolada. Así como el análisis de Árbol de Fallas proporciona información cuantitativa del evento principal, también puede proporcionar una visión cualitativa poderosa sobre modo de fallas potenciales de un sistema complejo, a través del análisis de conjuntos de cortes mínimos.

Una suposición básica en el Árbol de Fallas es que todas las fallas en un sistema son de naturaleza binaria. Esto es, un componente u operador se ejecuta exitosamente o falla completamente. Adicionalmente, se supone que el sistema es capaz de realizar su tarea si todos sus subcomponentes están trabajando. El Árbol de Fallas no considera la degradación de un sistema o sus componentes, y considera únicamente fallas instantáneas.

### 5.2.1. Conceptos básicos del análisis del árbol de fallas<sup>(1)(31)</sup>.

#### a) Modelo de fracaso vs modelo de éxito.

La operación de un sistema se puede considerar desde dos puntos de vista: se pueden enumerar varias maneras para éxitos del sistema, o se pueden enumerar varias maneras para los fracasos del sistema. La figura 5.2.1 describe el concepto de espacio fracaso/éxito.

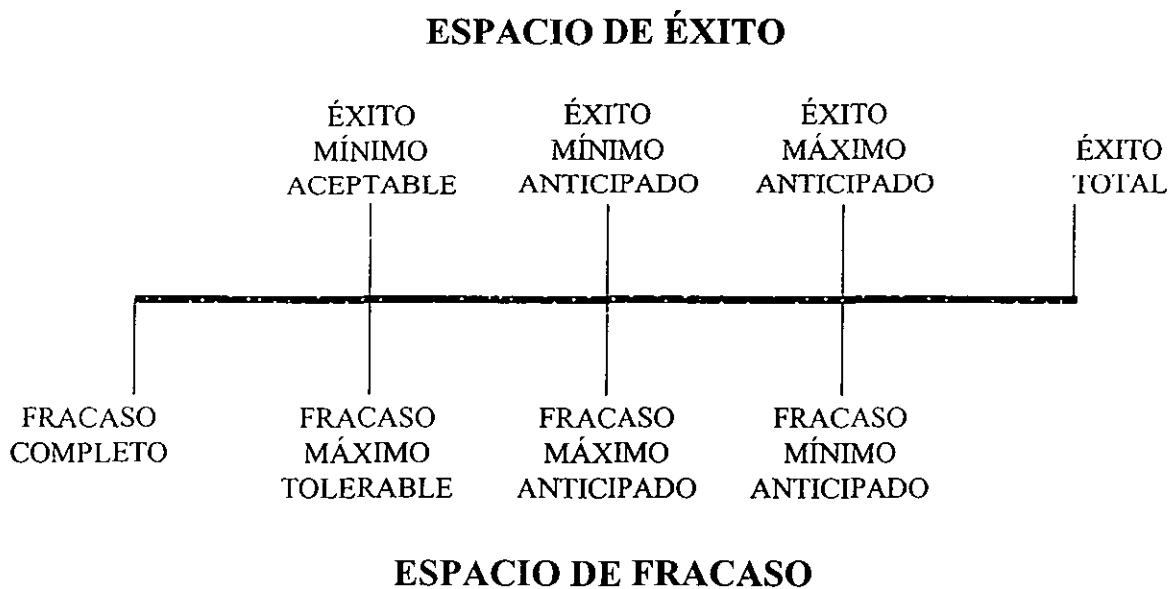


Figura 5.2.1. El concepto espacio de fracaso - espacio de éxito.

Es interesante notar que ciertos puntos identificables en el espacio de éxito coinciden con ciertos puntos análogos en el espacio de fracaso. Así, por ejemplo, se puede pensar que “el éxito máximo anticipado” dentro del espacio de éxito, coincide con “el fracaso mínimo anticipado” en el espacio de fracaso. Aunque la primera inclinación sea seleccionar el punto óptimo del sistema (éxito) más que el pesimista (fracaso), se debe tener en cuenta que esto necesariamente no es lo mejor.

Generalmente, el evento “fracaso”, en particular “fracaso completo”, es más fácil de definir, mientras que el evento “éxito” es más difícil de visualizar. Este hecho hace que el uso del espacio de fracaso en un análisis, sea mucho más valioso que el uso del espacio de éxito.

La elaboración de diagramas de árbol para un sistema complejo es una operación costosa y consume mucho tiempo. Cuando se consideran los fracasos, solamente es necesario construir uno o dos modelos del sistema, tales como árboles de fallas, los cuales cubren todos los modos de fracasos significativos. Cuando se considera el éxito, es necesario construir varios cientos de modelos del sistema que cubran varias definiciones de éxito.

b) El concepto de evento no deseado.

Un evento no deseado constituye el evento principal en un diagrama de árbol de fallas construido para el sistema, y generalmente consiste de una falla completa o catastrófica. La selección cuidadosa es importante para el éxito del análisis. Si es muy general, el análisis se vuelve inmanejable; si es muy específico, el análisis no proporciona una amplia visión del sistema. El análisis de árbol de falla es un ejercicio costoso y consume mucho tiempo, y su costo se debe medir contra el costo asociado con la ocurrencia del evento relevante no deseado.

c) Modelo de un Árbol de Fallas.

El análisis del árbol de fallas se puede describir simplemente como una técnica analítica, por medio del cual se especifica un estado no deseado del sistema (usualmente es un estado que es crítico desde un punto de vista de seguridad), y el sistema se analiza en el contexto de su medio ambiente y operación para encontrar todas las formas creíbles en la cual puede ocurrir un evento no deseado. El árbol de fallas por si mismo es un modelo gráfico de varias combinaciones secuenciales y paralelas de fallas que resultarán del suceso del evento no deseado predefinido. Las fallas pueden ser eventos que están asociados con fallas en los componentes de un hardware, errores humanos, o cualquier otro evento pertinente que pueda conducir a un evento no deseado. Por lo tanto, un árbol de fallas describe las interrelaciones lógicas de eventos básicos que conducen a eventos no deseados, el cual es el evento principal de un árbol de fallas.

Es importante entender que el árbol de fallas no es un modelo que incluya todas las fallas posibles en un sistema o causas posibles para fallas del sistema. Un árbol de fallas se ajusta a su evento principal el cual corresponde a un particular modo de falla en el sistema, e incluye únicamente aquellas fallas que contribuyen a este evento principal. Es más, estas fallas no son exhaustivas, sino que cubren únicamente las fallas más creíbles, así como también las que son evaluadas por el especialista.

### 5.2.2. Simbología para la construcción de bloques de un árbol de fallas<sup>(1)(31)</sup>.

Un árbol de fallas típico está compuesto de un número de símbolos los cuales se mencionan a continuación.

a) Eventos primarios.

Los eventos primarios de un árbol de fallas son aquellos eventos, los cuales por una u otra razón no han sido totalmente desarrollados. Estos son eventos para los cuales se le tendrán que proporcionar las probabilidades si el árbol de fallas será usado para calcular la probabilidad del evento principal. Hay cuatro tipos de eventos primarios:

El Evento Básico.





El círculo describe el inicio básico de un evento de falla que no requiere más desarrollo. En otras palabras, el círculo significa que se han alcanzado los límites apropiados de resolución.

El evento no desarrollado.



El diamante describe un evento de falla específico que no ha sido totalmente desarrollado, ya sea porque el evento no es de consecuencia suficiente, o porque la información relevante del evento no está disponible.

El evento condicionante.



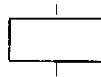
La elipse se usa para recordar cualquier condición o restricción que aplica para cualquier puerta lógica. Se usa primariamente con las puertas BLOQUEADO y PRIORIDAD AND.

El evento externo.



La casa se usa para indicar un evento que normalmente se espera que ocurra. Así, el símbolo de casa despliega los eventos que son o no fallas.

Eventos intermedios.



Un evento intermedio es un evento de falla que ocurre porque uno o más antecedentes causan una acción a través de puertas lógicas. Todos los eventos intermedios se simbolizan con rectángulos.

## b) Compuertas.

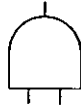
Hay dos tipos básicos de compuertas de árbol de fallas: la compuerta OR y la compuerta AND. Todas las otras compuertas son en realidad casos especiales de estos dos tipos básicos. Las compuertas se simbolizan con un escudo con la base plana o curva.

La compuerta OR.



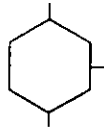
Se usa para mostrar que el evento de salida ocurre si uno o más de los eventos de entrada ocurren. Puede haber cualquier número de eventos de entrada en una compuerta OR. Es importante entender que la causalidad nunca pasa a través de una compuerta OR. Esto es, para una compuerta OR, las fallas de entrada nunca son las causas de las fallas de salida.

La compuerta AND.



Se usa para mostrar que la falla de salida ocurre únicamente si ocurren todas las fallas de entrada. En contraste a la compuerta OR, la compuerta AND especifica una relación causal entre las entradas y las salidas, es decir las fallas de entrada colectivamente representan la causa de la falla de salida. La compuerta AND no implica en absoluto los antecedentes de las fallas de entrada. Cuando se describen los eventos de entrada para una compuerta AND, se debe incorporar cualquier dependencia en la definición del evento si la dependencia afecta la lógica del sistema. Generalmente, las dependencias existen cuando la falla cambia el sistema.

La compuerta BLOQUEO.



La compuerta BLOQUEO, representada por un hexágono, es un caso especial de la compuerta AND. La salida es causada por una entrada sencilla, pero se debe satisfacer algunas condiciones calificativas antes de que la entrada pueda producir la salida. La condición que debe existir es la condicional de entrada. La descripción de esta condicional de entrada es escrita dentro de una elipse dibujada a la derecha de la puerta.

### 5.2.3. Fundamentos para la construcción del árbol de fallas<sup>(1)(31)</sup>.

En esta sección se tratará el álgebra de eventos, también llamada álgebra Booleana, con aplicación particular al árbol de fallas.

#### 5.2.3.1. Álgebra Booleana y su aplicación para el análisis del árbol de fallas<sup>(1)(31)</sup>.

El álgebra Booleana es especialmente importante en situaciones que involucran una dicotomía, como válvulas que abren o cierran, micro interruptores que abren o cierran, o de manera general eventos que ocurren o no ocurren.

Las técnicas Booleanas tienen una importancia práctica inmediata con relación al árbol de fallas. Así, un árbol de fallas es la representación gráfica de las relaciones Booleanas, entre árboles de eventos que causan un evento no deseado.

En la tabla 5.2.1 se presentan las reglas del álgebra Booleana, así como su notación.

El especialista puede checar la validez de cada regla, mediante los diagramas de Venn. De acuerdo a (1a) y (1b), las operaciones de unión e intersección son conmutativas. En otras palabras, la ley conmutativa permite intercambiar los eventos X, Y, mediante una operación AND.

Las relaciones (2a) y (2b), son similares a la ley asociativa del álgebra ordinaria:

$$a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$$

$$a + (b + c) = (a + b) + c$$

Si tenemos una serie de operaciones OR o AND, la ley asociativa permite al especialista agruparlas.

Tabla 5.2.1. Reglas del Álgebra Booleana.

Simbolismo Matemático	Simbolismo de Ingeniería	Denominación
(1a) $X \cap Y = Y \cap X$	$X * Y = Y * X$	Ley conmutativa
(1b) $X \cup Y = Y \cup X$	$X + Y = Y + X$	
(2a) $X \cap (Y \cap Z) = (X \cap Y) \cap Z$	$X * (Y * Z) = (X * Y) * Z$	Ley asociativa
(2b) $X \cup (Y \cup Z) = (X \cup Y) \cup Z$	$X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$	
(3a) $X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$	$X * (Y + Z) = X * Y + X * Z$	Ley distributiva
(3b) $X \cup (Y \cap Z) = (X \cup Y) \cap (X \cup Z)$	$X + Y * Z = (X + Y) * (X + Z)$	
(4a) $X \cap X = X$	$X * X = X$	Ley Idempotent
(4b) $X \cup X = X$	$X + X = X$	
(5a) $X \cap (X \cup Y) = X$	$X * (X + Y) = X$	Ley de absorción
(5b) $X \cup (X \cap Y) = X$	$X + X * Y = X$	
(6a) $X \cap \bar{X} = \phi$	$X * \bar{X} = \phi$	Complementación
(6b) $X \cup \bar{X} = \Omega = I$	$X + \bar{X} = \Omega = I$	
(6c) $\overline{\bar{X}} = X$	$\overline{\bar{X}} = X$	
(7a) $\overline{(X \cap Y)} = \bar{X} \cup \bar{Y}$	$\overline{(X * Y)} = \bar{X} + \bar{Y}$	Teorema de morgan
(7b) $\overline{(X \cup Y)} = \bar{X} \cap \bar{Y}$	$\overline{(X + Y)} = \bar{X} * \bar{Y}$	
(8a) $\phi \cap X = \phi$	$\phi * X = \phi$	Operaciones con y
(8b) $\phi \cup X = X$	$\phi + X = X$	
(8c) $\Omega \cap X = \phi$	$\Omega * X = X$	
(8d) $\Omega \cup X = \Omega$	$\Omega + X = \Omega$	

Las relaciones (3a) y (3b), nos permiten realizar operaciones válidas entre las operaciones OR y AND.

Las relaciones (4a) y (4b), permiten al especialista cancelar cualquier redundancia del mismo evento.

Las relaciones (5a) y (5b), pueden ser fácilmente validadas a través de un diagrama de Venn.

La relación (7a) y (7b), es la regla general para remover las negociaciones y los paréntesis. Suponer que X representa la falla de un componente, entonces  $\bar{X}$  representa la no-falla del componente, o éxito en la operación del componente apropiado.

El árbol de fallas interrelaciona eventos y se emplean símbolos para mostrar las interrelaciones. El símbolo básico es la "compuerta" y cada compuerta puede tener varias entradas y una sola salida.

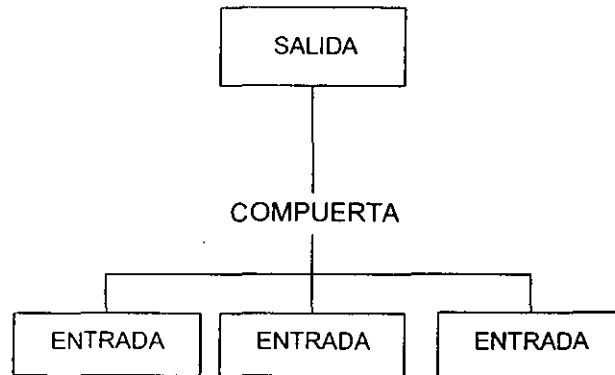


Figura 5.2.2. la función compuerta en un árbol de fallas

Cuando se elabora un árbol de fallas, procedemos en su construcción de la salida hacia la(s) entrada(s), esto es, los eventos más básicos. En este proceso, se emplean ciertas técnicas para determinar cual categoría de la compuerta es la apropiada.

Las dos compuertas básicas son la OR y la AND. Ya que estas compuertas relacionan eventos exactamente en el mismo camino que las operaciones Booleanas, por lo tanto existe una correlación uno a uno entre la representación Booleana y la de árbol de fallas.

#### La Compuerta OR:

El símbolo de la compuerta OR es



y representa la unión de los eventos de entrada a la compuerta. Uno o más de los eventos deben de ocurrir para que exista la salida. La compuerta OR es equivalente al símbolo Booleano "+". Para n eventos de entrada a una compuerta OR, se tienen la expresión Booleana equivalente:

$$Q = A_1 + A_2 + \dots + A_n \quad (5.2.1)$$

#### La Compuerta AND:

El símbolo de la compuerta AND es



y representa la intersección de eventos de entrada a la compuerta. Para que exista la salida se deben de dar todos los eventos de entrada. La compuerta AND es equivalente al símbolo Booleana "•". Para n eventos de entrada a una compuerta AND, se tiene la expresión Booleana equivalente:

$$Q = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n \quad (5.2.2)$$

En este caso, el evento Q ocurre si y solamente si todos los  $A_i$  ocurren.

Las reglas de álgebra Booleana también se pueden aplicar para obtener una forma del árbol de fallas, llamada conjunto de corte mínimo, el cual nos permite las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de manera directa.

### 5.2.3.2. Determinación de los conjuntos de corte mínimo de un árbol de fallas<sup>(1)(31)</sup>.

Uno de los principales propósitos al representar un árbol de fallas en términos de ecuaciones Booleanas es que estos pueden ser usados para determinar los conjuntos de corte mínimo asociados al árbol. Los conjuntos de corte mínimo definen los modos de falla del evento no deseado, y se obtienen cuando se evalúa el árbol de fallas, una vez que se obtienen los conjuntos de corte mínimo, la cuantificación del árbol es casi directa.

Podemos definir un conjunto de corte mínimo de la siguiente manera: un conjunto de corte mínimo en la combinación más pequeña de fallas de componentes, necesaria y suficiente para causar la ocurrencia del evento no deseado.

Cualquier árbol de fallas es el resultado de un número finito de conjuntos de corte mínimo, los cuales son únicos para el evento no deseado. El conjunto de corte mínimo de un componente, si existe, representa aquella falla simple que causa el evento no deseado. El conjunto de corte mínimo de dos componentes, representa la doble falla, la cual causará que ocurra el evento no deseado. Para un conjunto de corte mínimo de n componentes, todos los n componentes deberán de fallar a fin de que ocurra el evento no deseado.

La expresión general para el conjunto de corte mínimo es

$$T = M_1 + M_2 + \dots + M_k$$

donde T es el evento no deseado y  $M_i$ , son los conjuntos de corte mínimo. Cada uno de los conjuntos de corte mínimo consiste de una combinación específica de fallas de componentes, y así se puede expresar el conjunto de corte mínimo por:

$$M_2 = X_1 \cdot X_2 \dots X_n$$

Donde  $X_1, X_2$ , etc., son las fallas del componente básico.

Para determinar los conjuntos de corte mínimo de un árbol de fallas, éste deberá primero ser trasladado a una ecuación Booleana equivalente, y se realiza la sustitución de arriba hacia abajo. El método es directo e involucra el empleo de la simbología mencionada en la sección 5.2.2. La ley distributiva y la ley de absorción se emplean para remover las redundancias.

### 5.3. Construcción del Árbol de Fallas<sup>(1)(31)</sup>.

En la construcción de los árboles de falla se usa la lógica de falla apropiada, y se utilizan los símbolos para representar la interacción que tienen los eventos básicos iniciantes para llegar al "Top Event".

Descripción de la metodología.

- a) Definir el sistema y el problema, en donde es necesario considerar, Eventos iniciantes y Sistemas de seguridad y protecciones
- b) Construir el modelo lógico del sistema y determinar la independencia estadística de los eventos iniciantes en las ramas, lo que puede originar el desarrollo de árboles de falla para cada punto en la rama.
- c) Recolectar/calcular datos de la frecuencia del evento iniciante y la probabilidad de falla sobre la demanda para cada punto de la rama.
- d) En el cálculo de datos de tasas de fallas para los eventos básicos se utilizan la tasa de falla ( $\lambda$ ) y el tiempo muerto ( $\tau$ ) Actualmente existen fuentes comerciales de datos de tasas de fallas de componentes en las cuales se incluyen registros de plantas, experiencia de personal de operación, manuales de tasas de fallas de diferentes industrias (OREDA Handbook, 1984, 1992 y 1997) así como opiniones de expertos.
- e) Por ultimo se realiza el cálculo de la frecuencia o determinación de los parámetros de confiabilidad para cada secuencia de accidente multiplicando la frecuencia del evento iniciante por la probabilidad de cada punto en la rama de la secuencia (o calculando la frecuencia para cada corte).
- f) Los resultados se presentan en una Tabla en donde se muestren claramente la disminución del Riesgo del evento no deseado respecto al número esperado de falla para los escenarios analizados, cuando se aplica la Propuesta de Mitigación respectiva, considerando siempre que dicha propuesta emitida deba ser factible de llevarse a cabo bajo las buenas prácticas y decisiones de ingeniería. También es importante considerar que el sistema se encuentre en niveles de riesgo aceptables internacionalmente.

#### **5.4. Técnicas para la evaluación del árbol de fallas<sup>(1)(31)</sup>.**

En esta sección se presentan los métodos aproximados para cuantificar árboles de fallas, basados en la teoría del árbol cinético (KTT por sus siglas en inglés) (Vesley, 1970). Estos métodos de aproximación permiten al especialista estimar las características de confiabilidad del evento principal en un árbol de fallas, a través del uso de conjunto de cortes mínimos y datos de tasa de fallas para los eventos básicos en el árbol de falla.

Los métodos de análisis de árbol de falla se usan para analizar eventos en donde los datos de accidentes no están disponibles de registros históricos; en estos casos, los métodos de aproximación simple se pueden usar para estimar parámetros de confiabilidad que son requeridos en una análisis de riesgos.

##### **5.4.1. Parámetros de confiabilidad<sup>(1)(31)</sup>.**

Generalmente el especialista está interesado en uno o más de los siguientes parámetros de confiabilidad:

- a) No funcionabilidad. La probabilidad de que el evento de falla exista en un tiempo inicial ( $t$ ) o ocurra entre  $t$  y el fin de la misión.
- b) No disponibilidad. La probabilidad de que el evento de falla exista en un tiempo específico ( $t$ ).
- c) No confiabilidad. La probabilidad de que el evento de falla ocurra durante un intervalo de tiempo específico ( $0$  a  $t$ ).

- d) Número esperado de fallas. El número de veces que ocurre el evento de falla durante un intervalo de tiempo específico (0 a t).
- e) Tasa de fallas. Número esperado de ocurrencias del evento de falla por unidad de tiempo en el tiempo t.
- f) Tasa de fallas. Definido como  $\lambda dt$  es la probabilidad de que el evento de falla ocurra entre t y t+dt, si no ha ocurrido antes de t.
- g) Tiempo de muerte promedio. Tiempo promedio de la existencia del evento de falla.
- h) Importancia del evento básico. Probabilidad de que el evento básico contribuya a la falla del sistema, si el sistema falla.
- i) Importancia del conjunto de corte mínimo. Probabilidad de que el conjunto de corte esté causando la falla del sistema, si el sistema falla.

La notación que se usa para los parámetros de confiabilidad se da en la siguiente tabla.

**Tabla 5.4.1.** Notación para las ecuaciones de aproximación<sup>(1)</sup>.

Parámetro de interés	Evento básico <sup>a</sup>	Conjunto de corte mínimo <sup>b</sup>	Evento principal <sup>c</sup>
No funcionalidad	$\bar{d}_i$	$\bar{D}_k$	$\bar{D}_T$
No disponibilidad	$\bar{a}_i$	$\bar{A}_k$	$\bar{A}_T$
No confiabilidad	$\bar{r}_i$	$\bar{R}_k$	$\bar{R}_T$
Número esperado de fallas	$enf_i$	$ENF_k$	$ENF_T$
Promedio de tasa de fallas	$rof_i$	$ROF_k$	$ROF_T$
Tasa de fallas	$\lambda_i$	$\Lambda_k$	$\Lambda_T$
Tiempo de muerte promedio	$\tau_i$	$\tau_k$	$\tau_T$
Importancia	$I_i$	$I_k$	--
Tiempo de restauración	$\tau_i$	$\tau_k$	$\tau_T$

<sup>a</sup>El subíndice i denota el evento básico i.

<sup>b</sup>El subíndice k denota el conjunto de corte mínimo k.

<sup>c</sup>El subíndice T denota el evento principal

En la tabla 5.4.2 se presentan las ecuaciones de aproximación junto con las ecuaciones KTT, así como también las consideraciones y limitaciones.

Tabla 5.4.2. Ecuaciones de aproximación para cálculo de parámetros de confiabilidad<sup>(1)</sup>.

Parámetros	Ecuación	Aproximación	Limitaciones de la aproximación
<b>Eventos básicos</b>			
$\bar{r}_i$	$1 - e^{-\lambda_i t}$	$\lambda_i t$	$\lambda_i t < 0.1$
$\bar{a}_i$	$\frac{\lambda_i \tau_i}{1 + \lambda_i \tau_i} [1 - e^{-(\lambda_i + 1/\tau_i)t}]$	$\frac{\lambda_i \tau_i}{1 + \lambda_i \tau_i}$	$t \geq 2\tau_i$
		$\lambda_i \tau_i$	$\lambda_i \tau_i < 0.1, t \geq 2\tau_i$
Probabilidad de falla en la demanda PFOD <sub>i</sub>	$\frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} \bar{a}_i(t) dt$	$\frac{\lambda_i T_i}{2}$	$\lambda_i t < 0.1$ , evento básico no reparable
	$T_i =$ intervalo de prueba para el evento básico i		Demandas sobre un sistema en espera tienen la misma probabilidad de ocurrir en cualquier tiempo
	$PFOD = \bar{a}_{asintótica} \approx \lambda_i \tau_i$		$\lambda_i \tau_i < 0.1$ , evento básico reparable
$\bar{d}_i$		$PFOD_i + \bar{r}_i$	
rof <sub>i</sub>	$(1 - \bar{a}_i)\lambda_i$		
enf <sub>i</sub>	$\int rof_i dt$		
	$\bar{r}_i = \bar{a}_i = enf_i$		Únicamente eventos básicos no reparable
$I_i^{\bar{A}}$	$\sum_{k=1}^M I_k^{\bar{A}}$		
$I_i^{\bar{R}}$	$\sum_{k=1}^M I_k^{\bar{R}}$		
$I_i^{ENF}$	$\sum_{k=1}^M I_k^{ENF}$		
	$M =$ número de conjunto de cortes que contienen el evento básico i		



**Tabla 5.4.2.** Ecuaciones de aproximación para cálculo de parámetros de confiabilidad<sup>(1)</sup> (continuación).

Parámetros	Ecuación	Aproximación	Limitaciones de la aproximación
<b>Conjunto de cortes mínimo</b>			
$\bar{A}_k^a$	$\prod_{i=1}^{n_k} \bar{a}_i$		$n_k$ = el número de eventos en el conjunto de corte k
PFOD <sub>k</sub>	$\frac{1}{T} \int_0^T \bar{A}_k(t) dt$ T = intervalo de prueba del conjunto de corte mínimo		Las demandas sobre un sistema en espera tienen la misma probabilidad de ocurrir en cualquier tiempo
ROF <sub>k</sub> <sup>a</sup>	$\sum_{i=1}^{n_k} \lambda_i a_i \prod_{j=1, j \neq i}^{n_k} \bar{a}_j$	$\bar{A}_k \sum_{i=1}^{n_k} \frac{\lambda_i}{a_i}$	$a_i$ cercano a 1 $a_i$ = disponibilidad del evento básico $i(1 - \bar{a}_i)$
ENF <sub>k</sub> <sup>a</sup>	$\int_0^T ROF_k dt$		
$\bar{R}_k^a$		$\leq ENF_k$	
$\bar{D}_k$		$PFOD_k = \bar{R}_k$	
$A_k$	$\frac{ROF_k}{A_k}$	$< ROF_k$	
$I_k^{\bar{A}}$	$\frac{\bar{A}_k}{\bar{A}_T}$		
$I_k^{\bar{R}}$	$\frac{\bar{R}_k}{\bar{R}_T}$		
<b>Evento principal</b>			
$\bar{A}_T$		$\leq \sum_{k=1}^N \bar{A}_k$	
$\bar{R}_T$		$\leq \sum_{k=1}^N \bar{R}_k$	
ENF <sub>T</sub>		$\leq \sum_{k=1}^N ENF_k$	

**Tabla 5.3.2.** Ecuaciones de aproximación para cálculo de parámetros de confiabilidad<sup>(1)</sup> (continuación).

Parámetros	Ecuación	Aproximación	Limitaciones de la aproximación
$\bar{D}_T$		$\leq \sum_{k=1}^N \bar{D}_k$	
$\Lambda_T$		$\approx \sum_{k=1}^N \Lambda_k$	
		N = número de conjuntos de cortes mínimos	
$\tau_T$		$\approx \frac{\bar{A}_T}{\Lambda_T}$	Todos los eventos básicos son reparables

<sup>a</sup> Si todos los eventos básicos en un conjunto de corte mínimo son no reparables, entonces  $\bar{A}_k = \bar{R}_k = ENF_k$

### 5.5. Cuantificación del árbol de fallas<sup>(1)(31)</sup>.

a) Análisis de Árbol de Fallas - Cualitativo.

Elabora el árbol de fallas para el evento principal y listar los conjuntos de cortes mínimos.

b) Análisis de Árbol de Fallas - Cuantitativo.

Listar los datos de fallas para los eventos básicos que aparecen en el conjunto de cortes mínimos.

c) Calcular los Eventos Básicos.

Calcular  $\bar{a}_i$  con las ecuaciones de la tabla 5.3.2 para la parte de eventos básicos.

d) Calcular los Conjuntos de Corte Mínimos.

Calcular la tasa de fallas  $ROF_k$  del conjunto de cortes mínimos (tabla 5.3.2).

Calcular el número esperado de fallas  $ENF_k$  del conjunto de cortes mínimos (tabla 5.3.2)

## CAPITULO 6

### ESTIMACIÓN DEL RIESGO<sup>(1)</sup>.

#### 6.1. Medidas de riesgo<sup>(1)</sup>.

El riesgo se define como una medida de pérdidas económicas y daños humanos en función de la probabilidad y la magnitud de las pérdidas o daños. Hay tres formas usadas comúnmente que combinan información de probabilidad y magnitud de pérdidas o daños:

- Índices de riesgo son números en particular o tabulaciones que resultan en simples presentaciones.
- Medidas de riesgo individual los cuales consideran el riesgo de un individuo que puede estar en algún punto en las zonas de efecto de los accidentes.
- Medidas de riesgo social el cual considera el riesgo de la población que están en las zonas de efecto de los accidentes.

#### 6.1.1. Índices de riesgo<sup>(1)</sup>.

Los índices de riesgo son números o tabulaciones en particular, y ellos pueden ser usados en un sentido relativo o absoluto. Las limitaciones en su uso son:

1. No pueden ser un criterio absoluto para aceptar o rechazar un riesgo.
2. No comunican la misma información como riesgo social o individual.

Los índices de consecuencias (ejemplo Doe o Mond) consideran el riesgo solamente en un sentido relativo. Los siguientes ejemplos de índices de riesgo son en forma absoluta, Tasa de Accidentes Fatales (FAR, por sus siglas en ingles Fatal Accident Rate) que algunas compañías han establecido.

- La tasa de accidentes fatales (FAR)<sup>(37)</sup> es el número estimado de muertes por 108 horas de exposición. El FAR es un índice numérico que es directamente proporcional al Riesgo Individual Promedio. La única diferencia numérica es el periodo de tiempo, el cual es un año para el Riesgo Individual Promedio, por lo tanto el FAR debe ser multiplicado por un factor de  $10^8 / (24 \times 365) = 1.14 \times 10^4$ .
- El Índice de Peligro Individual (IHI)<sup>(38)</sup> es el FAR para un peligro particular, con el tiempo de exposición definido como el tiempo actual en el que una persona es expuesta al peligro de interés. El IHI estima el riesgo pico.
- La Tasa Promedio de Muerte<sup>(37)</sup> se define como el número promedio de fatalidades por unidad de tiempo que se pueden esperar de todos los incidentes posibles. También se le conoce como el Número de Fatalidades por Accidentes.
- El Índice de Costo Social Equivalente<sup>(39)</sup> es una modificación de la Tasa Promedio de muertes y toma en cuenta la aversión de la sociedad a incidentes de grandes consecuencias.
- El Índice o Número de Mortalidad<sup>(40)</sup> se usa para caracterizar el peligro potencial de materiales tóxicos almacenados. Está basado en la tasa promedio de accidentes observado para la masa del material o energía liberada, así como también de registros históricos.

- El Índice Económico mide las pérdidas financieras y puede ser presentado y tratado esencialmente en la misma forma que un FAR. Las compañías pueden haber desarrollado su riesgo económico específico, y el Índice Económico puede ser comparado con ello.

### 6.1.2. Riesgo individual<sup>(1)</sup>.

Considine<sup>(42)</sup> define el riesgo individual como el riesgo de una persona en la vecindad de un peligro. Esto incluye la naturaleza de los daños al individuo, la probabilidad de ocurrencia de los daños y el periodo de tiempo sobre el cual tal vez los daños ocurran. Los analistas de riesgo frecuentemente estiman el riesgo de daños irreversibles o fatalidades, para los cuales existen más estadísticas.

Algunas definiciones de las medidas de riesgo individual son las siguientes.

1. Contornos de Riesgo Individual muestran la distribución geográfica del riesgo individual. Los contornos muestran la frecuencia esperada de un evento capaz de causar un nivel específico de daños a una locación específica, indiferente de si o no alguien esté presente en dicha locación para sufrir ese daño.
2. Máximo Riesgo Individual. Es el riesgo individual de la persona expuesta al más alto riesgo en una población expuesta. Este es frecuentemente el operador de una unidad que se esté analizando, pero tal vez sea la persona de la población en general viviendo en una locación de más alto riesgo. El Máximo riesgo individual puede ser determinado de los contornos de riesgo localizando la persona en el más alto riesgo y determinando el riesgo individual en ese punto. Alternativamente este puede ser determinado calculando el riesgo individual en todas las locaciones geográficas donde las personas están presentes e investigando los resultados para el máximo valor.
3. Riesgo Individual Promedio (población expuesta) es el riesgo individual promedio de la población que es expuesta al riesgo de la instalación (por ejemplo, todos los operadores de un edificio o aquellas personas dentro de la zona de efecto más grande). Esta medida de riesgo es solamente usada si el riesgo esta relativamente distribuido uniformemente sobre la población.
4. Riesgo Individual Promedio (población total) es el riesgo individual promedio sobre una población predeterminada indiferente de si o no todas las personas en esa población estén actualmente expuestas al riesgo. Esta medida de riesgo promedio es potencialmente y extremadamente engañosa. Si la población seleccionada es demasiado grande, un bajo estimado del riesgo individual promedio resultara porque mucha de la población tal vez no este en riesgo bajo la instalación en estudio.
5. Riesgo Individual Promedio (horas expuestas / horas trabajadas). El riesgo individual para una actividad puede ser calculada para la duración de la actividad o puede ser promediado sobre el día de trabajo.

### 6.1.3. Riesgo social<sup>(1)</sup>.

Algunos incidentes mayores tienen el potencial de afectar muchas personas. Riesgo social es una medida del riesgo de un grupo de personas. Se expresa en términos de la distribución de frecuencia de eventos de accidentes múltiples. Sin embargo, el riesgo social también se puede expresar en términos similares al riesgo individual. El cálculo del riesgo social requiere la misma información de frecuencia y consecuencia que para un riesgo individual. Adicionalmente, la estimación del riesgo social requiere una definición de la población en riesgo alrededor de la instalación. Esta definición puede incluir el tipo de población, la probabilidad de que las personas estén presentes, o factores de mitigación.

El riesgo individual y social tienen diferentes presentaciones de la misma combinación fundamental de la frecuencia incidente y consecuencias. Estas medidas pueden ser importantes en la evaluación de los beneficios de las medidas de la reducción de riesgos o en juzgar la aceptabilidad de una planta en términos absolutos. En general, es imposible derivar una de la otra sin volver a hacer los cálculos, aunque se piense que la evaluación de la información para la frecuencia y consecuencia sea la misma.

#### 6.1.4. Medidas del riesgo por daño<sup>(1)</sup>.

El riesgo a personas puede ser definido en términos de daños o fatalidades. El uso de daños como una base de evaluación de riesgos es menos perturbante que el uso de fatalidades. Más sin embargo, esto introduce problemas asociados con el grado de daños y comparación entre diferentes tipos de daños (efectos por radiación térmica vs explosión vs tóxicos). Muchas medidas de riesgo han sido conducidas en las bases de efectos fatales, más sin embargo, hay incertidumbre para precisar que constituye una dosis fatal de radiación térmica, efecto por onda expansiva o un químico tóxico.

**Tabla 6.2.1.** Presentación de medidas de riesgo.

Medida de Riesgo	Formato de presentación
<b>Indices</b>	
Índice de costo social equivalente	Un simple número que representa el valor del índice.
Tasa de accidente fatal	Un estimado puntual de fatalidades / 108 horas de exposición.
Índice de peligro individual	Un estimado del riesgo individual pico o FAR.
Tasa promedio de muerte	Un número que representa el número promedio estimado de fatalidades por unidad de tiempo.
Índice de mortalidad	Un valor simple que representa las consecuencias.
<b>Riesgo individual</b>	
Contorno de riesgo individual	Curva cerrada de igual valor de riesgo colocada sobre un mapa local.
Perfil de riesgo individual	Una gráfica del riesgo individual como una función de la distancia desde la planta hacia una dirección específica.
Riesgo individual máximo	Un valor numérico simple del riesgo individual correspondiente a la persona en alto riesgo
Riesgo individual promedio (población expuesta)	Un valor numérico simple que estima el riesgo promedio para una persona en la población expuesta.
Riesgo individual promedio (población total)	Un valor numérico simple que estima el riesgo promedio para una persona en una población predeterminada, aunque no todos los miembros de la población estén expuestas al peligro.
<b>Riesgo Social</b>	
Curva de riesgo social (curva F-N)	Una gráfica de la probabilidad acumulada o frecuencia de eventos causados N o más fatalidades, lesiones o exposición versus N, el número de fatalidades, lesiones o exposición.
Riesgo social promedio	Otro término para la tasa promedio de muertes.

## 6.2. Presentación del riesgo<sup>(1)</sup>.

La Gran cantidad de información de frecuencia y consecuencia generada por una CPQRA debe ser integrada en una presentación que sea fácil de entender y usar. La forma de la presentación varía dependiendo de las metas del CPQRA y la medida de riesgo seleccionado.

La presentación del riesgo provee una descripción simple del riesgo cuantitativamente para la toma de decisiones. El número de incidentes evaluados en un CPQRA puede ser muy grande. La presentación del riesgo reduce este gran volumen de información en una forma manejable. El resultado final puede ser un índice, una tabla, una gráfica (curva FN) y/o un mapa de riesgo (contorno de riesgo individual).

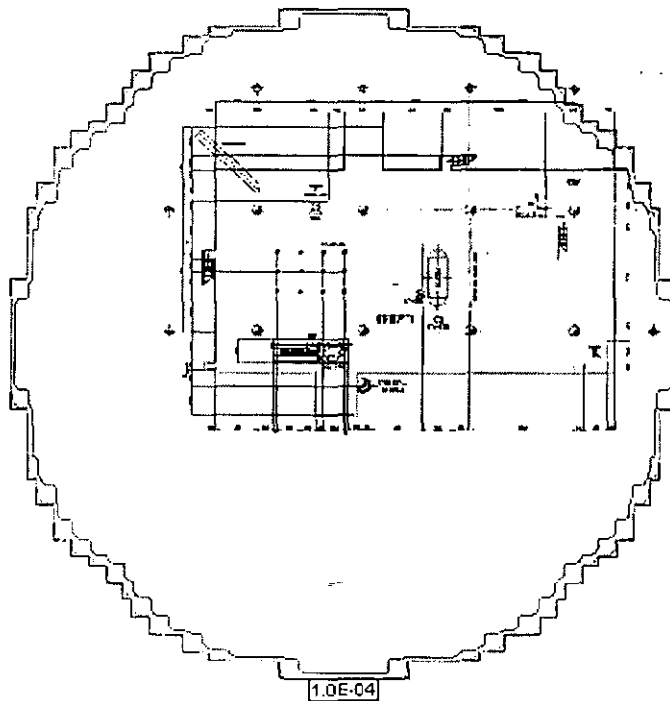
Los estudios de riesgos publicados han usado una variedad de formatos de presentación, que incluyen medidas de riesgo individual y social (ver tabla 6.2.1).

### 6.2.1. Índices de riesgo<sup>(1)</sup>.

Debido a que el índice de riesgo es una medida dada por un número simple, se presenta en forma de tablas. El índice medido frecuentemente se compara con el riesgo objetivo.

### 6.2.2. Riesgo individual<sup>(1)</sup>.

Formas comunes de presentación de riesgo individual son las gráficas de contornos de riesgo (Figura 6.2.1) y perfiles de riesgo individual<sup>(42)</sup>.



**Figura 6.2.1.** Ejemplo de una gráfica de contorno de riesgo individual.

La gráfica del contorno de riesgo muestra los estimados del riesgo individual en puntos específicos en un mapa. Los contornos de riesgo (líneas isoriesgo) conectan líneas de igual riesgo alrededor de la instalación. De esta manera, los lugares de particular vulnerabilidad se pueden identificar rápidamente.

El perfil de riesgo individual es una gráfica de riesgo individual como una función de distancia de la fuente de riesgo. Este tipo de gráfica es de dos dimensiones (riesgo vs distancia) y es una simplificación de la gráfica de contorno del riesgo individual. Para usar este formato se deben de dar dos condiciones: la fuente del riesgo debe ser compacta y la distribución del riesgo debe ser igual en todas direcciones.

### 6.2.3. Riesgo social<sup>(1)</sup>.

El riesgo social direcciona el número de personas que tal vez sean afectadas por incidentes peligrosos. Una forma común de riesgo social es conocida como una curva F-N (Frecuencia – Número de fatalidades). Una curva F-N es una gráfica de frecuencia acumulativa contra consecuencias (expresado como número de fatalidades). Se usa una gráfica logarítmica porque el rango de la frecuencia y número de fatalidades son de varios ordenes de magnitud.

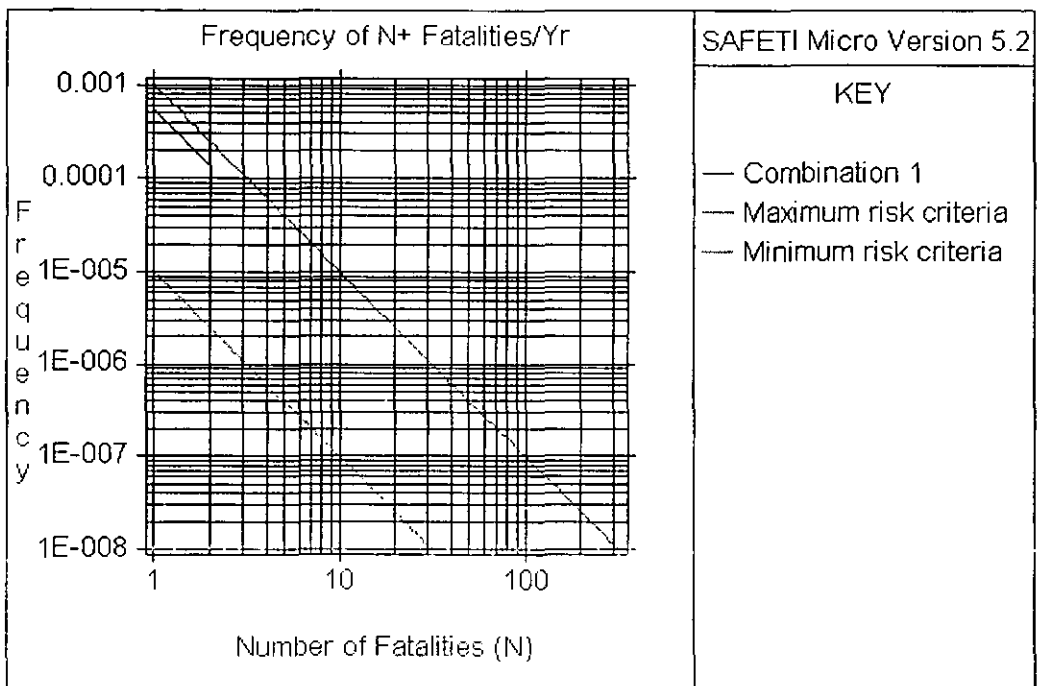


Figura 6.2.2. Ejemplo de una curva F-N para el estimado del riesgo social.

### 6.3. Selección de la medida del riesgo y formato de presentación<sup>(1)</sup>.

La selección de la medida del riesgo y el formato de presentación es dependiente sobre un número de factores.

#### 6.3.1. Selección de las medidas de riesgo<sup>(1)</sup>.

Algunos factores que deben ser considerados son los siguientes;

- **Objetivos de estudio.** El objetivo de estudio puede o no puede apuntar a una medida de riesgo específica, pero el alcance del trabajo debe definir que medida de riesgo se va a aplicar.
- **Profundidad requerida del estudio.** El desarrollo de una medida específica se puede restringir por la profundidad del estudio.

- Usos finales. La selección de medidas de riesgos es dictada normalmente por el uso final planeado del estudio, pero los objetivos del estudio pueden no considerar todos los posibles usos finales de los resultados del estudio.
- Población en riesgo. La selección de la medida de riesgo puede ser restringida por si el estudio es dirigido a los empleados de una planta o al público de los alrededores. Usualmente el riesgo individual se estima para trabajadores de una planta por su exposición al riesgo, pero el estimado del riesgo social también puede ser apropiado para plantas grandes con diversa población de trabajadores.

### **6.3.2. Selección del formato de presentación<sup>(1)</sup>.**

Los siguientes factores deben ser considerados en decidir cuales formatos son elegidos.

- Requerimientos del usuario. Así como con la selección de la medida de riesgo, el usuario puede tener una necesidad específica para ver el estimado del riesgo en un cierto formato. En ese caso, este formato requiere el establecimiento del nivel mínimo de esfuerzo requerido.
- Conocimientos del usuario. Cuando el usuario no está familiarizado con los formatos, se necesita hacer una selección juiciosa a través de un proceso donde los ejemplos de formatos se presentan y son aprobados por el usuario antes de que se haga cualquier esfuerzo para asegurar la aprobación para el alcance del trabajo. Si se selecciona un formato complejo de presentación, será necesario orientar y familiarizar al usuario sobre la interpretación de la presentación del riesgo.
- Efectividad de los resultados de comunicación. No importa cual es el conocimiento del usuario o la percepción de los requerimientos, es vital que la presentación comunique los resultados en una forma aceptable. La presentación debe ser tan simple como sea necesario para asegurar su comprensión, pero no tan simple que la resolución se pierda.
- Usos potenciales no revelados y audiencia. A menudo los resultados de un CPQRA se pueden usar para propósitos fuera de los objetivos de estudio. Este uso puede conducir a la mal interpretación de resultados, debido a la selección de los formatos de presentación. Bajo estas circunstancias se puede dar el caso de que no haya tiempo para desarrollar más presentaciones apropiadas. Puede ser prudente considerar la probabilidad de tales usos no oficiales y preparar las presentaciones apropiadas como parte de los resultados.
- Necesidad de presentaciones comparativas. Puede ser deseable presentar la comparación de los resultados del estudio con otros valores de riesgos. Este tipo de presentaciones puede tener las siguientes comparaciones:
  - Una comparación de diseño de alternativas de proceso u opciones de operación.
  - Una comparación del estimado de riesgo vigente con el riesgo estimado de otros sistemas similares estudiado previamente, para áreas consideradas para la reducción del riesgo o estudios más profundos.
  - Una comparación del estimado de riesgo vigente con otro estimado de riesgo interno que ha sido previamente aprobado o rechazado, o una comparación del estimado de riesgo vigente con otros estudios publicados.
  - Una comparación del riesgo vigente con otro riesgo voluntario o involuntario, para jerarquizar el estimado de riesgo vigente entre esos valores de referencia.



## 6.4. Cálculo del riesgo<sup>(1)</sup>.

Esta sección describe los procedimientos para calcular riesgo individual, riesgo social e índice de riesgo.

### 6.4.1. Riesgo individual<sup>(1)</sup>.

El siguiente procedimiento para calcular el riesgo individual esta basado en el IchemE<sup>(41)</sup>. Para los cálculos de riesgo individual en una localización geográfica cerca de una planta, se asume que las contribuciones de todos los casos posibles del escenario son aditivas. Así, el riesgo individual total en cada punto es igual a la suma de los riesgos individuales en dicho punto, de todos los resultados de los casos del escenario evaluados cuantitativamente asociados con la planta

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^n IR_{x,y,i} \quad (6.4.1)$$

donde:

$IR_{x,y}$  = Riesgo individual total de fatalidades en una locación geográfica x,y.

$IR_{x,y,i}$  = El riesgo individual de fatalidades en una localización geográfica x,y de un caso del escenario evaluado cuantitativamente i.

n = número total de casos del escenario evaluado cuantitativamente considerados en el análisis.

Los datos para la ecuación (6.4.1) se obtienen de

$$IR_{x,y,i} = f_i P_{f,i} \quad (6.4.2)$$

donde:

$f_i$  = frecuencia del caso del escenario evaluado cuantitativamente i, del análisis de frecuencia (año<sup>-1</sup>).

$P_{f,i}$  = Probabilidad que el caso del escenario evaluado cuantitativamente i resultará en una fatalidad en una localización x,y del modelo de consecuencias y efectos.

Y los datos para la ecuación (4.4.2) se obtienen de

$$f_i = F_I P_{o,i} P_{oc,i} \quad (6.4.3)$$

donde :

$F_I$  = frecuencia del escenario I, el cual ha resultado del caso del escenario evaluado cuantitativamente i como un de los resultados de los casos de los incidentes (año<sup>-1</sup>).

$P_{o,i}$  = Probabilidad de que el incidente ocurra, teniendo i como uno de estos incidentes resultantes, ocurre dada que el incidente I ha ocurrido.

$P_{oc,i}$  = Probabilidad que el resultado del incidente i ocurra dado la ocurrencia del incidente precursor I y el incidente resultante corresponda a la salida del caso i.

Los cálculos de  $f_i$  requiere de la evaluación del resultado del accidente y las probabilidades del resultado del accidente ( $P_{o,i}$ ,  $P_{oc,i}$ ) dado la ocurrencia del incidente I.

#### 6.4.1.1. Contornos de riesgo individual y perfiles<sup>(1)</sup>.

Una aproximación simplificada para el cálculo de los contornos de riesgo individual y perfiles esta basada en las siguientes consideraciones.

- Todos los peligros se originan en los puntos fuente.

- La distribución del viento es uniforme (el viento es igualmente probable que sople en alguna dirección).
- Se puede usar una velocidad del viento y una clase de estabilidad atmosférica en particular.
- No se consideran los factores de mitigación.
- Las fuentes de ignición están uniformemente distribuidas.
- Los efectos de las consecuencias se pueden tratar discretamente. El nivel de efecto dentro de la zona de efecto en particular es constante (ejemplo 100% de fatalidades). Detrás de esa zona no hay efectos.

El uso de estas consideraciones resulta en contornos de riesgo simétricos, todos los contornos de riesgo son circulares. Así el riesgo individual determinado en una dirección radial de la fuente define el perfil de riesgo y el mapa de contorno de riesgo.

La figura 6.4.2 muestra el procedimiento para el cálculo del riesgo individual. Este procedimiento requiere una lista de todos los accidentes, resultados de los accidentes y los casos de resultados de accidentes considerados en el estudio de consecuencias y frecuencias para todos los casos de resultados de accidentes, los cuales deben ser determinados usando los métodos mencionados en el análisis de consecuencias y análisis de frecuencia de fallas.

El efecto de zona se puede definir en términos de distancia radial de la emisión, dentro de la cual ocurre el efecto que está bajo consideración. Para aquellos accidentes cuyos resultados son afectados por la dirección del viento, se requiere un estimado de la anchura de la zona de efecto en términos del ángulo abarcado, como se muestra en la figura 6.4.1. El resultado de esto es una lista de todos los casos de resultados de accidentes para el estudio, cada uno de ellos está asociado con la frecuencia, radio de la zona de efecto y ángulo abarcado.

Para generar el mapa de contorno de riesgo, se selecciona el accidente con la zona de afectación más extensa y se dibuja el círculo apropiado de radio igual a la zona de efecto sobre el mapa. Posteriormente, se determina si el accidente es afectado por la dirección del viento (por ejemplo, una nube de gas tóxico y/o inflamable se dispersará o viajará viento abajo, pero una explosión de la fase condensada tendrá similares efectos en todas las direcciones, sin hacer caso a la dirección del viento). Si el resultado del accidente es afectado por la dirección del viento, la frecuencia debe ser reducida por un factor de dirección, tomando en cuenta el hecho de que el viento estará soplando en una dirección en particular por solo una fracción del tiempo de la ocurrencia del accidente. Ya que se ha asumido que el viento es igualmente probable que sople en alguna dirección, se puede asumir que el factor de dirección es igual a  $\theta_i / 360$  donde  $\theta_i$  = ángulo abarcado por la zona de efecto del caso del resultado del accidente.

Para el caso en que la dirección del viento afecta una locación en particular, la frecuencia del accidente será igual a

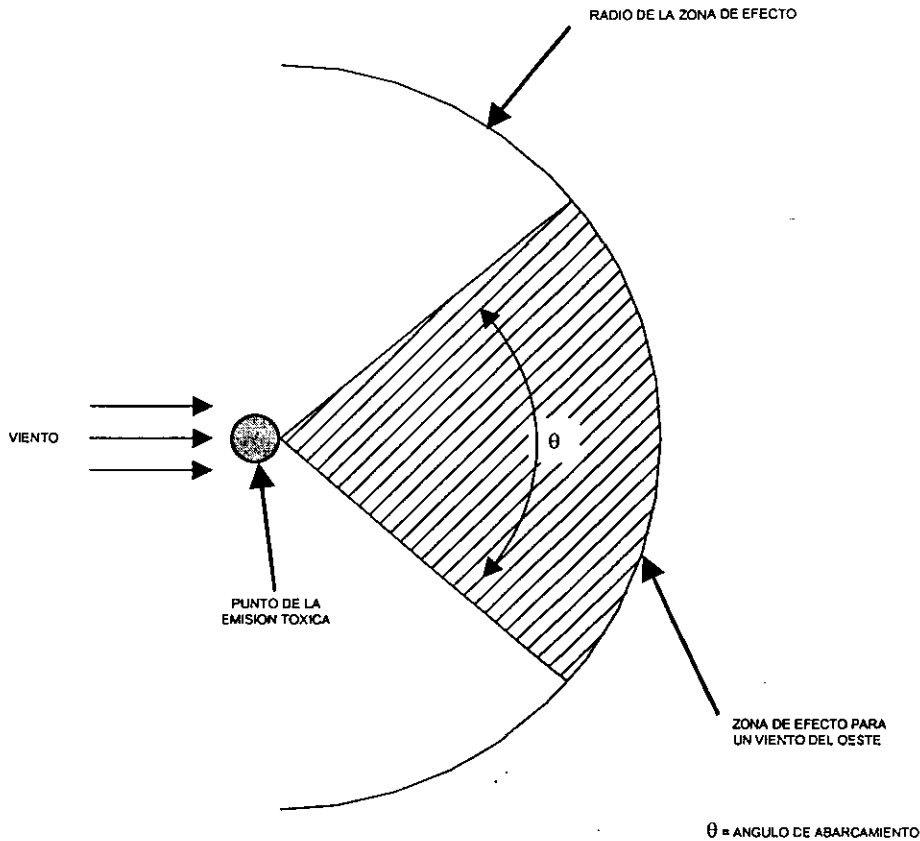
$$f_{i,d} = f_i(\theta_i / 360) \quad (6.4.4)$$

donde:

$f_{i,d}$  = frecuencia a la cual el accidente resultante afectara un punto en alguna dirección en particular asumiendo una distribución uniforme de la dirección del viento (año<sup>-1</sup>).

$f_i$  = frecuencia estimada de ocurrencia del accidente i (año<sup>-1</sup>).

$\theta_i$  = el ángulo abarcado por la zona de efecto del accidente  $i$  (grados).



**Figura 6.4.1.** Zona de efecto para el resultado del caso de un incidente dependiente de la dirección del viento para el procedimiento simplificado de la estimación del riesgo individual de la figura 6.4.2.

El próximo paso es asignar un valor de riesgo individual al contorno. Esto es igual a la frecuencia del caso del resultado del incidente  $i$  adicionado al riesgo individual del próximo contorno de riesgo.

$$IRC_i = f_i(\text{ó } f_{i,d}) + IRC_{i-1} \tag{6.4.5}$$

donde:

$IRC_i$  = Valor del riesgo individual en el contorno del incidente resultante bajo consideración ( $\text{año}^{-1}$ ).

$IRC_{i-1}$  = Valor del riesgo individual del próximo contorno más lejano ( $\text{año}^{-1}$ ).

$f_i$  y  $f_{i,d}$  son definidos por la ecuación (6.4.4).

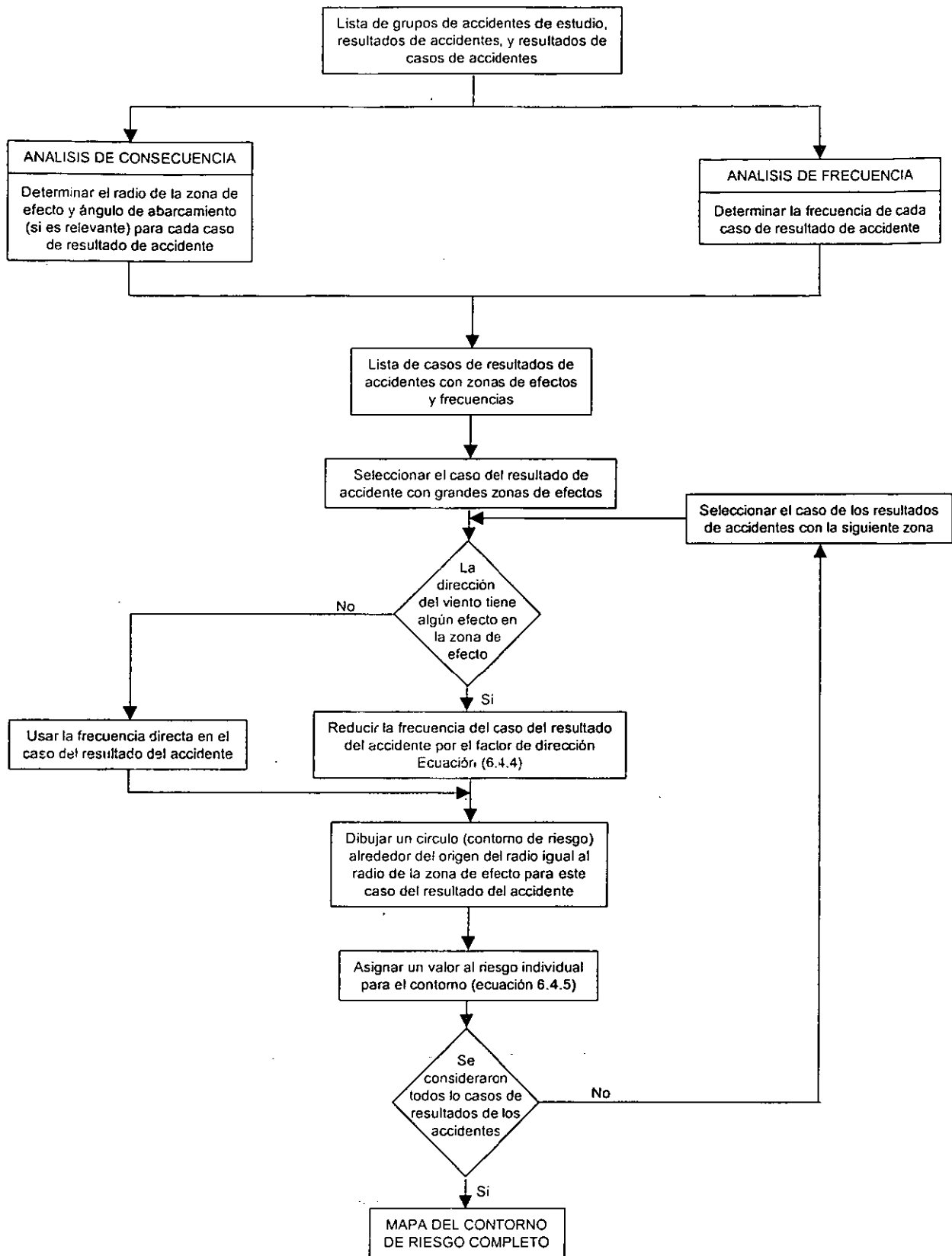
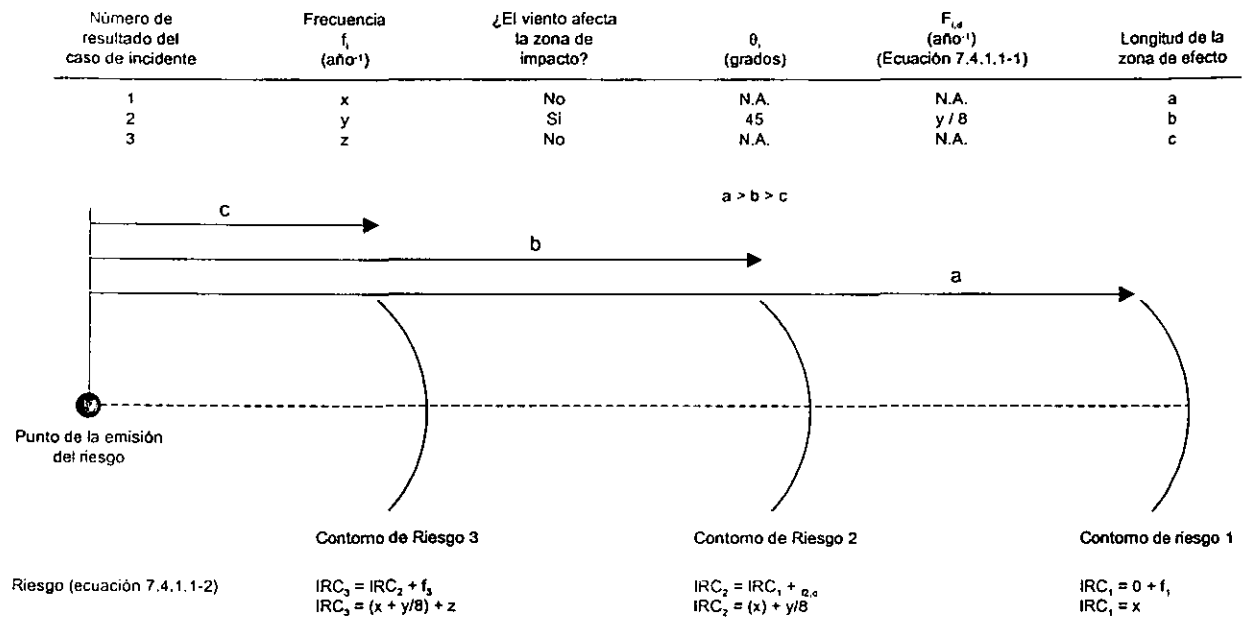


Figura 6.4.2. Procedimiento simplificado para el contorno de riesgo individual.

Para dibujar el primer contorno de riesgo  $IRC_{i-1} = 0$ . Este procedimiento es continuado hasta que todos los resultados de los accidentes son considerados. El mapa tiene una forma de series de círculos alrededor de la planta, cada uno de los cuales está asociado a un valor de riesgo individual. La figura 6.4.3 ilustra la aplicación de estos cálculos.



**Figura 6.4.3** Ilustración del procedimiento simplificado para el cálculo del riesgo individual. El incidente del caso 1 y 3 no es afectado por la dirección del viento. El incidente del caso 2 es dependiente del viento.

### 6.4.1.2. Otras medidas de riesgo individual<sup>(1)</sup>

- a) **Riesgo Individual Máximo.** El riesgo individual máximo está determinado por la estimación del riesgo individual en todas las localizaciones donde las personas están presentes, y la búsqueda del resultado para el valor máximo del riesgo individual.
- b) **Riesgo Individual Promedio (Población Expuesta).** El Riesgo Individual Promedio (población expuesta) se determina promediando el riesgo individual de todas las personas expuestas al riesgo de la instalación. Esto es necesario para determinar la población que puede ser afectada por al menos un caso de incidente. El número de personas localizadas en cada lugar dentro de la parte más lejana del contorno de riesgo individual que debe ser determinada. El riesgo individual promedio se determina por:

$$IR_{AV} = \frac{\sum_{x,y} IR_{x,y} P_{x,y}}{\sum_{x,y} P_{x,y}} \quad (6.4.6)$$

donde:

$IR_{AV}$  = riesgo individual promedio en la población expuesta (año<sup>-1</sup>)

$IR_{x,y}$  = riesgo individual en la localización x,y (año<sup>-1</sup>)

$P_{x,y}$  = número de personas en la localización x,y

Únicamente se consideran aquellas localizaciones en donde las personas están presentes, ya que  $P_{x,y} = 0$  es una localización en donde no hay personas.

- c) **Riesgo Individual Promedio (Población Total).** El Riesgo Individual Promedio (población total) está determinado por el promedio del riesgo individual sobre una población determinada, sin considerar si la población entera está o no, sujeta al riesgo de la instalación. El cálculo es el mismo que la ecuación (6.4.6), excepto que el denominador es la población total predeterminada:

$$IR_{AV} = \frac{\sum_{x,y} IR_{x,y} P_{x,y}}{P_T} \quad (6.4.7)$$

donde:

$P_T$  = población predeterminada total para el riesgo promedio (número de personas).

#### 6.4.2. Riesgo social<sup>(1)</sup>.

El siguiente procedimiento para el cálculo del riesgo social (curvas FN) está basado en el IchemE<sup>(41)</sup>. Toda la información necesaria para el cálculo del riesgo individual, también se utiliza para el riesgo social, junto con la información de la población alrededor de la instalación. Para un análisis detallado se requiere lo siguiente:

- Información del tipo de población (ejemplo: residencial, oficina, hospital, fábrica) para evaluar los factores de mitigación.
- Información acerca de los efectos tiempo de día (ejemplo: para escuelas).
- Información acerca de los efectos en días de la semana (ejemplo: industrial, escolar o instalaciones recreativas).
- Información acerca del porcentaje del tiempo en que la población está dentro de las instalaciones para efectuar los factores de mitigación.

##### 6.4.2.1. Procedimiento general<sup>(1)</sup>.

La figura 6.4.4 muestra el procedimiento general para el cálculo del riesgo social (curvas FN). Los pasos son los mismos que para el cálculo del riesgo individual, estimación de consecuencias y frecuencias. Entonces es necesario combinar esta información con datos de la población para estimar el número de personas afectadas por cada caso de accidente.

El número de personas afectadas por cada caso de incidente esta dado por:

$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} P_{f,i} \quad (6.4.8)$$

donde:

$N_i$  = Número de fatalidades resultado de caso del accidente  $i$ .

$P_{x,y}$  = número de personas en la locación  $x,y$ .

$P_{fi}$  = Probabilidad de que el caso del accidente  $i$  resultará en una fatalidad en la locación  $x,y$  del modelo de causas y consecuencias.

$P_{f,i}$  es el mismo que está definido en la ecuación (6.4.2).

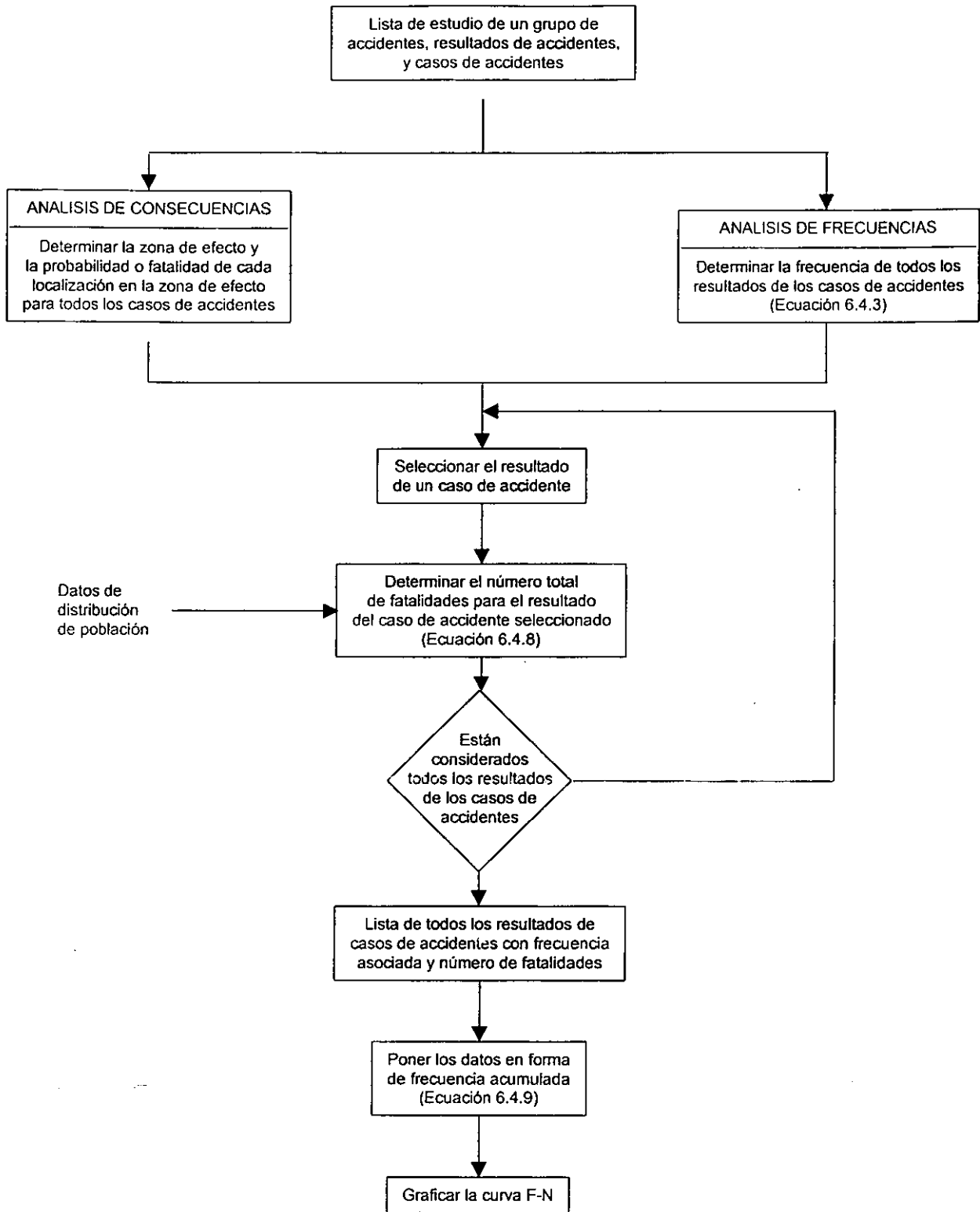


Figura 6.4.4. Procedimiento general para calcular las curvas F-N del riesgo social.

Se determina el número de personas afectadas por todos los casos de accidentes, resultando una lista de todos los casos de accidentes, cada uno con una frecuencia y el número de personas afectadas (ecuación 6.4.8). Esta información se pone en forma de frecuencia acumulada de tal forma que se pueda graficar la curva FN.

$$F_N = \sum_i F_i \text{ Para todos los casos de accidentes } i \text{ para los cuales } N_i \geq N \quad (6.4.9)$$

donde:

$F_N$  = Frecuencia de todos los casos de incidentes afectando N o más personas.

$F_i$  = Frecuencia de los casos de incidentes i.

$N_i$  = Número de personas afectadas por los casos de incidentes i.

El resultado es un conjunto de datos para FN como una función de N, los cuales se grafican (generalmente es una gráfica logarítmica) para dar la curva F-N.

#### 6.4.2.2. Procedimiento simplificado<sup>(1)</sup>.

La cantidad de cálculos requeridos para estimar el riesgo social por el método de la figura 6.4.4 se puede reducir limitando las condiciones climatológicas, dirección del viento y los casos de población considerados. Esto reduce los cálculos pero sacrifica la exactitud. Otra simplificación es asumir que la probabilidad de fatalidades  $P_{f,i}$  en la ecuación 6.4.8 puede tener solamente dos valores. Uno constante para todas las locaciones x,y dentro de la zona de efecto y cero para todas las locaciones x,y que no estén dentro de la zona de efecto. La probabilidad de fatalidad supuesta puede tener cualquier valor apropiado, pero debe ser tomado como una constante a través de la zona de efecto. El procedimiento simplificado es igual al procedimiento general de la figura 6.4.4. Sin embargo, el número de fatalidades por cada caso de accidente se puede determinar gráficamente, más que por la aplicación de la ecuación 6.4.8 en cada localización. El número de fatalidades debido a un caso de accidente i se determinado por:

- a) Sobreponer una zona de efecto en el mapa para el caso del accidente i en un mapa de distribución de la población.
- b) Contar el número de personas dentro de la zona de efecto.
- c) Multiplicar por la probabilidad de fatalidad dentro de la zona de efecto.

$$N_i = P_i P_{f,i} \quad (6.4.10)$$

donde:

$P_i$  = número total de personas dentro de la zona de efecto para el caso del incidente i.

$P_{f,i}$  = valor discreto de probabilidad de fatalidades dentro de la zona de efectos para el caso del incidente i.

Entonces la curva FN se genera en la misma forma que para el procedimiento general.

#### 6.4.3. Índices de riesgo<sup>(1)</sup>.

El calculo del índice de riesgo requiere los mismos datos que para el riesgo individual y social, pero los procedimientos son diferentes. Los resultados de los cálculos de índices de riesgo son presentados como números únicos o como tablas.



#### 6.4.3.1. Tasa promedio de muerte<sup>(1)</sup>.

La tasa de promedio de muerte es una medida de riesgo social y no es relevante a cualquier individuo en un lugar particular.

$$ARD = \sum_{i=1}^n f_i N_i \quad (6.4.11)$$

donde:

$f_i$  = frecuencia del caso del accidente  $i$  (año<sup>-1</sup>).

$N_i$  = número de fatalidades resultantes del caso del accidente  $i$ .

$n$  = número de casos de accidentes en estudio.

#### 6.4.3.2. Costo social equivalente<sup>(1)</sup>.

Okrent (1981) sugiere el uso de una tasa de muerte promedio que tome en cuenta que los accidentes con múltiples fatalidades son más serios que un conjunto de accidentes con menos fatalidades. Las consecuencias son incrementadas a una potencia mayor que 1. Esta forma es conocida como el Costo Social Equivalente.

$$\text{Costo Social Equivalente} = \sum_{i=1}^n f_i (N_i)^p \quad (6.4.12)$$

donde

$p$  = factor de potencia de aversión al riesgo ( $p > 1$ ).

Si  $p=1$  el Costo Social Equivalente = Tasa de Muerte Promedio.

#### 6.4.3.3. Tasa de accidentes fatales (FAR)<sup>(1)</sup>.

La única diferencia numéricamente entre la FAR y el riesgo individual promedio es el periodo de tiempo. Un factor de  $1.14 \times 10^4$  ( $10^8$  horas de exposición vs 1 año) se incorpora a la ecuación (6.4.6):

$$FAR = IR_{av} (1.14 \times 10^4) \quad (6.4.13)$$

donde:

FAR = tasa de accidentes fatales (fatalidades /  $10^8$  hrs exposición).

$IR_{av}$  = riesgo individual promedio (año<sup>-1</sup>).

Esta definición de FAR es para una persona que permanece en una localización fija donde el riesgo individual es constante en el tiempo. Para una persona que se mueve en una zona de efecto, la FAR se calcula por un tiempo promedio de las FARs en cada punto donde la persona pasa su tiempo.

## CAPITULO 7

### DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA DESARROLLADA (CPQRA)

En este capítulo se describe en forma integral, la metodología desarrollada (CPQRA) para el análisis de riesgo en las instalaciones de producción primaria de Pemex Exploración y Producción.

De acuerdo a la figura 7.1, en la cual se describe la secuencia para la aplicación de esta metodología, primeramente se debe contar con la información correspondiente al proceso o instalación que se está estudiando. Esta información debe contener condiciones de temperatura y presión de las corrientes, propiedades termofísicas, la descripción del proceso, las filosofías básicas de operación, descripción de los equipos involucrados en la operación de la planta, etc.

Los documentos necesarios para el estudio de análisis de riesgos son (ver capítulo 2):

- Descripción del proceso.
- Filosofía de operación.
- Diagrama de flujo de proceso.
- Diagramas de tubería e instrumentación.
- Plano de localización general.
- Manual de operación.
- Balance de materia y energía.
- Bitácora de operación y mantenimiento.

Una vez obtenida la información, se procede a analizarla para familiarizarse con el proceso y con las variables de operación. También es necesario realizar una visita a la instalación para verificar los datos de la información obtenido y si es necesario, actualizarlos.

La siguiente etapa en el estudio de análisis de riesgos es la identificación de peligros (capítulo 3). Las técnicas usadas para la identificación de peligros son:

- Lista de verificación (checklist).
- ¿Qué pasa si...? (what-if).
- Análisis de peligro y operabilidad (HazOp).

La identificación de peligros es una etapa importante en esta metodología, ya que debe ser lo suficientemente minuciosa para identificar todos los peligros importantes y discriminar los menos importantes, para que los evaluadores no se inunden con una gran cantidad de peligros potenciales. La calidad de los resultados obtenidos dependen del tipo de información usada, así como también de la experiencia del grupo evaluador.

Con el fin de jerarquizar los riesgos encontrados con el análisis de identificación de peligros, se realiza una ponderación tanto de la frecuencia como de la consecuencia de cada una de las desviaciones analizadas. Los valores ponderados de frecuencia por consecuencia para cada una de las desviaciones en el análisis HazOp, se denominan escenarios y tienen un valor de riesgo para cada uno de ellos, el cual es representado dentro de una matriz de riesgo en la cual se definen regiones que abarcan diferentes periodos de tiempos.

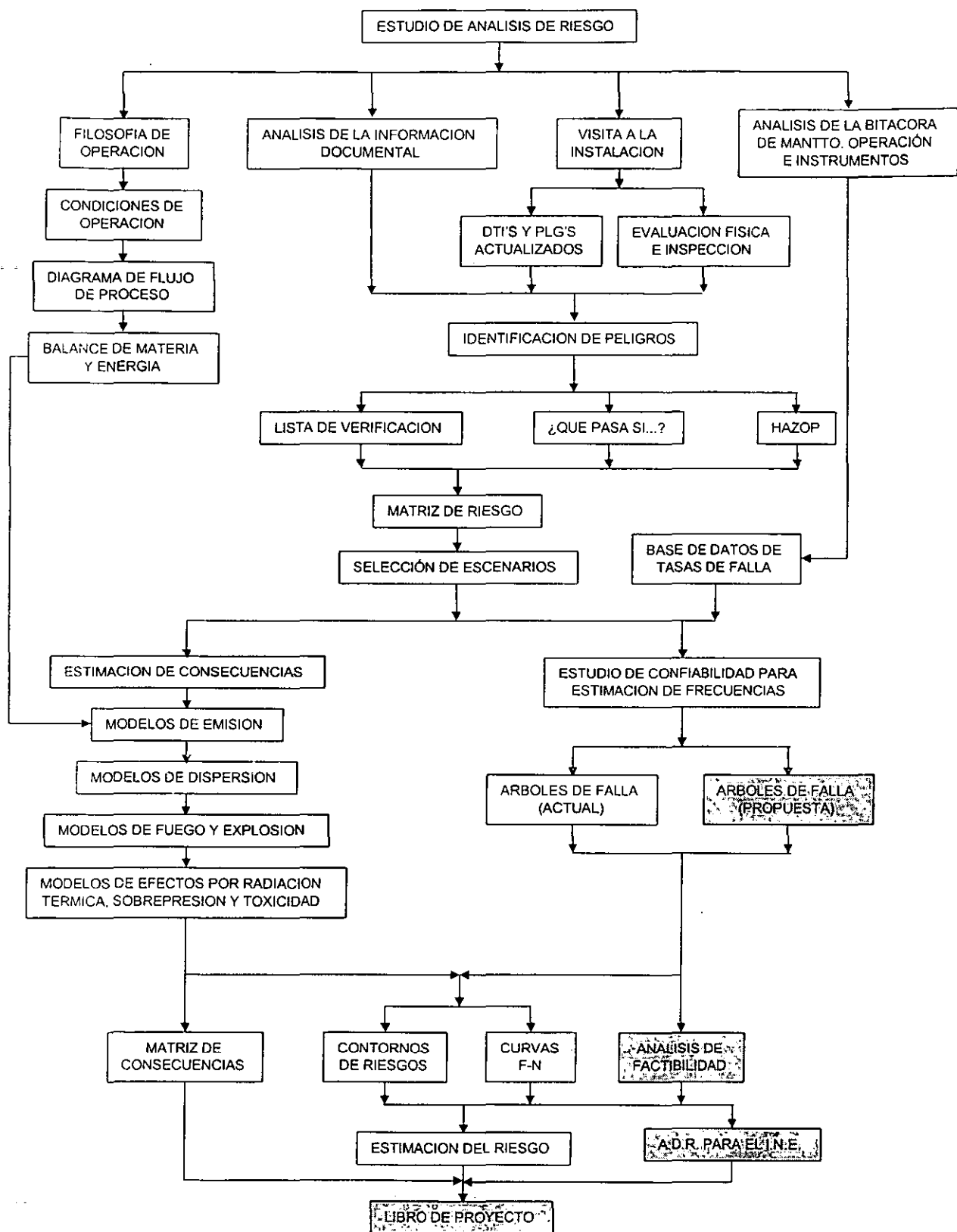


Figura 7.1. Metodología desarrollada (CPQRA) para la estimación del riesgo de una instalación de producción terrestre.

Estos tiempos son periodos en los cuales se debe tomar una acción correctiva para cada escenario, ya sea un plan de acción, la definición de una solución o la asignación de un responsable para realizar una tarea específica que corrija o disminuya el valor de riesgo de dicho escenario.

El siguiente paso en la metodología desarrollada (CPQRA) para el estudio de análisis de riesgos, es la estimación de consecuencias (capítulo 4). La estimación de consecuencias tiene como objetivo determinar las posibles consecuencias de un accidente o un grupo de accidentes durante la operación de una instalación. Los modelos utilizados para cuantificar la magnitud de las consecuencias son:

- Modelos de emisión.
- Modelos de dispersión.
- Modelos de explosión y fuego.
- Modelos de efectos por onda expansiva, radiación y toxicidad.

Para la modelación de consecuencias es necesario contar con herramientas de computo que faciliten el trabajo. En esta metodología se utiliza el software especializado PHAST.PRO V.5.22 (process hazards analysis software tools professional).

La modelación de consecuencias requiere de la siguiente información.

- Información validada de la ingeniería de la instalación como son: diagramas de flujo de proceso, diagramas de tubería e instrumentación, plano de localización general y el HazOp.
- Propiedades físicas, químicas y tóxicas de las corrientes de proceso.
- Datos meteorológicos de la zona donde se ubica la instalación.

Con la información anterior se procede a simular y cuantificar el material liberado siguiendo la siguiente secuencia.

1. Análisis de las propiedades físicas, químicas y tóxicas de los componentes de las diferentes corrientes de proceso (balance de materia).
2. Planteamiento de los escenarios de mayor peligro en la instalación (HazOp).
3. Identificación de los puntos más probables de emisión o derrame en corrientes y/o equipo de proceso, asignando valores de diámetros de fugas probables para cuantificar el flujo emitido (modelación de emisiones).
4. Determinación de las zonas con mayor riesgo de inflamabilidad, explosividad y toxicidad empleando modelos de dispersión y las condiciones meteorológicas de la zona (modelación de consecuencias).
5. Estimación de los daños por onda expansiva, radiación térmica y toxicidad, tanto a las instalaciones como al personal.

Los pasos 3, 4 y 5 se realizan empleando el paquete de simulación PHAST.PRO V.5.22.

Una vez estimas las consecuencias por fuego, explosión y toxicidad, los resultados se plasman en una matriz en donde se identifica el escenario simulado, especificando las condiciones de presión y temperatura, tamaño del orificio y la masa relevada en kg/s, ya sea líquido vapor o ambas. Posteriormente se indican las zonas de afectación en metros para cada una de las consecuencias analizadas, finalmente se expresa la zona de inflamabilidad en metros y la distancia a la cual el material tóxico alcanza el IDLH.

La siguiente etapa es el análisis de frecuencia de fallas, cuyo objetivo es la determinación de la frecuencia de ocurrencia de los eventos no deseados mediante el análisis de árbol de fallas (capítulo 5). El árbol de fallas es un método deductivo que permite determinar la secuencia en la que puede ocurrir un evento no deseado. El árbol de fallas no solo sirve para identificar peligros, sino también para la cuantificación de los riesgos involucrados, el resultado es la representación lógica en la que aparecen cadenas de eventos capaces de generar el evento no deseado (top event), el cual ocupa la cúspide del árbol.

Este método permite definir claramente las probabilidades de ocurrencia, así como también facilitar objetivamente la toma de decisiones acerca de las medidas preventivas y de control recomendadas, que eliminen o reduzcan su probabilidad a niveles de riesgo razonable. Para el análisis de árbol de fallas se requiere información sobre la probabilidades de ocurrencia de los eventos básicos que originan el evento no deseado, estas probabilidades se pueden obtener del análisis de datos de bitácoras y de bases de datos confiables que reporten fallas de los equipos y accesorios.

El árbol de falla se construye a partir de un evento no deseado (top event), al cual se le van determinando hacia abajo las causas (sub-eventos) que intervienen en su generación, así mismo el sub-evento se desarrolla en otros sub-eventos o eventos básicos. La rama se termina cuando todos los eventos en la rama son básicos. Para la construcción y solución lógica del árbol de fallas se hace uso del software BRAVO 2.0 & IRRAS V.1.0.

Por último, toda la información generada en el estudio de análisis de riesgo se integra en un documento llamado libro de proyecto.

## CAPITULO 8

### CASO DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE RIESGOS PARA LA ESTACIÓN DE COMPRESIÓN SAMARIA II.

#### 8.1. Antecedentes.

Debido a las características del gas, las condiciones de operación e inventarios manejados, la Estación de Compresión Samaria II representa un riesgo para los Recursos Humanos, Medio Ambiente y la Producción. Por estas razones y con el propósito de identificar y evaluar los riesgos para mejorar la seguridad de la instalación, se elaboró el Estudio de Análisis de Riesgos esta instalación.

#### 8.2. Objetivo.

Identificar los peligros inherentes, evaluar las consecuencias, determinar la frecuencia con que se presentan los disparos de las unidades de compresión y proponer medidas que aumenten el nivel de seguridad del proceso en la Estación de Compresión Samaria II.

#### 8.3. Alcance.

Identificar, evaluar los riesgos inherentes al proceso mediante la aplicación de las Metodologías recomendadas por El Center for Chemical Process Safety (CCPS) del American Institute of Chemical Engineers (AIChE).

La normatividad y guías utilizadas en el desarrollo del proyecto fueron las siguientes:

- Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. CCPS.
- Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. CCPS.
- API RP 14J "Recommended Practice for Design and Hazards Analysis for Offshore Production Facilities". American Petroleum Institute.
- API RP 14C "Recommended Practice For Analysis, Design Installation and Testing of Basic Surface Safety Systems for Offshore Production Platforms". American Petroleum Institute.
- API 617 "Centrifugal Compressors for Petroleum, Chemical And Gas Service Industries". American Petroleum Institute.
- API 616 "Gas Turbines for Refinery Service". American Petroleum Institute.

#### 8.4. Descripción de la Estación de Compresión Samaria II.

##### 8.4.1. Generalidades

La Estación de Compresión Samaria II se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas  $X=93^{\circ}10'$ ,  $Y=17^{\circ}96'$  en la Ranchería Cumuapa 2da sección del Municipio de Cunduacán, Tabasco, y ocupa un área aproximada de 71,258 m<sup>2</sup>. Su acceso es por la carretera federal Villahermosa-Cárdenas hasta el kilómetro 15 y posteriormente hacia la Ranchería Cumuapa en el kilómetro 2.

#### **8.4.2. Procedencia de la alimentación.**

La Estación de Compresión maneja 140 MMPCSD de gas amargo y su función es proporcionar la energía necesaria para el transporte del gas proveniente desde las Baterías Samaria II y III, Carrizo, Iride y de Cd. Pemex hasta el Centro Procesador de Gas Cactus, en Chiapas.

El gas amargo es succionado en baja presión a 6.0 Kg/cm<sup>2</sup> man. (85 lb/pulg<sup>2</sup> man.) y 45 °C y descargado en alta presión de 77 Kg/cm<sup>2</sup> man. (1100 lb/pulg<sup>2</sup> man.) y 50°C, al gasoducto que se une con la corriente de Conduacán y son enviados a su destino final. Los condensados que se obtienen de la compresión son enviados la Batería Samaria II.

#### **8.4.3. Estación de Compresión Samaria II.**

La Estación de Compresión Samaria II se encuentra actualmente constituida por tres áreas de compresión. El Área Principal que está integrada por cinco turbocompresores marca Solar-Centauro con capacidad de 15 MMPCSD c/u, uno de estos esta destinado para Recuperación de Vapores. El Área de Ampliación integrada por seis turbocompresores Solar Centauro con capacidad de 15 MMPCSD c/u; y finalmente el Área de Reampliación que cuenta con tres turbocompresores Solar Centauro con capacidad de 15 MMPCSD c/u, en donde uno es dedicado a Bombeo Neumático.

El Área Principal cuenta con un Separador General de Gas de Succión (FA-120) y cinco unidades de Compresión (U-9, U-10, U-11, U-12, U-23) de las cuales una es para recuperación de vapores, cada una está integrada por los siguientes equipos:

- Filtro Separador de Succión (FA-200, FA-250, FA-300, FA-350, FA-400).
- Unidad de Turbocompresión compuesta de 1 Turbina de Gas y 3 Compresores Centrifugos (GB-200, GB-250, GB-300, GB-350, GB-400).
- Enfriador de la Primera Etapa (EC-200, EC-250, EC-300, EC-350, EC-400).
- Separador de Líquidos de la Primera Etapa (FA-201, FA-251, FA-301, FA-351, FA-401).
- Enfriador de la Segunda Etapa (EC-201, EC-251, EC-301, EC-351, EC-401).
- Separador de Líquidos de la Segunda Etapa (FA-202, FA-252, FA-302, FA-352, FA-402).
- Enfriador de la Tercera Etapa (EC-202, EC-252, EC-302, EC-352, EC-402).
- Separador de Líquidos de la Tercera Etapa (FA-203, FA-253, FA-303, FA-353, FA-403).
- Intercambiador de Calor de Gas Combustible–Gas Amargo (EA-625, EA-650, EA-675, EA-700, EA-725).
- Filtro Separador de Gas Combustible (FA-625, FA-650, FA-675, FA-700, FA-725).

El Área de Ampliación cuenta con un Separador General de Gas de Succión (FA-100A), un filtro Separador Primario de Gas Combustible (FA-600A) y seis unidades de Compresión (U-14, U-15, U-16, U-17, U-18 y U-19) cada una integrada por los siguientes equipos:

- Filtro Separador de Succión (FA-150A, FA-200A, FA-250A, FA-300A, FA-350A, FA-400A).
- Unidad de Turbocompresión compuesta de 1 Turbina de Gas y 3 Compresores Centrifugos (GB-150A, GB-200A, GB-250A, GB-300A, GB-350A, GB-400A).
- Enfriador de la Primera Etapa (EC-150A, EC-200A, EC-250A, EC-300A, EC-350A, EC-400A).





## COMPOSICION DE LAS CORRIENTES DE PROCESO

CORRIENTE COMPONENTE	1 <sup>(2)</sup>	2 <sup>(3)</sup>	3	4	5	6	7	8	9	10
	GAS	GAS	LIQUIDO	LIQUIDO	MEZCLA	GAS	GAS	GAS	GAS	MEZCLA
	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL
Agua <sup>(1)</sup>	0.93	2.92	100.00	99.98	39.28	0.25	0.88	0.92	0.92	0.92
Acido Sulfhídrico	1.28	0.73	0.00	0.02	0.90	1.26	0.74	1.25	1.25	1.25
Bióxido de Carbono	1.66	1.33	0.00	0.00	0.59	1.66	1.36	1.65	1.65	1.65
Nitrógeno	0.95	1.56	0.00	0.00	0.10	1.01	1.59	0.99	0.99	0.99
Metano	75.64	62.25	0.00	0.00	16.26	75.96	63.56	74.95	74.95	74.95
Etano	9.95	12.63	0.00	0.00	6.07	10.19	12.90	10.12	10.12	10.12
Propano	4.57	8.02	0.00	0.00	6.04	4.76	8.19	4.77	4.77	4.77
i-Butano	0.58	1.70	0.00	0.00	1.39	0.64	1.73	0.65	0.65	0.65
n-Butano	0.0	4.23	0.00	0.00	0.65	0.24	4.32	0.25	0.25	0.25
i-Pentano	1.51	1.89	0.00	0.00	6.94	1.45	1.93	1.54	1.54	1.54
n-Pentano	1.32	1.88	0.00	0.00	6.94	1.26	1.92	1.35	1.35	1.35
Hexános (+)	1.60	0.86	0.00	0.00	14.84	1.33	0.88	1.56	1.56	1.56
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

**NOTAS:**

- (1) Agua de saturación para fines de simulación.
- (2) Composición tomada de reporte de análisis cromatográfico del 15 de febrero de 1999.
- (3) Composición tomada de reporte de análisis cromatográfico del 13 de enero de 1999.

CORRIENTE COMPONENTE	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	LIQUIDO	GAS	GAS	MEZCLA	LIQUIDO	GAS	GAS	MEZCLA	LIQUIDO	GAS
	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL
Agua	99.97	0.89	0.89	0.89	91.73	0.41	0.41	0.41	14.52	0.25
Acido Sulfhídrico	0.02	1.25	1.25	1.25	0.12	1.26	1.26	1.26	1.27	1.26
Bióxido de Carbono	0.01	1.65	1.65	1.65	0.06	1.65	1.65	1.65	0.84	1.66
Nitrógeno	0.00	0.99	0.99	0.99	0.01	1.0	1.0	1.0	0.15	1.01
Metano	0.00	74.98	74.98	74.98	1.25	75.37	75.37	75.37	23.34	75.96
Etano	0.00	10.12	10.12	10.12	0.58	10.17	10.17	10.17	8.66	10.19
Propano	0.00	4.78	4.78	4.78	0.68	4.80	4.80	4.80	8.56	4.76
i-Butano	0.00	0.65	0.65	0.65	0.18	0.65	0.65	0.65	1.96	0.64
n-Butano	0.00	0.25	0.25	0.25	0.09	0.25	0.25	0.25	0.91	0.24
i-Pentano	0.00	1.54	1.54	1.54	1.10	1.54	1.54	1.54	9.70	1.45
n-Pentano	0.00	1.35	1.35	1.35	1.14	1.35	1.35	1.35	9.67	1.26
Hexános (+)	0.00	1.55	1.55	1.55	3.06	1.55	1.55	1.55	20.42	1.33
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

### BALANCE DE MATERIA

CORRIENTE COMPONENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	GAS	GAS	LIQUIDO	LIQUIDO	MEZCLA	GAS	GAS	GAS	GAS	MEZCLA
Flujo (Kgmol/h)	6571.46	406.83	5.34	5.31	114.67	6852.97	398.44	580.98	580.98	580.98
Viscosidad (Cp)	1.000	0.011	0.712	0.591		0.015	0.011	0.012	0.015	
Peso Molecular	22.50	26.02	18.02	18.02	38.76	22.45	26.19	22.71	22.71	22.71
Densidad Relativa	0.777	0.898	1.000	1.000		0.775	0.904	0.784	0.784	
Factor de Compresibilidad Z	0.981	0.992	0.001	0.004		0.827	0.969	0.982	0.981	
Cp/Cv	1.224	1.20	1.116	1.116		1.159	1.192	1.221	1.181	
BPD @ 15.6 °C y 1 Atm.			14.32	14.24	820					
MMPCSD @ 15.6 °C y 1 Atm.	132.00	8.17			0.5	137.6	8.0	11.67	11.67	
Presión (Kg/cm <sup>2</sup> man.)	5.2	0.8	0.3	5.2	20	75.3	6.3	4.9	19.8	19.1
Temperatura (°C)	35	34	36	45	44	53	37	39	141	56
Densidad (°API)			10	10						
Densidad @ P y T (g/cm <sup>3</sup> )	0.005	0.002	0.999	0.922		0.075	0.007	0.005	0.014	

CORRIENTE COMPONENTE	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	LIQUIDO	GAS	GAS	MEZCLA	LIQUIDO	GAS	GAS	MEZCLA	LIQUIDO	GAS
Flujo (Kgmol/h)	0.38	580.60	580.60	580.60	3.03	577.57	577.57	577.57	6.49	571.08
Viscosidad (Cp)	0.492	0.013	0.015		0.853	0.013	0.016		0.119	0.015
Peso Molecular	18.02	22.71	22.71	22.71	21.68	22.72	22.72	22.72	46.82	22.45
Densidad Relativa	1.0	0.784	0.784		0.876	0.784	0.784		0.568	0.775
Factor de Compresibilidad Z	0.013	0.951	0.953		0.004	0.895	0.907			0.827
Cp/Cv	1.116	1.203	1.117		1.106	1.184	1.165		1.067	1.159
BPD @ 15.6 °C y 1 Atm.	0.5				11				79	
MMPCSD @ 15.6 °C y 1 Atm.		11.66	11.66			11.60	11.60			11.47
Presión (Kg/cm <sup>2</sup> man.)	19.1	19.1	42.9	42.2	42.2	42.2	76	75.3	75.3	75.3
Temperatura (°C)	56	56	121	54	54	54	103	53	53	53
Densidad (°API)	10				30				118	
Densidad @ P y T (g/cm <sup>3</sup> )	0.984	0.017	0.031		0.833	0.039	0.060		0.506	0.075

### 8.5.3. Tasa de Fallas.

Para determinar las tasas de fallas y obtener los diferentes datos de confiabilidad de las unidades de compresión, se utiliza una técnica cuantitativa conocida como Análisis de Datos de Bitácoras. Esta técnica es apropiada cuando se tienen documentados los datos históricos de las fallas que se han presentado durante un tiempo determinado de operación de la instalación.

Con el Análisis de Datos de Bitácoras se obtiene la probabilidad de ocurrencia de cada falla (tasa de fallas) en: instrumentos, intercambiadores de calor, recipientes a presión, sistemas de control, compresores, bombas, servicios auxiliares, etc. Para estimar la tasa de fallas se divide el número de incidentes registrados entre el tiempo de operación.

Para la aplicación del Análisis de Datos de Bitácoras se requiere del documento en el cual se indican los tipos de fallas, tiempos fuera de operación por reparación, tiempos de disponibilidad y el tiempo de operación de cada una de las unidades de compresión. Los documentos proporcionados por PEMEX fueron las bitácoras correspondientes al período de diciembre de 1997 a marzo de 1999 (equivalente a 11,224 horas por unidad). Del análisis de bitácoras se obtuvieron los siguientes datos.

#### RESUMEN DE FRECUENCIA DE FALLAS Y TIEMPO DE REPARACION AREA PRINCIPAL (\*).

SISTEMA Y EQUIPOS		AREA PRINCIPAL									
		UNIDAD 9		UNIDAD 10		UNIDAD 11		UNIDAD 12		UNIDAD 23	
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	
TURBINA (A)	F	24	12.12	23	12.43	5	4.39	6	6.12	5	3.01
	MDT	10.65	4.76	10.09	6.60	6.00	7.62	15.75	6.43	17.68	9.23
COMPRESOR (B)	F	0	0.00	1	0.54	2	1.75	3	3.06	1	0.60
	MDT	0.00	0.00	10.17	6.65	0.16	0.20	125.75	51.34	0.25	0.13
SISTEMA DE LUBRICACION (C)	F	14	7.07	3	1.62	4	3.51	5	5.10	9	5.42
	MDT	21.33	9.53	21.16	13.83	2.84	3.61	2.33	0.95	7.43	3.88
SISTEMA DE SELLOS (D)	F	29	14.65	35	18.92	21	18.42	9	9.18	14	8.43
	MDT	25.75	11.50	12.14	7.94	8.58	10.89	2.83	1.16	5.68	2.97
SISTEMA DE GAS COMB (E)	F	11	5.56	12	6.49	0	0.00	9	9.18	17	10.24
	MDT	35.00	15.63	33.91	22.17	0.00	0.00	41.09	16.78	45.58	23.80
SISTEMA ELECTRICO (F)	F	8	4.04	20	10.81	5	4.39	4	4.08	21	12.65
	MDT	2.90	1.30	11.85	7.75	11.33	14.38	4.75	1.94	19.58	10.22
PROCESO (G)	F	89	44.95	62	33.51	53	46.49	41	41.84	81	48.80
	MDT	117.86	52.64	43.98	28.75	29.27	37.16	43.26	17.68	68.82	35.94
ARRANQUE (H)	F	2	1.01	2	1.08	1	0.88	3	3.06	8	4.82
	MDT	2.00	0.89	1.92	1.26	13.58	17.24	3.50	1.43	15.16	7.92
INSTRUMENTACION (I)	F	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	MDT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DESCONOCIDA (J)	F	21	10.61	27	14.59	23	20.18	18	18.37	10	6.02
	MDT	8.42	3.76	7.74	5.06	7.01	8.90	5.67	2.31	11.32	5.91
TOTAL DE FALLAS	n	198	100.00	185	100.00	114	100.00	98	100.00	166	100.00
TIEMPO TOTAL DE REP.	MDT	223.91	100.00	152.96	100.00	78.77	100.00	244.93	100.00	191.50	100.00

**RESUMEN DE FRECUENCIA DE FALLAS Y TIEMPO DE REPARACION  
AREA DE AMPLIACION (\*).**

SISTEMA Y EQUIPOS		AREA AMPLIACION											
		UNIDAD 14		UNIDAD 15		UNIDAD 16		UNIDAD 17		UNIDAD 18		UNIDAD 19	
			%		%		%		%		%		%
TURBINA (A)	F	41	18.06	38	13.01	19	10.67	49	18.15	24	7.55	3	1.38
	MDT	33.41	14.69	64.49	18.91	41.68	22.90	28.24	13.67	95.17	17.64	4.18	5.36
COMPRESOR (B)	F	3	1.32	3	1.00	7	3.93	3	1.11	14	4.40	2	0.90
	MDT	4.01	1.76	102.87	30.11	85.33	35.90	27.42	14.29	152.50	28.27	0.33	0.42
SISTEMA DE LUBRICACION (C)	F	51	22.47	64	21.62	40	22.47	68	25.19	80	25.16	0	0.00
	MDT	25.33	11.14	32.34	9.48	30.40	16.71	57.01	29.70	99.86	18.51	0.00	0.00
SISTEMA DE SELLOS (D)	F	13	5.73	3	1.00	24	13.48	30	11.11	37	11.64	9	4.07
	MDT	17.07	7.51	1.41	0.41	8.90	4.89	10.55	5.50	22.68	4.20	3.57	4.60
SISTEMA DE GAS COMB. (E)	F	8	3.52	2	0.68	1	0.56	3	1.11	6	1.89	5	2.28
	MDT	13.84	6.09	5.83	1.71	0.50	0.27	6.50	3.39	49.83	9.24	2.66	3.42
SISTEMA ELECTRICO (F)	F	16	7.05	12	4.11	5	2.81	13	4.81	19	5.97	14	6.33
	MDT	16.01	7.04	18.58	5.45	5.25	2.89	17.58	9.16	30.01	5.56	19.42	25.00
PROCESO (G)	F	85	37.44	152	52.05	74	41.57	90	33.33	112	35.22	167	75.57
	MDT	116.39	51.18	88.84	26.05	28.83	15.84	43.31	22.57	81.19	15.05	38.78	49.93
ARRANQUE (H)	F	0	0.00	4	1.37	0	0.00	1	0.37	3	0.94	2	0.90
	MDT	0.00	0.00	21.67	6.36	0.00	0.00	0.33	0.17	3.83	0.71	4.58	5.90
INSTRUMENTACION (I)	F	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	MDT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DESCONOCIDA (J)	F	10	4.41	14	4.79	8	4.49	13	4.81	23	7.23	19	8.60
	MDT	1.34	0.59	5.16	1.51	1.08	0.59	2.99	1.58	4.32	0.80	4.17	5.37
TOTAL DE FALLAS	n	227	100.00	292	100.00	178	100.00	270	100.00	318	100.00	221	100.00
TIEMPO TOTAL DE REP.	MDT	227.40	100.00	340.99	100.00	181.97	100.00	191.93	100.00	539.37	100.00	77.67	100.00

**RESUMEN DE FRECUENCIA DE FALLAS Y TIEMPO DE REPARACION  
AREA DE REAMPLIACION (\*).**

SISTEMA Y EQUIPOS		AREA REAMPLIACION					
		UNIDAD 20		UNIDAD 21		UNIDAD 22	
			%		%		%
TURBINA (A)	F	0	9.09	2	6.06	1	1.82
	MDT	56.24	32.65	14.25	24.93	0.25	0.47
COMPRESOR (B)	F	2	3.03	0	0.00	0	0.00
	MDT	37.42	21.73	0.00	0.00	0.00	0.00
SISTEMA DE LUBRICACION (C)	F	6	9.09	1	3.03	6	10.91
	MDT	8.00	4.64	1.67	2.92	3.67	6.97
SISTEMA DE SELLOS (D)	F	10	15.15	4	12.12	3	5.45
	MDT	5.86	3.29	3.59	6.28	2.24	4.25
SISTEMA DE GAS COMB. (E)	F	1	1.52	1	3.03	10	18.18
	MDT	4.00	2.32	3.50	6.12	7.68	14.58
SISTEMA ELECTRICO (F)	F	15	22.73	5	15.15	13	23.64
	MDT	35.50	20.61	8.25	10.93	25.73	48.86
PROCESO (G)	F	24	36.36	18	54.55	7	12.73
	MDT	24.84	14.42	25.58	44.74	8.33	15.82
ARRANQUE (H)	F	1	1.52	1	3.03	2	3.64
	MDT	0.50	0.29	1.83	3.20	1.50	2.85
INSTRUMENTACION (I)	F	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	MDT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DESCONOCIDA (J)	F	1	1.52	1	3.03	13	23.64
	MDT	0.08	0.05	0.50	0.87	3.26	6.19
TOTAL DE FALLAS	n	66	100.00	33	100.00	55	100.00
TIEMPO TOTAL DE REP.	MDT	172.24	100.00	57.17	100.00	52.66	100.00

Donde:

F = Frecuencia de fallas.

n = Total de fallas.

MDT = Tiempo fuera de operación para reparación (Hrs.).

☐ = Fallas con mayor contribución.

(\*) = Período de análisis de datos de bitácoras (del 1 de diciembre de 1997 al 16 de marzo de 1999).

El número total de fallas, los tiempos de reparación, operación y disponibilidad, así como la tasa de fallas de cada unidad se resumen en la siguiente tabla.

**TASA DE FALLAS PARA LA ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II (\*)**

UNIDAD	F	$\lambda$ (Hr <sup>-1</sup> )	MTBF (Hr)	MTR (Hr)	TTF (Hr)	TD (Hr)	MDT (Hr)
9	198	$1.84 \times 10^{-2}$	54.33	1.1309	10756.75	23.41	223.91
10	185	$1.71 \times 10^{-2}$	58.60	0.8268	10841.88	21.83	152.96
11	114	$1.05 \times 10^{-2}$	95.57	0.6910	10894.99	22.17	78.77
12	98	$9.12 \times 10^{-3}$	109.60	2.4993	10741.00	22.33	244.93
14	227	$2.10 \times 10^{-2}$	47.70	1.0018	10828.11	23.75	227.40
15	292	$2.73 \times 10^{-2}$	36.67	1.1678	10708.00	38.25	340.99
16	178	$1.64 \times 10^{-2}$	60.94	1.0223	10847.95	23.17	181.97
17	270	$2.49 \times 10^{-2}$	40.22	0.7109	10860.33	25.24	191.93
18	318	$3.02 \times 10^{-2}$	33.10	1.6961	10526.38	21.83	539.37
19	221	$2.01 \times 10^{-2}$	49.62	0.3514	10966.08	26.33	77.67
20	66	$6.07 \times 10^{-3}$	164.63	2.6097	10865.68	33.83	172.24
21	33	$3.00 \times 10^{-3}$	332.94	1.7324	10987.18	33.16	57.17
22	55	$4.96 \times 10^{-3}$	201.64	0.9575	11090.27	9.25	52.66
23	166	$1.53 \times 10^{-2}$	65.47	1.1536	10868.51	34.74	191.50
TOTAL	2451	$1.61 \times 10^{-2}$	61.93	1.1152	151783.12	359.30	2733.44

Donde:

F = Frecuencia de fallas.

$\lambda$  (Hr<sup>-1</sup>) = Tasa de fallas.

MTBF (Hr) = Tiempo medio entre fallas.

MTR (Hr) = Tiempo medio de reparación.

TTF (Hr) = Tiempo de operación.

TD (Hr) = Tiempo disponible.

MDT (Hr) = Tiempo fuera de operación para reparación.

(\*) = Período de análisis de datos de bitácoras (del 1 de diciembre de 1997 al 16 de marzo de 1999).

El mayor número de fallas en las unidades, clasificadas por sistemas es debido a:

SISTEMA	MODO DE FALLAS	%
Proceso	Disparo al recircular, alto nivel de líquidos en separadores, alta presión de gas de succión, falla en el sistema hidráulico y por baja presión de descarga.	44.27
Sistema de lubricación	Alta temperatura, reparación en bomba principal, bajo nivel de aceite, alta presión diferencial y baja presión de aceite lubricante.	14.32
Turbina	Alta temperatura de turbina de potencia, reparación de caja de accesorios, sobrevelocidad de turbina de potencia, falla del generador de gas y cambio de filtros de admisión de aire.	10.04
Sistema de sello	Baja o alta presión diferencial de aceite o gas de sello, falla en sistema de gas de sello, falla en bomba principal y/o auxiliar de aceite de sello y fuga de gas de sello en válvula reguladora Cash.	9.83
Desconocidas	Falla desconocida de la cual no se tenga ninguna información o dispara la unidad sin marcar falla en tablero.	8.20
Sistema eléctrico y de control	Bajo voltaje de baterías, falla del sistema eléctrico, falla en secuencia de válvulas, revisión del tablero eléctrico y falla en pick ups del generador de gas y turbina de potencia.	6.94
Sistema de gas combustible	Falla del topping, baja o alta presión de gas combustible, reparación de válvula de control y válvula reguladora de gas combustible.	3.51
Compresor	Alineación, acoplamiento, reparación, cambio, falla y vibración del compresor.	1.67
Arranque	Falla en el encendido, falla de motores de arranque, no acelera y fuga de aceite en motores de arranque.	1.22

Las causas del mayor número de horas fuera de operación por reparación, obtenidas en las unidades y clasificadas por sistemas son:

SISTEMA	MODO DE FALLAS	%
Proceso	Disparo al recircular, falla en el sistema hidráulico, alto nivel de líquidos en separadores, baja presión de descarga y fuga de aceite en bomba principal de aceite hidráulico.	27.80
Compresor	Alineación, acoplamiento, reparación, cambio, fuga de gas en succión y/o descarga y vibración de compresor.	19.24
Turbina	Reparación de caja de accesorios, falla del generador de gas, alta temperatura, alineación y sobrevelocidad de turbina de potencia.	14.49
Sistema de lubricación	Alta temperatura, alta presión diferencial, falla en el cárter, incendio del venteo del cárter por rayo y exceso de consumo de aceite lubricante.	11.46
Sistema de gas combustible	Falla del topping, reparación de válvula de control, baja o alta presión y fuga en el separador de gas combustible.	9.14

SISTEMA	MODO DE FALLAS	%
Sistema eléctrico y de control	Falla del sistema eléctrico, bajo voltaje de baterías, falla en secuencia de válvulas, falla en pick ups del generador de gas y turbina de potencia y revisión del tablero eléctrico.	8.22
Sistema de sello	Baja presión diferencial de aceite o gas de sello, falla en bomba principal y/o auxiliar de aceite de sello, falla en sistema de gas de sello, falla del sistema de sellado y fuga de gas de sello en válvula reguladora Cash.	4.76
Arranque	Falla en el encendido, falla de motores de arranque, no acelera y fuga de aceite en motores de arranque.	2.58
Desconocidas	Falla desconocida de la cual no se tenga ninguna información o dispara la unidad sin marcar falla en tablero.	2.31

Las fallas más significativas son las correspondientes a proceso y a los daños en compresores y turbina, alineación de incrementador de velocidad, turbina de potencia y compresores, debido a que los tiempos y costos de reparación son elevados.

### 8.6. Análisis de Peligro y Operabilidad (HazOp).

Con esta metodología se identificaron los peligros que pudieran presentarse debido a una mala operación o por fallas de los diversos sistemas que intervienen en el desempeño eficiente de los equipos.

El resultado de este análisis es una serie de recomendaciones para realizar cambios en el diseño, en los procedimientos operativos o de mantenimiento que permitan mejorar la seguridad y la eficiencia de la instalación. Aunque evidentemente no existe garantía de que todas las posibles desviaciones queden identificadas. La característica de exhaustividad y profundidad del análisis permiten cubrir cada uno de los elementos que conforman el proceso, de modo que al final se tenga la certeza de que los eventos identificados son precisamente los más representativos y susceptibles de ocurrir.

Debido a que la información generada por el HazOp es de gran volumen y aprovechando que las unidades de compresión presentan similitud en sus condiciones de operación (presión, temperatura y flujo), en el Anexo B solo se incluye parte del HazOp de la unidad 17 del área de ampliación, para lo cual se procedió a dividir esta unidad en 15 nodos tomando como base los diagramas de tubería e instrumentación (DTI), identificando su intención de diseño y definiendo sus límites entre ellos.

### 8.7. Matriz de Riesgos.

Una vez realizado el Análisis de Peligro y Operabilidad, es necesario categorizar los resultados para detectar cuales son las desviaciones que requieren una atención a mediano y corto plazo. Para ello se hace uso de la matriz de riesgo en la cual se reflejan las categorías de consecuencias, categorías de frecuencia y el número total de eventos que pudieran suscitarse, identificando los peligros más significativos en base a la frecuencia y a las pérdidas esperadas por evento.

#### Categorías de Consecuencias y Frecuencias.

Para este estudio se analizaron los siguientes tipos de consecuencia y categorías de frecuencia:

##### Tipos de consecuencias

##### A. Contaminación al Medio Ambiente y Seguridad Pública.

1. No hay daños o efectos al medio ambiente y a la salud.

2. Daños o efectos menores al medio ambiente y a la salud.
  3. Daños o efectos moderados al medio ambiente y a la salud.
  4. Muerte o efectos severas al medio ambiente y a la salud.
- B. Seguridad de los Empleados.
1. No hay daños o efectos en la seguridad ocupacional.
  2. Daño o enfermedad ocupacional menores.
  3. Daño o enfermedad ocupacional moderados.
  4. Muerte o enfermedad ocupacional severa.
- C. Pérdida en la Producción.
1. Menor de una semana.
  2. Entre una semana y un mes.
  3. Entre uno y seis meses.
  4. Más de seis meses.

**Categoría de Frecuencias.**

1. No se espera que ocurra durante el ciclo de vida de la planta.
2. Se espera que ocurra no más de una vez durante el ciclo de vida de la planta.
3. Se espera que ocurra varias veces durante el ciclo de vida de la planta.
4. Se espera que ocurra más de una vez en un año.

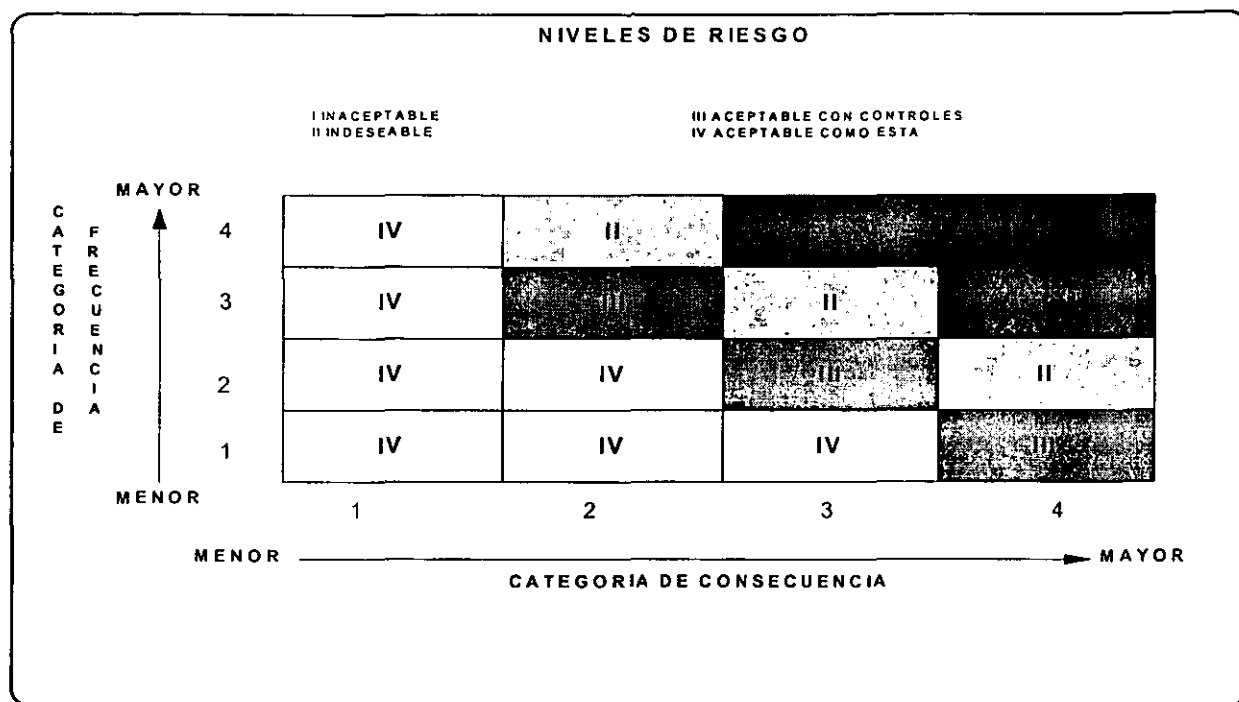
Una vez definidos los escenarios que representan riesgos en la Estación de Compresión se procedió a establecer las categorías de consecuencias y frecuencias para obtener el nivel de riesgo. En el Anexo C, a manera de ejemplo, se listan algunos de los niveles de riesgos y categorías de consecuencias y frecuencias de la unidad de compresión 17, que se utilizaron en la elaboración de la matriz de riesgos.

A continuación se enlistan los niveles de riesgos con su respectiva descripción, que se establecieron para este estudio.

Número	Categoría	Descripción
I	Inaceptable	Deberá mitigarse con ingeniería y/o controles administrativos dentro de un período de tiempo específico tal como 6 meses. Permittedose llegar a un nivel de riesgo III o menor.
II	Indeseable	Deberá mitigarse con ingeniería y/o controles administrativos dentro de un periodo de tiempo específico tal como 12 meses llegándose a un nivel de riesgo III o menor.
III	Aceptables con Controles	Deberá verificarse que los procedimientos o controles estén en su lugar.
IV	Aceptable como está	No necesita acción de mitigación.

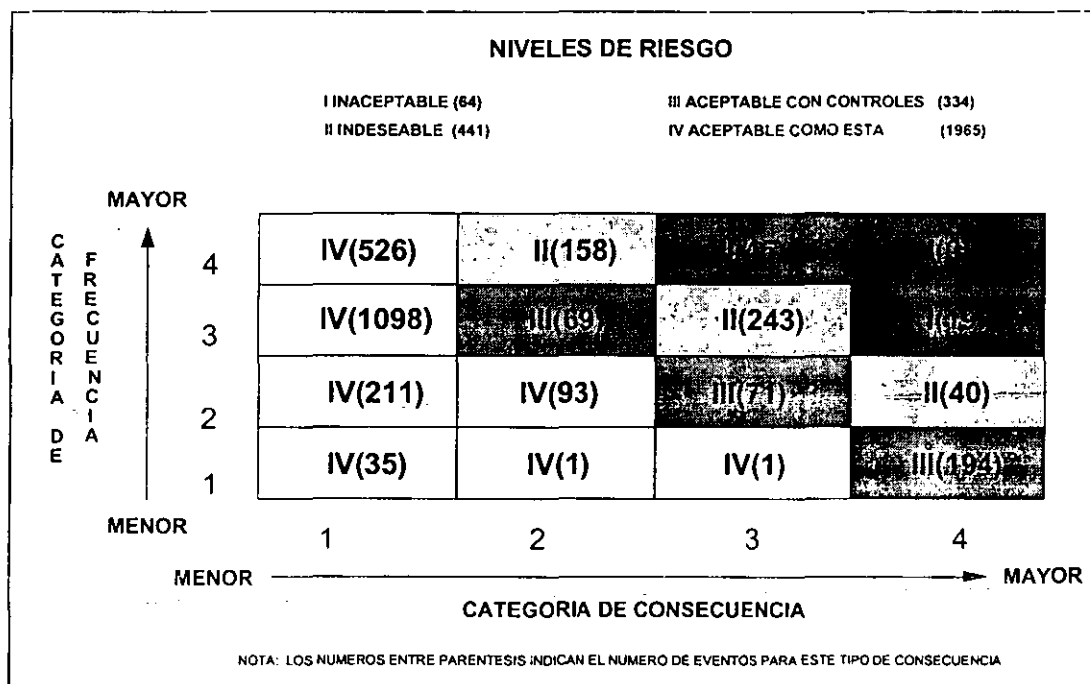


Con la definición de los niveles de riesgos y las categorías de frecuencias y consecuencias, se construye la Matriz de Riesgos, quedando de la siguiente manera:

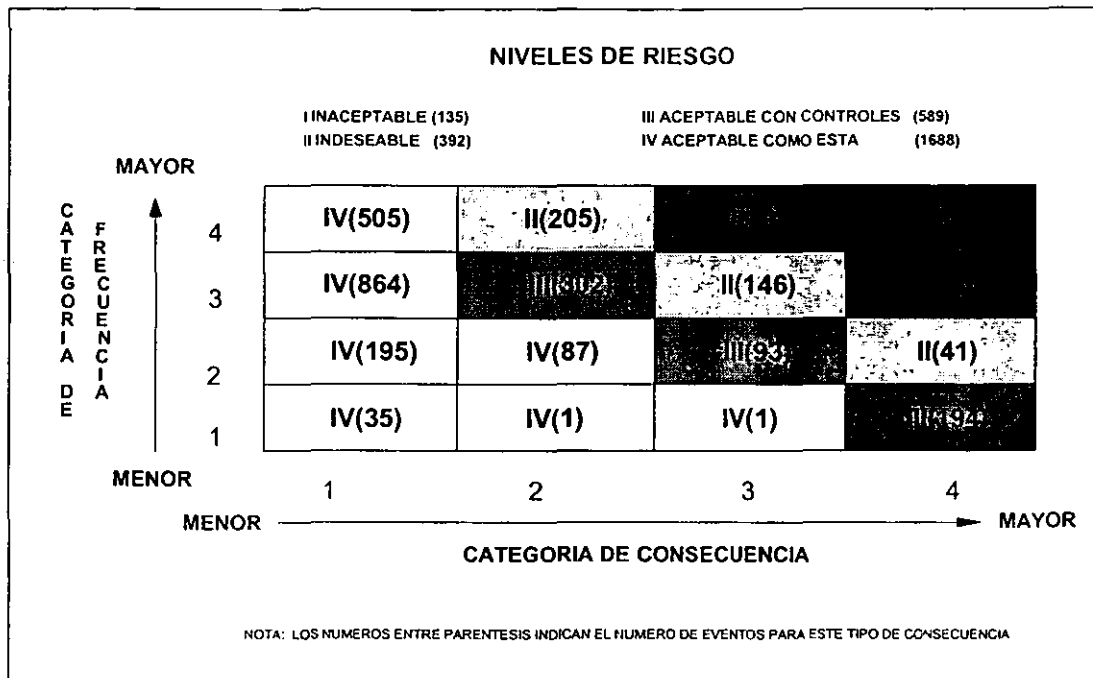


A continuación se muestran las tres matrices de riesgo obtenidas en este estudio para cada una de las tres categorías de consecuencias consideradas.

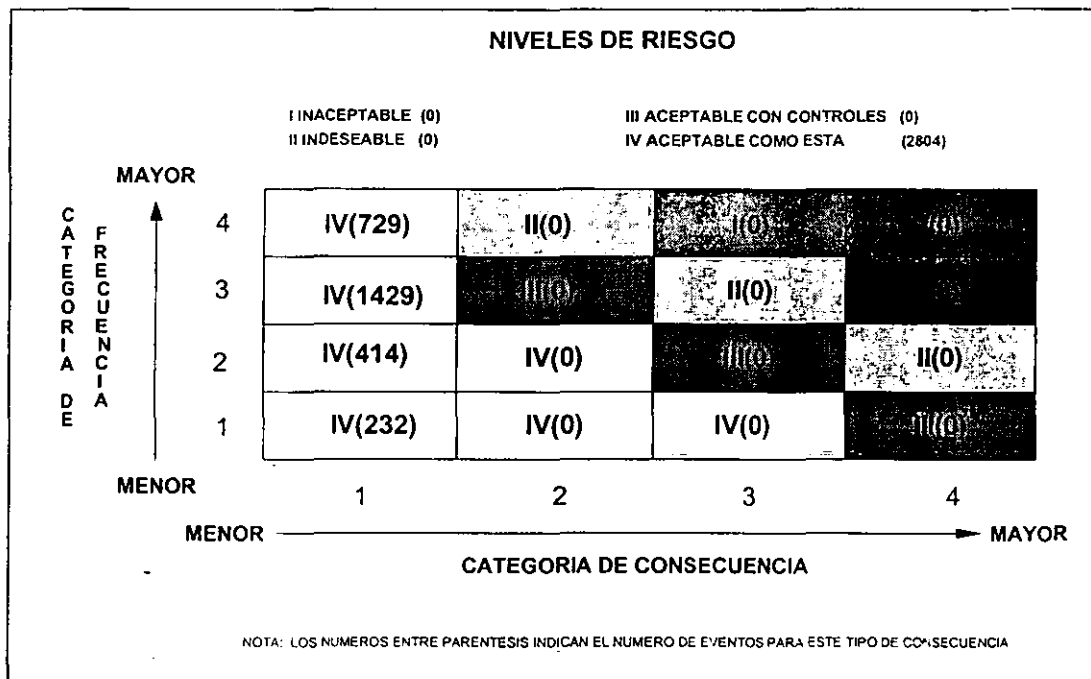
**MATRIZ DE RIESGO PARA CONSECUENCIAS DEL TIPO "A"  
SEGURIDAD PUBLICA Y MEDIO AMBIENTE**



**MATRIZ DE RIESGO PARA CONSECUENCIAS DEL TIPO "B":  
SEGURIDAD DE LOS EMPLEADOS**



**MATRIZ DE RIESGO PARA CONSECUENCIAS DEL TIPO "C":  
PERDIDA DE PRODUCCION**



De los diferentes escenarios surgidos del Análisis de Peligro y Operabilidad (HAZOP) se procedió a generar las matrices de riesgo para cada uno de los tipos de consecuencia. De los 2804 riesgos potenciales se encontró que 318 (11.35% del total) caen en la categoría de riesgos inaceptables (Nivel I) (ver anexo C).

Los riesgos indeseables (Nivel II) que deben ser mitigados con ingeniería y/o controles administrativos en un periodo de tiempo máximo de 12 meses son 802 (28.60 % del total) (ver Anexo C).

Los riesgos aceptables con controles (Nivel III) son 488 (17.40% del total) y deberá verificarse que los procedimientos y controles existan, dicha verificación debe realizarse para evitar que en un futuro estos riesgos se conviertan en inaceptables o indeseables.

Dentro de los riesgos aceptables como están y que no requieren acciones de mitigación (Nivel IV), se tienen 1196 (42.65 % del total).

### **8.8. Modelación de Consecuencias.**

En esta parte del estudio se calcularon las zonas de afectación por fuego, explosión y toxicidad de los escenarios definidos en la metodología HAZOP. Para la Modelación de consecuencias se empleo el balance de materia y energía obtenido a través del simulador de procesos HISYS, la hoja de composición del gas que se maneja en la estación y el software "PHAST-PRO V 5.2.2 (Process Hazard Analysis Software Tools Professional)", los resultados obtenidos se muestran con las Matrices de Causas y Consecuencias y en los esquemas de Zonas de Afectación (ver Anexo D).

Se recopiló la siguiente información con el objetivo de llevar a cabo una revisión detallada que permita plantear los posibles escenarios de emisión.

- a) Información validada de la ingeniería de la instalación para elaborar análisis de riesgos, como son los Diagramas de Flujo de Proceso (DFP's), Diagramas de Tuberías e Instrumentación (DTI's), Planos de Localización General (PLG's) y el HAZOP.
- b) Propiedades físicas, químicas y tóxicas de las diferentes corrientes.
- c) Datos meteorológicos de la zona donde se ubica la instalación.

El principal objetivo de la modelación de consecuencias es el de determinar la magnitud del riesgo, para lo cual es de vital importancia simular y cuantificar el material liberado a través de los modelos de:

- a) Emisión.
- b) Dispersión.
- c) Explosión y Fuego.
- d) Efectos por explosión. radiación térmica y toxicidad.

Debido a que las unidades de compresión presentan similitud en sus condiciones de operación (presión, temperatura y flujo) se consideró a la unidad 17 del área ampliación como referencia para el análisis de consecuencias; además de que esta unidad al encontrarse en medio de la estación de compresión, presenta el riesgo de que las zonas de afectación por radiación, explosión y toxicidad sean de mayor alcance y abarquen a las unidades de las áreas principal y reampliación, así como a la Batería de Separación Samaria II cercana a la estación.

### 8.8.1. Modelación de Emisiones.

Los modelos de emisión son empleados para cuantificar el flujo de descarga del material, la cantidad total emitida y el estado físico del mismo. Algunas fuentes de emisión en instalaciones de manejo de gas son: recipientes a presión, cabezales, compresores y tuberías. El modelo matemático que representa este fenómeno físico es el balance de energía expresado como la ecuación de Bernoulli.

Dependiendo de las condiciones de operación (presión, temperatura, composición de la mezcla, etc.), el material que se libera puede presentar cualquiera de las fases.

Las fuentes de emisión pueden considerarse como prácticas y potenciales. Las prácticas tienen una mayor probabilidad de ocurrencia, pero las consecuencias son moderadas. Las emisiones potenciales tienen una menor probabilidad de ocurrencia pero sus consecuencias son más severas.

Para poder determinar los efectos de las emisiones sobre el personal del área es necesario conocer las principales propiedades físicas, químicas y tóxicas de los materiales emitidos, éstas son mostradas en las tablas de Balance de Materia.

De las sustancias manejadas, el ácido sulfhídrico es sin duda el gas más venenoso, ya que a altas concentraciones mata los nervios del olfato. A concentraciones elevadas (800-1000 ppm) puede ser fatal instantáneamente, siendo tan peligroso como el ácido cianhídrico. La concentración máxima permisible de ácido sulfhídrico a la cual no se producen daños irreversibles a la salud (IDLH) es de 300 ppm. El ácido sulfhídrico presenta un peligro de explosión moderado.

El metano, etano, propano y butano son asfixiantes simples, que no tienen efectos tóxicos específicos, pero actúan para excluir el oxígeno de los pulmones. Este tipo de hidrocarburos son gases altamente inflamables, explosivos y reaccionan vigorosamente con materiales oxidantes. El pentano y el hexano son narcóticos en altas concentraciones, los valores de IDLH son de 1.5 y 0.5 % mol para el pentano y hexano, respectivamente. Estos gases constituyen un riesgo de fuego y explosión altamente peligrosos.

En la sección de Balance de Materia de la Estación de Compresión Samaria II, se tiene una tabla donde se muestran las composiciones de las corrientes de alimentación para los diversos escenarios. Estos datos fueron alimentados al banco de datos del paquete PHAST.

Cada escenario es afectado por los siguientes factores:

- Si la descarga es continua o instantánea.
- Si el recipiente está presurizado o a presión atmosférica.
- Las características químicas, incluyendo si el material es normalmente un gas, líquido o sólido a temperatura ambiente.

Con el objeto de definir por completo la fuente, es necesario contar con la siguiente información:

- Características físicas y químicas del material almacenado.
- Geometría de la fuente de emisión.
- Condiciones operacionales de la planta.
- Condiciones de la superficie del derrame.

### Planteamiento de los diferentes escenarios:

Consideraciones	Escenarios
<p>a) Emisiones en orificios de ½, ¾ y 2 pulgadas de diámetro en un equipo o en una tubería.</p> <p>b) Ruptura catastrófica.</p> <p>c) Ruptura de línea.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fuga de gas en el separador general de succión FA-100A o en el cabezal general de succión 30"ØP-105.</li> <li>2. Fuga de gas en el separador vertical de vapores FA-150 o en la línea de alimentación de 16"ØP-150.</li> <li>3. Derrame de condensados en el cabezal general de condensados de alta presión a Batería Samaria II, 6"ØP-500.</li> <li>4. Fuga de gas en el separador vertical de descarga de la tercera etapa FA-303A.</li> <li>5. Fuga de gas en el separador de la primera etapa FA-301A o en la línea de descarga de 8"ØP-308A.</li> <li>6. Derrame de condensados en el separador vertical de la segunda etapa FA-302A.</li> <li>7. Fuga de gas en el separador vertical de la segunda etapa FA-302A o en la línea de descarga 6"ØP-313A.</li> <li>8. Derrame de condensados en el separador vertical de la tercera etapa FA-303A o en la línea 1½"Ø P-342A.</li> <li>9. Fuga de gas en el separador vertical de la tercera etapa FA-303A o en la línea de descarga 6"ØP-317A.</li> <li>10. Fuga de gas en el cabezal general de descarga de gas amargo de alta presión a C.P.G. Cactus, 16"ØP-453A.</li> </ol>

El tiempo que se consideró para la emisión de gas en el cabezal de alimentación y separador general de succión fue de 10 minutos y para los demás equipos y cabezales de descarga de 5 minutos; estos tiempos abarcan la acción de detección, bloqueo de líneas adecuadas y venteo en el equipo o tubería. Este tiempo se utiliza para el cálculo de la masa que se emite.

#### 8.8.2. Modelación de Dispersiones.

Los modelos de dispersión describen el transporte en la atmósfera del material liberado, desde el sitio de emisión hasta los puntos en donde la concentración resulte nociva para el ser humano o se encuentre como mezcla inflamable. Estos modelos están basados en la ecuación de difusión Gaussiana de un gas y para su aplicación es necesario establecer una concentración máxima permisible de exposición, lo cual permite estimar el área de evacuación en caso de un accidente. Las ecuaciones gaussianas se emplean bajo el supuesto de que las concentraciones máximas se registran al nivel del piso ( $z = 0$  metros) y de que tanto el gasto de emisión como las condiciones meteorológicas permanecen constantes durante el tiempo de modelación.

Dentro de los modelos de dispersión más utilizados se encuentran los de Pasquill-Gifford, el cual involucra los siguientes factores:

- La velocidad y dirección del viento.
- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.

- Radiación solar.
- Irregularidad de la superficie.
- Elevación de la fuente.
- Distribución del equipo.
- Cantidad y tasa de la emisión.
- Duración de la emisión.

La siguiente tabla muestra los parámetros utilizados en este estudio. La estabilidad atmosférica Clase F representa el peor caso posible de la dispersión del material en la estación de compresión Samaria II.

Parámetro	Valor utilizado	
Velocidad del viento	1.5 m/s	6 m/s
Estabilidad atmosférica	Clase F	Clase C/D
Temperatura atmosférica	29°C	29°C
Presión atmosférica	1 atm	1 atm
Humedad	80%	80%
Rugosidad de la superficie de los alrededores	0.1	0.1

### 8.8.3. Modelación de Explosión y Fuego.

Los modelos de Fuego y Explosión cuantifican las consecuencias de una explosión o fuego y el área afectada.

Una vez que se produce la explosión se generan una serie de ondas expansivas circulares (ondas de choque) de tal forma que las ondas de mayor presión están cercanas al centro de la nube. El objetivo del modelo es entonces determinar la magnitud de los diámetros asociados a la sobrepresión de las ondas y los daños producidos en las instalaciones.

Es muy importante mencionar que con el análisis de las situaciones de mayor riesgo se pueden hacer recomendaciones en el diseño o en las medidas de seguridad para disminuir su probabilidad de ocurrencia y con ello incrementar la seguridad de la planta.

### 8.8.4. Modelación de efectos por Explosión, Radiación Térmica y Toxicidad.

Para medir la magnitud del riesgo por toxicidad se monitorea la concentración máxima permisible definida por el IDLH para el ácido sulfhídrico en 300 ppm en un tiempo promedio de 1800 s.

Los efectos por explosión de la nube emitida se modelaron para diferentes valores de sobrepresión (1, 2 y 3 psig) de acuerdo a los Daños Producidos en el Personal, Equipo e Instalaciones obteniéndose radios de sobrepresión (en metros) que definen la región dañada en la estación de compresión y sus alrededores.

Los efectos por fuego se calcularon para diferentes niveles de radiación (4, 12.5 y 37.5 kw/m<sup>2</sup>) para obtener los radios de afectación en la instalación a partir del punto de emisión.

Los criterios de evaluación de consecuencias por efectos de sobrepresión, radiación térmica y el umbral de dolor por efectos térmicos se establecen en las Tablas 4.5.2, 4.5.3 y 4.5.5.

## 8.8.5. Resultados obtenidos de la modelación de consecuencias.

### Estabilidad Atmosférica: Clase F

#### Velocidad del Viento: 1.5 m/s

#### 1. Sistema de Separación de Gas de Baja Presión.

La finalidad de este sistema es separar el gas amargo de baja presión proveniente de la Bateria Samaria II de los líquidos arrastrados o formados durante su transporte a la Estación de Compresión Samaria II.

##### 1.1. Fugas por orificio.

Para las fugas por orificio, así como ruptura catastrófica del recipiente y de línea, se encontró que es el escenario que presenta las menores consecuencias de alto riesgo debido a que opera a baja presión y la tasa de emisión no es elevada como para formar una nube de gas inflamable que abarque una gran distancia. Sin embargo, por ser el material liberado un gas combustible se presenta el riesgo de provocar fuego/explosión dentro de un radio de 4.7, 6.3 y 17.2 m para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente. Estos radios de afectación significan que los efectos mayores se presentan dentro del área de proceso.

Las consecuencias por un nivel de sobrepresión de 3 psig para este tipo de fugas se traducen en daños menores a las instalaciones y equipos de proceso en un radio de hasta 36.9 m en las fugas de 2 pulgadas. Para la fuga de 0.5 y 0.75 pulgadas no se tiene efecto alguno debido a que la tasa de masa liberada es demasiado baja como para alcanzar la mínima concentración de inflamabilidad en la mezcla gas-aire.

Los efectos por un nivel de radiación térmica de  $12.5 \text{ kW/m}^2$ , alcanzan distancias a partir del punto de emisión de 8.12, 12.1 y 30.03 m para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente (ver dibujo 00667C, del anexo D). Este nivel de radiación es capaz de causar quemaduras de tercer grado y tener una probabilidad de ser letal del 1% en un tiempo de exposición de 1 minuto. Para distancias mayores se provocarían quemaduras de 2º grado luego de 20 segundos de exposición. Las fugas por orificio con diámetro de 0.75 y 2 pulgadas alcanzan un nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  a 10.4 y 26.6 m, respectivamente; este nivel se considera 100% letal en un minuto de exposición.

La distancia en la que se sobrepasa la concentración IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) es hasta 7.9 m para la fuga de 0.5 pulgadas, 11.6 m para el de 0.75 pulgadas y 28.7 m para el de 2 pulgadas.

##### 1.2. Ruptura de Línea.

Para determinar las zonas de afectación por explosión por la modelación del evento de ruptura de línea, se tiene que el nivel de sobrepresión de 3 psig se alcanza hasta una distancia de 185.1 m teniendo como origen al cabezal general de succión de 30" de diámetro P-105, para este tipo de escenario la zona de afectación presenta mayor área, debido a que la cantidad de masa liberada es considerable.

En las Consecuencias por Fuego se tiene que para el escenario de Ruptura de Línea se alcanza el nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  hasta una distancia de 102.1 m a partir del punto de origen de la emisión, debido a la cantidad de materia liberada de manera continua.

La máxima concentración IDLH para el H<sub>2</sub>S de 300 ppm en la dirección del viento durante el evento, abarca un radio de 124.70 m para la ruptura de línea.

## **2. Separador Vertical de Succión de Vapores.**

La finalidad de este sistema es separar los vapores, provenientes de la Batería Samaria II, de los líquidos arrastrados o formados durante su transporte a la recuperadora de vapores o unidad de compresión 23.

### **2.1. Fugas por orificio.**

Para las fugas por orificio, presenta que no hay riesgo por consecuencias de explosión debido a que opera a baja presión y la tasa de masa liberada es demasiado baja como para alcanzar la mínima concentración de inflamabilidad para formar una nube de gas que abarque una gran distancia, en la mezcla gas-aire. Sin embargo, por ser el material liberado un gas combustible se presenta el riesgo de provocar fuego/explosión dentro de un radio de 2.8, 4.5 y 11.4 m para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente.

Los efectos por un nivel de radiación térmica de  $12.5 \text{ kW/m}^2$ , solo es alcanzado por el escenario de 2 pulgadas la distancia a partir del punto de emisión es de 17.48 m. Este nivel de radiación es capaz de causar quemaduras de tercer grado y tener una probabilidad de ser letal del 1% en un tiempo de exposición de 1 minuto. Para distancias mayores se provocarían quemaduras de 2º grado luego de 20 segundos de exposición. Las fugas por orificio con diámetro de 2 pulgadas alcanzan un nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  a 15.3 m, respectivamente; este nivel se considera 100% letal en un minuto de exposición.

La distancia en la que se sobrepasa la concentración IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) es hasta 2.5 m para la fuga de 0.5 pulgadas, 3.6 m para el de 0.75 pulgadas y 10.1 m para el de 2 pulgadas, para este tipo de escenario.

### **2.2. Ruptura Catastrófica de Recipiente y Línea.**

Para la modelación del evento de ruptura catastrófica de recipiente, se considera solamente la masa que el separador puede contener en su volumen a sus condiciones de presión y temperatura.

Para determinar las zonas de afectación por explosión, se tiene que el nivel de sobrepresión de 3 psig se alcanzo hasta una distancia de 8.2 m teniendo como origen al separador FA-300A, este nivel de sobrepresión se tienen daños menores a equipos hasta ruptura de tanques de almacenamiento. Para la ruptura de línea la zona de afectación presenta mayor área, por la cantidad de masa emitida es mayor, alcanzando un radio de 62.8 metros.

En las Consecuencias por Fuego se tiene que para el escenario de Ruptura Catastrófica se alcanza el nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  hasta una distancia de 12.0 m a partir del punto de origen de la emisión. Para el escenario de Ruptura de Línea se alcanza este mismo nivel de radiación hasta una distancia de 35.4 m debido a que es mayor la cantidad de materia liberada de manera continua.

La máxima concentración IDLH para el  $\text{H}_2\text{S}$  de 300 ppm en la dirección del viento durante el evento, abarca un radio de 2.3 m para la ruptura catastrófica y 24.5 m para la ruptura de línea.

## **3. Separador Vertical de Descarga de la Tercera Etapa de Vapores.**

El gas de descarga del compresor de la tercera etapa se alimenta al separador vertical de la tercera etapa FA-303A para retirar los posibles condensados que lleguen a formarse durante el enfriamiento.

### **3.1. Fugas por orificio.**

Para las fugas por orificio en el Separador Vertical de la Tercera Etapa FA-303A, se encontró que es el escenario que presenta las menores consecuencias de alto riesgo debido a que la tasa de emisión no es elevada como para formar una nube de gas. Sin embargo, por ser el material liberado un gas combustible se presenta el riesgo de provocar fuego/explosión dentro de un radio de 5.2, 7.6 y 20.7 m para los



diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente. Estos radios de afectación significan que los efectos mayores se presentan dentro del área de proceso.

Los efectos por un nivel de radiación térmica de  $4 \text{ kW/m}^2$ , alcanzan distancias a partir del punto de emisión de 9.0, 14.9 y 39.3 m para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas. Este nivel de radiación es capaz de causar daños al personal por quemaduras de segundo grado durante 20 segundos. Para un nivel de radiación de  $12.5 \text{ kW/m}^2$ , en la fuga de 0.5 pulgadas no se alcanzó y en los escenarios de 0.75 y 2 pulgadas, el resultado de los radios que se obtuvieron son 10.8, 32.9 m. Con esta emisión de gas, a este nivel de radiación tiene la probabilidad de ser letal del 1% en un tiempo de exposición de 1 minuto. Las fugas por orificio con diámetro de 2 pulgadas alcanzó un nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  a 28.7 m, respectivamente; este nivel se considera 100% letal en un minuto de exposición.

En este caso, se tiene que por toxicidad por ácido sulfhídrico, se alcanza la concentración IDLH de 300 ppm, cubriendo las distancias de 4.5, 6.1 y 16.9 m en la dirección del viento para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente.

### **3.2. Ruptura Catastrófica de Recipiente y Línea.**

El nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica de recipiente y de línea, se presenta en un radio de 10.3 y 47.1 m, respectivamente. Lo cual indica que dentro de esta zona de afectación se tienen daños menores a equipos de proceso y conforme la distancia es menor respecto al origen del evento, se presenta el riesgo de daños mayores a equipos y líneas.

El nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  por ruptura catastrófica y de línea, se alcanza a una distancia de 14.6 y 30.2 m respectivamente. Lo anterior implica que se presenta el riesgo de causar daños a equipos y líneas de proceso de esta distancia hacia el origen de la emisión. Además de ser una zona 100% letal para el personal durante un tiempo de exposición de 1 minuto.

La zona de riesgo por toxicidad, alcanzado durante liberación de gas en forma instantánea y por ruptura de línea en el separador vertical de la tercera etapa FA-303A, es de 3 y 17.2 m respectivamente.

## **4. Primera Etapa de Separación, Compresión y Enfriamiento.**

El gas de descarga del compresor de la primera etapa se alimenta al separador vertical FA-301A para retirar los condensados formados durante el enfriamiento.

### **4.1. Fugas por orificio.**

Considerando una emisión de gas en diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas en el Separador Vertical de la Primera Etapa FA-301A, los efectos por fuego y explosión son apreciables ya que se tiene la relación aire-combustible adecuada para que se lleve a cabo la ignición hasta distancias de 8.3, 11.9 y 31.2 m, respectivamente. En este caso también, se tiene además efectos considerables por toxicidad por ácido sulfhídrico, ya que la concentración IDLH de 300 ppm, alcanza las distancias de 12.6, 18.9 y 51.9 m en la dirección del viento para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente.

Para la fuga de gas en un orificio de 2 pulgadas, la explosión de la nube formada ocasionará daños menores al equipo de proceso e instalaciones dentro de un radio de 70.9 m con un nivel de sobrepresión de 3 psig; para las fugas de orificio con diámetros de 0.5 y 0.75 pulgadas no hay riesgo de ignición del gas emitido a la atmósfera.

El Límite de Inflamabilidad Inferior comprende un radio de 31.2 m para una fuga de 2 pulgadas de diámetro, por lo que se recomienda tomar las medidas necesarias para evitar la presencia de fuentes de

ignición en esta área. Con esta emisión de gas, los efectos por niveles de radiación se reflejan en daños al personal por quemaduras de segundo grado en un tiempo de exposición de 20 segundos para un radio de 60.1 m a  $4 \text{ kW/m}^2$  y daños al equipo de proceso para un radio menor de 45 metros a  $37.5 \text{ kW/m}^2$  respectivamente.

#### **4.2. Ruptura Catastrófica de Recipiente y Línea.**

El nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica y de línea, abarca un radio de 15 y 197.60 m, respectivamente. Lo cual indica que dentro de esta zona de afectación se tienen daños menores a equipos de proceso y conforme la distancia es menor respecto al origen del evento, se presenta el riesgo de daños mayores a equipos y líneas.

El nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  es alcanzado a una distancia de 20.5 m para el escenario de ruptura catastrófica; lo anterior implica que aumenta el riesgo de daños menores a severos en equipos y líneas conforme la distancia disminuye con respecto al origen de la emisión. Para el escenario de Ruptura de Línea se alcanza este mismo nivel de radiación hasta una distancia de 120.3 metros.

La zona de riesgo por toxicidad, alcanzado durante liberación de gas en forma instantánea y por ruptura de línea en el separador FA-301A es de 5.7 y 143.6 m, respectivamente.

### **5. Segunda Etapa de Separación, Compresión y Enfriamiento.**

El gas de descarga del compresor de la segunda etapa se alimenta al separador vertical de la segunda etapa FA-302A para retirar los condensados formados durante el enfriamiento.

#### **5.1. Fugas por orificio.**

##### **A) Emisión de Gas.**

Para fugas de gas con diámetros de orificio de 0.5 y 0.75 pulgadas, los efectos por fuego y explosión representan riesgo debido a que el Límite Inferior de Inflamabilidad (0.0398 fracción mol de gas combustible) se alcanza a una distancia de 12.1 y 18.4 m, respectivamente.

La nube tóxica formada en una fuga por orificio de 2 pulgadas rebasa la concentración máxima permisible de 300 ppm hasta una distancia de 77 m y sus efectos son nocivos para vida y la salud si el personal se encuentra dentro de este radio de afectación durante un periodo de 30 minutos.

Para las emisiones de gas en orificios de 2 pulgadas, la zona de inflamabilidad estará dentro de un radio de 48.5 m. En caso de fuego, los efectos por radiación son considerables ocasionando daños a los equipos en un radio de 64.4 m a  $37.5 \text{ kW/m}^2$  en la dirección del viento durante el evento.

Los efectos por sobrepresión de 3 psig, sólo son apreciables en un radio de 39.5 m para las fugas por orificio 0.75 pulgadas, provocando daños menores a equipos y tuberías, y para fugas de 2 pulgadas donde los efectos son catastróficos ya que es posible tener daños dentro de la instalación en una distancia de 105 m, daños que van desde rupturas a tanques de almacenamiento hasta daños severos a distancias más cercanas al punto de ignición.

##### **B) Emisión de Condensados.**

Para el caso de fugas de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, que ocasionan derrames de condensados que van desde el Separador Vertical de la Segunda Etapa FA-302A al cabezal de condensados de alta presión, se obtuvieron valores de Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL) a distancias de cero, respectivamente. Los efectos por una onda de choque de 3 psig, para los orificios con diámetros de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas se obtuvo que no hay riesgo considerable.

Para los escenarios de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas los niveles de radiación no se alcanzaron las distancias de niveles capaz de provocar fuego.

## **5.2. Ruptura Catastrófica de Recipiente y Línea.**

### **A) Emisión de Gas.**

El nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica y de línea considerando el flujo de gas, se presenta en un radio de 18.7 y 256.7 m, respectivamente. Lo cual indica que dentro de esta zona de afectación se tienen daños menores a equipos de proceso y conforme la distancia es menor respecto al origen del evento, se presenta el riesgo de daños mayores a equipos y líneas.

El nivel de radiación de  $37.5 \text{ kw/m}^2$  es alcanzado por el escenario de ruptura catastrófica y de línea en una distancia de 21.9 y 170 m, respectivamente, lo cual implica que se presenta el riesgo de daños a equipos y líneas de estas distancias hacia el origen de la emisión con una probabilidad de ser letal del 100% para el personal durante un tiempo de exposición de 1 minuto.

La zona de riesgo por toxicidad alcanzado durante liberación de gas en forma instantánea y por ruptura de línea en el Separador Vertical de la Segunda Etapa FA-302A es de 7.1 y 271.8 m, respectivamente.

### **B) Emisión de Condensados.**

Para el análisis de consecuencias por la liberación de condensados en el separador vertical de la segunda etapa FA-302A, se tiene que para el nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica y de línea no hay riesgo.

Por ruptura catastrófica y la ruptura de línea no se alcanzaron niveles de radiación debido a que estos dependen de las condiciones atmosféricas, el gasto másico liberado, su orientación y dirección.

La zona de afectación por toxicidad alcanzado por emisión instantánea de condensados en el Separador Vertical de la Segunda Etapa FA-302A, presenta concentraciones mayores que el IDLH de 300 ppm para el  $\text{H}_2\text{S}$  hasta una distancia de mínima 0.2 m. Para ruptura de línea de descarga de condensados en el mismo separador, el alcance es de 5.3 metros (ver dibujo 00667C del anexo D).

## **6. Tercera Etapa de Separación, Compresión y Enfriamiento.**

El gas de descarga del compresor de la tercera etapa se alimenta al separador vertical de la tercera etapa FA-303A para retirar los posibles condensados que lleguen a formarse durante el enfriamiento.

### **6.1. Fugas por orificio.**

#### **A) Emisión de Gas.**

Considerando una emisión de gas en diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas en el separador vertical de la tercera etapa FA-303A y líneas de descarga, los efectos por fuego y explosión son apreciables ya que se tiene la relación aire-combustible adecuada para que se lleve a cabo la ignición a distancias de 16.2, 24.7 y 62.6 m, respectivamente.

En este evento, se tienen además efectos considerables de toxicidad por ácido sulfhídrico, ya que se alcanza la concentración IDLH de 300 ppm, cubriendo las distancias de 26.6, 43.1 y 107.6 m en la dirección del viento para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas (ver dibujo 00667E del anexo D), respectivamente.

Para la fuga de gas en un orificio de 2 pulgadas, la explosión de la nube formada ocasionará daños menores al equipo de proceso e instalaciones al alcanzar un nivel de sobrepresión de 3 psig a una distancia de 147.8 m en la dirección del viento. La zona de inflamabilidad comprende un radio de 62.5 m,

por lo que se recomienda tomar las medidas necesarias para evitar la presencia de fuentes de ignición en esta área. Con esta emisión de gas, los efectos por una radiación de  $4 \text{ kW/m}^2$  se reflejan en daños al personal por quemaduras de segundo grado durante 20 segundos de exposición en un radio de 114.5 m y daños al equipo de proceso por un nivel de radiación igual o mayor de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  para radios menores de 85.7 metros.

#### **B) Emisión de Condensados.**

Para el caso de fugas de 0.5 y 0.75 pulgadas, que ocasionan derrames de condensados que van desde el Separador Vertical de la Tercera Etapa FA-303A al cabezal de condensados de alta presión, se obtuvieron valores de Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL) de 0.0211 fracción mol de combustible a distancias de 26 y 38.4 m, respectivamente. Los efectos por una onda de choque de 3 psig, para los orificios con diámetros de 0.5 y 0.75 pulgadas son considerables en un radio de 57.9 y 80.5 m, respectivamente. Para una fuga con diámetro de 2 pulgadas no hay riesgo.

Las distancias a las cuales se alcanza el nivel de radiación de  $12.5 \text{ kW/m}^2$ , capaz de provocar incendios por material inflamable y quemaduras de tercer grado por más de 20 segundos de exposición, son de 80.3, 115.6 y 276.3 m para las fugas de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente (ver dibujo 00667C del anexo D).

### **6.2. Ruptura Catastrófica de Recipiente y Línea.**

#### **A) Emisión de Gas.**

El nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica de recipiente y de línea, se presenta en un radio de 20.9 y 230.4 m, respectivamente. Lo cual indica que dentro de esta zona de afectación se tienen daños menores a equipos de proceso y conforme la distancia es menor respecto al origen del evento, se presenta el riesgo de daños mayores a equipos y líneas.

El nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  es alcanzado por ruptura catastrófica y de línea en una distancia de 25 y 228 m, respectivamente. Lo anterior implica que se presenta el riesgo de causar daños a equipos y líneas de proceso de esta distancia hacia el origen de la emisión. Además de ser una zona 100% letal para el personal durante un tiempo de exposición de 1 minuto

La zona de riesgo por toxicidad, se alcanza durante liberación de gas en forma instantánea y por ruptura de línea en el separador vertical de la tercera etapa FA-303A es de 7.56 y 461.2 m, respectivamente.

#### **B) Emisión de Condensados.**

Para el análisis de consecuencias por la liberación de condensados en el Separador Vertical de la Tercera Etapa FA-303A, se encontró que no hay riesgo; para niveles de sobrepresión, para los eventos de ruptura catastrófica y línea.

Respecto a las consecuencias por fuego, no se obtuvieron resultados para los efectos de radiación por ruptura catastrófica para el nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  tampoco para el escenario por ruptura de línea debido a que los niveles de radiación dependen de las condiciones atmosféricas, características y flujo másico liberado, su orientación y dirección. Sin embargo, el nivel de radiación de  $12.5 \text{ kW/m}^2$  por ruptura de línea si es alcanzado hasta una distancia de 214.4 m a partir del origen de la emisión, lo cual indica que a menores distancias se presentan los efectos de quemaduras de tercer grado si el personal está expuesto más de 20 segundos.

La zona de riesgo por toxicidad solamente se alcanza en forma instantánea en el separador vertical de la tercera etapa FA-303A teniendo un radio de afectación de 6.7 m.

## **7. Cabezal General de Condensados A.P.**

### **7.1. Fuga por orificio.**

Los condensados de alta presión obtenidos en los separadores de la segunda y tercera etapa de compresión se envían directamente al cabezal general de condensados de alta presión (6" de diámetro P-500) a batería Samaria II. Debido a que estos condensados se manejan en alta presión en el cabezal (20 kg/cm<sup>2</sup> man), cualquier fuga puede causar daños considerables, ya que una fracción de estos se vaporizará instantáneamente formando una nube de gas inflamable y tóxica; además de que la tasa de emisión será más elevada, pues el material al encontrarse en fase líquida presenta una mayor densidad.

La mezcla formada de gas-aire presenta el riesgo de ser inflamable a distancias de 16.87, 25.9 y 64.9 m para diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente. El riesgo de una consecuencia por un nivel de sobrepresión de 3 psig por una fuga por orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas con un alcance en radios de 36.7, 56.26 y 159.50 m el cual representa daños a equipo y tuberías en caso de explosión de la nube de gas formada a partir del punto de emisión (ver dibujo 0067A del anexo D).

El nivel de radiación de 37.5 kW/m<sup>2</sup> por fuga de orificio con diámetros 0.5, 0.75 y 2 pulgadas es alcanzado unas distancias de 32.8, 47.5 y 114.1 respectivamente. Lo anterior implica que se presenta el riesgo de causar daños a líneas de proceso de esta distancia hacia el origen de la emisión. Además de ser una zona 100% letal para el personal durante un tiempo de exposición de 1 minuto

La zona de riesgo por toxicidad, alcanzado durante liberación de condensados en el cabezal general de condensados de alta presión es de 13.3, 20.2 y 49.8 m, respectivamente.

### **7.2. Ruptura de Línea.**

Para el análisis de la modelación de consecuencias por explosión, fuego, y toxicidad en el cabezal general de condensados de alta presión, solamente se consideró el escenario de ruptura de línea debido a que en el cabezal se maneja un flujo continuo y no una masa puntual que se libera en todas direcciones como es modelado en la ruptura catastrófica.

De la modelación de consecuencias por explosión, se obtuvieron resultados por un nivel de sobrepresión de 3 psig hasta un radio de afectación de 218.5 m, provocando dentro de este radio posibles daños a instalaciones y equipo de proceso.

El nivel de radiación de 37.5 kW/m<sup>2</sup> es alcanzado por el escenario de ruptura de línea en una distancia de 278.4 m, lo cual implica que se presenta el riesgo de daños a equipos y líneas de esta distancia hacia el origen de la emisión con una probabilidad de ser letal del 100% para el personal durante un tiempo de exposición de 1 minuto.

La distancia, a favor del viento (Este-Noreste y Este-Sureste) a la cual se rebasa la concentración máxima permisible IDLH para el H<sub>2</sub>S (300 ppm) y el radio de afectación es de 139.3 m. Esto significa, que si una persona se encuentra dentro de la nube de gas del condensado liberado desde su fuente de emisión hasta esta distancia, durante un tiempo de exposición máxima de 30 minutos, la concentración del ácido sulfhídrico puede provocarle daños a la vida y a la salud con consecuencias fatales.

## **8. Sistema de Gas Amargo de Alta Presión.**

El gas amargo de alta presión de descarga es enviado a C.P.G. Cactus, a una presión de 75.3 kg/cm<sup>2</sup> man, temperatura de 53°C y con un flujo de 137.6 MMPCSD por medio del cabezal de 16"Ø P-453A.

Considerando la dirección de los vientos reinantes Este-Noreste y Este-Sureste y la localización de la fuente de emisión de gas, se generaría una nube que se desplazará del Área de Ampliación hacia el Área Principal.

### **8.1. Fugas por orificio**

Para fugas con diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, se formaría una nube inflamable/explosiva en un radio 15.7, 24.6 y 61.4 m partiendo del punto de emisión. La concentración de IDLH (300 ppm) se alcanza a un radio del punto de emisión de 26, 39.2 y 105.1 m para los orificios de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente; de lo anterior se hace notar que a menor distancia se tendrían efectos significativos de toxicidad por ácido sulfhídrico.

La onda de choque de 3 psig por una explosión, ocasionará daños que van desde rupturas en recipientes dentro de un radio de 33.8, 53 y 157.6 m (ver dibujo 00667A del anexo D), hasta daños menores en equipo y líneas para radios mayores de 34.57, 54.5 y 162.8 m para un nivel de sobrepresión de 2 psig, para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas.

Los efectos por radiación de un nivel de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  se presentan hasta una distancia de 24.5, 35.5 y 85.9 m para las fugas por orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas. Este nivel de radiación es suficiente para ocasionar daño a la instalación y equipo de proceso, así como al personal de operación por quemaduras en menos de un minuto de exposición. El riesgo para ocasionar quemaduras de tercer grado después de 20 segundos de exposición e incendios por un nivel de radiación de  $12.5 \text{ kW/m}^2$ , se presenta a distancias del punto de emisión de 27.7, 40.3 y 97.1 m para diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas.

### **8.2. Ruptura de Línea.**

Debido a la emisión de masa por ruptura del cabezal de manera continua y a la alta caída de presión de  $75.3 \text{ kg/cm}^2$  man a presión atmosférica, se tiene la mayor velocidad final de descarga de gas lo cual favorece su dilución con el aire y por consiguiente las zonas de afectación por explosión, fuego y toxicidad son de un alcance moderado.

La zona de afectación por explosión alcanza un nivel de sobrepresión de 3 psig en un radio de 212 m, lo cual implica que del origen de la emisión en el cabezal de gas de alta presión hasta esta distancia en la dirección del viento durante el evento, se pueden causar desde daños menores hasta severos a equipo y líneas de proceso.

La zona de afectación por un nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  capaz de provocar daños a instalaciones y equipos de proceso es alcanzada hasta una distancia de 104 m a favor del viento, mostrando con ello el gran riesgo que se tiene en esta zona, ya que es un nivel de radiación suficiente tener una probabilidad de ser letal del 100% si el personal se expone durante un minuto.

El impacto tóxico del gas liberado continuamente durante cinco minutos, es suficiente para rebasar la concentración IDLH de 300 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$  hasta una distancia de 139.4 m a favor del viento. Esto significa, que si una persona se encuentra dentro de la pluma de la nube de gas durante un tiempo de exposición de media hora, presentará daños irreversibles en su salud.

## **Estabilidad Atmosférica: Clase C/D**

**Velocidad del Viento: 6.0 m/s**

### **1. Sistema de Separación de Gas de Baja Presión**

#### **1.1. Fugas por orificio**

Para las fugas por orificio, así como ruptura catastrófica del recipiente y de línea, se encontró que es el escenario que presenta las menores consecuencias de alto riesgo debido a que opera a baja presión y la tasa de emisión no es elevada como para formar una nube de gas inflamable que abarque una gran distancia. Sin embargo, por ser el material liberado un gas combustible se presenta el riesgo de provocar fuego/explosión dentro de un radio de 4.7, 6.2 y 18.2 m para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas. Estos radios de afectación significan que los efectos mayores se presentan dentro de la instalación.

Las consecuencias por una sobrepresión de 3 psig para este tipo de fugas se traducen en daños menores a las instalaciones y equipos de proceso en un radio de hasta 37.7 m en las fugas con diámetro de 2 pulgadas. Para las fugas de 0.5 y 0.75 pulgadas, no se tiene efecto alguno debido a que la tasa de masa liberada es demasiado baja como para alcanzar la mínima concentración de inflamabilidad en la mezcla gas-aire.

Los efectos por un nivel de radiación térmica de  $12.5 \text{ kW/m}^2$ , alcanzan distancias a partir del punto de emisión de 6, 9.21 y 23 m para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente (ver dibujo 00667D del anexo D). Este nivel de radiación es capaz de causar quemaduras de tercer grado y tener una probabilidad de ser letal del 1% en un tiempo de exposición de 1 minuto. Para distancias mayores se provocarían quemaduras de segundo grado luego de 20 segundos de exposición. Las fugas por orificio con diámetros de 2 pulgadas alcanzan un nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  a 20 m, el cual representa un nivel 100 % letal en un minuto de exposición.

La distancia en la que se sobrepasa la concentración IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) es hasta 7.9 m para la fuga de 0.5 pulgadas, 11.6 m para el de 0.75 pulgadas y 29.2 m para el de 2 pulgadas.

#### **1.2. Ruptura de Línea.**

Para la ruptura de línea la zona de afectación presenta mayor área, debido a que la cantidad de masa liberada es mayor.

Para determinar las zonas de afectación por explosión, se tiene que el nivel de sobrepresión de 3 psig se alcanza hasta una distancia de 156.7 m teniendo como origen en la línea del Cabezal General de Succión 30" de diámetro P-105, este nivel de sobrepresión se tienen daños menores a equipos hasta ruptura de tanques de almacenamiento.

En las Consecuencias por Fuego se tiene que para el escenario de Ruptura de Línea alcanza el nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  hasta una distancia de 77.2 m a partir del punto de origen de la emisión.

La máxima concentración IDLH para el  $\text{H}_2\text{S}$  de 300 ppm en la dirección del viento durante el evento, abarca un radio de 118.3 m para la ruptura de línea.

## **2. Primera Etapa de Separación, Compresión y Enfriamiento.**

### **2.1. Fugas por orificio**

Considerando una emisión de gas en diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas en el Separador Vertical de la Primera Etapa FA-301A, los efectos por fuego y explosión son apreciables ya que se tiene la relación aire-combustible adecuada para que se lleve a cabo la ignición hasta distancias de 8.3, 11.9 y 31.3 m, respectivamente. En este caso, se tienen además efectos considerables por toxicidad por ácido sulfhídrico, ya que la concentración IDLH de 300 ppm, alcanza las distancias de 12.7, 18.9 y 51.9 m en la dirección del viento para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente.

Para la fuga de gas en un orificio de 2 pulgadas, la explosión de la nube formada ocasionará daños menores al equipo de proceso e instalaciones dentro de un radio de 69 m con un nivel de sobrepresión de 3 psig; para las fugas de orificio con diámetros de 0.5 y 0.75 pulgadas no hay riesgo por gas emitido a la atmósfera (ver dibujo 00667D del anexo D).

El Límite de Inflamabilidad Inferior comprende un radio de 31.3 m para una fuga de 2 pulgadas de diámetro, por lo que se recomienda tomar las medidas necesarias para evitar la presencia de fuentes de ignición en esta área. Con esta emisión de gas, los efectos por niveles de radiación de  $4 \text{ kW/m}^2$  se reflejan en daños al personal por quemaduras de segundo grado en un tiempo de exposición de 20 segundos en un radio de 48.3 m y daños al equipo de proceso para un radio menor de 33.7 metros a  $37.5 \text{ kW/m}^2$ .

### **2.2. Ruptura Catastrófica de Recipiente y Línea.**

El nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica y de línea, abarca un radio de 15 y 189.6 m, respectivamente. Lo cual indica que dentro de esta zona de afectación se tienen daños menores a equipos de proceso y conforme la distancia es menor respecto al origen del evento, se presenta el riesgo de daños mayores a equipos y líneas.

El nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  es alcanzado a una distancia de 20.5 m para el escenario de ruptura catastrófica; lo anterior implica que aumenta el riesgo de daños menores a severos en equipos y líneas conforme la distancia disminuye con respecto al origen de la emisión. Para el escenario de ruptura de línea se alcanza con este mismo nivel de radiación hasta una distancia de 91 metros.

La zona de alto riesgo por toxicidad, alcanzado durante liberación de gas en forma instantánea y por ruptura de línea en el separador FA-301A es de 9.17 y 137.8 m, respectivamente.

## **3. Segunda Etapa de Separación, Compresión y Enfriamiento.**

### **3.1. Fugas por orificio.**

#### **A) Emisión de Gas.**

Para fugas de gas con diámetros de orificio de 0.5 y 0.75 pulgadas, los efectos por fuego y explosión representan riesgo debido a que el Límite Inferior de Inflamabilidad (0.039 fracción mol de gas combustible) se alcanza a una distancia de 12.2 y 18.5 m, respectivamente.

La nube de gas formada en una fuga por orificio de 2 pulgadas rebasa la concentración máxima permisible de 300 ppm hasta una distancia de 75.2 m y sus efectos nocivos para la vida y la salud si el personal se encuentra dentro de este radio de afectación durante un periodo de 30 minutos.

Para las emisiones de gas en orificios de 2 pulgadas, la zona de inflamabilidad estará dentro de un radio de 48.5 m. En caso de fuego, los efectos por radiación son considerables ocasionando daños a los



equipos en un radio de 48.9 m a un nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  en la dirección del viento durante el evento.

Los efectos por sobrepresión de 3 psig, sólo son apreciables en un radio de 38.9 m para las fugas por orificio 0.75 pulgadas, provocando daños menores a equipos y tuberías, y para fugas de 2 pulgadas donde los efectos son catastróficos ya que es posible tener daños dentro de la instalación en una distancia de 98.2 m, daños que van desde rupturas a tanques de almacenamiento hasta daños severos a distancias más cercanas al punto de ignición, el cual se puede dar en el mismo punto de emisión o en cualquier distancia hasta los 48.5 m en dirección del viento (distancia a la cual se tiene el 0.039 del LFL).

#### **B) Emisión de Condensados.**

Para el caso de fugas de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, que ocasionan derrames de condensados que van desde el separador vertical de la segunda etapa FA-302A al cabezal de condensados de alta presión, se obtuvieron valores de Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL) a distancias de cero. Los efectos por una onda de choque de 3 psig, se obtuvo que no hay riesgo considerable para los orificios con diámetros de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas.

Para los escenarios de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas los niveles de radiación no se alcanzaron las distancias de niveles capaz de provocar fuego.

Solamente los escenarios que reportaron riesgo, son por toxicidad durante la liberación por fuga de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas son de 2.14, 3 y 8.5 m respectivamente (ver dibujo 00667F del anexo D).

### **3.2. Ruptura Catastrófica de Recipiente y Línea.**

#### **A) Emisión de Gas.**

El nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica y de línea considerando el flujo de gas, se presenta en un radio de 18.7 y 254.2 m, respectivamente. Lo cual indica que dentro de esta zona de afectación se tienen daños menores a equipos de proceso y conforme la distancia es menor respecto al origen del evento, se presenta el riesgo de daños mayores a equipos y líneas.

El nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  es alcanzado por el escenario de ruptura catastrófica y de línea en una distancia de 21.9 y 129.2 m, respectivamente, lo cual implica que se presenta el riesgo de daños a equipos y líneas de estas distancias hacia el origen de la emisión con una probabilidad de ser letal del 100% para el personal durante un tiempo de exposición de 1 minuto.

La zona de riesgo por toxicidad, alcanzado durante liberación de gas en forma instantánea y por ruptura de línea en el separador vertical de la segunda etapa FA-302A es de 11.6 y 202.8 m, respectivamente.

#### **B) Emisión de Condensados.**

Para el análisis de consecuencias por la liberación de condensados en el separador vertical de la segunda etapa FA-302A, se encontró que el nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica y de línea no se alcanzó presentar zona de afectación. Para el nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  tampoco alcanza algún riesgo.

La zona de alto riesgo por toxicidad, alcanzado durante liberación de gas en forma instantánea y por ruptura de línea en el separador FA-302A es de 0.5 y 5.5 m, respectivamente.

#### **4. Tercera Etapa de Separación, Compresión y Enfriamiento.**

##### **4.1 Fugas por orificio.**

###### **A) Emisión de Gas.**

Considerando una emisión de gas en diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas en el Separador Vertical de la Tercera Etapa FA-303A y líneas de descarga, los efectos por fuego y explosión son apreciables ya que se tiene la relación aire-combustible adecuada para que se lleve a cabo la ignición a distancias de 16.2, 24.7 y 62.8 m, respectivamente. En este caso, se tienen además efectos considerables de toxicidad por ácido sulfhídrico, ya que se alcanza la concentración IDLH de 300ppm, cubriendo las distancias de 25.6, 39.7 y 97.4 m en la dirección del viento para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas (ver dibujo 00667F del anexo D), respectivamente.

Para la fuga de gas en un orificio de 2 pulgadas, la explosión de la nube formada ocasionaría daños menores al equipo de proceso e instalaciones al alcanzar un nivel de sobrepresión de 3 psig a una distancia de 129.6 m en la dirección del viento. La zona de inflamabilidad comprende un radio de 62.8 m, por lo que se recomienda tomar las medidas necesarias para evitar la presencia de fuentes de ignición en esta área. Con esta emisión de gas, los efectos por una radiación de 4 kW/m<sup>2</sup> se reflejan en daños al personal por quemaduras de segundo grado durante 20 segundos de exposición en un radio de 92.9 m y daños al equipo de proceso por un nivel de radiación igual o mayor de 37.5 kW/m<sup>2</sup> para radios menores de 64.7 metros.

###### **B) Emisión de Condensados.**

Para el caso de fugas de 0.5 y 0.75 pulgadas, que ocasionan derrames de condensados que van desde el separador vertical de la tercera etapa FA-303A al cabezal de condensados de alta presión, se obtuvieron valores de Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL) de 0.0211 fracción mol de combustible a distancias de 25.8 y 38.3 m, respectivamente. Los efectos por una onda de choque de 3 psig, para los orificios con diámetros de 0.5 y 0.75 pulgadas son considerables en un radio de 59.3 y 81 m, respectivamente. Para una fuga con diámetro de 2 pulgadas, no hay riesgo.

Las distancias a las cuales se alcanza el nivel de radiación de 12.5 kW/m<sup>2</sup>, capaz de provocar incendios por material inflamable y quemaduras de tercer grado por más de 20 segundos de exposición, son de 61, 87.4 y 210.6 m para las fugas de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente (ver dibujo 00667D del anexo D).

##### **4.2. Ruptura Catastrófica de Recipiente y Línea.**

###### **A) Emisión de Gas.**

El nivel de sobrepresión de 3 psig para la ruptura catastrófica de recipiente y de línea, se presenta en un radio de 20.9 y 227.5 m, respectivamente. Lo cual indica que dentro de esta zona de afectación se tienen daños menores a equipos de proceso y conforme la distancia es menor respecto al origen del evento, se presenta el riesgo de daños mayores a equipos y líneas.

El nivel de radiación de 37.5 kW/m<sup>2</sup> es alcanzado por ruptura catastrófica y de línea en una distancia de 25 y 173.2 m, respectivamente. Lo anterior implica que se presenta el riesgo de causar daños a equipos y líneas de proceso de esta distancia hacia el origen de la emisión. Además de ser una zona 100% letal para el personal durante un tiempo de exposición de 1 minuto

La zona de riesgo por toxicidad, alcanzado durante liberación de gas en forma instantánea y por ruptura de línea en el Separador Vertical de la Tercera Etapa FA-303A es de 12.9 y 340.4 m, respectivamente.

## **B) Emisión de Condensados.**

Para el análisis de consecuencias por la liberación de condensados en el separador vertical de la tercera etapa FA-303A, se encontró que no hay riesgo de alcanzar en un nivel de sobrepresión de 3 psig. Respecto a las consecuencias por fuego, no se obtuvieron resultados para los efectos de radiación por ruptura catastrófica debido a que los niveles de radiación dependen de las condiciones atmosféricas, característica fisicoquímicas y flujo del material liberado, su orientación y dirección. El nivel de radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  por ruptura de línea es alcanzado en una distancia de 134.3 m a partir del origen de la emisión, lo cual indica que a menores distancias se presentan los efectos de daños a instalaciones, equipos y líneas de proceso con una probabilidad de fatalidad del 100% durante un tiempo de exposición de 1 minuto.

La zona de afectación por toxicidad solamente se alcanza por ruptura catastrófica en el separador vertical de la tercera etapa FA-303A, presenta concentraciones mayores que el IDLH de 300 ppm para el  $\text{H}_2\text{S}$  hasta una distancia de 8.2 metros.

### **5. Cabezal General de Condensados A.P.**

#### **5.1. Fuga por orificio.**

El escenario de fuga por orificio de 2 pulgadas no se consideró debido a que al ser mayor del 20% del diámetro de la tubería, se le considera como ruptura total de línea.

La mezcla formada de gas-aire presenta el riesgo de ser inflamable a distancias de 16.9, 25.7 y 63.3 m, para diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente. El riesgo de una consecuencia por un nivel de sobrepresión de 3 psig por una fuga por orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas con un alcance en radio de 34.4, 52.8 y 153.1 m, el cual representa daños a equipo y tuberías en caso de explosión de la nube de gas formada a partir del punto de emisión hasta esta distancia (ver dibujo 00667D del anexo D).

El nivel por radiación de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  capaz de causar daños a equipo y tubería para fugas por orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas se alcanza dentro del radio de afectación de 24.8, 35.9, y 87.2 m a partir del punto de emisión y en la dirección del viento, respectivamente. Lo anterior implica que se presenta el riesgo de causar daños a líneas de proceso de esta distancia hacia el origen de la emisión. Además de ser una zona 100% letal para el personal durante un tiempo de exposición de 1 minuto

La zona de riesgo por toxicidad, alcanzado durante liberación de condensados en el cabezal general de condensados de alta presión es de 13.3, 20.2 y 49.8 m, respectivamente.

#### **5.2. Ruptura de Línea.**

Para el análisis de la modelación de consecuencias por explosión, fuego, y toxicidad en el cabezal general de condensados de alta presión, solamente se consideró el escenario de ruptura de línea debido a que en el cabezal se maneja un flujo continuo y no una masa puntual que se libera en todas direcciones como es modelado en la ruptura catastrófica.

De la modelación de consecuencias por explosión, se obtuvieron resultados por un nivel de sobrepresión de 3 psig hasta un radio de afectación de 201.5 m, provocando dentro de este radio posibles daños a instalaciones y equipo de proceso.

El nivel de radiación suficiente para causar daño a equipo y líneas de proceso de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  es alcanzado en una distancia de 212.4 m, con el cual una persona presentará quemaduras de 3er. grado en 1 minuto de exposición.

La distancia, a favor del viento (Este-Noreste y Este-Sureste) a la cual se rebasa la concentración máxima permisible IDLH para el H<sub>2</sub>S (300 ppm) y el radio de afectación es de 131.1 m. Esto significa, que si una persona se encuentra dentro de la nube de gas del condensado liberado desde su fuente de emisión hasta esta distancia, durante un tiempo de exposición máxima de 30 minutos, la concentración del ácido sulfhídrico puede provocarle daños para la vida y la salud.

## **6. Sistema de Gas Amargo de Alta Presión.**

### **6.1. Fugas por orificio.**

Para fugas con diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, se formaría una nube inflamable/explosiva en un radio 16.2, 24.2 y 58.2 m partiendo del punto de emisión. La concentración de IDLH (300 ppm) se alcanza a un radio del punto de emisión de 26.6, 36.5 y 93.8 m para los orificios de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente; de lo anterior se hace notar que a menor distancia se tendrían efectos significativos de toxicidad por ácido sulfhídrico.

La onda de choque de 3 psig por una explosión, ocasionará daños que van desde rupturas en recipientes dentro de un radio de 33.5, 48 y 127.3 m (ver dibujo 00667B del anexo D), hasta daños menores en equipo y líneas para radios mayores de 34.3, 49.6 y 132 m para los diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas para una onda de choque 2 psig, respectivamente.

Los efectos por radiación de un nivel de 37.5 kW/m<sup>2</sup> se presentan hasta una distancia de 18.4, 26.7 y 65 m para las fugas por orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente. Este nivel de radiación es suficiente para ocasionar daño a la instalación y equipo de proceso, así como al personal de operación por quemaduras en menos de un minuto de exposición. El riesgo para ocasionar quemaduras de tercer grado después de 20 segundos de exposición e incendios por un nivel de radiación de 12.5 kW/m<sup>2</sup>, se presenta a distancias del punto de emisión de 21.2, 31 y 75.5 m para diámetros de orificio de 0.5, 0.75 y 2 pulgadas, respectivamente.

### **6.2. Ruptura de Línea.**

La zona de afectación por explosión alcanza un nivel de sobrepresión de 3 psig en un radio de 162.4 m, lo cual implica que del origen de la emisión en el cabezal de gas de alta presión hasta esta distancia en la dirección del viento durante el evento, se pueden causar desde daños menores hasta severos a equipo y líneas de proceso si la mezcla gas-aire encuentra una fuente de ignición durante su desplazamiento.

La zona de afectación por un nivel de radiación de 37.5 kW/m<sup>2</sup> capaz de provocar daños a instalaciones y equipos de proceso es alcanzada hasta una distancia de 79.1 m a favor del viento, mostrando con ello el gran riesgo que se tiene en esta zona, ya que es un nivel de radiación suficiente tener una probabilidad de ser letal del 100% si el personal se expone durante un minuto.

El impacto tóxico del gas liberado continuamente durante cinco minutos, es suficiente para rebasar la concentración IDLH de 300 ppm de H<sub>2</sub>S hasta una distancia de 116.8 m a favor del viento. Esto significa, que si una persona se encuentra dentro de la pluma de la nube de gas durante un tiempo de exposición de media hora, presentará daños irreversibles en su salud.

## **8.9. Árbol de Fallas.**

Con la aplicación de esta metodología se obtiene la probabilidad de ocurrencia del evento no deseado (Top Event) "Daños irreversibles al turbocompresor". Este método permite definir claramente las probabilidades de ocurrencia, así como facilitar objetivamente la toma de decisiones acerca de las

medidas preventivas y de control recomendadas que eliminen o bien reduzcan su probabilidad a niveles de riesgo razonable.

Para el Análisis del Árbol de Fallas se utilizó el software especializado Bravo 2.0a & IRRAS 1.0, licenciado al IMP por JBF Associates. Este software contiene Modelos Matemáticos Rigurosos soportados en la Teoría de Confiabilidad.

Con el análisis de datos de bitácora se detectaron 104 posibles fallas o causas por las cuales las unidades de compresión quedaron fuera de operación en 2451 veces durante el periodo analizado.

La importancia que tiene el análisis de datos de bitácoras para la elaboración del árbol de fallas radica en que nos permite detectar la frecuencia con que se presentan las fallas en los sistemas de compresión de la estación y una vez obtenidos esos datos se pueden calcular las probabilidades con que se presentarán dichos eventos.

Además de contar con las probabilidades resultantes del análisis de bitácoras, también se consultaron otras fuentes confiables de bases de datos como son: el reporte OREDA-84 (Offshore Reliability Data), la tabla de Estimaciones de Errores Humanos que presenta la Fundación MAPFRE, así como el artículo "Use equipment failure statistics properly" de H.P. Bloch y F.K. Geltner publicado en la revista Hydrocarbon Processing del mes de Enero de 1999.

Para la elaboración del árbol de fallas se utilizaron un total de 120 posibles eventos básicos que combinados pueden ocasionar daños irreversibles al turbocompresor, a continuación se desglosan en la siguiente tabla dichos eventos básicos así como la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos.

Clave	Evento Básico.	Probabilidad
B-1	Falla del sensor de temperatura Z-182	2.53E-04
B-2	Falla dispositivo de alarma (considera también disparos sin marcar falla y fallas desconocidas).	0.0816
B-3	Error humano por omisión.	1.0E-02
B-4	Falla en válvula de sangrado.	2.04E-03
B-5	Sobrecarga en el turbocompresor.	1.0E-06
B-6	Falla en álabes guías.	1.64E-04
B-7	Compresor de flujo axial sucio.	1.00E-06
B-8	Obstrucción del filtro de entrada de aire.	2.45E-03
B-9	Falla del actuador de gas combustible L-344.	1.00E-04
B-10	Falla en válvula de control de gas combustible.	4.49E-03
B-11	Baja presión de gas combustible.	7.75E-03
B-12	Falla en el interruptor de baja presión de gas combustible S-342	1.00E-04
B-13	Falla en cojinetes (1).	2.33E-03 en generador de gas. 7.77E-04 en turbina de potencia. 2.59E-04 en caja de accesorios. 1.79E-04 en el compresor.
B-14	Falla en válvula reguladora de gas combustible.	2.04E-03
B-15	Falla disparo por alta vibración.	7.10E-04
B-16	Fuelles hidráulicos	2.44E-03
B-17	Alineación inadecuada en turbina de potencia y generador de gas	1.63E-03
B-18	Fijación y montaje inadecuados de turbina.	2.50E-07
B-19	Cojinetes dañados (2)	1.18E-03
B-20	Falla sistema de disparo por sobrevelocidad Z-153	1.80E-04
B-21	Falla sistema de disparo de respaldo por sobrevelocidad Z-353	1.43E-04

Clave	Evento Básico.	Probabilidad
B-22	Falla el sensor 6353 de velocidad de turbina de potencia.	3.26E-03
B-23	Falla el sensor 6383 de velocidad del generador de gas.	3.26E-03
B-24	Fuente de ignición.	1.00
B-25	Falla en detectores térmicos.	1.20E-04
B-26	Falla en sensores de fuego UV/IR.	2.45E-03
B-27	Falla en el sistema de supresión de fuego en base a CO <sub>2</sub> .	4.08E-03
B-28	Falla en pernos. (1)	2.72E-06 en generador de gas. 4.41E-06 en turbina de potencia. 4.41E-06 en estructura. 2.16E-06 en el compresor. 3.92E-06 en sistema de arranque
B-29	Falla en coplees del sistema de arranque. (1)	4.53E-04
B-30	Falla en engranes de la caja de accesorios.(1)	3.32E-04
B-31	Falla en diafragmas del generador de gas. (1)	4.43E-04
B-32	Falla en detectores de gas.	2.45E-03
B-33	Falla disparo por alta concentración de gas.	2.21E-04
B-34	Falla en impulsores de los compresores. (1)	1.94E-05
B-35	Sismo de alta intensidad.	1.00E-06
B-36	Explosión en equipo adyacente.	1.00E-06
B-37	Falla en juntas mecánicas.	2.44E-05
B-38	Banco de tubos sucios de los enfriadores.	1.20E-04
B-39	Falla en tuercas. (1)	3.20E-05 en generador de gas. 9.34E-05 en turbina de potencia. 7.73E-05 en caja de accesorios 3.73E-04 en estructura. 1.50E-05 en el compresor. 3.73E-04 en sistema de arranque
B-40	Falla en válvula reguladora de presión de tres vías.	9.42E-03
B-41	Falla en el sistema de aceite hidráulico.	0.0159
B-42	Fuga de aceite hidráulico en motor de ventiladores y en bomba principal.	7.35E-03
B-43	Falla en alarma por baja presión de aceite lubricante (considera fallas en el sistema eléctrico, las veces que dispara sin marcar falla y las fallas desconocidas).	0.0816
B-44	Fallas en el interruptor por baja presión de aceite lubricante.	5.31E-04
B-45	Ruptura en línea de descarga de bomba de aceite lubricante (considera fuga de aceite en el retorno y falla en las conexiones de aceite a la turbina).	4.90E-03
B-46	Fugas de aceite lubricante en uniones o mangueras en mal estado.	1.22E-03
B-47	Fugas en el sistema de aceite de sello.	4.08E-03
B-48	Falla en el interruptor por bajo nivel de aceite lubricante S388-1.	1.40E-04
B-49	Falla en el regulador de presión de aceite lubricante (considera los casos de baja presión de aceite).	3.26E-03
B-50	Falla en anillos. (1)	1.09E-03 en generador de gas. 7.79E-04 en turbina de potencia. 3.89E-04 en caja de accesorios 1.95E-04 en el compresor. 3.03E-04 en sistema de arranque
B-51	Obstrucción del filtro de aceite lubricante.	4.08E-03
B-52	Fallas en las bombas principal y auxiliar de aceite lubricante.	0.0147
B-53	Tiempo y cantidad de líquidos suficiente para causar daños al compresor.	1.00E-02
B-54	Alta presión diferencial de aceite de sellos.	5.71E-03
B-55	Holgura en sellos.	1.00E-06

Clave	Evento Básico.	Probabilidad
B-56	Falla en trampa de líquidos del Separador de Gas de Sellos (considera fallas de la trampa de aceite de sellos).	8.16E-04
B-57	Alto nivel de líquidos en los Separadores (considera también falla de los controladores de nivel).	0.1297
B-58	Falla disparo por alto nivel de líquidos.	1.17E-04
B-59	Falla en abrazaderas y/o sujetadores. (1)	1.18E-03 en estructura. 2.35E-03 en turbina de potencia. 1.18E-03 en caja de accesorios 4.70E-04 en el compresor.
B-60	Falla en lubricadores de bombas (1).	1.09E-03 en sistema de arranque
B-61	Alineación inadecuada de compresores.	4.90E-03
B-62	Falla en sellos mecánicos. (1)	1.67E-04 en generador de gas 2.24E-04 en el compresor.
B-63	Falla en flechas. (1)	1.60E-04 en caja de accesorios 2.00E-04 en el compresor.
B-64	Bajo flujo en la succión del compresor.	0.1999
B-65	Falla disparo por alta presión en la descarga.	4.08E-04
B-66	Falla en válvulas de seguridad ubicadas en las descargas.	4.49E-03
B-67	Falla en resortes ubicados en el generador de gas.	4.38E-05
B-68	Falla en transmisores de flujo.	2.02E-04
B-69	Falla en válvula by pass del sistema antisurge.	6.85E-04
B-70	Falla en transmisores de presión.	2.15E-05
B-71	Falla en soportes para vibración en la estructura.	9.00E-04
B-72	Desgaste de anillos. (1)	1.54E-02 en sistemas de turbina 3.85E-03 en compresores.
B-73	Fuga de gas en el interior del contenedor (considera fuga en succión y/o descarga de compresores, en válvula reguladora de gas de sellos y alta concentración de gas).	8.98E-03
B-74	Falla en el disparo por alta temperatura de aceite lubricante.	2.74E-04
B-75	Alta temperatura de aceite lubricante.	0.1049
B-76	Alta y/o baja presión diferencial de aceite o gas de sellos (considera también fallas en la regulación).	0.0755
B-77	Alta temperatura de turbina de potencia.	0.0677
B-78	Bajo voltaje de baterías y/o reparación del cargador de baterías.	0.0379
B-79	Falla del alternador.	8.16E-04
B-80	Falla del topping.	0.0180
B-81	Falla en aspas del ventilador.	1.22E-03
B-82	Falla en los reductores de velocidad.	3.67E-03
B-83	Alineación de reductores de velocidad.	2.04E-03
B-84	Falla del sistema eléctrico.	0.0118
B-85	Falla del sistema de gas de sellos.	8.98E-03
B-86	Falla en caja de accesorios (considera también reparaciones en la turbina de potencia).	7.75E-03
B-87	Falla en secuencia de válvulas.	6.94E-03
B-88	Sobrevelocidad de turbina de potencia (considera también sobrevelocidad en el generador de gas).	7.34E-03
B-89	Falla del compresor (considera también reparación y/o cambio de compresor).	0.0106
B-90	Alineación y acoplamiento inadecuados del compresor.	4.90E-03
B-91	Bajo nivel de aceite lubricante.	4.90E-03
B-92	Alta temperatura de descarga.	3.67E-03

Clave	Evento Básico.	Probabilidad
B-93	Falla en válvula de descarga.	3.26E-03
B-94	Falla del generador de gas.	2.86E-03
B-95	Falla del incrementador de velocidad.	1.63E-03
B-96	Falla en conexiones de servicios auxiliares a turbina, generador de gas o compresores.	2.85E-03
B-97	Falla del sistema de sellado.	1.63E-03
B-98	Falla en fuelles de suministro y retorno de aceite lubricante.	1.22E-03
B-99	Fallas en cárter y trampa de aceite lubricante.	2.45E-03
B-100	Tormenta eléctrica.	8.16E-04
B-101	Falla en válvulas de control de nivel.	8.16E-04
B-102	Falla en válvula de venteo.	8.16E-04
B-103	Vibración en turbina de potencia.	4.08E-04
B-104	Vibración en compresores.	4.08E-04
B-105	El operador no advierte alarma.	3.00E-02
B-106	Unidad de compresión sin sensores de vibración.	0.2105
B-107	Falla de sensores de vibración.	4.08E-04
B-108	Fuga de aceite en turbina de potencia (considera fugas en conector y funda de flecha de turbina, en el incrementador de velocidad, en los compresores, en el retorno del generador de gas y en la bomba principal de aceite hidráulico).	8.57E-03
B-109	Fuga de gas (considera fugas en succión y/o descarga de compresores, en válvula reguladora de gas de sellos, en separador o cabezal de gas combustible, en válvula de relevo de gas combustible, en válvulas de succión y/o descarga, en válvulas de carga y/o venteo, en el enfriador y en separadores).	0.0139
B-110	Fuga de gas en compresores (considera la detección de alta concentración de gas así como la fuga en la succión y/o descarga de los compresores).	6.53E-03
B-111	Alta presión de gas de succión.	0.0379
B-112	Fuga de condensados en los separadores.	2.04E-03
B-113	Falla en válvulas de purga y/o venteo. (1)	7.70E-03
B-114	Alineación inadecuada del generador de gas.	4.08E-04
B-115	Error general de omisión en un procedimiento de mantenimiento.	3.00E-03
B-116	No acelera el turbocompresor.	2.86E-03
B-117	Falla en el encendido.	7.34E-03
B-118	Alineación inadecuada de turbina de potencia.	1.22E-03
B-119	Falla en turbina de potencia.	4.08E-04
B-120	Falla en empaques de caja de accesorios y compresores.	4.01E-05

(1) Resultados obtenidos a partir de la información del artículo "Use equipment failure statistics properly" de H. P. Bloch y F. K. Gelther, publicado en la revista Hydrocarbon Processing del mes de Enero de 1999.

(2) Resultado obtenido al analizar las bitácoras.

Una vez encontradas las probabilidades de ocurrencia de los eventos básicos se procedió a combinar las probabilidades como se muestra en el árbol de fallas del anexo E, para encontrar la probabilidad de ocurrencia del evento principal.

Al aplicar el método de análisis de árbol de fallas considerando la operación de las 14 unidades de compresión de la estación en un período analizado de 157136 horas, se obtuvo una probabilidad de ocurrencia del evento no deseado (Top Event) "Daños irreversibles al turbocompresor" de  $9.54 \times 10^{-03}$ ,



este valor puede ser utilizado para obtener el tiempo probable que tardará en presentarse una falla que pueda provocar un daño irreversible al turbocompresor en el período de un año calendario (122640 horas considerando la operación de las 14 unidades).

MTBF en el período de un año = (Probabilidad de fallas) (Hrs de operación en un año calendario).

MTBF en el período de un año =  $(9.54 \times 10^{-03} \times 122640 \text{ horas}) = 1169.38 \text{ horas}$

Es decir este evento se presentará aproximadamente cada 1169.38 hrs; considerando que las horas comprendidas en un año calendario son 122640 se puede calcular el número de veces que se puede presentar el evento tope durante un año.

No de fallas anual = (Hrs. De operación en un año calendario) / (MTBF en el período de un año).

No de fallas anual =  $(122640 \text{ horas}) / (1169.38 \text{ horas}) = 104.88 \approx 105$ .

Es decir que en el transcurso de un año calendario existe la probabilidad de que se presente un total de 105 fallas que puedan ocasionar daños irreversibles a cualquiera de los 14 turbocompresores de que consta la estación.

Y considerando consecuencias como pérdida de producción entre una semana y un mes (Ver matriz de riesgos del análisis de peligro y operabilidad); esto nos ubica en la matriz de riesgo para consecuencias tipo "C" (pérdida de producción); en un nivel de riesgo indeseable, por lo cual deberán mitigarse con ingeniería y/o controles administrativos las probables causas que lleguen a ocasionar el evento tope dentro de un período de tiempo específico tal como 12 meses para que permita llegar a un nivel de riesgo aceptable.

La ponderación mayor de probabilidad se ubica en los siguientes eventos:

1. Alta temperatura de turbina de potencia combinada con fallas en los dispositivos sensores de temperatura, fallas en los dispositivos de alarma y disparo por alta temperatura así como fallas en el sistema eléctrico. La combinación de dichas fallas puede dar como resultado: daños mecánicos a la turbina por exceder la resistencia a las altas temperaturas del metal, daños a los componentes rotatorios (álabes y discos) de baja resistencia térmica también se constituye en una fuente de calor que puede provocar fugas intermitentes en las caras de sellos.
2. La segunda combinación de eventos básicos que pueden provocar el evento tope son aquellas donde se presentan fallas en el sistema de gas combustible particularmente en los dispositivos de alarma y disparo por baja presión de gas combustible y alta temperatura de turbina combinadas con fallas en las válvulas de sangrado, de control de gas combustible y reguladora de gas combustible.

Dichos eventos básicos combinados generan la posibilidad de surge en el compresor axial así como vibración, sobrevelocidad y alta temperatura a la entrada de la turbina. Si llegan a fallar las válvulas de control y reguladora de presión de gas combustible existe la probabilidad de que se presente falla en el arranque o en el peor de los casos sobrevelocidad de la turbina.

Al fallar la válvula de sangrado se pierde la protección por surge en la turbina durante la aceleración de la misma, ya que dicha válvula tiene como función reducir la contra presión impuesta en el compresor durante el arranque, asimismo dicha falla podría causar fatiga en los materiales de la turbina por alta temperatura además de provocar desalineación por alta vibración.

3. La tercera combinación de fallas que resultarían en un aumento de probabilidad de que ocurra el evento tope es aquella donde se presenten fallas en los cojinetes del generador de gas, turbina de potencia y/o caja de accesorios junto con algún error general de omisión en algún procedimiento de

mantenimiento, al ser los cojinetes los puntos de apoyo o alineación de los equipos, si estos llegarán a fallar provocarían una nivelación inadecuada de los equipos que se traduciría posteriormente en vibración con los respectivos daños mecánicos.

4. Otra combinación de eventos básicos que puede desembocar en daños irreversibles al turbocompresor es aquella donde existe arrastre de aceite de sellos a la succión del compresor debido a fallas en la trampa de líquidos del separador de gas de sellos ocasionados por falta de protecciones para detectar en forma automática el alto nivel de líquidos, holgura en sellos, falla en sistema de gas de sellos, alta presión diferencial de aceite de sellos, además de la falta de un programa de mantenimiento preventivo al mecanismo de la trampa del separador de aceite de sellos y de una supervisión periódica del nivel para evitar la posibilidad de las siguientes consecuencias:

El aceite como líquido puede ocasionar un desbalance en el rotor del compresor debido a la erosión en los álabes de los impulsores. El arrastre de líquidos podría contribuir a la formación de incrustaciones en el rotor del compresor, lo que podría provocar:

- Un desbalance significativo, lo cual ocasionará gradualmente desgaste y fatiga en los materiales de soporte.
  - Formación de película en los claros radiales y axiales entre el rotor y las partes estacionarias, podrían ser capaz de provocar un desgaste por abrasión a los sellos e impulsores, pérdida de eficiencia por fricción y reducción del área de flujo.
5. En quinto lugar de las causas básicas que pueden presentarse para que ocurra el evento de daños irreversibles al turbocompresor se encuentra una causa externa que no deja de ser menos importante que las demás, dicha causa es la de tormentas eléctricas, considerando que la instalación se encuentra ubicada geográficamente en una región donde es común la presencia de tormentas eléctricas se hace necesario supervisar que los equipos de la Estación de Compresión se encuentren debidamente aterrizados, además se recomienda la instalación de un pararrayos lo anterior debido a que se han presentado durante el período analizado 2 conatos de incendio por rayo en las unidades 11 y 18 de la estación.

La probabilidad de ocurrencia del evento no deseado (Top Event) "Daños irreversibles al turbocompresor" de  $9.54 \times 10^{-03}$ , resulta alto si lo comparamos con el valor de  $10^{-04}$  que marca el gobierno holandés, el cual es utilizado como referencia por muchas empresas a nivel mundial. Por lo tanto es necesario hacer ciertas recomendaciones que disminuyan de manera importante las fallas que se presentan en los equipos, mediante programas de mantenimiento sistematizados y dirigidos hacia sus líneas y equipo críticos.

### **8.10. Recomendaciones.**

De acuerdo al estudio realizado se recomienda poner atención en los siguientes elementos del sistema de compresión:

- a) Sensores de temperatura de la turbina.
- b) Dispositivos de alarma y disparo, especialmente a los relacionados con alta temperatura de turbina y baja presión de gas combustible.
- c) Sistema eléctrico.
- d) Válvula reguladora de presión de gas combustible y válvula de sangrado.
- e) Revisión de cojinetes.

- f) Trampa de líquidos del sistema de aceite de sellos, falla en el sistema de gas de sellos y presión diferencial de aceite de sellos.
- g) Revisión de tierra eléctrica de los equipos y estructuras.

Se le debe dar mantenimiento preventivo programado a cada uno de los elementos mencionados anteriormente, se debe supervisar cada control de nivel de las trampas de líquidos del sistema de aceite de sellos y/o instalar un interruptor por alto nivel. También es recomendable dar mantenimiento a los sensores de vibración para el caso particular de fallas en los cojinetes, asimismo se deben instalar disparos por alta vibración en las unidades del área principal ya que no cuentan con sensores.

Además se recomienda que en el área principal y en las unidades 15, 20 y 23 se rehabiliten los sistemas contraincendio ya que estos se encuentran bloqueados y en el caso de un incendio no podrán ser utilizados.

Para reducir considerablemente la probabilidad de daños irreversibles por surge en los compresores centrífugos, se recomienda rehabilitar los controladores antisurge y/o instalar un sistema de control digital basado en electrónica e instrumentos inteligentes que permita obtener una mayor confiabilidad en los tiempos de respuesta para las acciones correctivas que sean necesarias.

Desarrollando las acciones correctivas y preventivas recomendadas anteriormente, la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de los riesgos que se presentan en la Estación de Compresión Samaria II podrá mantenerse en un nivel aceptable.

## **CAPÍTULO 9**

### **CONCLUSIONES**

El Análisis de Riesgos es una herramienta poderosa de la Administración de Riesgos, que contribuye a un mejor desempeño en la seguridad de las instalaciones de producción terrestre y en la optimización del manejo de los recursos económicos, materiales y humanos disponibles para la operación eficiente de la industria petrolera.

La metodología desarrollada a lo largo de este trabajo nos permite realizar un estudio muy completo de Análisis de Riesgos para una instalación de producción terrestre, ya que nos permite identificar, entender, evaluar y jerarquizar los peligros inherentes al proceso. Todo esto se logra mediante la identificación de los peligros, cuantificación de los escenarios y propuestas de medidas que mejoren la seguridad en las instalaciones.

Aunque se dan los fundamentos para la aplicación de diversos modelos para el estudio de Análisis de Riesgos, es necesario la utilización de software especializado debido a los volúmenes de información que se manejan en este tipo de estudios. Además que disminuye considerablemente la cantidad de Horas-Hombres utilizadas en estos proyectos.

Así mismo, la aplicación de esta metodología requiere la participación de un grupo interdisciplinario de especialistas que estén familiarizados con el tipo de proceso en cuestión.

Por último, es importante mencionar que esta metodología se ha aplicado con éxito en proyectos llevados a cabo por el Instituto Mexicano del Petróleo y que suman más de 150,000 Horas-Hombre.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Accidente.** Liberación no controlada de material o energía capaz de producir daño.

**Análisis de Consecuencias.** Es la estimación de los efectos esperados (por dispersión de gases, radiación térmica, sobrepresión y/o toxicidad) de los casos de un accidente, independientemente de la frecuencia o probabilidad de su ocurrencia.

**Análisis de riesgo.** Es el desarrollo de la valoración cuantitativa del riesgo basado en la evaluación de ingeniería y técnicas matemáticas combinando los estimados de las consecuencias y frecuencias del accidente.

**BLEVE (Boiling liquid expanding vapor explosion).** Es la vaporización rápida y explosiva de un líquido inflamable en su descarga súbita de un recipiente, donde se encuentra bajo una presión mayor que la atmosférica y a una temperatura por encima de su punto de ebullición atmosférica.

**Casos del accidente (escenario).** Definición cuantitativa de parámetros específicos que permiten diferenciar un caso de otros que pueden resultar de un mismo accidente.

**Condición de operación anormal.** Es una condición la cual ocurre en un componente de proceso cuando una variable de operación esta fuera de los límites de operación normal.

**Consecuencias.** Es una medida de los efectos esperados de un accidente.

**Contornos de riesgo.** Líneas que conectan puntos de igual riesgo alrededor de una instalación (líneas de isoriesgo).

**Curvas FN.** Es la gráfica de la frecuencia acumulada contra las consecuencias (número de muertes).

**Descarga a chorro.** Emisión de gas y/o líquido a una presión tal que resulta en un arrastre significativo de aire.

**Dispersión atmosférica.** Acción de mezclado lento de un gas o vapor con aire. El mezclado es el resultado de la turbulencia que es función del viento y del perfil de temperatura.

**Deflagración.** Es una explosión cuya onda de sobrepresión resultante se mueve a una velocidad menor que la velocidad del sonido en el medio no reaccionado.

**Detonación.** Es una explosión cuya onda explosiva resultante se mueve a una velocidad mayor que la velocidad del sonido en el medio no reaccionado.

**Dosis tóxica.** Es la combinación de concentración y tiempo de inhalación de un gas tóxico que produce un efecto dañino específico.

**Duración de una explosión.** Tiempo que existe la fase de sobrepresión de una onda explosiva.

**El Peor Accidente Creíble.** El accidente más severo, que es razonablemente creíble, considerando solo resultados de accidentes y sus consecuencias, de todos los accidentes identificados y sus resultados.

**El Peor Accidente Posible.** El accidente más severo, considerando solo resultados de accidentes y sus consecuencias, de todos los accidentes identificados y sus resultados.

**Emisión continua (pluma).** El tiempo de emisión es muy largo comparado con el tiempo de transporte de la nube o el tiempo de muestreo.

**Emisión instantánea (puff).** El tiempo de emisión es muy corto comparado con el tiempo de transporte de la nube o el tiempo de muestreo.

**Emisividad.** La razón de la energía radiante emitida por una superficie con aquella emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

**Equivalencia TNT.** Es la cantidad de Trinitrotolueno (TNT) que puede crear efectos observables similares a aquellos producidos por la explosión considerada.

**Estabilidad Atmosférica.** Es una medida del grado de la turbulencia atmosférica.

**Estimación de riesgo.** Es la combinación de consecuencias estimadas y la probabilidad de todos los resultados de los accidentes analizados para proporcionar una medida de riesgo.

**Evaluación de riesgo.** Es el proceso por el cual los resultados de un análisis de riesgo son usados para la toma de decisiones, ya sea por la jerarquización relativa de estrategias de reducción del riesgo o por la comparación con metas de riesgo.

**Explosión.** Emisión de energía que produce un cambio transiente en la densidad del gas, presión y velocidad del aire circundante al punto donde se produce la ignición.

**Explosión confinada.** La combustión rápida de un combustible y oxidante en un medio cerrado.

**Flash Fire.** Combustión no explosiva de una nube de vapor resultante de una liberación de material inflamable.

**Fireball.** Combustión de una nube formada por aire y combustible en la cual el núcleo de la nube consiste completamente de combustible, mientras que la capa exterior es una mezcla inflamable. Debido a la fuerza de flotación de los gases calientes, la nube crece y se expande tomando una forma esférica.

**Gas denso.** Gas cuya densidad excede a la del aire a temperatura ambiente.

**Indices de riesgo.** Es un número en particular o tabulaciones que representan la probabilidad de un riesgo.

**Isopleta.** Presentación gráfica de perfiles de iso-concentración de interés viento abajo del punto de emisión en una locación dada.

**Jet Fire.** Fuego que tiene origen cuando una liberación de material gas y/o líquido presurizado combustible encuentra una fuente de ignición.

**Limites de inflamabilidad.** Son las concentraciones mínima y máxima de un material combustible en una mezcla homogénea con un oxidante gaseoso para que se lleve a cabo la reacción de combustión.

**Lista de verificación.** Técnica cualitativa de Análisis de Riesgos, la cual utiliza una serie de preguntas escritas referidas a posibles fallas en el diseño de equipos y/o procedimientos operativos con el propósito de verificar el "status" del sistema a evaluar.

**Metas de riesgo.** Criterios de riesgo basados en objetivos establecidos como metas o guías para su ejecución.

**Método PROBIT.** Método que refleja la relación generalizada dependiente del tiempo para cualquier variable que tenga un resultado probabilístico que puede ser definido por una distribución normal.

**Modelos de dispersión.** Son modelos matemáticos y/o empíricos que determinan la concentración del material emitido tóxico y/o inflamable y/o explosivo en el medio que se dispersa y su comportamiento en función del tiempo.

**Modelos de efectos.** Modelos empíricos que predicen los efectos de un accidente que provocan daños al personal, medio ambiente y a las instalaciones.

**Modelo de efectos directos.** Modelo que predice los efectos en personas y/o estructuras basado en criterios predeterminados.

**Modelos de emisión.** Son modelos matemáticos que determinan la cantidad y fase del material tóxico y/o inflamable y/o explosivo liberado a la atmósfera

**Modelos de explosión.** Son modelos que determinan niveles de sobrepresión para una distancia de interés.

**Modelos de fuego.** Son modelos matemáticos y/o empíricos que determinan niveles de radiación térmica para una distancia de interés.

**Modelo Gaussiano.** Modelo de dispersión basado en el concepto de que la difusión atmosférica es un proceso de mezclado aleatorio condicionado por la turbulencia atmosférica.

**Onda explosiva (Blast Wave).** Onda de sobrepresión que se desplaza al frente de un punto de explosión.

**Presión máxima permisible de operación (MAOP).** La presión permisible de operación más alta en un punto de un sistema de tuberías durante un flujo normal o condición estática.

**Poder emisivo.** El poder radiante total emitido por unidad de área de la superficie de un fuego.

**Pool Fire.** Si se tiene un charco, parte del líquido comenzara a evaporarse y si el material es inflamable y encuentra una fuente de ignición, puede ocurrir un fuego de este tipo.

**PROBIT.** Variable aleatoria con una media de 5 y varianza de 1, usada en varios modelos de efectos.

**Rain out (precipitación).** Es el fenómeno que ocurre cuando un líquido sobrecalentado es liberado a la atmósfera y una fracción del mismo se evapora súbitamente mientras que la otra fracción permanece suspendida como aerosol. El líquido remanente así como porciones del aerosol pueden "precipitarse" al suelo.

**Resultado del accidente.** La manifestación física de un accidente.

**Riesgo.** Es la medida de pérdidas económicas o daños humanos en términos de la probabilidad de un accidente y la magnitud de la pérdida o daño.

**Riesgo individual.** Es el riesgo para una persona dentro de una zona de peligro.

**Riesgo social.** Es la medición del riesgo para un grupo de personas.

**Sobrepresión.** Una presión por encima de la atmosférica causada por una onda explosiva

**Tiempo de muestreo.** Intervalo de tiempo en el cual los datos de una concentración de una dispersión atmosférica examinada son promediados para obtener series de concentración en función del tiempo. El tiempo de muestreo es sinónimo de tiempo promedio.

**Tiempo promedio.** Intervalo de tiempo en el cual los datos de una concentración de una dispersión atmosférica examinada son promediados para obtener series de concentración en función del tiempo.

**Tiempo de transporte.** Tiempo que tarda la nube en alcanzar una locación de interés.

**Velocidad de combustión.** La velocidad de propagación de una flama ardiendo a través de una mezcla inflamable.

**Zonas de afectación.** Para un accidente que resulta en emisión tóxica es el área sobre la cual la concentración aerotransportada es igual a o excede cierto nivel de interés. Para una emisión inflamable es el área con un cierto nivel de radiación térmica de interés. Para el caso de explosión es el área con un cierto nivel de sobrepresión de interés.

## BIBLIOGRAFÍA.

1. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Center for Chemical Process Safety. AIChE, 1989.
2. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. Center for Chemical Process Safety. AIChE, 1992.
3. Hazard Evaluation: Consequence Analysis Methods. The Process Safety Institute (PSI-301).
4. Melo Gonzalez Rafael, López Sanchez Carlos, López Ledezma Jorge, Benavudes Hernández Lázaro, (2001). Análisis Cuantitativo de Riesgos. Identificación de peligros y estimación de consecuencias por onda expansiva, radiación térmica y toxicidad en plantas de proceso, Volumen I. Instituto Mexicano del Petróleo.
5. Perry, R. H. and Green, D. (eds.) (1984). Perry's Chemical Engineering Handbook, 6th edition. McGraw-Hill, New York.
6. Crowl, D. A. and Louvar, J. F. (1990). Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, ISBN 0-13-129701-5, Prentice Hall, Inc.
7. Fauske, H. K. (1985). "Flashing Flows or: Some Practical Guidelines for Emergency Releases". Plant/Operations Progress, Vol. 4 No. 3, July 1985, pp. 132-134.
8. Fauske, H. K. and Epstein, M. (1989). "Hazardous Vapor Clouds: Release Type, Aerosol Formation and Mitigation", Proceedings from the 6th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Oslo, Norway, June 19-22.
9. TNO (1979). Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Materials: Liquids and Gases ("The Yellow Book"), 2 volumes, in English, P.O. Box 432 7300AH Apeldoorn, The Netherlands.
10. Shaw, P. and Briscoe, F. (1978). Vaporization of Spills of Hazardous Liquids on Land and Water, SRD R 100, Safety and Reliability Directorate, United Kingdom Atomic Energy Authority, Wigshaw Lane, Culcheth Warrington, WA3 4NE, May.
11. Cremer and Warner (1982). Ltd., Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area, A Pilot Study: A Report to the Rijnmond Public Authority, ISBN 90-277-1393-6, D. Reidel Publishing Company, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, Holland, sold and distributed in the U.S.A. and Canada by Kluwer Boston, Inc., 190 Old Derby Street, Hingham, MA 02043.
12. Sutton, O. G. (1953). Micrometeorology. New York: Mc Graw-Hill Book Company.
13. Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models Second Edition. Center for Chemical Process Safety. AIChE. 1996.
14. Guidelines for use of Vapor Cloud Dispersion Models. Steven R. Hanna and Peter J. Drivas. Center for Chemical Process Safety. AIChE, 1987.
15. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVE's. Center for Chemical Process Safety. AIChE, 1994.
16. Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulezs, J. J., and Strehlow, R. A. (1983). Explosion Hazards and Evaluation. Elsevier, New York (ISBN 0-444-42094-0).



17. U.S. Army (1969). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Technical Manual TM5-1300. Departments of the Army, Navy and Air Force, Washington, D.C.
18. Brown, S. J. (1985). "Energy Release Protection for Pressurized Systems. Part I Review of Studies into Blast and Fragmentation". Applied Mechanics Reviews 38 (2, February), 177-201).
19. Brown, S. J. (1986). "Energy Release Protection for Pressurized Systems. Part II Review of Studies into Impact/Terminal Ballistics". Applied Mechanics Reviews 39 (12, December), 1625-1651).
20. Moore, C. V. (1967). "The Design of Barricades for Hazardous Pressure Systems". Nuc. Eng. Des. 5, 1550-1566.
21. Kinney, G. F. and Graham, K. J. (1985). Explosive Shocks in Air, 2<sup>nd</sup> edition. Springer-Verlag, New York.
22. Zebetakis, M. G. (1965). Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors. Bulletin 627, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C.
23. NFPA 68 (1988). Guide for Venting Deflagrations. National Fire Protection Association.
24. Lees F. P. (1991). Loss Prevention Process Vol. I y II. Ed. Butter Worths London.
25. Accident Prevention Manual for Industrial Operations (Chicago: National Safety Council, 1974)
26. Thomas, P. H. (1963). "The Size of Flames form Natural Fires". Ninth International Combustion Symposium, pp. 844-859.
27. American Gas Association (1974). "LNG Safety Research Program". Report IS 3-1, Columbus, OH.
28. Mudan, K. S. (1987). "Geometric View Factors for Thermal Radiation Hazard Assessment". Fire Safety Journal, Vol. 12, pp. 89-96.
29. API (1982). Guide for Pressure - Relieving and Depressuring Systems. API Recommended Practice 521, 2nd edition. American Petroleum Institute, Washington, D.C.
30. Cook, D. K. (1987). "Sizing and Radiactive Characteristics of Natural Gas Flares: Part 2 - Empirical Model". Chem. Eng. Res. Des. Vol. 65, July, pp. 318-325.
31. Melo Gonzalez Rafael, López Sanchez Carlos, Pérez Medina Eloisa, Lara Hernández Cristobal, (2001). Probabilidad de Eventos y Análisis de Frecuencia de Fallas en Plantas de Proceso, Volumen II. Instituto Mexicano del Petróleo.
32. Gifford, F. A. (1961). "Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion", Nuclear Safety, Vol. 2, N° 4.
33. Briggs, G.A., (1969). Plume Rise, AEC Critical Review Series, Report TID-24635. Pág 65.
34. Briggs, G.A., (1984). Plume Rise Buoyancy Effects, Atmospheric Science and Power Production, DOE/TIC-27601, 327-366., (pág.50)
35. Slade, D.H. (1968). Diffusion from Instantaneous Sources. Meteorology and Atomic Energy, TID-24190, USAEC, 163-175.
36. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineering and the National Fire Protection Association, ISBN 0-87765-353-4 (NFPA No. SFPE-88), 1988.
37. Lees, F. P. (1980). Loss Prevention in the Process Industries, 2 Volumes. Butterworths, London and Boston.

38. Helmers, E. N. and Schuller, L. C. (1982). "Calculated Process Risks and Hazards Management". *Plant Operations Progress*, V(3), 190.
39. Okrent, D. (1981). "The Assessment and Perception of Risk". *Proceedings of the Royal Society (London) Series A* 376, 133-49.
40. Marshall, V. C. (1987). *Major Chemical Hazards*. Hlsted Press, A division of John Wiley & Sons, Inc. New York.
41. IchemE (1985). *Risk Analysis in the Process Industries*. The Institution of Chemical Engineers, Rugby, Warks, England.
42. Considine, M. (1984). *The Assessment of Individual and Societal Risks*. SRD Report R-310, Safety and Reliability Directorate, UK Atomic Energy Authority, Warrington England.
43. API (1976). *Design and Installation of Pressure-Relieving Systems in Refineries: Part I - Design*. API Recommended Practice 520, 4th edition. American Petroleum Institute, Washington, D.C.
44. Carslow and Yaeger, (1959). *Conduction of Heat*. London, Oxford University Pres.
45. *Concentration Fluctuations and Averaging Time in Vapor Clouds*. Center for Chemical Process Safety. AIChE. 1995.
46. Craven, A. D. (1972). "Thermal Radiation Hazards from the Ignition of Emergency Vents". 4th Symposium on Chemical Process Hazards with Special Reference to Plant Design. IchemE Symp. Series No. 33. IchemE, Rugby, UK, p. 7.
47. Chan, S.T., P.M. Gresho, D.L. Ermak, (1981). A Three-Dimensional, Conservation Equation Model for Simulating LNG Vapor Dispersion in the Atmosphere. UCID-19210, Lawrence Livermore Lab., Livermore, CA. Pág 88, 108.
48. Fauske, H. K. and Epstein, M. (1987). "Source Term Considerations in Connection with Chemical Accidents and Vapor Cloud Modeling". *Proceedings of the international Conference on vapor Cloud Modeling*. Cambridge, MA, November 2-4, AIChE, New York, p. 251.
49. Fleischer, M. T. (1980). "SPILLS, an Evaporation/Air Dispersion Model for Chemical Spills on Land". *Westhollow Res. Center, Shell Develop. Center, Houston, TX*.
50. Germeles, A.E. and E.M. Drake, (1975). Gravity spreading and atmospheric dispersion of LNG vapor clouds. *Prcc., 4th Int'l. Symp. on Transport of Hazardous Cargoes by Sea and Inland Waterways*. Jacksonville, FL, 519-539. Pág 76
51. *Guidelines for Vapor Release Mitigation*. Center for Chemical Process Safety. AIChE. 1988.
52. Hanna, S. R., Briggs, S. A., and Hosker, R. P., Jr. (1982). *Handbook on Atmospheric Diffusion*. Technical Information Center, Oak Ridge, TN, U.S. Department of Energy.
53. Hanna, S.R., (1982). *Applications in Air Pollution Modeling*. *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling* (eds. F.T.M. Nieuwstadt and H. van Dop., D. Reidel, Dordrecht, 275-110. (pag-49, 90)
54. Hustad, J. and Sonju, O. K. (1985). "Radiation and Size Scaling of Large Gas and Gas-Oil Diffusion Flames". *10th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Berkeley, CA. American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 1986.
55. Jones, G. W. Inflammation limits ant their practical application in hazardous industrial operations, *Chem. Rev.*, vol. 22, pp 1-26.

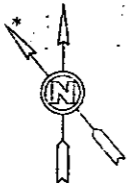
56. Leahey, D.M. and M.M. Schroeder, (1985). Predictions of maximum ground-level H<sub>2</sub>S concentrations resulting from two sour gas well blowouts. Western Research. Pág 50.
57. López Sánchez Carlos, (1999). Análisis Cuantitativo de Riesgos en Ingeniería de Procesos de Plantas industriales. Tesis de Maestría de Ciencias en Ingeniería Química. Centro de Graduados e Investigación del Instituto Tecnológico de Orizaba.
58. Melo Gonzalez Rafael, López Ledesma Jorge, Martínez Fernández Jorge, Rosales Torres Miguel Angel, (1998). "Source and Dispersion Simulation of Sour Gas in an Offshore Complex of the Sonda de Campeche". Firts International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation. Wessex Institute of Technology, Valencia, España.
59. Melo Gonzalez Rafael, López Ledesma Jorge. Taller de Análisis Cuantitativo de Riesgos. Identificación de peligros y estimación de consecuencias por onda expansiva, radiación térmica y toxicidad en plantas de proceso, Volumen I. Instituto Mexicano del Petróleo. Delegación Regional Zona Sur, Villahermosa, Tab. del 25 al 29 de Junio del 2001.
60. Mudan, K. S. (1984). Thermal Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires. Proc. Energy Combust. Sci.
61. NFPA 30 (1987a). Flammable and Combustible Liquids Code. National Fire Protection Association, Quincy, MA.
62. NFPA 58 (1987b). Standard for the Storage and Use of liquefied Petroleum Gases. National Fire Protection Association, Quincy, MA.
63. Paine, R.J., J.E. Pleim, D.W. Heinold and B.A. Egan, (1986). Physical processes in the release and dispersion of toxic air contaminants. Paper 86-76.3 at 79th Ann. Meeting of the Air Poll. Control Assoc., Minneapolis. Pág 101, 103.
64. Petersen, W.B. and L.G. Lavdas, (1986). INPUFF 2.0 – A Multiple Source Gaussian Puff Dispersion Algorithm. Users Guide, ASRL, USEPA, Research Triangle Park, NC. Pág. 92, 108.
65. Procedimientos de Trabajo:
  - PS-IN-IT-514-20-08 "ANALISIS DE CONSECUENCIAS"
  - PS-IN-IT-514-20-09 "MODELOS DE EMISIÓN"
  - PS-IN-IT-514-20-10 "MODELOS DE DISPERSIÓN"
  - PS-IN-IT-514-20-11 "MODELOS DE EFECTOS: RADIACIÓN TÉRMICA, ONDA EXPANSIVA Y TOXICIDAD"
  - PS-IN-IT-514-20-13 "MODELOS DE FUEGO"
  - PS-IN-IT-514-20-14 "MODELOS DE EXPLOSIÓN"
66. Roberts, A. F. (1982). Thermal radiation hazards from release of LPG fires from pressurized storage. Fire Safety J. 4:197-212.
67. Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases. Center for Chemical Process Safety. AIChE. 1995.
68. Wilson, D.J., (1979). The release and dispersion of gas from pipeline ruptures. Prepared for Alberta Environment. Pag 50, 52.

## **ANEXO A**

### **RELACIÓN DE DIAGRAMAS**

## RELACIÓN DE DIAGRAMAS

NUMERO DE PLANO	NOMBRE
00010	PLG Plano de Localización General de la Estación de Compresión Samaria II.
00011	DFP Diagrama de flujo de proceso área principal y unidad de vapores.
00011A	DFP Diagrama de flujo de proceso de área ampliación y reampliación.
00022	DTI Cabezales de llegada a las áreas principal, ampliación y reampliación.
00022B	DTI Sistema de separación general de área ampliación.
00023H	DTI Sistema de filtración, compresión, enfriamiento y separación de gas unidad 17, área ampliación.
00024A	DTI Sistema de cabezal de descarga de gas de alta presión de área de ampliación, reampliación y bombeo neumático.
00025C	DTI Sistema de cabezal de descarga de condensados de alta presión, área ampliación y reampliación.
00025D	DTI Sistema de cabezal de descarga de condensados de baja presión, área ampliación y reampliación.
00037B	DTI Sistema de desfogue de área ampliación.



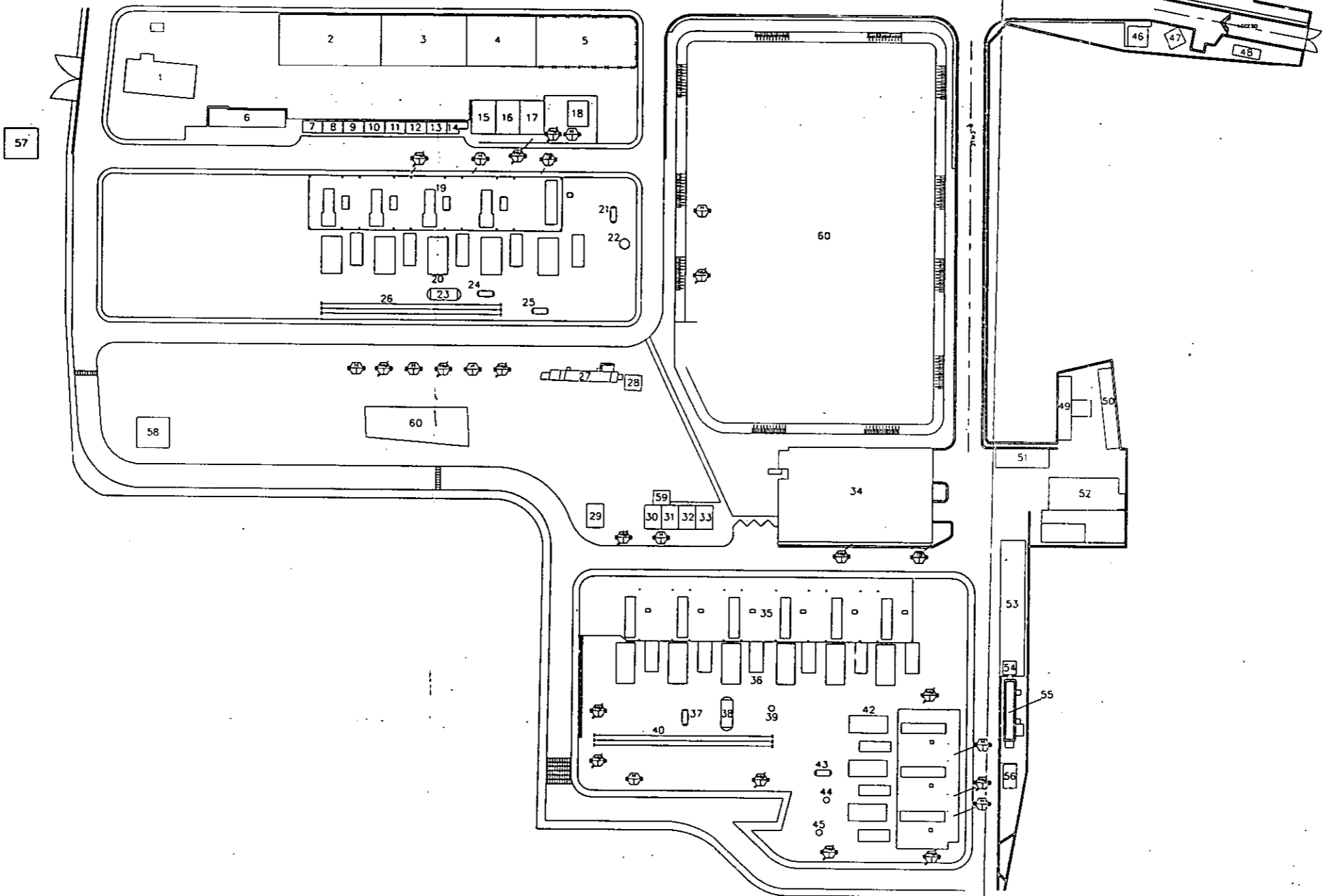
VENTOS REINANTES

**IDENTIFICACION**

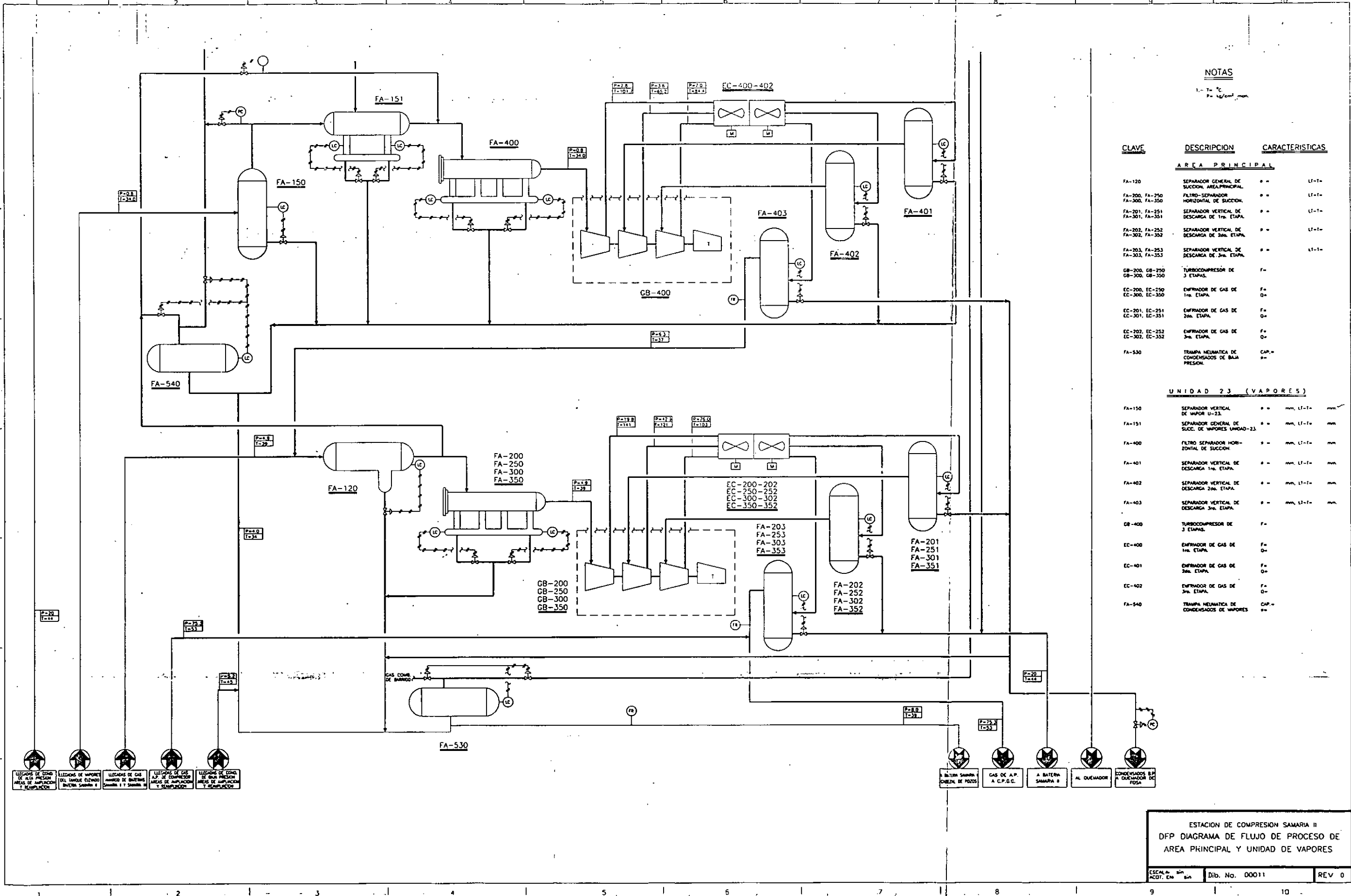
- 1.- SUBESTACION ELECTRICA
- 2.- MANTO A INSTRUMENTOS DE PRODUCCION 5 SITE. SECCION TANQUES Y TUBERIAS
- 3.- MANTO A INSTRUMENTOS DE PRODUCCION 5 SITE. SECCION ESTRUCTURAS Y EDIFICIOS
- 4.- FABRICA DE BLOCC-CONCRETO
- 5.- PATIO MATERIAL DE CONTRUCCION
- 6.- TALLER DE INSTRUMENTOS
- 7.- BAÑOS
- 8.- ALMACEN DE MANTENIMIENTO
- 9.- CUARTO DE CONTROL ELECTRICO
- 10.- CUARTO DE BATERIAS
- 11.- ALMACEN DE INSTRUMENTOS
- 12.- CASETA DE OPERADORES
- 13.- OFICINA DE OPERACION
- 14.- OFICINA DE MANTENIMIENTO
- 15.- ALMACEN
- 16.- ALMACEN DE INSTRUMENTOS
- 17.- VESTIDORES
- 18.- COMEDOR
- 19.- MAQUINAS TURBOCOMPRESORES, TANQUES DE BALANZE HIDRAULICO Y ENFRADORES DE ACEITE HIDRAULICO DE AREA PRINCIPAL UNIDADES 9, 10, 11, 12 Y 23
- 20.- FILTROS VERTICALES DE GAS COMBUSTIBLE, FILTROS SEPARADORES HORIZONTALES DE SUCCION, ENFRADORES DE GAS DE 1a, 2a Y 3ra ETAPA, ENFRADORES DE ACEITE LUBRICANTE Y SEPARADORES VERTICALES DE LA 1a, 2a Y 3ra ETAPA DE AREA PRINCIPAL UNIDADES 9, 10, 11, 12 Y 23
- 21.- TRAMPA NEUMATICA DE CONDENSADOS DE VAPORES FA-540
- 22.- SEPARADOR VERTICAL DE VAPORES FA-150
- 23.- SEPARADOR GENERAL DE SUCCION DE AREA PRINCIPAL FA-120
- 24.- TRAMPA NEUMATICA DE CONDENSADOS DE BAJA PRESION DE AREA PRINCIPAL FA-530
- 25.- SEPARADOR GENERAL DE SUCCION DE VAPORES FA-151
- 26.- Cabezal de Descarga
- 27.- PRESA API
- 28.- CARCANO DE AGUA RECUPERADA
- 29.- ALMACENAMIENTO DE TANQUES DE ACEITE LUBRICANTE
- 30.- BAÑOS
- 31.- BODEGA
- 32.- CUARTO DE BATERIAS
- 33.- CASETA DE OPERADORES
- 34.- TALLER DE REPARACION DE TURBOCOMPRESORES
- 35.- MAQUINAS TURBOCOMPRESORES, TANQUES DE BALANZE HIDRAULICO DE AREA AMPLIACION UNIDADES 14, 15, 16, 17, 18 Y 19
- 36.- FILTROS VERTICALES DE GAS COMBUSTIBLE, FILTROS SEPARADORES HORIZONTALES DE SUCCION, ENFRADORES DE GAS DE 1a, 2a Y 3ra ETAPA, ENFRADORES DE ACEITE LUBRICANTE Y SEPARADORES VERTICALES DE LA 1a, 2a Y 3ra ETAPA DE AREA AMPLIACION UNIDADES 14, 15, 16, 17, 18 Y 19
- 37.- TRAMPA NEUMATICA DE CONDENSADOS DE BAJA PRESION DE AREA AMPLIACION FA-530A
- 38.- SEPARADOR GENERAL DE SUCCION DE AREA AMPLIACION FA-100A
- 39.- SEPARADOR VERTICAL DE GAS COMB. AREA AMPLIACION FA-800A
- 40.- Cabezal de Descarga
- 41.- MAQUINAS TURBOCOMPRESORES, TANQUES DE BALANZE HIDRAULICO DE AREA REAMPLIACION UNIDADES 20, 21 Y 22
- 42.- FILTROS VERTICALES DE GAS COMBUSTIBLE, FILTROS SEPARADORES HORIZONTALES DE SUCCION, ENFRADORES DE GAS DE 1a, 2a Y 3ra ETAPA, ENFRADORES DE ACEITE LUBRICANTE Y SEPARADORES VERTICALES DE LA 1a, 2a Y 3ra ETAPA DE AREA REAMPLIACION UNIDADES 20, 21 Y 22
- 43.- SEPARADOR GENERAL DE SUCCION DE AREA REAMPLIACION FA-100B
- 44.- SEPARADOR VERTICAL DE GAS COMBUSTIBLE AREA REAMPLIACION FA-800B
- 45.- SEPARADOR VERTICAL DE BOMBA NEUMATICA FA-101
- 46.- CUARTO DE COMUNICACIONES
- 47.- ANTENA DE COMUNICACIONES
- 48.- CASETA DE CONTROL DE ACCESO
- 49.- ALMACEN DE REFACCIONES PARA TURBOCOMPRESOR
- 50.- BODEGA GENERAL
- 51.- ALMACEN DE REFACCIONES PARA TURBOCOMPRESORES
- 52.- OFICINAS DE MANTENIMIENTO
- 53.- COBERTIZO
- 54.- CARCANO DE AGUA RECUPERADA
- 55.- PRESA API
- 56.- CUARTO DE MATERIAS
- 57.- PAQUETE DE REPARACION DE GAS A QUEMADOR
- 58.- TRAMPAS DE DIABLOS
- 59.- SUBESTACION ELECTRICA
- 60.- LADINA

**SIMBOLOGIA**

- HIDRANTE DE 2 1/2" x 1 1/2"
- HIDRANTE MONITOR 2 1/2" x 1 1/2"
- TONA DE BOMBEROS DE 4" x 5"



PLANO DE LOCALIZACION GENERAL  
ESTACION DE COMPRESION SAMARA II



**NOTAS**

t = °C  
P = kg/cm<sup>2</sup> man.

**CLAVE DESCRIPCION CARACTERISTICAS**

AREA PRINCIPAL			
CLAVE	DESCRIPCION	UNIDAD	CARACTERISTICAS
FA-120	SEPARADOR GENERAL DE SUCCION AREA PRINCIPAL	φ =	LI-1+
FA-200, FA-250 FA-300, FA-350	FILTRO-SEPARADOR HORIZONTAL DE SUCCION	φ =	LI-1+
FA-201, FA-251 FA-301, FA-351	SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA DE 1ra. ETAPA	φ =	LI-1+
FA-202, FA-252 FA-302, FA-352	SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA DE 2da. ETAPA	φ =	LI-1+
FA-203, FA-253 FA-303, FA-353	SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA DE 3ra. ETAPA	φ =	LI-1+
GB-200, GB-250 GB-300, GB-350	TURBOCOMPRESOR DE 3 ETAPAS	F =	
EC-200, EC-250 EC-300, EC-350	ENFRIADOR DE GAS DE 1ra. ETAPA	F = D =	
EC-201, EC-251 EC-301, EC-351	ENFRIADOR DE GAS DE 2da. ETAPA	F = D =	
EC-202, EC-252 EC-302, EC-352	ENFRIADOR DE GAS DE 3ra. ETAPA	F = D =	
FA-530	TRAMPA NEUMATICA DE CONDENSADOS DE BAJA PRESION	CAP =	φ =

**UNIDAD 23 (VAPORES)**

FA-150	SEPARADOR VERTICAL DE VAPOR U-23	φ =	mm, LI-1+	mm
FA-151	SEPARADOR GENERAL DE SUCC. DE VAPORES UNIDAD-23	φ =	mm, LI-1+	mm
FA-400	FILTRO SEPARADOR HORIZONTAL DE SUCCION	φ =	mm, LI-1+	mm
FA-401	SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA 1ra. ETAPA	φ =	mm, LI-1+	mm
FA-402	SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA 2da. ETAPA	φ =	mm, LI-1+	mm
FA-403	SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA 3ra. ETAPA	φ =	mm, LI-1+	mm
GB-400	TURBOCOMPRESOR DE 3 ETAPAS	F =		
EC-400	ENFRIADOR DE GAS DE 1ra. ETAPA	F = D =		
EC-401	ENFRIADOR DE GAS DE 2da. ETAPA	F = D =		
EC-402	ENFRIADOR DE GAS DE 3ra. ETAPA	F = D =		
FA-540	TRAMPA NEUMATICA DE CONDENSADOS DE VAPORES	CAP =	φ =	

LLEGADA DE COMA DE ALTA PRESION AREA DE AMPLIACION Y SEPARACION  
 LLEGADA DE VAPOR DEL TANQUE ELIMINADO BATERIA SAMARIA II  
 LLEGADA DE GAS ANARDO DE BATERIAS SAMARIA I Y SAMARIA II  
 LLEGADA DE GAS A.P. DE COMPRESOR AREA DE AMPLIACION Y SEPARACION  
 LLEGADA DE COMA DE BAJA PRESION AREA DE AMPLIACION Y SEPARACION

A BATERIA SAMARIA OREJA DE POZOS  
 GAS DE A.P. A C.P.C.C.  
 A BATERIA SAMARIA II  
 AL QUEMADOR  
 CONDENSADOS B.P. A QUEMADOR DE FOSA

ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II  
 DFP DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE AREA PRINCIPAL Y UNIDAD DE VAPORES

EC-150A, 152A  
EC-200A, 202A  
EC-250A, 252A  
EC-300A, 302A  
EC-350A, 352A  
EC-400A, 402A

FA-151A, 201A, 251A  
301A, 351A, 401A

NOTAS  
t - t° c  
P = kg/cm<sup>2</sup> man

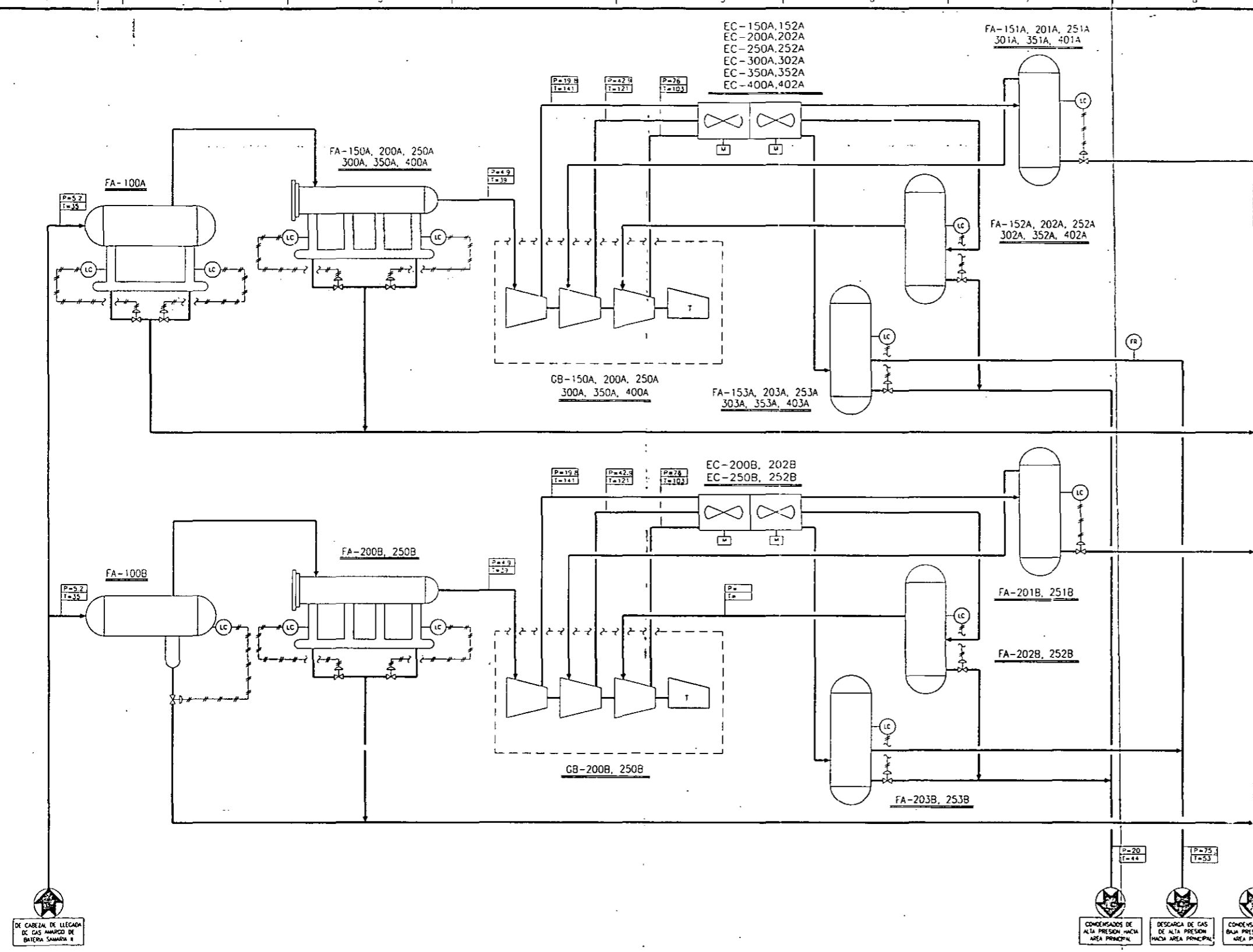
CLAVE DESCRIPCION CARACTERISTICAS

AREA DE AMPLIACION

FA-100A	SEPARADOR GENERAL DE SUCCION. AREA AMPLIACION	● =	LT-T+
FA-150A, FA-200A FA-250A, FA-300A FA-350A, FA-400A	FILTRO-SEPARADOR HORIZONTAL DE SUCCION.	● =	LT-T+
FA-151A, FA-201A FA-251A, FA-301A FA-351A, FA-401A	SEPARADOR VERTICAL DE 1ro. ETAPA.	● =	LT-T+
FA-152A, FA-202A FA-252A, FA-302A FA-352A, FA-402A	SEPARADOR VERTICAL DE 2do. ETAPA.	● =	LT-T+
FA-153A, FA-203A FA-253A, FA-303A FA-353A, FA-403A	SEPARADOR VERTICAL DE 3ro. ETAPA.	● =	LT-T+
GB-150A, GB-200A GB-250A, GB-300A GB-350A, GB-400A	TURBOCOMPRESOR DE 3 ETAPAS.	F =	
EC-150A, EC-200A EC-250A, EC-300A EC-350A, EC-400A	ENFRADOR DE GAS DE 1ro. ETAPA.	F = O =	
EC-151A, EC-201A EC-251A, EC-301A EC-351A, EC-401A	ENFRADOR DE GAS DE 2do. ETAPA.	F = O =	
EC-152A, EC-202A EC-252A, EC-302A EC-352A, EC-402A	ENFRADOR DE GAS DE 3ro. ETAPA.	F = O =	

AREA DE REAMPLIACION

FA-100B	SEPARADOR GENERAL DE SUCCION. AREA REAMPLIACION	● =	LT-T+
FA-200B, FA-250B	FILTRO-SEPARADOR HORIZONTAL DE SUCCION.	● =	LT-T+
FA-201B, FA-251B	SEPARADOR VERTICAL DE 1ro. ETAPA.	● =	LT-T+
FA-202B, FA-252B	SEPARADOR VERTICAL DE 2do. ETAPA.	● =	LT-T+
FA-203B, FA-253B	SEPARADOR VERTICAL DE 3ro. ETAPA.	● =	LT-T+
GB-200B, GB-250B	TURBOCOMPRESOR DE 3 ETAPAS.	F =	
EC-200B, EC-250B	ENFRADOR DE GAS DE 1ro. ETAPA.	F = O =	
EC-201B, EC-251B	ENFRADOR DE GAS DE 2do. ETAPA.	F = O =	
EC-202B, EC-252B	ENFRADOR DE GAS DE 3ro. ETAPA.	F = O =	



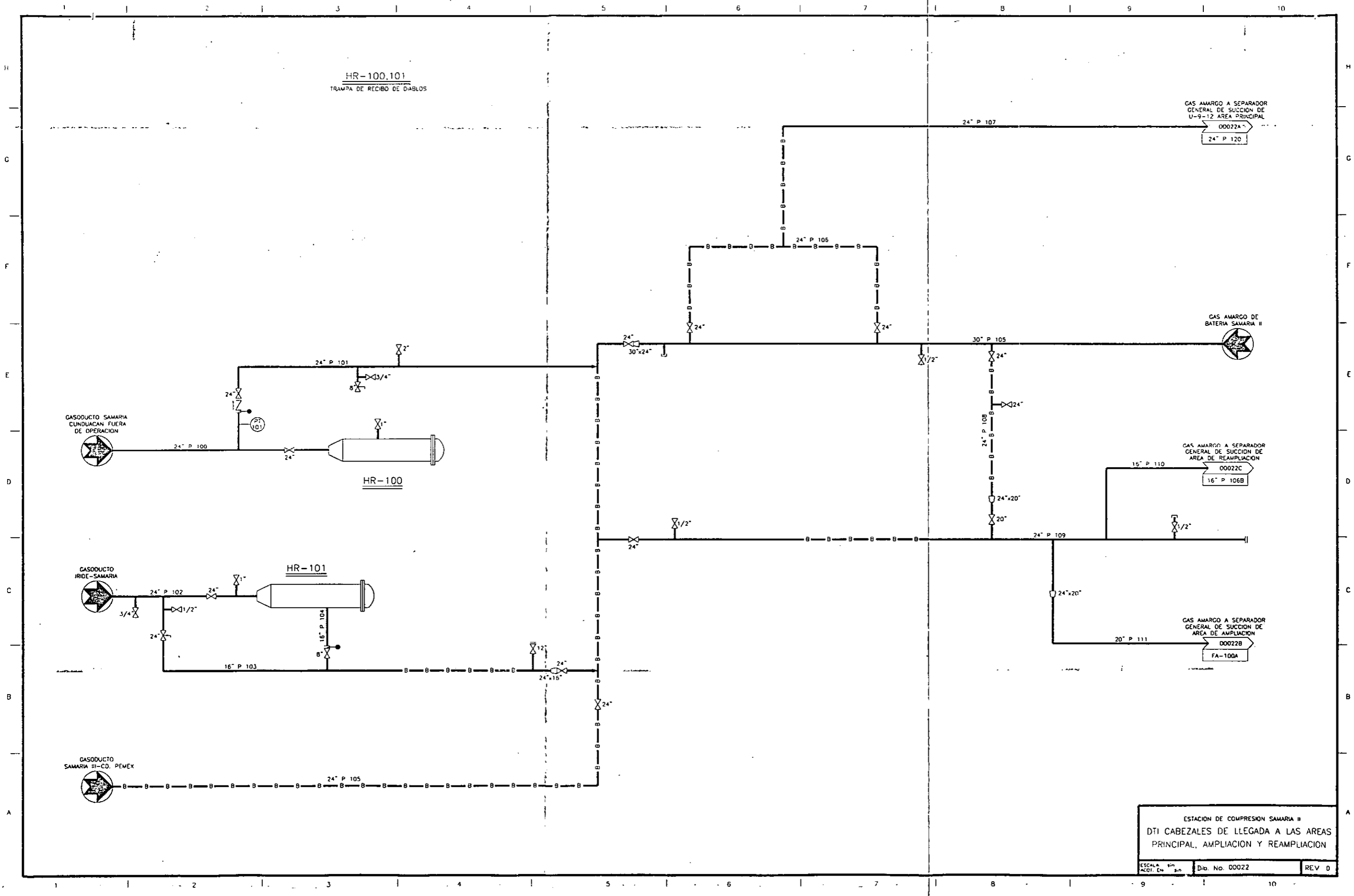
DE CABEZA DE LLEGADA DE GAS AMPLIO DE BATERIA SAMARIA II

CONDENSADOS DE ALTA PRESION HACIA AREA PRINCIPAL  
DESCARGA DE GAS DE ALTA PRESION HACIA AREA PRINCIPAL  
CONDENSADOS DE BAJA PRESION HACIA AREA PRINCIPAL

ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II  
DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE AREA AMPLIACION Y REAMPLIACION

ESCALA: 1/2" = 1' 0" (1:24)  
Dib. No. 00011A  
REV 0





HR-100,101  
TRAMPA DE RECIBO DE DIABLOS

GAS AMARGO A SEPARADOR  
GENERAL DE SUCCION DE  
U-9-12 AREA PRINCIPAL  
00022A  
24" P 120

GAS AMARGO DE  
BATERIA SAMARIA II

HR-100

GAS AMARGO A SEPARADOR  
GENERAL DE SUCCION DE  
AREA DE REAMPLIACION  
00022C  
16" P 106B

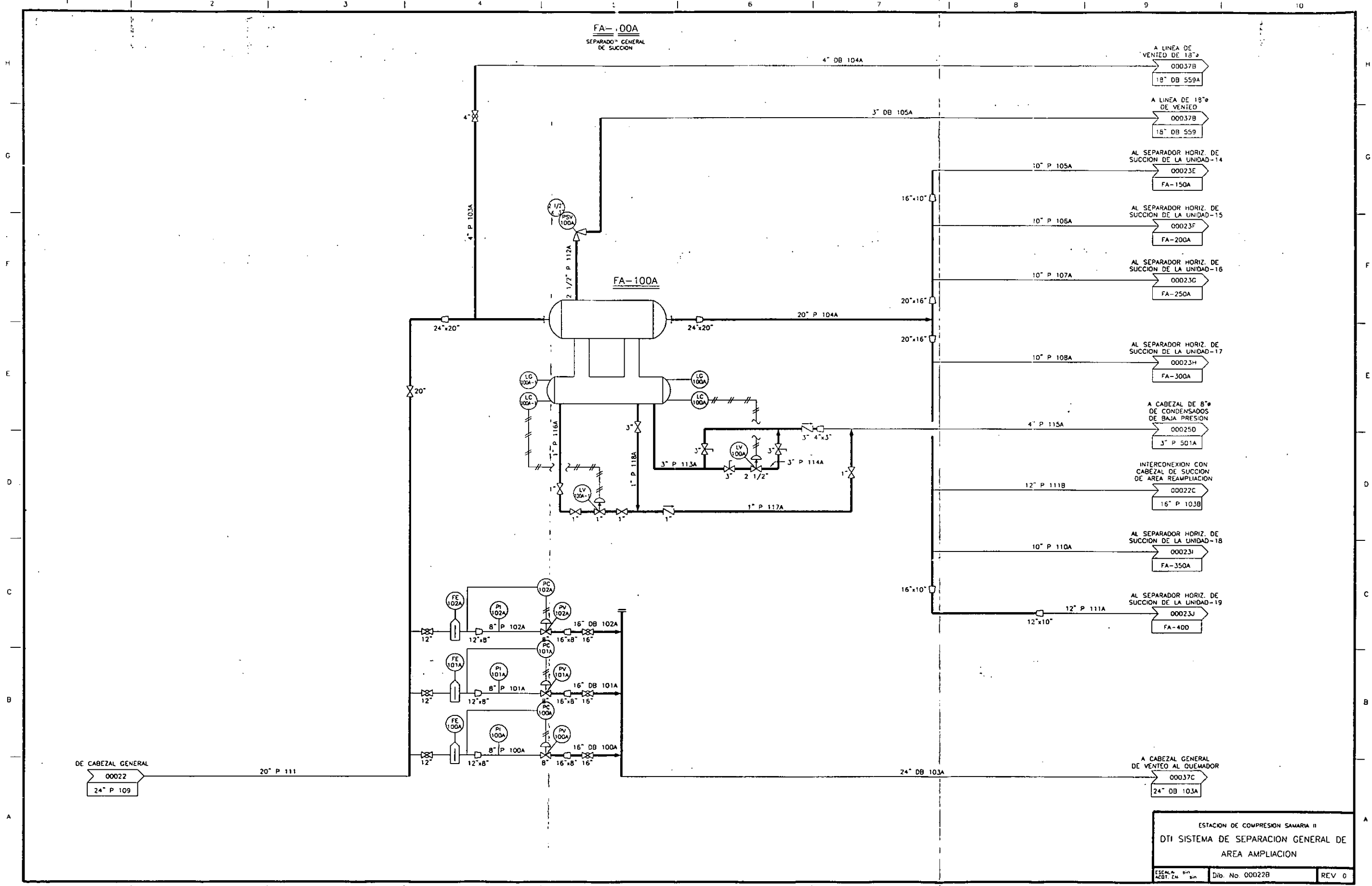
HR-101

GAS AMARGO A SEPARADOR  
GENERAL DE SUCCION DE  
AREA DE AMPLIACION  
00022B  
FA-100A

ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II  
DTI CABEZALES DE LLEGADA A LAS AREAS  
PRINCIPAL, AMPLIACION Y REAMPLIACION

ESCALA 1/4" = 1'-0" ACOT. EN 3/8" Dib. No. 00022 REV D

FA-00A  
SEPARADO GENERAL DE SUCCION



ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II  
DTI SISTEMA DE SEPARACION GENERAL DE AREA AMPLIACION

ESCALA: 1/4" = 1'-0"  
Dib. No. 00022B REV 0

**FA-300A**  
 FILTRO SEPARADOR  
 HORIZONTAL DE SUCCION

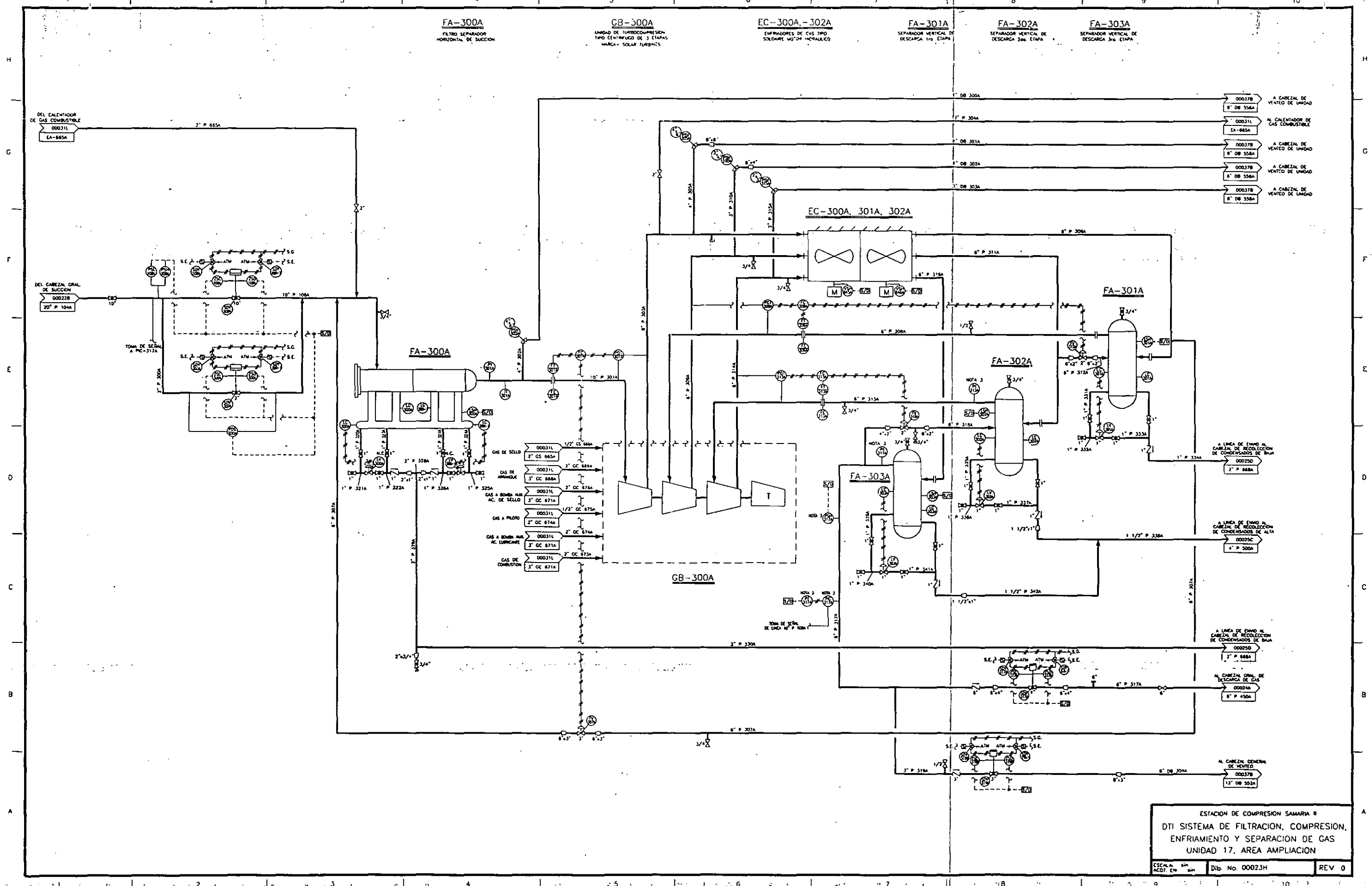
**GB-300A**  
 UNIDAD DE TURBOCOMPRESION  
 TIPO CENTRIFUGO DE 3 ETAPAS  
 MARCA: SOLAR TURBINES

**EC-300A, -302A**  
 ENFRIGADORES DE GAS TIPO  
 SOLIDARE MOTOR HORAZICO

**FA-301A**  
 SEPARADOR VERTICAL DE  
 DESCARGA 1ra ETAPA

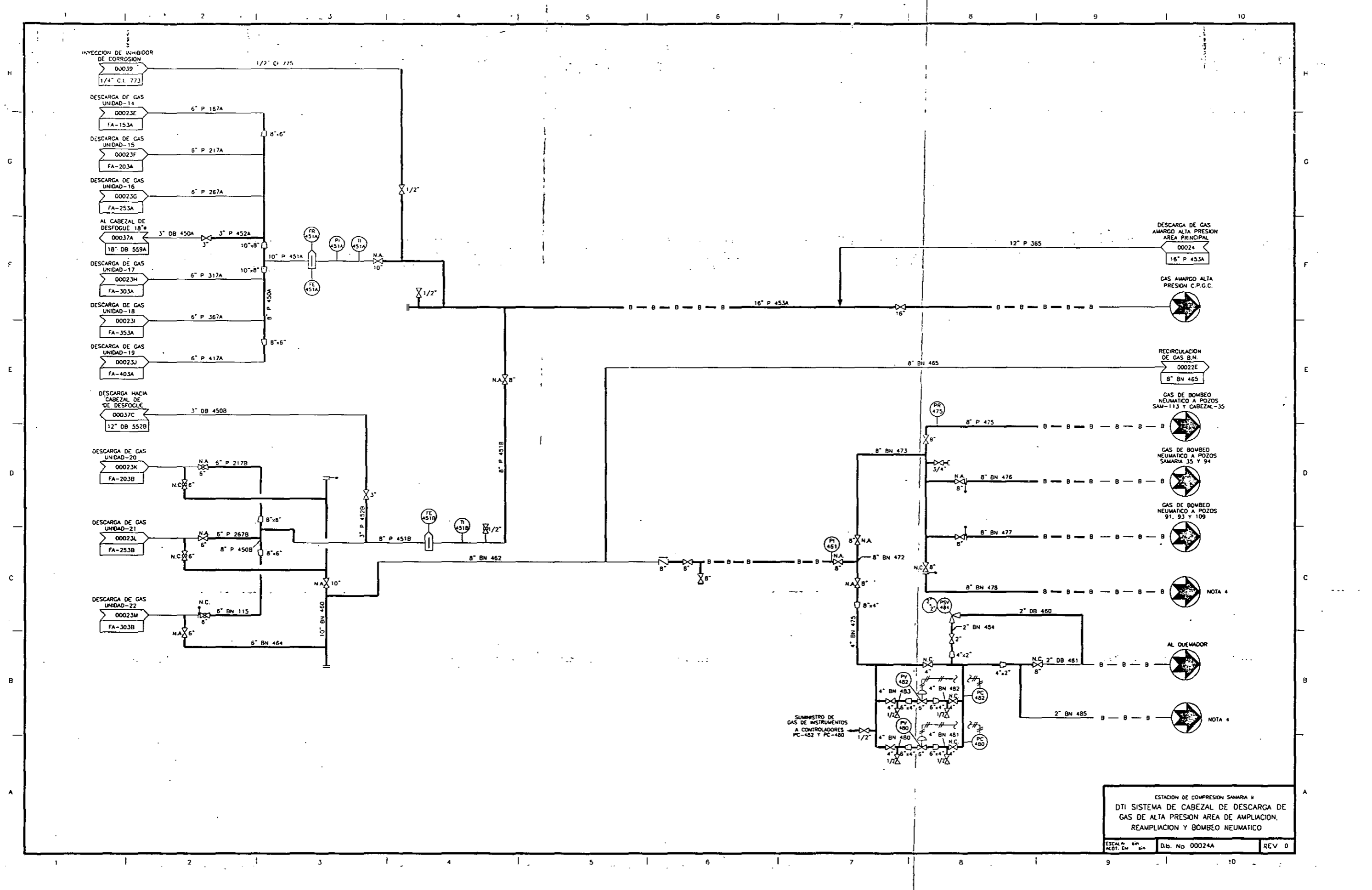
**FA-302A**  
 SEPARADOR VERTICAL DE  
 DESCARGA 2da ETAPA

**FA-303A**  
 SEPARADOR VERTICAL DE  
 DESCARGA 3ra ETAPA



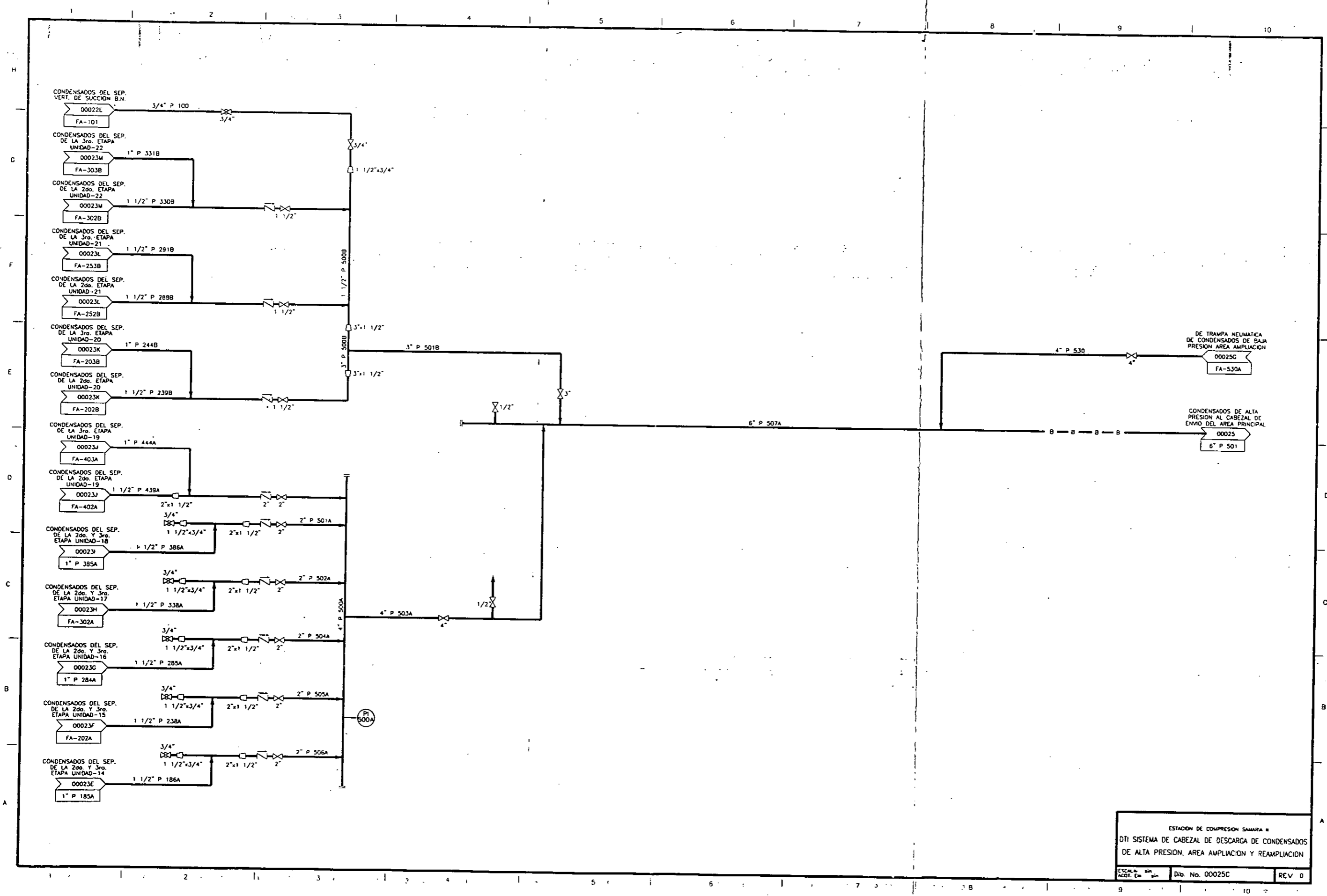
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II  
 DTI SISTEMA DE FILTRACION, COMPRESION,  
 ENFRIAMIENTO Y SEPARACION DE GAS  
 UNIDAD 17. AREA AMPLIACION

ESCALA: 1/2" = 1'-0"  
 ACOT. EN MM  
 DISEÑO No. 00023H  
 REV 0



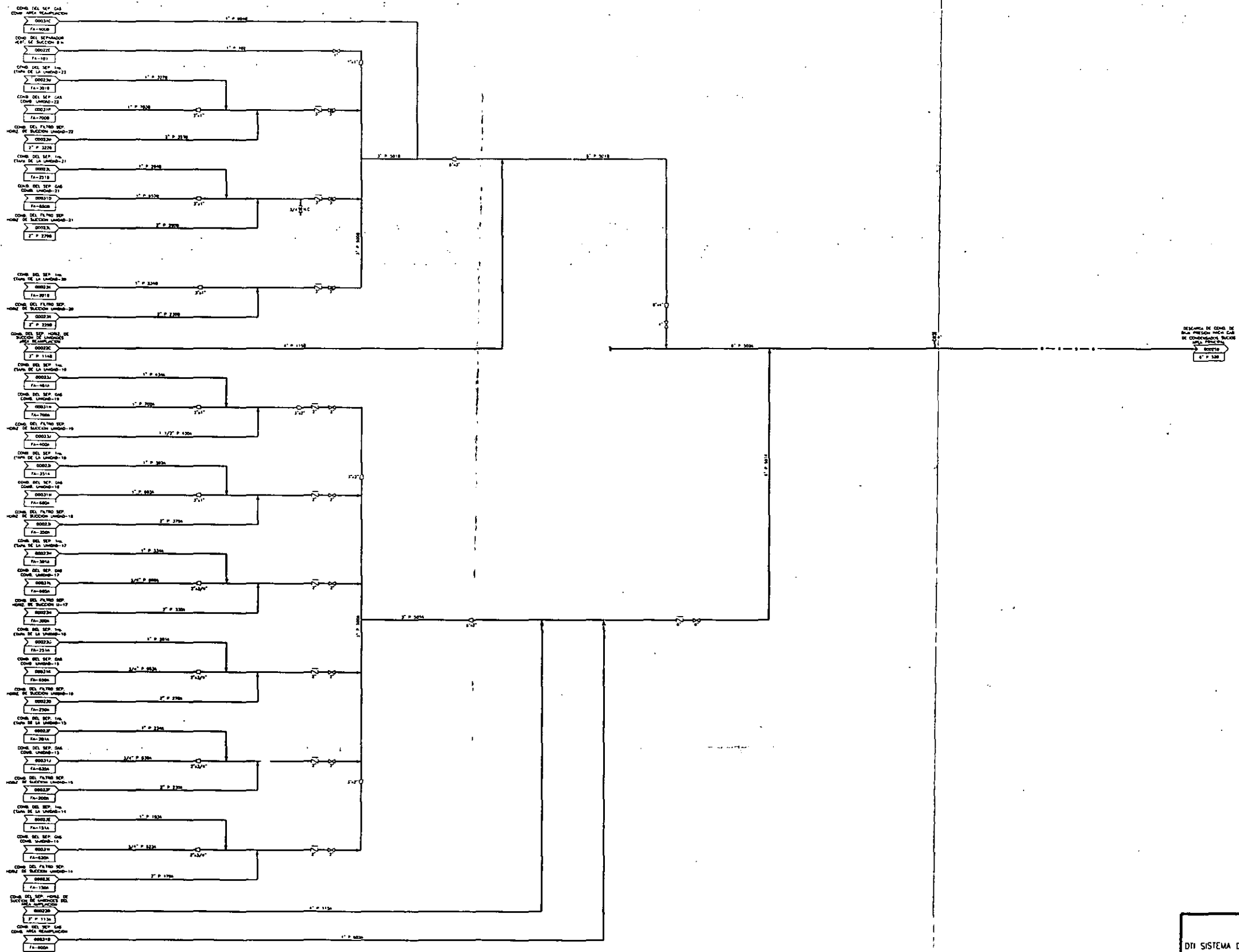
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II  
 DTI SISTEMA DE CABEZAL DE DESCARGA DE  
 GAS DE ALTA PRESION AREA DE AMPLIACION,  
 REAMPLACION Y BOMBEO NEUMATICO

ESCALA: 1/2" = 1' ACOT. Em. 2000  
 Dib. No. 00024A REV 0



ESTACION DE COMPRESION SAMARA II  
 DTI SISTEMA DE CABEZAL DE DESCARGA DE CONDENSADOS  
 DE ALTA PRESION, AREA AMPLIACION Y REAMPLIACION

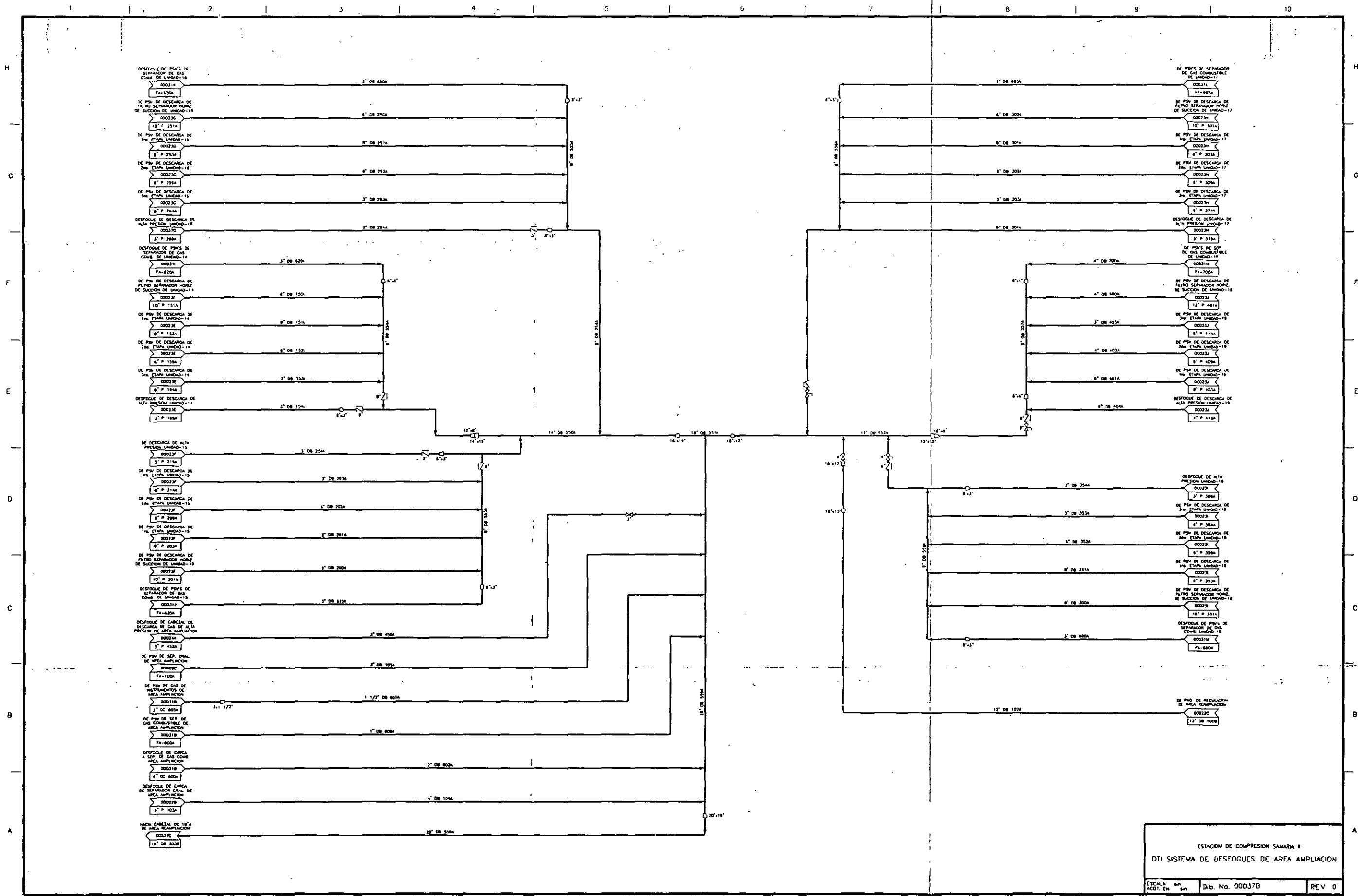
ETCALA: 1/2\"/>	Dib. No. 00025C	REV 0
-----------------	-----------------	-------



REPLAZA DE COND. DE BAJA PRESION Hacia GAS DE COMPRESORES UNIDAD 11-20

ESTACION DE COMPRESION SAMARA #  
 DTI SISTEMA DE CABEZAL DE DESCARGA DE CONDENSADOS DE BAJA PRESION. AREA AMPLIACION Y REEMPLAZACION

ESCALA: 50%  
 ACOT. EN INCHES  
 Dib. No. 000250  
 REV 0



ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II  
DTI SISTEMA DE DESFOGUES DE AREA AMPLIACION

ESCALA: 1:100	Dib. No. 00037B	REV 0
---------------	-----------------	-------

## **ANEXO B**

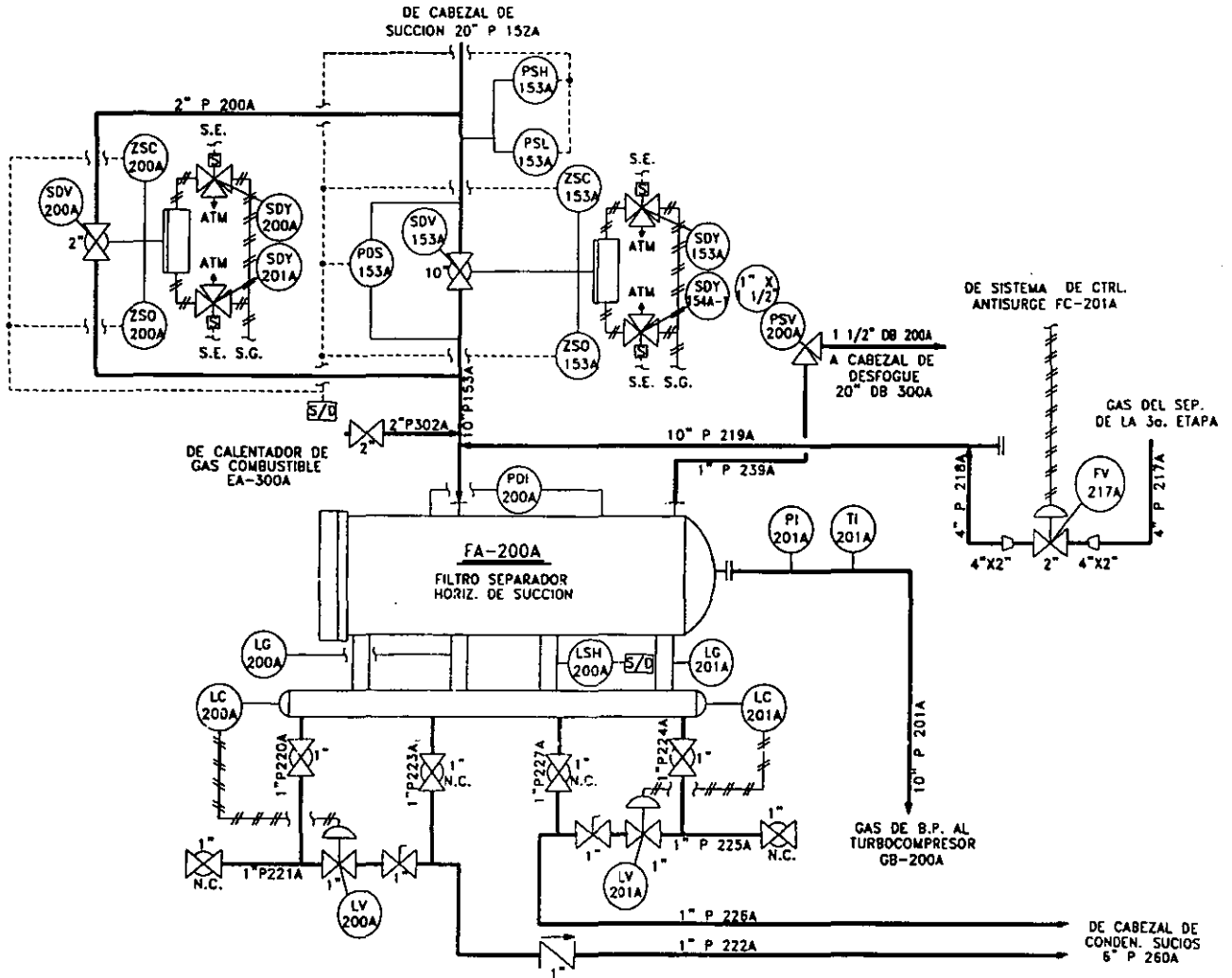
### **ANÁLISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP) DE LA UNIDAD 17 DEL ÁREA DE AMPLIACIÓN.**



# ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

**NODO 1** Filtro Separador Horizontal de Succión FA-300A.

**INTENCION DE DISEÑO:** Separar las partículas liquidas arrastradas con el Gas.



## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

<b>NODO 1</b>	Filtro Separador Horizontal de Succión FA-300A.
<b>INTENCIÓN DE DISEÑO:</b>	Separar las partículas líquidas arrastradas con el Gas.

DESVIACIÓN	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
<b>Baja Presión.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baja Presión en el Separador General de Succión FA-100A.</li> <li>2. Falla de las válvulas de corte SDV-108A y SDV-300A, y/o de sus accesorios (válvulas solenoides SDY-108A, 108A-1, 300A y 300A-1).</li> <li>3. Válvula de seguridad PSV-302A descalibrada.</li> <li>4. Fuga en equipo, líneas, válvulas de paso y/o venteo.</li> </ol>	Disparo de unidad de compresión por baja presión.	<p>Interruptor de baja presión PSL-108A.</p> <p>Transmisor de presión diferencial en la succión de la Primera Etapa PDT-301A.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ver baja presión en nodo 2 de la unidad 14.</li> <li>2. Mantenimiento a válvulas de corte SDV-108A y SDV-300A, y a sus accesorios (Válvulas solenoides SDY-108A, 108A-1, 300A y 300A-1, Interruptores de posición ZSC-108A, ZSO-108A, ZSC-300A y ZSO-300A).</li> <li>3. Mantenimiento a la válvula de seguridad PSV-302A.</li> <li>4. Análisis de espesores y mantenimiento preventivo a equipo, líneas y válvulas.</li> <li>5. Establecer el procedimiento operativo para el caso de baja presión.</li> <li>6. Mantenimiento al interruptor de baja presión PSL-108A.</li> </ol>
<b>Alta Presión.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta Presión en el Separador General de Succión FA-100A.</li> <li>2. Falla en válvula de control antisurge FV-307A, controlador de flujo FC-301A y transmisor de flujo FT-301A (ver fig. en nodo 2).</li> <li>3. Obstrucción del flujo debido a los internos.</li> </ol>	<p>Ruptura en separador y/o líneas.</p> <p>Fuga de gas en líneas, sellos de válvulas, empaques de bridas, conexiones de instrumentos y puntos de soldadura.</p>	<p>Interruptor por alta presión PSH-108A.</p> <p>Válvula de seguridad PSV-302A.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ver alta presión en el nodo 2 de unidad 14.</li> <li>2. Mantenimiento a la válvula de control de flujo FV-307A, controlador de flujo FC-301A y transmisor de flujo FT-301A.</li> <li>3. Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> <li>4. Mantenimiento al interruptor por alta presión PSH-108A y dar mantenimiento a válvula de corte SDV-108A.</li> <li>5. Mantenimiento a válvula de seguridad PSV-302A.</li> <li>6. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores a equipo y líneas.</li> <li>7. Automatizar el separador para monitorear alta presión por medio de un Sistema Digital de Control.</li> </ol>
<b>Alto Nivel.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Falla de los lazos de control de nivel (Controladores LC-300A, LC-300A-1, Válvulas de control LV-300A y LV-300A-1).</li> <li>2. Represionamiento del cabezal de descarga de condensados hacia la trampa neumática 6" P 502A.</li> </ol>	Arrastre de líquidos con daño al compresor.	Interruptor por alto nivel LSH-300A.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento a lazos de control de nivel (Controladores LC-300A y LC-300A-1, Válvulas de control LV-300A y LV-300A-1), vidrios de nivel LG-300A, LG-300<sup>o</sup>-1.</li> <li>2. Establecer los procedimientos operativos para el caso de alto nivel.</li> <li>3. Mantenimiento al interruptor de alto nivel LSH-300A.</li> </ol>

## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

DESVIACIÓN	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
Bajo Nivel.	1. Falla de los lazos de control de nivel (Controladores LC-300A, LC-300A-1, Válvulas de control LV-300A y LV-300A-1).	Represionamiento en línea de descarga de condensados 6" P 502A, debido al arrastre de gas.	Sin protecciones.	<p>4. Mantenimiento a alarmas en tablero de control de la unidad de compresión.</p> <p>5. Automatizar el proceso para monitorear nivel por medio de un Sistema Digital de Control.</p> <p>1. Mantenimiento a lazos de control de nivel (Controladores LC-300A y LC-300A-1, Válvulas de control LV-300A y LV-300A-1), vidrios de nivel LG-300A, LG-300A-1.</p> <p>2. Instalar alarma por bajo nivel.</p> <p>3. Automatizar el proceso para monitorear nivel por medio del Sistema Digital de Control.</p>
Alta Temperatura.	1. Mayor flujo de gas proveniente del calentador EA-665A.	Mayor temperaturas de operación en el compresor de la Primera Etapa.	Sin protecciones.	<p>1. Instalar un controlador de temperatura para gas combustible en el calentador EA-665A.</p> <p>2. Automatizar el proceso para monitorear temperatura de succión por medio de un Sistema Digital de Control.</p>
Fuga de Gas.	<p>1. Corrosión en conexiones del separador y/o líneas de gas.</p> <p>2. Falla en empaques de bridas y sellos de válvulas.</p>	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	Sin protecciones.	<p>1. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores del separador y de líneas.</p> <p>2. Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</p>
Fuga de Líquidos.	<p>1. Corrosión en conexiones del separador y/o líneas de condensados.</p> <p>2. Falla en empaques de bridas y sellos de válvulas.</p>	Formación de charco inflamable y tóxico.	Sin protecciones.	<p>1. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores del separador y de líneas.</p> <p>2. Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</p>

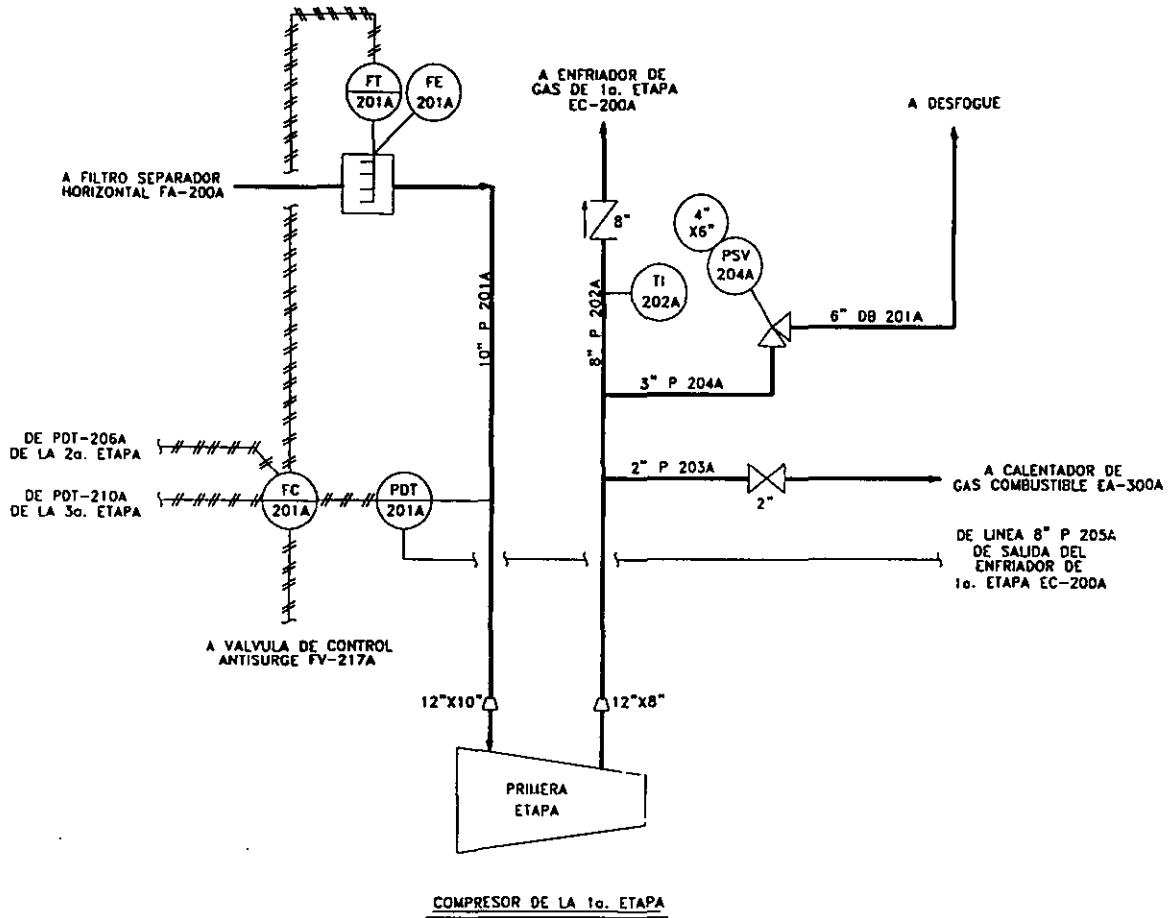
# ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

**NODO 2**

Compresor de Primera Etapa del Turbocompresor GB-300A.

**INTENCION DE DISEÑO:**

Comprimir el Gas Amargo en una Primera Etapa.



## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

<b>NODO 2</b>	Compresor de Primera Etapa del Turbocompresor GB-300A.
<b>INTENCION DE DISEÑO:</b>	Comprimir el Gas Amargo en una Primera Etapa.

DESVIACION	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
<b>Bajo Flujo en la Succión.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Bajo flujo desde el filtro separador horizontal de succión FA-300A.</li> </ol>	<p>Surge y daños mecánicos a los cojinetes, rotor del compresor, incrementador y el accionador.</p> <p>Alta temperatura a la descarga de la Primera Etapa.</p>	<p>Sistema de Control Antisurge.</p> <p>Interruptor por alta temperatura a la descarga S366-1.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Mantenimiento y automatización del sistema de control antisurge.</li> </ol>
<b>Baja Presión en la succión.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Válvula de seguridad PSV-302A descalibrada.</li> <li>Ruptura en la línea de succión.</li> <li>Baja presión desde el Filtro Separador Horizontal de Succión FA-300A.</li> </ol>	<p>Baja presión a la descarga y/o surge del compresor.</p>	<p>Interruptor de baja presión a la succión del compresor S-363-1.</p> <p>Transmisor de presión diferencial PDT-301A.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Mantenimiento a válvula de seguridad PSV-302A.</li> <li>Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> <li>Mantenimiento preventivo y análisis de espesores de línea de succión.</li> <li>Mantenimiento a interruptor por baja presión S363-1.</li> <li>Mantenimiento al transmisor de presión diferencial PDT-301A en la succión del compresor.</li> </ol>
<b>Alta Presión de Succión.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Alta presión desde el filtro separador de succión FA-300A.</li> <li>Mal funcionamiento del compresor o de la turbina.</li> </ol>	<p>Ruptura de línea de succión.</p> <p>Fuga en empaques de bridas y en conexiones de instrumentos a proceso.</p> <p>Alta presión de descarga de la Primera Etapa.</p>	<p>Válvula de seguridad PSV-302A.</p> <p>Transmisor de presión diferencial PDT-301A con envío de señal a sistema antisurge.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Ver alta presión en nodo 1 de la unidad 16.</li> <li>Mantenimiento preventivo a compresor y turbina.</li> <li>Establecer procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> <li>Instalar interruptor por alta presión en la succión del compresor.</li> <li>Mantenimiento preventivo y análisis de espesores de la línea de succión.</li> <li>Mantenimiento a conexiones de instrumentación.</li> </ol>
<b>Baja Presión a la Descarga.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Baja velocidad en la turbina.</li> <li>Baja presión de succión.</li> <li>Ruptura en tubería de descarga.</li> <li>Descalibración de la válvula de seguridad PSV-302A.</li> </ol>	<p>Baja presión en la succión de la segunda etapa.</p>	<p>Interruptor por baja presión en la succión de la segunda etapa S363-2.</p> <p>Transmisor de presión diferencial PDT-301A con envío de señal a sistema antisurge.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Mantenimiento al sistema de control de velocidad del turbocompresor.</li> <li>Ver acciones requeridas por baja presión de succión en este nodo.</li> <li>Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> <li>Mantenimiento preventivo y calibración a la válvula de seguridad PSV-302A.</li> <li>Mantenimiento al interruptor por baja presión y al transmisor de presión diferencial PDT-301A.</li> </ol>

## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

DESVIACION	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
<b>Alta presión a la Descarga.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sobrevelocidad en la turbina.</li> <li>2. Represionamiento corriente abajo.</li> <li>3. Alta presión en la succión de la primera etapa.</li> </ol>	<p>Ruptura de línea de descarga.</p> <p>Fuga en empaques de bridas y en conexiones de instrumentos a proceso.</p> <p>Alta temperatura a la descarga de la primera etapa.</p> <p>Alta presión al enfriador EC-300A.</p>	<p>Válvula de seguridad PSV-305A.</p> <p>Transmisor de presión diferencial PDT-301A de la primera etapa con envío de señal a sistema antisurge.</p> <p>Interruptor por alta presión S364-1 instalado a la descarga de la primera etapa.</p> <p>Interruptor por alta temperatura S366-1 en la descarga de la primera etapa.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores de línea de descarga.</li> <li>1. Mantenimiento al sistema de control de velocidad del turbocompresor Z-153 y a interruptor por sobrevelocidad Z-353.</li> <li>2. Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> <li>3. Mantenimiento a la válvula de seguridad PSV-305A y al transmisor de presión diferencial PDT-301*.</li> <li>4. Mantenimiento a interruptor por alta presión S364-1 e interruptor por alta temperatura S366-1 en la descarga de la Primera Etapa.</li> <li>5. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores en línea de descarga.</li> <li>6. Mantenimiento a conexiones de instrumentos</li> </ol>
<b>Fuga de Gas en el Interior del Contenedor de Compresores.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corrosión interna en conexiones de succión y/o descarga.</li> <li>2. Falla en líneas de gas combustible, empaques de bridas y conexiones de los instrumentos a proceso.</li> <li>3. Fuga en sistema de gas de sello.</li> </ol>	<p>Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.</p> <p>Incendio o explosión al contacto del gas con una fuente de ignición.</p>	<p>Interruptor por alta concentración de gas.</p> <p>Sistema de detección de fuego UV/IR.</p> <p>Sistema de supresión a base de CO<sub>2</sub>.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores en las conexiones de succión y descarga.</li> <li>2. Mantenimiento a líneas de gas combustible, gas de sellos y conexiones de instrumentación.</li> <li>3. Mantenimiento al sistema de disparo por alta concentración de gas.</li> <li>4. Mantenimiento a detectores de fuego UV/IR.</li> <li>5. Mantenimiento al sistema de supresión a base de CO<sub>2</sub>.</li> <li>6. Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> <li>7. Mantenimiento al sistema de agua contra incendio.</li> <li>8. Mantenimiento a extintores portátiles de CO<sub>2</sub>.</li> </ol>
<b>Fuga de Gas en el Exterior del Contenedor de Compresores.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corrosión en conexiones y puntos de soldadura de líneas de succión y/o descarga.</li> <li>2. Falla en empaques de bridas y conexiones de instrumentos.</li> </ol>	<p>Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.</p>	<p>Sin protecciones.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento preventivo y análisis de los espesores de las líneas de succión y/o descarga.</li> <li>2. Mantenimiento a conexiones de instrumentos.</li> <li>3. Establecer los procedimientos operacionales de emergencia.</li> </ol>

## ANÁLISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

DESVIACION	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
Vibración en el turbocompresor	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alineación inadecuada.</li> <li>2. Holgura en cojinetes.</li> <li>3. Surge del compresor.</li> </ol>	<p>Daños al rotor debido a esfuerzos excesivos en los cojinetes.</p> <p>Fuga en empaques de bridas y conexiones de gas combustible.</p> <p>Fatiga de materiales de soportería.</p>	Monitor e interruptor por alta vibración Z-284.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aplicar el manual de procedimientos del fabricante para alineación de compresores.</li> <li>2. Mantenimiento del sistema de monitoreo de vibración.</li> <li>3. Reemplazo de cojinetes dañados.</li> <li>4. Mantenimiento y automatización del sistema de control antisurge.</li> </ol>
Sobrevelocidad en la turbina.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Falla de la válvula de estrangulamiento del sistema de gas combustible.</li> <li>2. Falla en el controlador – actuador de combustible principal (Z144).</li> <li>3. Falla en el regulador de amperaje (Z154).</li> <li>4. Falla en la válvula solenoide del actuador principal de combustible (L344).</li> <li>5. Reducción de carga a la turbina.</li> </ol>	<p>Daños mecánicos a la turbina por velocidad excesiva del rotor.</p> <p>Alta presión de descarga del compresor.</p> <p>Sobrecalentamiento en partes internas de la turbina.</p>	<p>Interruptores por sobrevelocidad Z153 y Z353.</p> <p>Interruptor por alta temperatura en turbina Z182.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento al sistema de control de velocidad y suministro de gas combustible.</li> <li>2. Mantenimiento a interruptores por sobrevelocidad Z153 y Z353.</li> <li>3. Mantenimiento a interruptor por alta temperatura Z182.</li> </ol>
Alta temperatura de gases a la entrada de la turbina.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alabes guías desajustados y/o falla en el controlador de álabes.</li> <li>2. Sobrevelocidad en turbina por falla en el sistema de control de gas combustible.</li> <li>3. Insuficiente aire de enfriamiento por obstrucción en el filtro de aire.</li> </ol>	Daños mecánicos a la turbina por altas temperaturas del metal.	Sistema de control y disparo por alta temperatura (Z182).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento a la turbina y al controlador de álabes.</li> <li>2. Mantenimiento al sistema de control de gas combustible.</li> <li>3. Mantenimiento y/o cambio de filtros de aire.</li> <li>4. Mantenimiento al sistema de control de temperatura Z182.</li> </ol>
Alta Presión Diferencial en el filtro de aire.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ensuciamiento de filtros de aire.</li> </ol>	Alta temperatura de gases a la entrada de la turbina.	<p>Alarma y disparo por alta presión diferencial en filtro de aire.</p> <p>Control de temperatura Z182.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento preventivo y/o cambio de filtros de aire.</li> <li>2. Mantenimiento al control de temperatura Z182, al disparo y alarma por alta presión diferencial.</li> </ol>
Alta Temperatura del incrementador.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Deficiencia del sistema de lubricación.</li> <li>2. Rodamientos en mal estado.</li> </ol>	Daños mecánicos en el incrementador por degradación del aceite lubricante.	Interruptor por alta temperatura de aceite lubricante en el incrementador.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento al sistema de lubricación y al interruptor por alta temperatura (sin identificación).</li> <li>2. Mantenimiento a partes mecánicas del incrementador.</li> </ol>

## ANÁLISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

DESVIACION	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
<b>Baja Presión de Gas Combustible</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Baja presión en el Filtro Separador Vertical de Gas Combustible a la turbina FA-665A.</li> <li>Falla en alguna de las válvulas solenoide L-341-1, L-341-2 y L-342.</li> <li>Filtro de gas combustible sucio.</li> <li>Fuga o ruptura en líneas de suministro de gas combustible de la unidad de compresión.</li> </ol>	<p>Pérdida de potencia en la turbina.</p> <p>Baja presión de descarga en etapas de compresión.</p> <p>Surge en la turbina.</p>	<p>Interruptor por baja presión S386-1.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Ver baja presión en nodo 14 de la unidad 17.</li> <li>Mantenimiento a válvulas solenoides L341-1, L341-2 y L342.</li> <li>Mantenimiento al filtro de gas combustible.</li> <li>Mantenimiento a líneas y conexiones de suministro de gas combustible.</li> <li>Mantenimiento al interruptor de baja presión S386-1.</li> </ol>
<b>Baja Presión en el Sistema de Aceite Lubricante</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Fuga o ruptura de línea de aceite dentro de la unidad de compresión.</li> <li>Filtro de aceite lubricante sucio.</li> <li>Mal funcionamiento del regulador de aceite.</li> <li>Válvulas de relevo descalibradas.</li> <li>Fallas en la bomba principal de lubricación.</li> </ol>	<p>Daños a los cojinetes de los compresores, al incrementador de velocidad y a la turbina de gas.</p> <p>Posibles daños a los rotores del turbocompresor.</p>	<p>Interruptor por baja presión S-380.</p> <p>Interruptor por alta presión diferencial en el filtro S-397.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Mantenimiento a líneas de aceite.</li> <li>Mantenimiento al filtro y al indicador de presión diferencial.</li> <li>Mantenimiento y calibración al regulador de aceite.</li> <li>Mantenimiento y calibración a válvulas de relevo.</li> <li>Mantenimiento a la bomba principal de lubricación.</li> <li>Mantenimiento a los interruptores por baja presión S-380 e interruptor por alta presión diferencial S-397.</li> </ol>
<b>Bajo Nivel de Aceite Lubricante.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Fuga en sistema de aceite lubricante o sistema de aceite de sellos.</li> <li>Fuga en las uniones por mangueras en mal estado.</li> <li>Fuga de aceite en válvulas y accesorios.</li> </ol>	<p>Daños a los cojinetes de los compresores, al incrementador de velocidad y a la turbina de gas.</p> <p>Cavitación de la bomba principal de aceite lubricante.</p> <p>Sobrecalentamiento en la bomba principal de aceite.</p>	<p>Interruptores para disparo y alarma por bajo nivel S388 y S388-1 respectivamente.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Mantenimiento a líneas de aceite lubricante y de sello, así como a los interruptores por bajo nivel S388 y S388-1.</li> <li>Mantenimiento a conexiones del sistema de aceite lubricante.</li> <li>Mantenimiento a válvulas y accesorios.</li> </ol>
<b>Fuga de Aceite Lubricante.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Ruptura de línea de aceite lubricante.</li> <li>Fuga en las uniones por mangueras en mal estado.</li> <li>Fuga de aceite en válvulas y accesorios.</li> </ol>	<p>Formación de charco inflamable y tóxico.</p>	<p>Sin protecciones.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Mantenimiento a líneas de aceite lubricante.</li> <li>Mantenimiento a conexiones de instrumentación.</li> <li>Establecer procedimientos operacionales de emergencia.</li> </ol>
<b>Baja Presión Diferencial de aceite de sello.</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Falla en la bomba de aceite de sello.</li> <li>Obstrucción del filtro.</li> <li>Válvula de seguridad PSV descalibrada.</li> <li>Falla en válvula reguladora de flujo.</li> <li>Falla en regulador de presión diferencial.</li> </ol>	<p>Fuga de gas amargo al contenedor con posibilidad de fuego.</p>	<p>Interruptor por baja presión diferencial PDSL-S365 y alarma por baja presión diferencial PDAL.</p> <p>Bomba auxiliar.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Mantenimiento a bomba y filtro del sistema de aceite de sello.</li> <li>Mantenimiento a Válvula de seguridad, válvula reguladora de flujo y regulador de presión diferencial de aceite de sello.</li> <li>Mantenimiento a líneas y conexiones del sistema de aceite de sello.</li> <li>Reemplazo de manguera flexitall.</li> </ol>



## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

DESVIACION	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
Alta Presión Diferencial de aceite de sello.	6. Fuga en conexiones del sistema de aceite de sello.	Exceso de aceite hacia el separador de aceite de sellos con posible arrastre hacia el gas de sellos.	Válvula de seguridad de aceite de sello.	5. Mantenimiento a interruptor y alarma por baja presión diferencial de aceite de sello.
	7. Ruptura de líneas de aceite de sellos.			1. Mantenimiento a válvula controladora de flujo y al regulador de presión diferencial del sistema de aceite de sello.
Baja Presión Diferencial de Gas de Sello.	1. Falla de válvula controladora de flujo.	Contaminación de la corriente de gas por el paso de aceite de sello.	Alarma y disparo por baja presión diferencial entre el gas de sello y el gas de succión S343.	2. Mantenimiento a válvula de seguridad de aceite de sello.
	2. Falla del regulador de presión diferencial.			1. Mantenimiento al regulador de presión diferencial de gas de sello.
Bajo Voltaje en baterías del Sistema de Energía Eléctrica.	1. Falla del regulador de presión diferencial de gas de sello.	Pérdida del control del proceso.	Interruptor por bajo voltaje de baterías.	2. Mantenimiento a líneas y válvulas del sistema de regulación de gas de sello.
	2. Fuga en conexiones y/o accesorios.			3. Mantenimiento al interruptor y alarma por baja presión diferencial de gas de sello.
	3. Baterías en mal estado.			1. Mantenimiento al sistema eléctrico.
Falla en el Monitoreo de Gas.	1. Corto circuito en sistema eléctrico.	Imposibilidad para detectar atmósferas tóxicas y explosivas.	Interruptor y alarma por falla del sistema de monitoreo de gas.	2. Mantenimiento y/o remplazo a baterías.
	2. Falla en cargador de batería.			3. Mantenimiento al cargador de baterías.
	1. Falla en conexiones eléctricas.			2. Rehabilitar al Sistema de Detección de Gas.
	1. Falla en detectores de gas.			

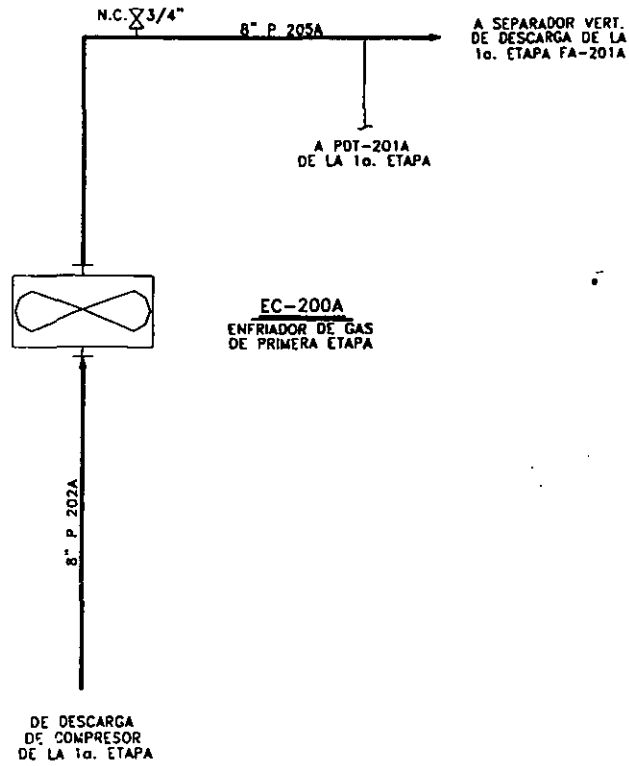
# ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

NODO 3

Enfriador de la Primera Etapa EC-300A.

INTENCION DE DISEÑO:

Disminuir la temperatura del gas a la descarga de la Primera Etapa.



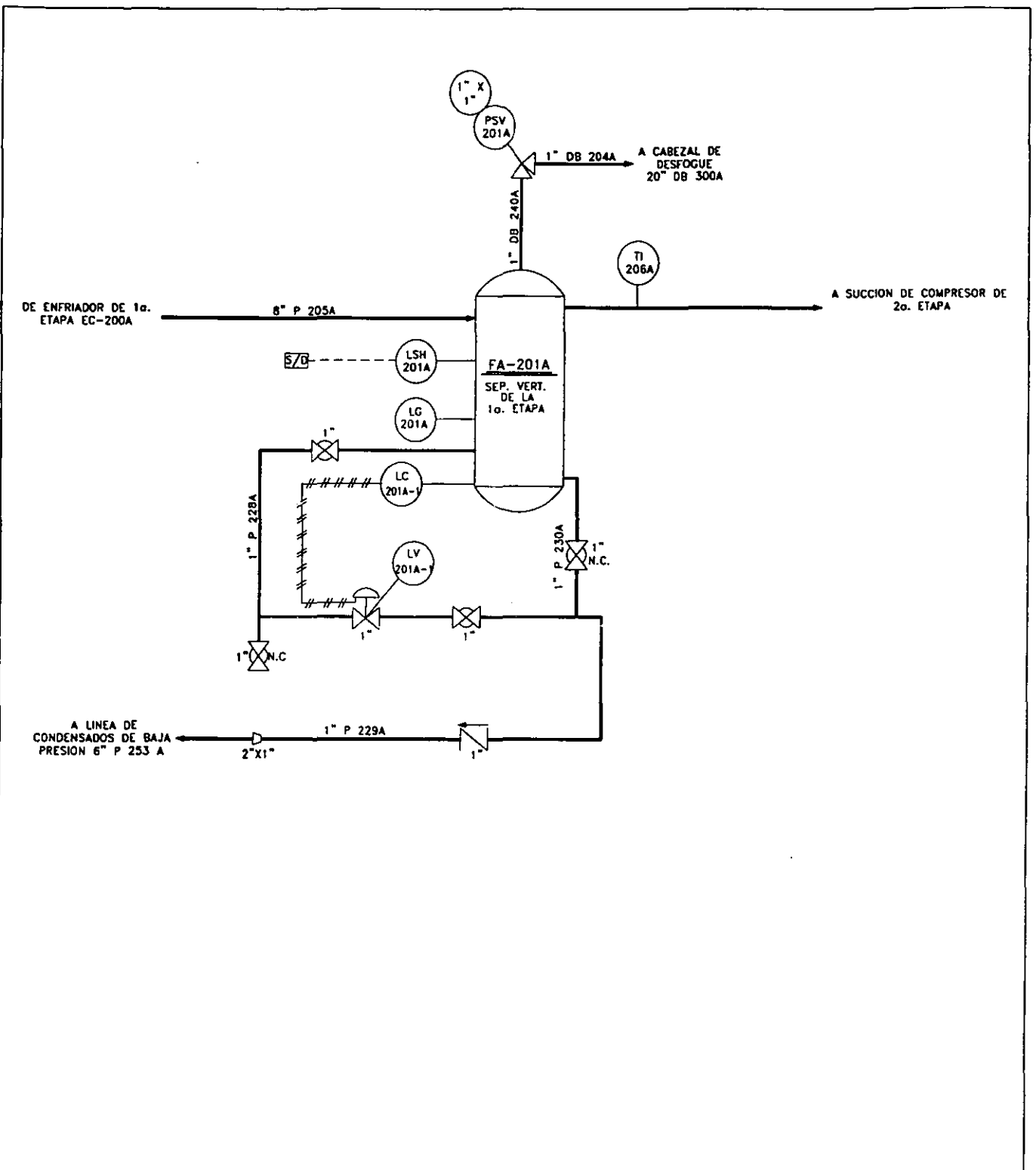
## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

<b>NODO 3</b>	Enfriador de la Primera Etapa EC-300A.
<b>INTENCION DE DISEÑO:</b>	Disminuir la temperatura del gas a la descarga de la Primera Etapa.

DESVIACION	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
Alta temperatura a la salida del enfriador	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Falla en el accionamiento de los ventiladores debido a:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja presión de aceite hidráulico originada por falla en válvula reguladora de presión PCV-846A.</li> <li>• Funcionamiento inadecuado de los motores HM-845A y HM-846A.</li> </ul> </li> <li>2. Ensuciamiento excesivo del banco de tubos.</li> </ol>	<p>Alta temperatura en la succión de la Segunda Etapa.</p> <p>Aumento en el consumo de gas combustible por la disminución de eficiencia del compresor de la Segunda Etapa.</p>	<p>Interruptor por alta temperatura en la descarga de la primera etapa S366.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento a válvula reguladora de presión PCV-846A.                             <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1 Mantenimiento a motores hidráulicos HM-845A y HM-846A.</li> </ol> </li> <li>2. Mantenimiento al banco de tubos y a los ventiladores.</li> <li>3. Realizar estudio para modificar o eliminar descarga de vapores de aceite a la atmósfera y su impacto en los enfriadores.</li> <li>4. Mantenimiento al interruptor por alta temperatura.</li> </ol>
Vibración en los ventiladores	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cojinetes dañados.</li> <li>2. Desbalanceo en aspas.</li> <li>3. Soporteria inadecuada de los motores.</li> </ol>	<p>Daños mecánicos en ventilador (aspas y flecha) y transmisión.</p> <p>Ruido excesivo.</p> <p>Fuga de aceite hidráulico.</p>	<p>Interruptores por vibración VSH-845A y VSH-846A.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reemplazo de cojinetes.</li> <li>2. Mantenimiento a ventiladores y motores hidráulicos.</li> <li>3. Verificar anclaje, nivelación y soporte de motores.</li> <li>4. Mantenimiento a interruptores por alta vibración VSH-845A y VSH-846A.</li> </ol>

## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

<b>NODO 4</b>	Separador de la Primera Etapa FA-301A.
<b>INTENCION DE DISEÑO:</b>	Separar los condensados formados por el enfriamiento del gas después de la Primera Etapa.



## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

<b>NODO 4</b>	Separador de la Primera Etapa FA-301A.
<b>INTENCION DE DISEÑO:</b>	Separar los condensados formados por el enfriamiento del gas después de la Primera Etapa.

DESVIACION	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
Baja Presión.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baja presión de descarga de la Primera Etapa.</li> <li>2. Falla en válvula de Control de Flujo FV-307A.</li> <li>3. Válvula de seguridad PSV-305A descalibrada (Ver fig. del nodo 2).</li> <li>4. Fuga en equipo, líneas y válvulas de dren y venteo.</li> </ol>	Disparo de unidad de compresión por baja presión.	<p>Interruptor por baja presión en la succión de la Segunda Etapa S363-2</p> <p>Transmisor de presión diferencial en la descarga de la Primera Etapa PDT-301A.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento al sistema de control antisurge.</li> <li>2. Mantenimiento a lazo de control antisurge FV-307A, FC-301A y FT-301A.</li> <li>3. Mantenimiento a válvula de seguridad PSV-305A.</li> <li>4. Establecer los procedimientos operacionales de emergencia.</li> <li>5. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores del separador y líneas.</li> <li>6. Mantenimiento al interruptor por baja presión y al transmisor de presión diferencial PDT-301A en la descarga de la Primera Etapa.</li> <li>7. Automatizar el sistema de control antisurge y monitorear la presión por medio de un Sistema Digital de Control.</li> </ol>
Alta Presión.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta presión de descarga de la Primera Etapa.</li> <li>2. Falla en válvula de control de flujo FV-312A.</li> <li>3. Obstrucción del flujo debido a los internos.</li> </ol>	<p>Ruptura de equipo y/o líneas.</p> <p>Fuga de gas en líneas, sellos de válvulas, empaques de bridas, conexiones de instrumentos y puntos de soldadura.</p> <p>Alta presión en la succión de la segunda etapa.</p>	<p>Interruptor por alta presión a la descarga de la Primera Etapa S364-1.</p> <p>Válvula de seguridad PSV-305A.</p> <p>Transmisor de presión diferencial PDT-301A.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento al interruptor de alta presión S364-1 y al transmisor de presión diferencial PDT-301A.</li> <li>2. Mantenimiento a lazo de control antisurge FV-312A, FC-308A y FT-308A.</li> <li>3. Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> <li>4. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores del separador y líneas.</li> <li>5. Mantenimiento a válvula de seguridad PSV-305A.</li> <li>6. Automatizar el proceso para monitorear alta presión por medio de un Sistema Digital de Control.</li> </ol>
Bajo Nivel.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Falla en el lazo de control de nivel (LC-301A y LV-301A).</li> </ol>	Represionamiento de cabezal de condensados de baja presión 6" P 502A debido al arrastre de gas.	Control de presión en cabezal de condensados sucios 6" P 441 (ver fig. del nodo 22 de la unidad 9).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento del sistema de control de nivel LC-301A y LV-301A.</li> <li>2. Establecer los procedimientos operativos de emergencia.</li> <li>3. Instalar alarma por bajo nivel.</li> <li>4. Automatizar el proceso para monitorear nivel por medio de un Sistema Digital de Control.</li> </ol>

## ANALISIS DE PELIGRO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

DESVIACION	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS	PROTECCIONES	ACCIONES REQUERIDAS
Alto Nivel.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Falla en el lazo de control de nivel (LC-301A y LV-301A).</li> <li>2. Sobrepresión en cabezal de condensados de baja presión 6" P 502A.</li> </ol>	Daños al compresor de la Segunda Etapa por arrastre de líquidos.	Interruptor por alto nivel LSH-301A.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento al sistema de control de nivel LC-301A y LV-301A y al interruptor por alto nivel LSH-301A.</li> <li>2. Establecer los procedimientos operativos de emergencia.</li> <li>3. Mantenimiento a alarmas en tablero de control de la unidad de compresión.</li> <li>4. Automatizar el proceso para monitorear nivel por medio de un Sistema Digital de Control.</li> </ol>
Fuga de gas.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corrosión en conexiones del separador y/o líneas de gas.</li> <li>2. Falla en empaques de bridas y sellos de válvulas.</li> </ol>	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	Sin protecciones.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores del separador y de líneas.</li> <li>2. Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> <li>3. Mantenimiento a conexiones de instrumentos.</li> </ol>
Fuga de Líquidos.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corrosión en conexiones del separador y/o líneas de condensados.</li> <li>2. Falla en empaques de bridas y sellos de válvulas.</li> </ol>	Formación de charco inflamable y tóxico.	Sin protecciones.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantenimiento preventivo y análisis de espesores del separador y de líneas.</li> <li>2. Establecer los procedimientos operacionales y planes de emergencia.</li> </ol>

## **A N E X O C**

**LISTA DE CATEGORÍAS DE CONSECUENCIAS Y FRECUENCIAS**

**Y**

**NIVELES DE RIESGO**

## LISTA DE CATEGORÍAS DE CONSECUENCIAS Y FRECUENCIAS

DESCRIPCION DE LA DESVIACION	CONSECUENCIAS	CATEGORIA DE CONSECUENCIAS Y FRECUENCIAS			
		A	B	C	FRECUENCIA
Baja presión en el filtro separador horizontal de succión FA-300A (Nodo 1 unidad 17).	Disparo de la unidad de compresión por baja presión.	1	1	1	4
Bajo flujo en la succión del compresor de la primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Surge y daños mecánicos a los cojinetes, rotor del compresor, incrementador y el accionador.	1	1	1	2
Alta presión a la descarga del compresor de la primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Fuga en empaques de bridas y en conexiones de instrumentos a procesos.	2	2	1	3
Fuga de gas en el interior del contenedor del compresor de la primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	3	4	1	3
Sobrevelocidad en el compresor de la primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 unidad 17).	Alta presión de descarga del compresor.	1	1	1	3
Alta temperatura de gases a la entrada del compresor de primera etapa de turbocompresor GB-300A (Nodo 2 unidad 17).	Daños mecánicos a la turbina por alta temperatura del metal.	1	1	1	1
Alta temperatura del incrementador en el compresor de primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 unidad 17).	Daños mecánicos en el incrementador por degradación del aceite lubricante.	1	1	1	4
Baja presión de gas combustible en el compresor de primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 unidad 17).	Reducción de potencia en la turbina.	1	1	1	3
Bajo nivel de aceite lubricante en el compresor de primer etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Daños a cojinetes de los compresores, al incrementador de velocidad y a la turbina de gas.	1	1	1	4
Alta presión diferencial de aceite de sello en el compresor de primer etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Exceso de aceite hacia el separador de aceite de sellos con posible arrastre hacia el gas de sello.	1	1	1	3
Baja presión diferencial de gas de sello en el compresor de primer etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 1).	Contaminación de la corriente de gas por el paso de aceite de sello.	1	1	1	3
Alta temperatura a la salida de enfriador de la primera etapa EC-300A (Nodo 3 unidad 17).	Aumento en el consumo de gas combustible por la disminución de eficiencia del compresor de la segunda etapa.	1	1	1	4
Vibración en los ventiladores del enfriador de la primera etapa EC-300A (Nodo 3 unidad 17).	Daño mecánico en ventilador (aspas y flecha) y transmisión.	3	3	1	3
Alta presión en el separador de la primera etapa FA-301A (Nodo 4 unidad 17).	Ruptura de equipo y/o líneas.	4	4	1	1
Bajo nivel en el separador de la primera etapa FA-301A (Nodo 4 unidad 17).	Represionamiento de cabezal de condensados de baja presión 6" P 507A debido al arrastre de gas.	1	1	1	3
Bajo flujo en la succión en el compresor de la segunda etapa GB-300A del turbocompresor (Nodo 5 unidad 17).	Alta temperatura a la descarga de la segunda etapa.	1	2	1	4
Alta presión en la succión del compresor de la segunda etapa de turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Ruptura de línea de succión.	4	4	1	1
Fuga de gas en el interior del contenedor del compresor de la segunda etapa del turbo compresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Incendio y/o explosión al contacto del gas con una fuente de ignición.	4	4	1	2



DESCRIPCION DE LA DESVIACION	CONSECUENCIAS	CATEGORIA DE CONSECUENCIAS Y FRECUENCIAS			
		A	B	C	FRECUENCIA
Alta temperatura de gases a la entrada del compresor de la segunda etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Daños mecánicos a la turbina por altas temperaturas del metal.	1	1	1	1
Baja presión de gas combustible en el compresor de segunda etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Reducción de potencia en la turbina.	1	1	1	3
Baja presión en el sistema de aceite lubricante del turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Daños a los cojinetes de los compresores, al incrementador de velocidad y a la turbina de gas.	1	1	1	3
Baja presión diferencial de aceite de sello en el compresor de segunda etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Fuga de gas amargo al contenedor con posibilidad de fuego.	2	3	1	3
Alta presión en el separador de la segunda etapa FA-302A (Nodo 7 unidad 17).	Alta presión en la succión de la tercera etapa.	1	1	1	3
Alto nivel en el separador de la segunda etapa FA-302A (Nodo 7 unidad 17).	Daño al compresor de la tercera etapa por arrastre de líquidos.	1	1	1	4
Fuga de gas en el separador de la segunda etapa FA-302A (Nodo 7 unidad 17).	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	3	4	1	3
Bajo flujo en la succión del compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300 A (Nodo 8 unidad 17).	Surge y daños mecánicos a los cojinetes, rotor del compresor, incrementador y el accionador.	1	1	1	3
Alta presión en la succión del compresor de tercera etapa turbocompresor GB-300 A (Nodo 8 unidad 17).	Ruptura de línea de succión.	4	4	1	1
Baja presión a la descarga del compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Sin consecuencias.	1	1	1	4
Alta presión a la descarga del compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Ruptura de línea de descarga	4	4	1	1
Fuga de gas en el interior del contenedor de compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Incendio y/o explosión al contacto del gas con una fuente de ignición.	4	4	1	2
Fuga de gas en el exterior del contenedor de compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	3	4	1	3
Vibración en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Fatiga en materiales de soportería.	1	1	1	3
Sobrevelocidad en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Sobrecalentamiento de partes internas de la turbina.	1	1	1	3
Alta presión diferencial en el filtro de aire de compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Alta temperatura de gases a la entrada de la turbina.	1	1	1	3
Alta temperatura del incrementador en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Daños mecánicos en el incrementador por degradación del aceite lubricante.	1	1	1	4
Baja presión de gas combustible en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Baja presión de descarga en etapas de compresión.	1	1	1	3
Baja presión de gas combustible en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Surge en la turbina.	1	1	1	3

DESCRIPCION DE LA DESVIACION	CONSECUENCIAS	CATEGORIA DE CONSECUENCIAS Y FRECUENCIAS			
		A	B	C	FRECUENCIA
Baja presión en el sistema de aceite lubricante en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Posibles daños a rotores del turbocompresor.	1	1	1	3
Bajo nivel de aceite lubricante en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Cavitación de la bomba principal de aceite.	1	1	1	3
Baja presión diferencial de aceite de sello en compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Fuga de gas amargo al contenedor con posibilidad de fuego.	3	3	1	3
Alta presión diferencial de aceite de sello compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Exceso de aceite hacia el separador de aceite de sellos con posible arrastre de gas de sello.	1	1	1	3
Bajo voltaje en baterías del sistema de energía eléctrica en compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Perdida del control de proceso.	3	2	1	4
Falla en el monitoreo de gas en compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Imposibilidad para detectar atmósferas tóxicas y explosivas.	3	3	1	3
Alta temperatura a la salida del enfriador de la tercera etapa EC-302A (Nodo 9 unidad 17).	Formación de condensados en el envío de gas a C.P.G Cactus.	1	1	1	4
Vibración en los ventiladores del enfriador de la tercera etapa EC-302A (Nodo 9 unidad 17).	Daños mecánicos en ventilador (aspas y flecha) y transmisión.	3	3	1	3
Baja presión en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Sin consecuencias.	1	1	1	4
Alta presión en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Ruptura de equipo y/o líneas.	4	4	1	1
Bajo nivel en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Represionamiento de cabezal de condensados de alta presión 6"P507A debido al arrastre de gas.	1	1	1	3
Fuga de gas en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	3	4	1	3
Fuga de líquidos en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Formación de charco inflamable y tóxico.	3	3	1	3
Alta temperatura a la salida del enfriador del sistema de aceite lubricante (Nodo 11 unidad 17).	Disparo de la unidad de compresión por alta temperatura de aceite lubricante.	1	1	1	4
Alta temperatura a la salida del enfriador del sistema de aceite lubricante (Nodo 11 unidad 17).	Incremento en la contaminación del área de vapores de aceite.	3	3	1	4
Fuga de aceite en el sistema de enfriamiento de aceite lubricante (Nodo 11 unidad 17).	Formación de charco inflamable y tóxico.	2	2	1	3
Alta presión en el sistema de aceite hidráulico (Nodo 12 unidad 17).	Fuga en empaques de bridas y sellos de válvulas.	2	2	1	4
Bajo nivel en el sistema de aceite hidráulico (Nodo 12 unidad 17).	Cavitación en la bomba de aceite.	1	1	1	3
Fuga de aceite en el sistema de aceite hidráulico (Nodo 12 unidad 17).	Formación de charco inflamable y tóxico.	2	2	1	3
Fuga de gas en tubo interno del calentador de gas combustible EA-665A (Nodo 13 unidad 17).	Contaminación de gas combustible con gas amargo.	1	1	1	2

## NIVELES DE RIESGO

DESVIACION	CONSECUENCIAS	NIVEL DE RIESGO POR TIPO DE CONSECUENCIA		
Baja presión en el filtro separador horizontal de succión FA-300A (Nodo 1 unidad 17).	Disparo de la unidad de compresión por baja presión.	IV	IV	IV
Bajo flujo en la succión del compresor de la primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Surge y daños mecánicos a los cojinetes, rotor del compresor, incrementador y el accionador.	IV	IV	IV
Alta presión a la descarga del compresor de la primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Ruptura de línea de descarga.	IV	III	IV
Fuga de gas en el exterior del contenedor del compresor de la primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	II	I	IV
Sobrevelocidad en el compresor de la primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 unidad 17).	Alta presión de descarga del compresor.	IV	IV	IV
Alta temperatura del incrementador en el compresor de primera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 unidad 17).	Daños mecánicos en el incrementador por degradación del aceite lubricante.	IV	IV	IV
Bajo nivel de aceite lubricante en el compresor de primer etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Daños a cojinetes de los compresores, al incrementador de velocidad y a la turbina de gas.	IV	IV	IV
Alta presión diferencial de aceite de sello en el compresor de primer etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Exceso de aceite hacia el separador de aceite de sellos con posible arrastre hacia el gas de sello.	IV	IV	IV
Baja presión diferencial de gas de sello en el compresor de primer etapa del rbocompresor GB-300A (Nodo 2 Unidad 17).	Contaminación de la corriente de gas por el paso de aceite de sello.	IV	IV	IV
Vibración en los ventiladores del enfriador de la primera etapa EC-300A (Nodo 3 unidad 17).	Daño mecánico en ventilador (aspas y flecha) y transmisión.	II	II	IV
Alta presión en el separador de la primera etapa FA-301A (Nodo 4 unidad 17).	Ruptura de equipo y/o líneas.	III	III	IV
Bajo nivel en el separador de la primera etapa FA-301A (Nodo 4 unidad 17).	Represionamiento de cabezal de condensados de baja presión 6" P 507A debido al arrastre de gas.	IV	IV	IV
Bajo flujo en la succión en el compresor de la segunda etapa GB-300A del turbocompresor (Nodo 5 unidad 17).	Alta temperatura a la descarga de la segunda etapa.	IV	II	IV
Alta presión en la succión del compresor de la segunda etapa de turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Ruptura de línea de succión.	III	III	IV
Fuga de gas en el interior del contenedor del compresor de la segunda etapa del turbo compresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Incendio y/o explosión al contacto del gas con una fuente de ignición.	II	II	IV
Alta temperatura de gases a la entrada del compresor de la segunda etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Daños mecánicos a la turbina por altas temperaturas del metal.	IV	IV	IV
Baja presión de gas combustible en el compresor de segunda etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Pérdida de potencia en la turbina.	IV	IV	IV
Baja presión en el sistema de aceite lubricante del turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Daños a los cojinetes de los compresores, al incrementador de velocidad y a la turbina de gas.	IV	IV	IV
Baja presión diferencial de aceite de sello en el compresor de segunda etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 5 unidad 17).	Fuga de gas amargo al contenedor con posibilidad de fuego.	II	II	IV

DESVIACION	CONSECUENCIAS	NIVEL DE RIESGO POR TIPO DE CONSECUENCIA		
Alta presión en el separador de la segunda etapa FA-302A (Nodo 7 unidad 17).	Alta presión en la succión de la tercera etapa.	IV	IV	IV
Alto nivel en el separador de la segunda etapa FA-302A (Nodo 7 unidad 17).	Daño al compresor de la tercera etapa por arrastre de líquidos.	IV	IV	IV
Fuga de gas en el separador de la segunda etapa FA-302A (Nodo 7 unidad 17).	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	II	II	IV
Bajo flujo en la succión del compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300 A (Nodo 8 unidad 17).	Surge y daños mecánicos a los cojinetes, rotor del compresor, incrementador y el accionador.	IV	IV	IV
Alta presión en la succión del compresor de tercera etapa turbocompresor GB-300 A (Nodo 8 unidad 17).	Ruptura de línea de succión.	III	III	IV
Baja presión a la descarga del compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Sin consecuencias.	IV	IV	IV
Alta presión a la descarga del compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Ruptura de línea de descarga.	III	III	IV
Fuga de gas en el interior del contenedor de compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Incendio y/o explosión al contacto del gas con una fuente de ignición.	II	II	IV
Fuga de gas en el exterior del contenedor de compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	II	I	IV
Vibración en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Fatiga en materiales de soportería	IV	IV	IV
Sobrevelocidad en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Sobrecalentamiento de partes internas de la turbina.	IV	IV	IV
Alta presión diferencial en el filtro de aire de compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Alta temperatura de gases a la entrada de la turbina.	IV	IV	IV
Alta temperatura del incrementador en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Daños mecánicos en el incrementador por degradación del aceite lubricante.	IV	IV	IV
Baja presión de gas combustible en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Baja presión de descarga en etapas de compresión.	IV	IV	IV
Baja presión de gas combustible en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Surge en la turbina.	IV	IV	IV
Baja presión en el sistema de aceite lubricante en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Posibles daños a rotores del turbocompresor.	IV	IV	IV
Bajo nivel de aceite lubricante en el compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Cavitación de la bomba principal de aceite.	IV	IV	IV
Baja presión diferencial de aceite de sello en compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Fuga de gas amargo al contenedor con posibilidad de fuego.	II	II	IV
Alta presión diferencial de aceite de sello compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Exceso de aceite hacia el separador de aceite de sellos con posible arrastre de gas de sello.	IV	IV	IV

DESVIACION	CONSECUENCIAS	NIVEL DE RIESGO POR TIPO DE CONSECUENCIA		
		I	II	IV
Bajo voltaje en baterías del sistema de energía eléctrica en compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Perdida del control de proceso.	I	II	IV
Falla en el monitoreo de gas en compresor de tercera etapa del turbocompresor GB-300A (Nodo 8 unidad 17).	Imposibilidad para detectar atmósferas tóxicas y explosivas.	II	II	IV
Alta temperatura a la salida del enfriador de la tercera etapa EC-302A (Nodo 9 unidad 17).	Formación de condensados en el envío de gas a C.P.G Cactus.	IV	IV	IV
Vibración en los ventiladores del enfriador de la tercera etapa EC-302A (Nodo 9 unidad 17).	Daños mecánicos en ventilador (aspas y flecha) y transmisión.	II	II	IV
Baja presión en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Sin consecuencias.	IV	IV	IV
Alta presión en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Ruptura de equipo y/o líneas.	III	III	IV
Bajo nivel en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Represionamiento de cabezal de condensados de alta presión 6 " P 507A debido al arrastre de gas.	IV	IV	IV
Fuga de gas en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Formación de nube tóxica, inflamable y explosiva.	II	I	IV
Fuga de líquidos en el separador de la tercera etapa FA-303A (Nodo 10 unidad 17).	Formación de charco inflamable y tóxico.	II	II	IV
Alta temperatura a la salida del enfriador del sistema de aceite lubricante (Nodo 11 unidad 17).	Disparo de la unidad de compresión por alta temperatura de aceite lubricante.	IV	IV	IV
Alta temperatura a la salida del enfriador del sistema de aceite lubricante (Nodo 11 unidad 17).	Incremento en la contaminación del área de vapores de aceite.	I	I	IV
Fuga de aceite en el sistema de enfriamiento de aceite lubricante (Nodo 11 unidad 17).	Formación de charco inflamable y tóxico.	III	IV	IV
Alta presión en el sistema de aceite hidráulico (Nodo 12 unidad 17).	Fuga en empaques de bridas y sellos de válvulas.	II	II	IV
Bajo nivel en el sistema de aceite hidráulico (Nodo 12 unidad 17).	Cavitación en la bomba de aceite.	IV	IV	IV
Fuga de aceite en el sistema de aceite hidráulico (Nodo 12 unidad 17).	Formación de charco inflamable y tóxico.	III	III	IV
Fuga de gas en tubo interno del calentador de gas combustible EA-665A (Nodo 13 unidad 17).	Contaminación de gas combustible con gas amargo.	IV	IV	IV

## **A N E X O D**

**MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS**

**Y**

**ZONAS DE AFECTACIÓN.**

CAUSAS		CONSECUENCIAS										CRITERIOS PARA EVALUACION DE CONSECUENCIAS			
		EMISION		EXPLOSION			FUEGO			TOXICIDAD		EXPLOSION		FUEGO	
ESCENARIO	DIAMETRO DE ORIFICIO O RUPTURA (plg)	MASA RELEVADA (Kg/S)		ONDA DE CHOQUE (psig) EN FUNCION DEL RADIO (m)			RADIACION TERMICA (KW/m <sup>2</sup> ) EN FUNCION DEL RADIO (m)			LFL (%VOL.) EN FUNCION DEL RADIO (m)	IDLH 300 ppm H <sub>2</sub> S (m)	ONDA DE CHOQUE (psig)	EFECTOS	NIVEL DE RADIACION (KW/m <sup>2</sup> )	EFECTOS
		LIQUIDO	GAS	1	2	3	4	12.50	37.50						
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR GENERAL DE SUCCION FA-100A O EN EL CABEZAL DE SUCCION 30" P-105	1/2	----	0.13	N.R.	N.R.	N.R.	9.66	9.12	N.A.	4.70	7.91	1.00	DANOS PARCIALES A ESTRUCTURAS, PANELES DE ACERO O ALUMINIO CORRUGADO	37.50	DAÑO A EQUIPO DE PROCESO 100% LETAL EN 1 MINUTO
	3/4	----	0.293	N.R.	N.R.	N.R.	14.22	12.14	10.38	6.28	11.60				
	2	----	2.08	40.66	37.96	36.92	35.20	30.03	26.58	17.19	28.69				
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE VAPORES FA-300A O EN LA LINEA DE 16" P-150	1/2	----	0.03	N.R.	N.R.	N.R.	4.0	N.A.	N.A.	2.85	2.53	2.00	COLAPSO PARCIAL DE TECHOS Y PAREDES DE CASAS	12.50	ENERGIA MINIMA REQUERIDA PARA DESARROLLAR UN INCENDIO CONTROLABLE 1% LETAL EN 1 MINUTO
	3/4	----	0.08	N.R.	N.R.	N.R.	7.28	N.A.	N.A.	4.49	3.64				
	2	----	0.56	N.R.	N.R.	N.R.	20.97	17.48	15.33	11.45	10.12				
DERRAME DE CONDENSADOS EN EL CABEZAL GENERAL DE CONDENSADOS DE ALTA PRESION A BATERIA SAMARIA II	1/2	3.43	----	39.78	37.55	36.69	43.57	37.38	32.79	16.87	13.32	3.00	DAÑOS MENORES A INSTALACIONES Y EQUIPO DE PROCESO	4.00	QUEMADURAS DE 2do. GRADO (20 SEGUNDOS DE EXPOSICION) 0% LETAL
	3/4	7.71	----	63.43	58.25	56.26	63.79	53.63	47.53	25.95	20.21				
	2	54.80	----	180.0	165.20	158.50	153.90	130.0	114.10	64.95	49.82				
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA DE LA 3ro. ETAPA FA-303A	1/2	----	0.165	N.R.	N.R.	N.R.	9.03	N.A.	N.A.	5.23	4.47				
	3/4	----	0.371	N.R.	N.R.	N.R.	14.88	10.80	N.A.	7.65	6.12				
	2	----	2.64	48.54	44.89	43.49	39.30	32.89	28.87	20.75	16.98				
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR DE LA PRIMERA ETAPA FA-301A O EN LA LINEA DE DESCARGA 8" P 308A	1/2	----	0.422	N.R.	N.R.	N.R.	15.83	11.62	N.A.	8.34	12.65				
	3/4	----	0.95	N.R.	N.R.	N.R.	24.0	19.66	N.A.	11.89	18.95				
	2	----	6.75	79.36	73.24	70.88	60.10	50.88	45.0	31.16	51.95				
DERRAME DE CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA 2do. ETAPA FA-302A	1/2	6.78	----	*N.R.	*N.R.	*N.R.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0	3.02				
	3/4	15.30	----	*N.R.	*N.R.	*N.R.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0	8.36				
	2	109.0	----	*N.R.	*N.R.	*N.R.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0	8.36				
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR DE LA 2do. ETAPA FA-302A O EN LA LINEA DE DESCARGA 6" P-313A	1/2	----	0.94	N.R.	N.R.	N.R.	23.85	19.51	N.A.	12.14	21.06				
	3/4	----	2.11	43.79	40.73	39.55	34.90	29.73	25.89	18.42	29.22				
	2	----	15.0	118.80	108.40	104.40	86.70	73.14	64.44	48.53	77.06				
DERRAME DE CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA 3ro. ETAPA FA-303A	1/2	5.91	----	66.23	60.22	57.91	91.82	80.35	N.A.	25.93	23.33				
	3/4	13.30	----	93.00	83.99	80.53	132.0	115.60	N.A.	38.42	34.31				
	2	94.53	----	**N.R.	**N.R.	**N.R.	313.90	275.30	N.A.						
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR DE LA 3ro. ETAPA FA-303A O EN LA LINEA DE DESCARGA 6" P-317A	1/2	----	1.74	38.65	36.32	35.43	31.86	27.06	23.57	16.16	26.60				
	3/4	----	3.92	61.52	57.11	55.41	46.34	39.80	35.01	24.73	43.15				
	2	----	27.80	166.60	153.10	147.80	114.50	96.93	85.67	62.57	50.50				
FUGA DE GAS EN EL CABEZAL GENERAL DE DESCARGA DE GAS A. P. A C.P.G. CACTUS 16" P-453A	1/2	----	1.74	36.69	34.57	33.75	32.46	27.70	24.52	15.70	26.07				
	3/4	----	3.92	59.26	54.53	52.70	47.11	40.30	35.48	24.60	39.25				
	2	----	27.80	176.20	162.80	157.60	114.40	97.12	85.88	61.41	105.10				

ESTABILIDAD ATMOSFERICA: CLASE F  
VELOCIDAD DEL VIENTO: 1.5 m/s

TOXICIDAD

IDLH:  
CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE DE H<sub>2</sub>S (300 ppm), QUE NO OCASIONA EFECTOS IRREVERSIBLES A LA SALUD, DURANTE UN TIEMPO DE EXPOSICION DE 30 MINUTOS.

NOMENCLATURA

LFL= LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD  
N.A.= NO SE ALCANZO  
N.R. = NO HAY RIESGO  
IDLH= CONCENTRACION INMEDIATAMENTE PELIGROSA PARA LA VIDA Y LA SALUD  
NOTAS:  
\* NO PRESENTA RIESGO POR ALTA CONCENTRACION DE AGUA  
\*\* NO PRESENTA RIESGO POR QUE NO SE ALCANZA EL LFL.

MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS  
FUGAS POR ORIFICIO  
ESTABILIDAD ATMOSFERICA "F" (CRITICA)  
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II

ESCALA: 1:1000  
DISEÑO: No 00665A  
REV 3

CAUSAS		CONSECUENCIAS										CRITERIOS PARA EVALUACION DE CONSECUENCIAS			
		EMISION		EXPLOSION			FUEGO			TOXICIDAD		EXPLOSION		FUEGO	
ESCENARIO	DIAMETRO DE ORIFICIO O RUPTURA (pig)	MASA RELEVADA (Kg/S)		ONDA DE CHOQUE (psig) EN FUNCION DEL RADIO (m)			RADIACION TERMICA (KW/m <sup>2</sup> ) EN FUNCION DEL RADIO (m)			LFL (%VOL.) EN FUNCION DEL RADIO (m)	IDLH 300 ppm H <sub>2</sub> S (m)	ONDA DE CHOQUE (psig)	EFECTOS	NIVEL DE RADIACION (KW/m <sup>2</sup> )	EFECTOS
		LIQUIDO	GAS	1	2	3	4	12.50	37.50						
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR GENERAL DE SUCCION FA-100A O EN EL CABEZAL GRAL. DE SUCCION 30" P-105	1/2	----	0.13	N.R.	N.R.	N.R.	7.69	6.08	5.36	4.72	7.95	1.00	DAÑOS PARCIALES A ESTRUCTURAS, PANELES DE ACERO O ALUMINIO CORRUGADO	37.50	DAÑO A EQUIPO DE PROCESO 100% LETAL EN 1 MINUTO
	3/4	----	0.293	N.R.	N.R.	N.R.	11.40	9.21	7.80	6.29	11.62				
	2	----	2.08	41.51	38.80	37.75	28.42	23.02	20.0	18.20	29.29				
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE VAPORES FA-300A O EN LA LINEA DE 16" P-150	1/2	----	0.03	N.R.	N.R.	N.R.	3.03	N.A.	N.A.	2.86	2.55	2.00	COLAPSO PARCIAL DE TECHOS Y PAREDES DE CASAS	12.50	ENERGIA MINIMA REQUERIDA PARA DESARROLLAR UN INCENDIO CONTROLABLE 1% LETAL EN 1 MINUTO
	3/4	----	0.078	N.R.	N.R.	N.R.	5.72	N.A.	N.A.	4.52	3.68				
	2	----	0.56	N.R.	N.R.	N.R.	16.84	13.45	10.28	11.50	10.18				
DERRAME DE CONDENSADOS EN EL CABEZAL GENERAL DE CONDENSADOS DE ALTA PRESION A BATERIA SAMARIA II	1/2	3.43	----	37.04	35.14	34.41	35.34	28.70	24.84	16.88	13.36	3.00	DAÑOS MENORES A INSTALACIONES Y EQUIPO DE PROCESO	4.00	QUEMADURAS DE 2do. GRADO (20 SEGUNDOS DE EXPOSICION) 0% LETAL
	3/4	7.71	----	59.40	54.66	52.83	51.57	41.84	35.92	25.68	20.14				
	2	54.80	----	172.50	158.50	153.15	127.20	101.40	87.20	63.32	49.37				
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA DE LA 3ra. ETAPA FA-303A	1/2	----	0.165	N.R.	N.R.	N.R.	7.19	N.A.	N.A.	5.25	4.49				
	3/4	----	0.371	N.R.	N.R.	N.R.	11.75	7.75	N.A.	7.69	6.13				
	2	----	2.64	47.45	44.17	42.90	31.85	25.40	21.45	20.81	17.07				
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR DE LA PRIMERA ETAPA FA-301A O EN LA LINEA DE DESCARGA 8" P 308A	1/2	----	0.422	N.R.	N.R.	N.R.	12.50	8.25	N.A.	8.38	12.67				
	3/4	----	0.95	N.R.	N.R.	N.R.	19.18	14.87	N.A.	11.91	18.95				
	2	----	6.75	76.79	71.21	69.06	48.27	38.99	33.69	31.29	51.67				
DERRAME DE CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA 2da. ETAPA FA-302A	1/2	6.78	----	N.R.	N.R.	N.R.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0	2.14				
	3/4	15.30	----	N.R.	N.R.	N.R.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0	3.07				
	2	109.0	----	N.R.	N.R.	N.R.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0	8.53				
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR DE LA 2da. ETAPA FA-302A O EN LA LINEA DE DESCARGA 6" P-313A	1/2	----	0.939	N.R.	N.R.	N.R.	19.08	14.08	N.A.	12.18	21.06				
	3/4	----	2.11	42.68	39.98	38.93	28.27	22.54	18.82	18.48	29.16				
	2	----	15.0	111.50	101.90	98.25	70.29	56.91	48.93	48.52	75.16				
DERRAME DE CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA 3ra. ETAPA FA-303A	1/2	5.91	----	64.87	59.37	57.25	71.26	61.00	N.A.	25.77	23.34				
	3/4	13.30	----	92.75	84.33	81.09	102.20	87.41	N.A.	38.33	35.18				
	2	94.53	----	N.R.	N.R.	N.R.	244.60	210.60	182.00						
FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR DE LA 3ra. ETAPA FA-303A O EN LA LINEA DE DESCARGA 6" P-317A	1/2	----	1.74	37.62	35.60	34.83	25.80	20.43	16.65	16.22	25.56				
	3/4	----	3.92	59.26	55.25	53.70	37.52	30.59	25.93	24.76	39.67				
	2	----	27.80	147.20	134.50	129.60	92.86	75.36	64.71	62.80	87.42				
FUGA DE GAS EN EL CABEZAL GENERAL DE DESCARGA DE GAS A. P. A C.P.G. CACTUS 16" P-453A	1/2	----	1.74	36.43	34.35	33.54	26.19	21.22	18.44	16.21	26.57				
	3/4	----	3.92	53.86	49.63	48.01	38.0	31.02	26.68	24.23	36.47				
	2	----	27.80	144.30	132.0	127.30	93.62	75.55	64.97	58.21	93.76				

ESTABILIDAD ATMOSFERICA: CLASE C/D  
VELOCIDAD DEL VIENTO: 6.0 m/s

**TOXICIDAD**

IDLH:  
CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE DE H<sub>2</sub>S (300 ppm), QUE NO OCASIONA EFECTOS IRREVERSIBLES A LA SALUD, DURANTE UN TIEMPO DE EXPOSICION DE 30 MINUTOS.

**NOMENCLATURA**

LFL= LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD

N.A.= NO SE ALCANZO

N.R.= NO HAY RIESGO

IDLH= CONCENTRACION INMEDIATAMENTE PELIGROSA PARA LA VIDA Y LA SALUD

MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS  
FUGAS POR ORIFICIO  
ESTABILIDAD ATMOSFERICA "C/D" (FAVORABLE)  
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II



CAUSAS		CONSECUENCIAS										CRITERIOS PARA EVALUACION DE CONSECUENCIAS							
		EMISION		EXPLOSION			FUEGO			TOXICIDAD		EXPLOSION		FUEGO					
ESCENARIO	TIPO DE RUPTURA	MASA RELEVADA (Kg/S)		ONDA DE CHOQUE (psig) EN FUNCION DEL RADIO (m)			RADIACION TERMICA (KW/m <sup>2</sup> ) EN FUNCION DEL RADIO (m)			LFL (%VOL.) EN FUNCION DEL RADIO (m)	IDLH 300 ppm H <sub>2</sub> S (m)	ONDA DE CHOQUE (psig)	EFECTOS	NIVEL DE RADIACION (KW/m <sup>2</sup> )	EFECTOS				
		LIQUIDO	GAS	1	2	3	4	12.50	37.50										
CABEZAL GENERAL DE SUCCION 30" P-105	DE LINEA	----	41.10	207.10	191.20	185.10	136.50	115.10	102.10	74.56	124.70	1.00	DAÑOS PARCIALES A ESTRUCTURAS, PANELES DE ACERO O ALUMINIO CORRUGADO	37.50	DAÑO A EQUIPO DE PROCESO 100% LETAL EN 1 MINUTO				
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE VAPORES FA-300A	CATASTROFICA	----	2.0	16.92	10.66	8.25	36.59	20.62	12.06	8.95	2.31	2.00	COLAPSO PARCIAL DE TECHOS Y PAREDES DE CASAS	12.50	ENERGIA MINIMA REQUERIDA PARA DESARROLLAR UN INCENDIO CONTROLABLE 1% LETAL EN 1 MINUTO				
	DE LINEA	----	2.94	70.80	65.06	62.85	47.65	40.38	35.41	28.64	24.50								
CABEZAL GENERAL DE CONDENSADOS DE A. P. 6" P-500 A BATERIA SAMARIA II	DE LINEA	403.0	----	273.40	233.80	218.50	376.90	316.80	278.40	225.85	139.30	3.00	DAÑOS MENORES A INSTALACIONES Y EQUIPO DE PROCESO	4.00	QUEMADURAS DE 2do. GRADO (20 SEGUNDOS DE EXPOSICION) 0% LETAL				
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA DE LA TERCERA ETAPA FA-303	CATASTROFICA	----	3.90	21.21	13.36	10.34	43.94	26.02	14.66	3.14	2.99	ESTABILIDAD ATMOSFERICA: CLASE F VELOCIDAD DEL VIENTO: 1.5 m/s							
	DE LINEA	----	2.90	53.59	48.91	47.11	40.89	34.39	30.20	20.11	17.22								
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA PRIMERA ETAPA FA-301A Y EN LA LINEA DE 8" P-308A	CATASTROFICA	----	12.20	30.85	19.43	15.04	61.43	35.71	20.51	4.49	5.71					TOXICIDAD			
	DE LINEA	----	59.20	226.70	205.70	197.60	160.10	136.0	120.30	94.71	145.60								
CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA SEGUNDA ETAPA FA-302A Y EN LA LINEA DE 1" P-342A	CATASTROFICA	111.2	----	*N.R.	*N.R.	*N.R.	----	----	----	0.23	0.23					IDLH: CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE DE H <sub>2</sub> S (300 ppm), QUE NO OCASIONA EFECTOS IRREVERSIBLES A LA SALUD, DURANTE UN TIEMPO DE EXPOSICION DE 30 MINUTOS.			
	DE LINEA	26.10	----	*N.R.	*N.R.	*N.R.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0	5.33								
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA SEGUNDA ETAPA FA-302A Y EN LA LINEA DE 6" P-313A	CATASTROFICA	----	23.0	38.35	24.16	18.69	66.51	39.21	21.90	5.60	7.11					NOMENCLATURA			
	DE LINEA	----	130.0	298.10	268.20	256.70	228.10	192.60	170.00	133.87	271.80								
CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA TERCERA ETAPA FA-303A Y EN LA LINEA DE 1 1/2" P-342A	CATASTROFICA	56.40	----	**N.R.	**N.R.	**N.R.	----	----	----	7.04	6.68					LFL= LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD N.A.= NO SE ALCANZO N.R.= NO HAY RIESGO  IDLH= CONCENTRACION INMEDIATAMENTE PELIGROSA PARA LA VIDA Y LA SALUD  NOTAS: * NO PRESENTA RIESGO POR ALTA CONCENTRACION DE AGUA ** NO PRESENTA RIESGO POR QUE NO SE ALCANZA EL LFL.			
	DE LINEA	53.20	----	**N.R.	**N.R.	**N.R.	243.30	214.40	N.A.	----	----								
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA TERCERA ETAPA FA-303A Y EN LA LINEA DE 6" P-317A	CATASTROFICA	----	32.10	42.89	27.02	20.91	75.49	43.03	25.0	5.98	7.56								
	DE LINEA	----	251.0	284.40	245.40	230.40	303.60	258.10	228.10	179.14	461.20								
CABEZAL GENERAL DE DESCARGA DE GAS AMARGO DE A. P. A C. P. C. CACTUS 16" P-453A	DE LINEA	----	42.70	235.30	218.50	212.10	139.0	117.20	104.0	76.68	139.40								

MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS  
 RUPTURA CATASTROFICA DE RECIPIENTE Y LINEA  
 ESTABILIDAD ATMOSFERICA "F" (CRITICA)  
 ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II

ESMA  
 ACOT EN

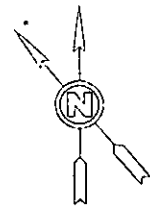
DH No 00866C

REV 0

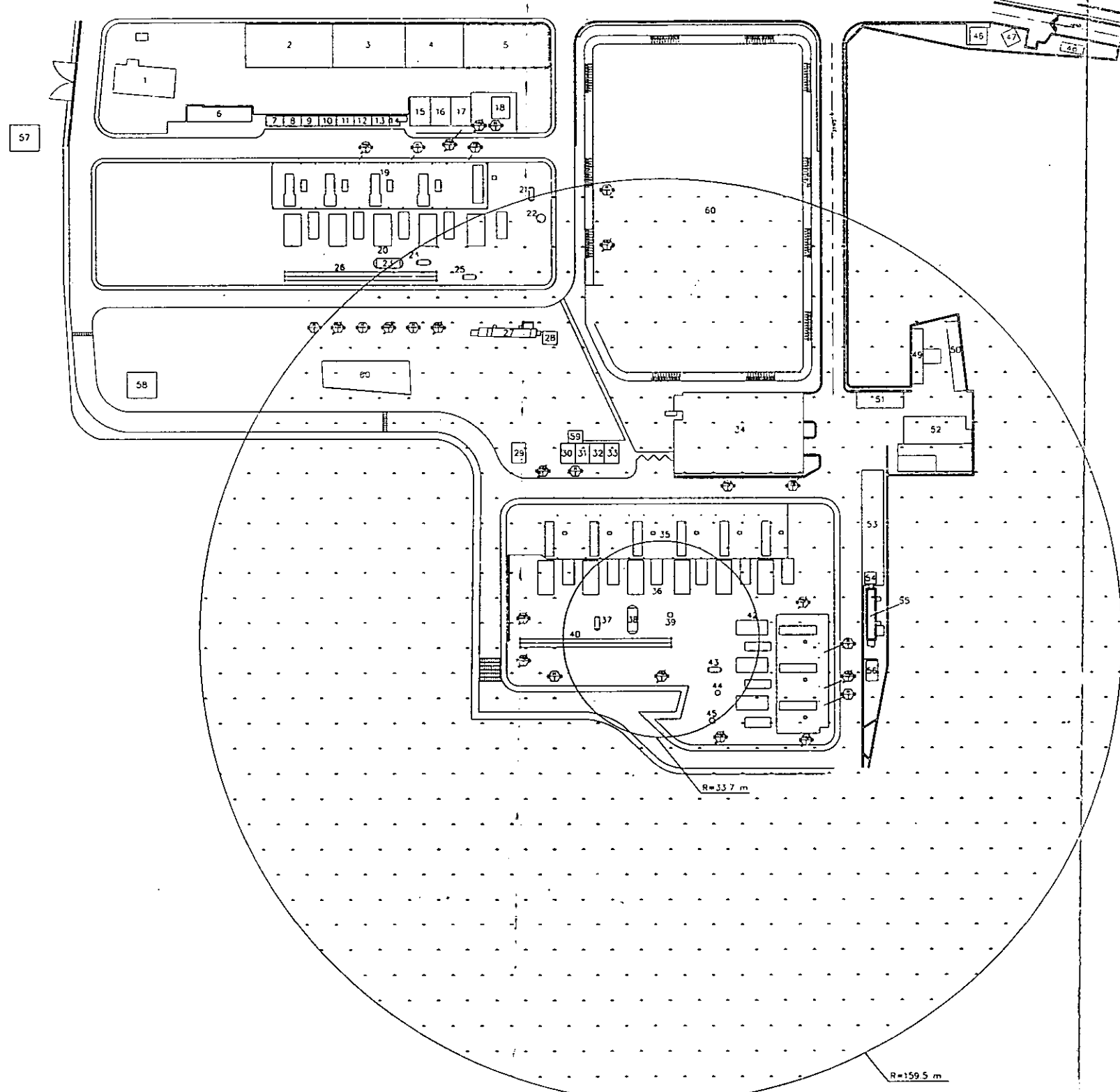
CAUSAS		CONSECUENCIAS										CRITERIOS PARA EVALUACION DE CONSECUENCIAS				
		EMISION		EXPLOSION			FUEGO			TOXICIDAD		EXPLOSION		FUEGO		
		ESCENARIO	TIPO DE RUPTURA	MASA RELEVADA (Kg/S)		ONDA DE CHOQUE (psig) EN FUNCION DEL RADIO (m)			RADIACION TERMICA (kW/m <sup>2</sup> ) EN FUNCION DEL RADIO (m)			LFL (%VOL.) EN FUNCION DEL RADIO (m)	IDLH 300 ppm H <sub>2</sub> S (m)	ONDA DE CHOQUE (psig)	EFFECTOS	NIVEL DE RADIACION (KW/m <sup>2</sup> )
LIQUIDO	GAS			1	2	3	4	12.50	37.50							
CABEZAL GENERAL DE SUCCION 30" P-105	DE LINEA	----	41.10	176.90	162.30	156.70	110.80	89.98	77.25	71.07		118.30	1.00	DAÑOS PARCIALES A ESTRUCTURAS, PANELES DE ACERO O ALUMINIO CORRUGADO	37.50	DAÑO A EQUIPO DE PROCESO 100% LETAL EN 1 MINUTO
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE VAPORES FA-300A	CATASTROFICA	----	2.0	16.92	10.66	8.25	36.59	20.62	12.06	7.87		4.28	2.00	COLAPSO PARCIAL DE TECHOS Y PAREDES DE CASAS	12.50	ENERGIA MINIMA REQUERIDA PARA DESARROLLAR UN INCENDIO CONTROLABLE 1% LETAL EN 1 MINUTO
	DE LINEA	----	2.94	69.60	64.29	62.24	38.49	31.50	26.51	30.07		24.61				
CABEZAL GENERAL DE CONDENSADOS DE A. P. 6" P-500 A BATERIA SAMARIA II	DE LINEA	403.0	----	252.0	215.60	201.50	307.40	248.20	212.40	174.72		131.10	3.00	DAÑOS MENORES A INSTALACIONES Y EQUIPO DE PROCESO	4.00	QUEMADURAS DE 2do. GRADO (20 SEGUNDOS DE EXPOSICION) 0% LETAL
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE DESCARGA DE LA TERCERA ETAPA FA-303A	CATASTROFICA	----	3.90	21.21	13.36	10.34	43.94	26.02	14.66	5.28		4.62	<p>ESTABILIDAD ATMOSFERICA: CLASE C/D VELOCIDAD DEL VIENTO: 6.0 m/s</p> <p style="text-align: center;"><u>TOXICIDAD</u></p> <p>IDLH: CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE DE H<sub>2</sub>S (300 ppm), QUE NO OCASIONA EFECTOS IRREVERSIBLES A LA SALUD, DURANTE UN TIEMPO DE EXPOSICION DE 30 MINUTOS.</p> <p style="text-align: center;"><u>NOMENCLATURA</u></p> <p>LFL= LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD N.A.= NO SE ALCANZO N.R.= NO HAY RIESGO IDLH= CONCENTRACION INMEDIATAMENTE PELIGROSA PARA LA VIDA Y LA SALUD</p>			
	DE LINEA	----	2.90	52.19	47.98	46.36	33.17	26.49	22.51	20.20		17.27				
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA PRIMERA ETAPA FA-301A Y EN LA LINEA DE 8" P-308A	CATASTROFICA	----	12.20	30.85	19.43	15.04	61.43	35.71	20.51	6.63		9.17				
	DE LINEA	----	59.20	216.90	197.20	189.00	131.30	105.60	91.08	94.01		137.80				
CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA SEGUNDA ETAPA FA-302A Y EN LA LINEA DE 1" P-342A	CATASTROFICA	111.2	----	N.R.	N.R.	N.R.	----	----	----	0.28		0.5				
	DE LINEA	26.10	----	N.R.	N.R.	N.R.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0		5.48				
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA SEGUNDA ETAPA FA-302A Y EN LA LINEA DE 6" P-313A	CATASTROFICA	----	23.0	38.35	24.16	18.69	66.51	39.21	21.90	8.31		11.63				
	DE LINEA	----	130.0	292.80	264.90	254.20	188.50	150.30	129.20	129.70		202.80				
CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA TERCERA ETAPA FA-303A Y EN LA LINEA DE 1 1/2" P-342A	CATASTROFICA	56.40	----	N.R.	N.R.	N.R.	----	----	----	8.80		8.16				
	DE LINEA	53.20	----	N.R.	N.R.	N.R.	189.40	162.0	134.30	----		----				
GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA TERCERA ETAPA FA-303A Y EN LA LINEA DE 6" P-317A	CATASTROFICA	----	32.10	42.89	27.02	20.91	75.49	43.03	25.0	8.96		12.92				
	DE LINEA	----	251.0	278.50	241.70	227.60	249.30	203.10	173.20	173.17		340.40				
CABEZAL GENERAL DE DESCARGA DE GAS AMARGO DE A. P. A. C. P. G. CACTUS 16" P-453A	DE LINEA	----	42.70	183.70	168.30	162.40	112.9	91.65	79.10	71.52		116.80				

MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS  
RUPTURA CATASTROFICA DE RECIPIENTE Y LINEA  
ESTABILIDAD ATMOSFERICA "C/D" (FAVORABLE)  
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II

Dib. No. 006660    REV 0



VIENTOS REINANTES

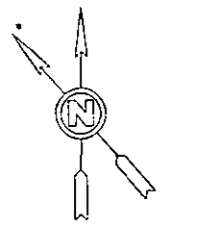


**NOTAS**

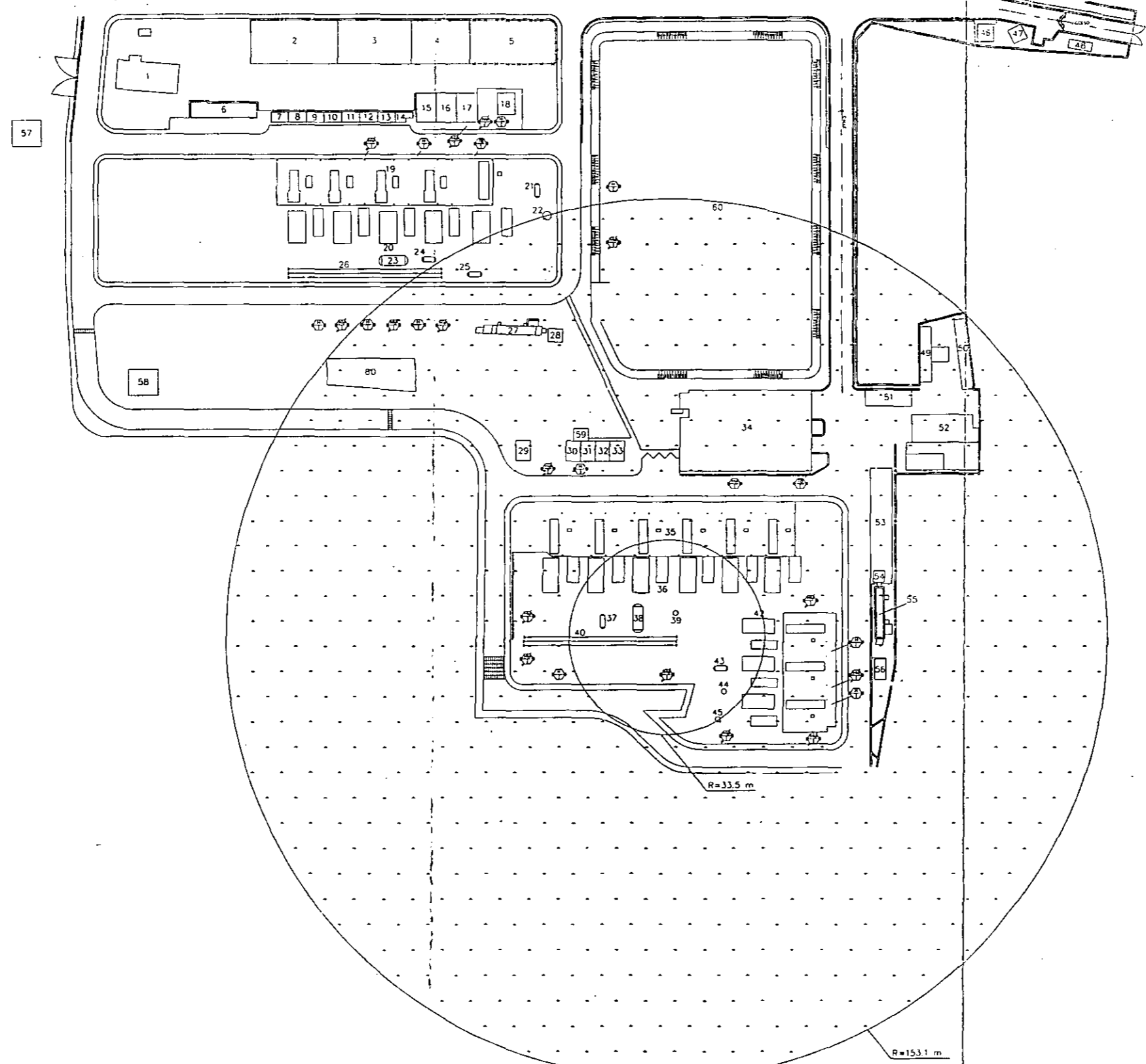
- 1.- NIVEL DE SOBREPRESION CONSIDERADO 3 PSIG. DAÑOS MENORES A INSTALACIONES EQUIPO DE PROCESO. (VER MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS)
- 2.- ESTABILIDAD "F" Y VELOCIDAD DEL VIENTO 1.5 m/s
- 3.- ZONA DE AFECTACION  MINIMA  MAXIMA
- 4.- LA ZONA DE AFECTACION MINIMA CORRESPONDE AL ESCENARIO DE FUGA DE GAS EN EL CABEZAL GENERAL DE DESCARGA DE GAS A.P. A C.P.G. CACTUS. CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 1/2" DE DIAMETRO.
- 5.- ZONA DE AFECTACION MAXIMA CORRESPONDEN AL ESCENARIO DE DERRAME DE CONDENSADOS EN EL CABEZAL GENERAL DE CONDENSADOS DE ALTA PRESION A BATERIA SAMARIA II. CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 2" DE DIAMETRO.

ZONA DE AFECTACION POR EXPLOSION  
ESTABILIDAD ATMOSFERICA "F" (CRITICA)  
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II

ESCALA 1:100 ACOT. EN MTS. Dib. No. 00667A REV 0



VIENTOS REINANTES

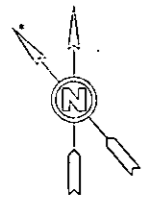


**NOTAS**

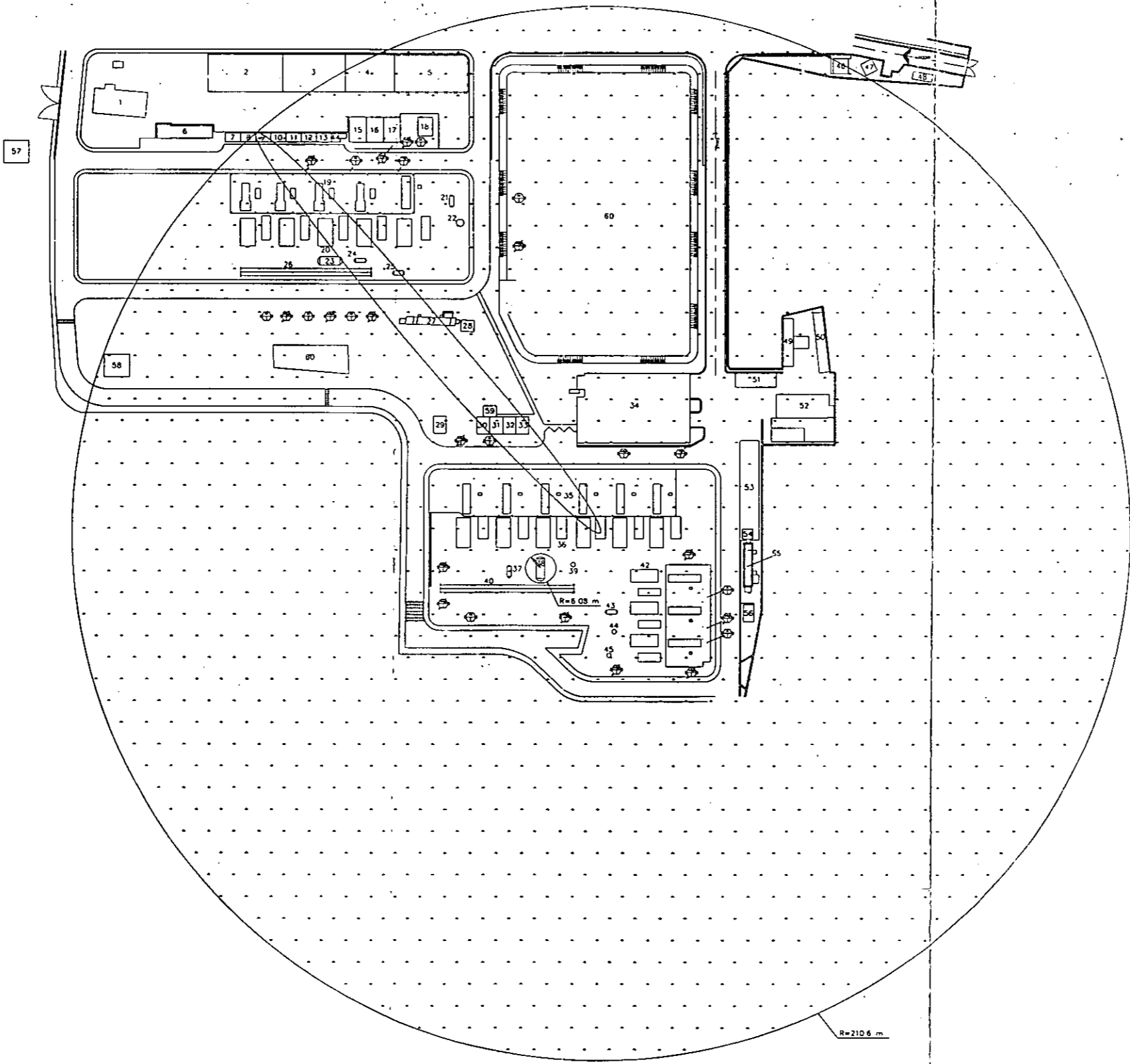
- 1.- NIVEL DE SOBRE PRESION CONSIDERADO 3 PSIG  
DAÑOS MENORES A INTALACIONES EQUIPO DE  
PROCESO.  
(VER MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS)
- 2.- ESTABILIDAD "C/D" Y VELOCIDAD DEL VIENTO  
6 m/s
- 3.- ZONA DE AFECTACION  
MINIMA   
MAXIMA
- 4.- LA ZONA DE AFECTACION MINIMA CORRESPONDE  
AL ESCENARIO DE FUCA DE GAS EN EL CABEZAL  
GENERAL DE DESCARGA DE GAS A.P. A C.P.G.  
CACTUS. CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 1/2"  
DE DIAMETRO.
- 5.- ZONA DE AFECTACION MAXIMA CORRESPONDEN AL  
ESCENARIO DE DERRAME DE CONDENSADOS EN EL  
CABEZAL GENERAL DE CONDENSADOS DE ALTA  
PRESION A BATERIA SAMARIA II. CON UNA FUGA  
POR ORIFICIO DE 2" DE DIAMETRO.

ZONA DE AFECTACION POR EXPLOSION  
ESTABILIDAD ATMOSFERICA "C/D" (FAVORABLE)  
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II





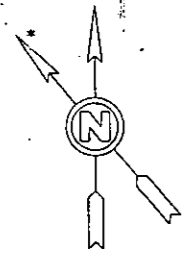
VIENTOS REINANTES



**NOTAS**

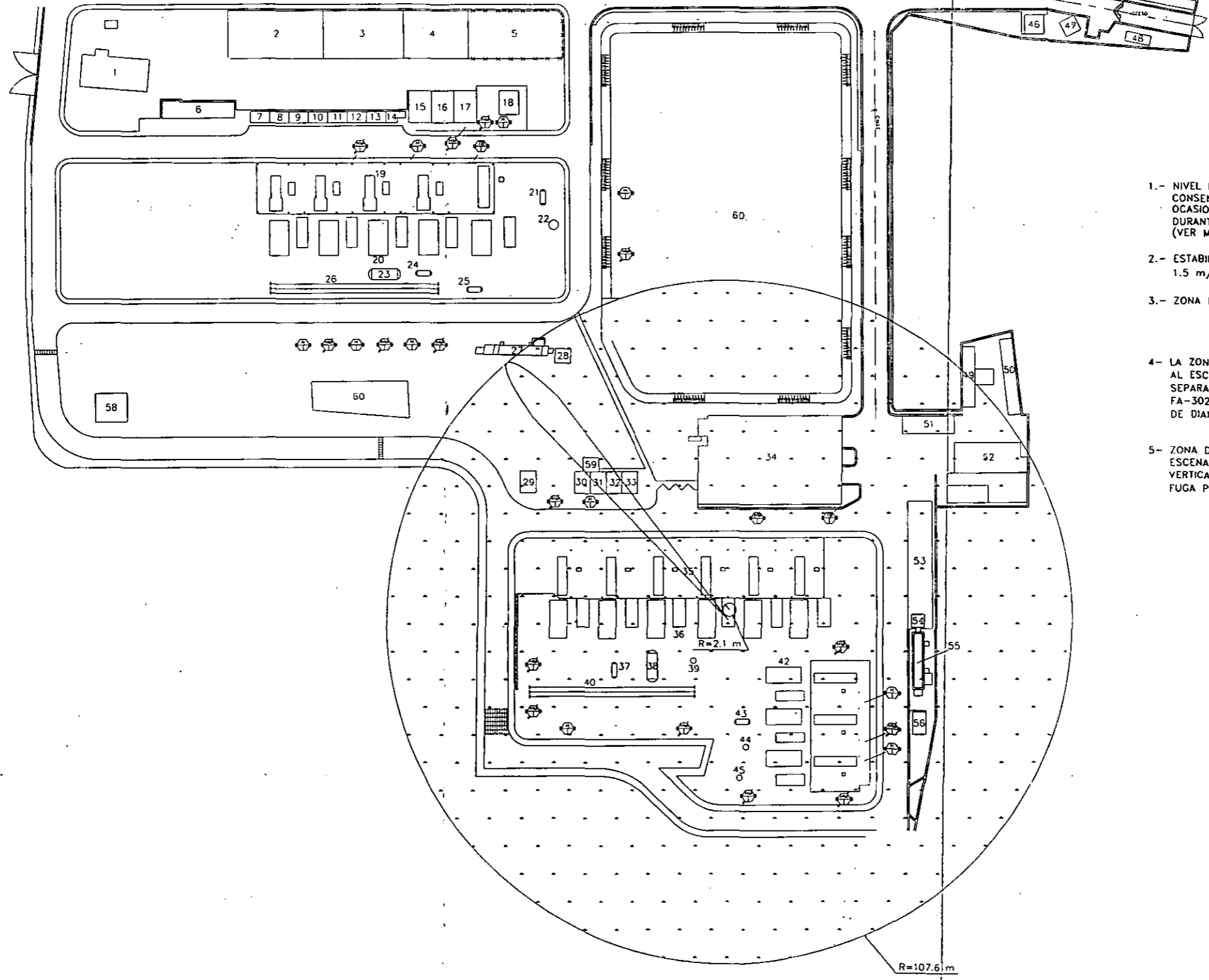
- 1.- NIVEL DE RADIACION CONSIDERANDO 12.5 KW/m<sup>2</sup> ENERGIA MINIMA PARA DESARROLLAR UN INCENDIO CONTROLABLE, 1X LETAL EN 1 MINUTO. (VER MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS)
- 2.- ESTABILIDAD "C/D" Y VELOCIDAD DEL VIENTO 6 m/s
- 3.- ZONA DE AFECTACION  MINIMA  MAXIMA
- 4.- LA ZONA DE AFECTACION MINIMA CORRESPONDE AL ESCENARIO DE FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR GENERAL DE SUCCION FA-100A, CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 1/2" DE DIAMETRO.
- 5.- ZONA DE AFECTACION MAXIMA CORRESPONDEN AL ESCENARIO DE DERRAME DE CONDENSADOS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA 3ro. ETAPA FA-303A, CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 2" DE DIAMETRO.

ZONA DE AFECTACION POR FUEGO ESTABILIDAD ATMOSFERICA "C/D" (FAVORABLE) ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II		
ESCALA 1:100 ACOT. EN MTS.	Dico. No. 00667D	REV 0



VIENTOS REINANTES

57

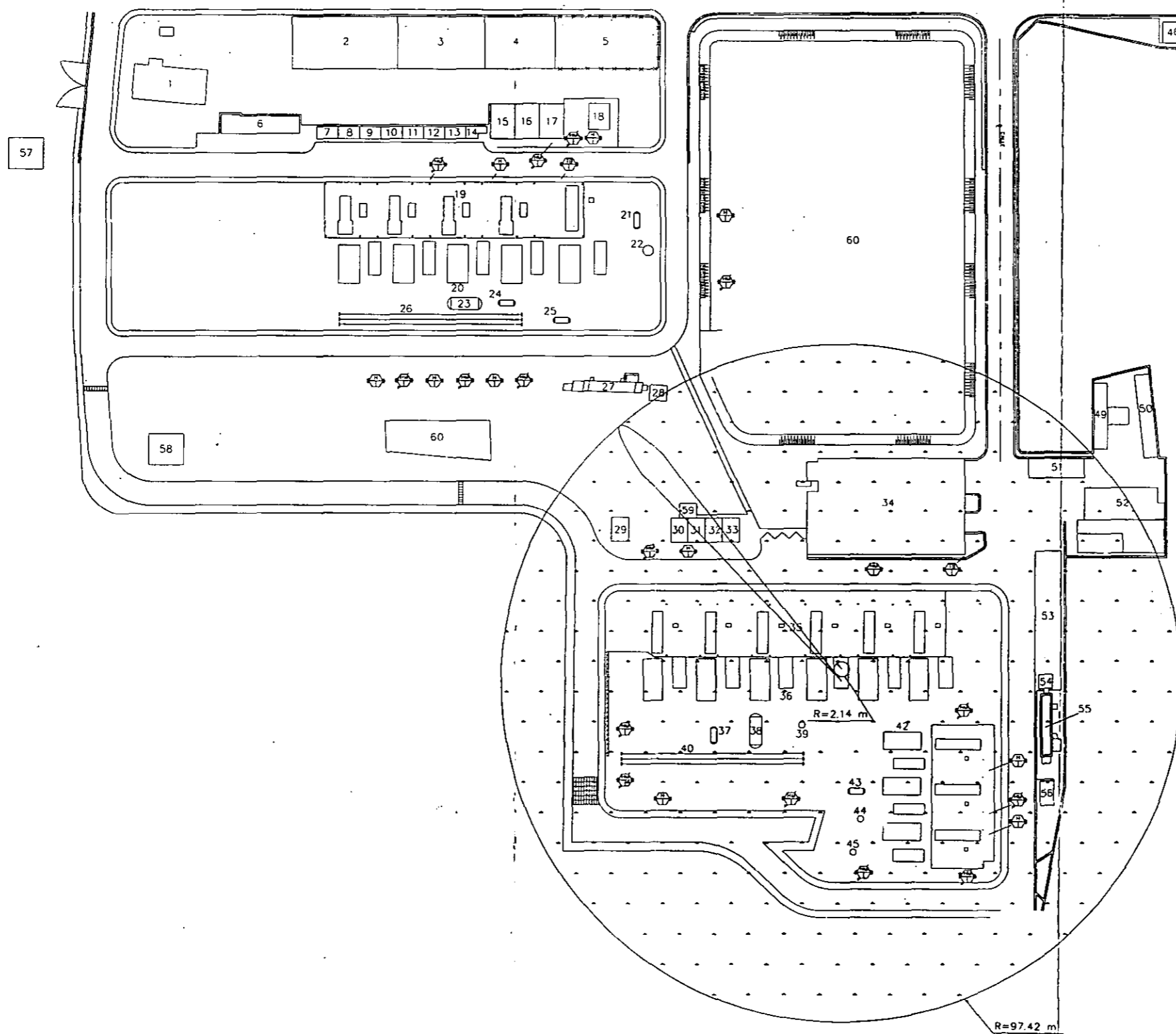
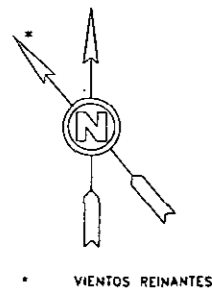


**NOTAS**

- 1.- NIVEL DE TOXICIDAD IDLH H<sub>2</sub>S 300 PPM CON CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE QUE NO OCASIONA EFECTO IRREVERSIBLES A LA SALUD DURANTE UN TIEMPO DE EXPOSICION DE 30 MIN. (VER MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS)
- 2.- ESTABILIDAD "F" Y VELOCIDAD DEL VIENTO 1.5 m/s
- 3.- ZONA DE AFECTACION  
 MINIMA   
 MAXIMA
- 4.- LA ZONA DE AFECTACION MINIMA CORRESPONDE AL ESCENARIO DE DERRAME DE CONDENSADO EN SEPARADOR VERTICAL DE LA SEGUNDA ETAPA FA-302A. CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 1/2" DE DIAMETRO.
- 5.- ZONA DE AFECTACION MAXIMA CORRESPONDEN AL ESCENARIO DE FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR VERTICAL DE LA 3ra. ETAPA FA-303A, CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 2" DE DIAMETRO.

ZONA DE AFECTACION POR TOXICIDAD  
 ESTABILIDAD ATMOSFERICA "F" (CRITICA)  
 ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II

ESCALA: 1:100  
 ACT. EM. MTS. Dib. No. 00667F REV 0



**NOTAS**

- 1.- NIVEL DETOXICIDAD IDLH H<sub>2</sub>S PPM CON CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE QUE NO OCASIONA EFECTOS IRREVERSIBLES A LA SALUD DURANTE UN TIEMPO DE EXPOSICION DE 30 MINUTOS (VER MATRIZ DE CAUSAS Y CONSECUENCIAS)
- 2.- ESTABILIDAD "C/D" Y VELOCIDAD DEL VIENTO 6 m/s
- 3.- ZONA DE AFECTACION
 

MINIMA	
MAXIMA	
- 4.- LA ZONA DE AFECTACION MINIMA CORRESPONDE AL ESCENARIO DE DERRAME DE CONDENSADOS EN SEPARADOR VERTICAL DE LA SEGUNDA ETAPA FA-302A, CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 1/2" DE DIAMETRO.
- 5.- ZONA DE AFECTACION MAXIMA CORRESPONDEN AL ESCENARIO DE FUGA DE GAS EN EL SEPARADOR DE LA 3ra. ETAPA FA-303A, CON UNA FUGA POR ORIFICIO DE 2" DE DIAMETRO.

ZONA DE AFECTACION POR TOXICIDAD ESTABILIDAD ATMOSFERICA "C/D" (FAVORABLE) ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II		
ESCALA: 1:120 ACOT. EN MTS.	Dib. No. 00667F	REV 0



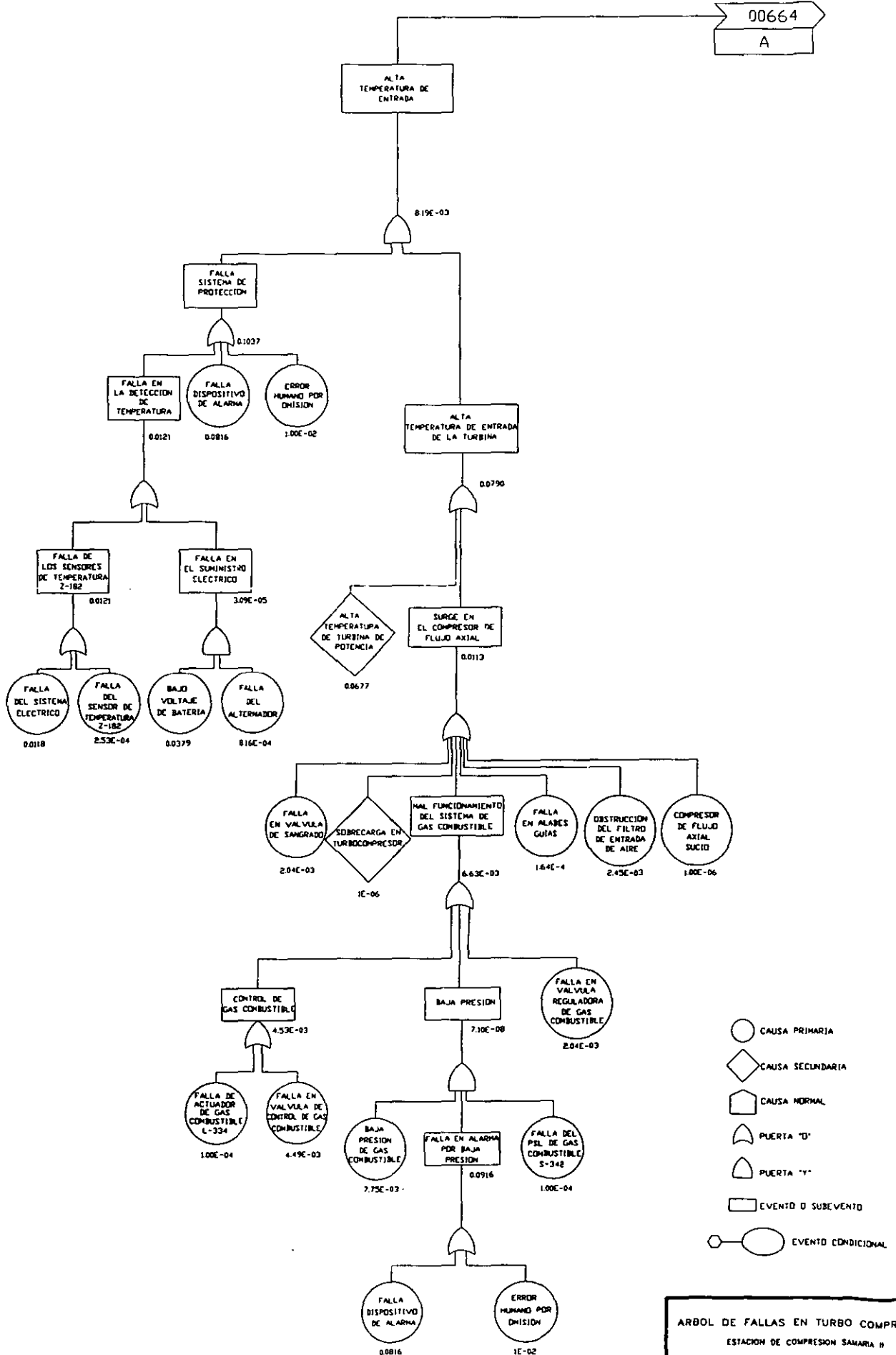
## **ANEXO E**

### **ÁRBOL DE FALLAS**



00664

A

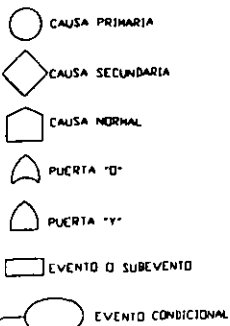
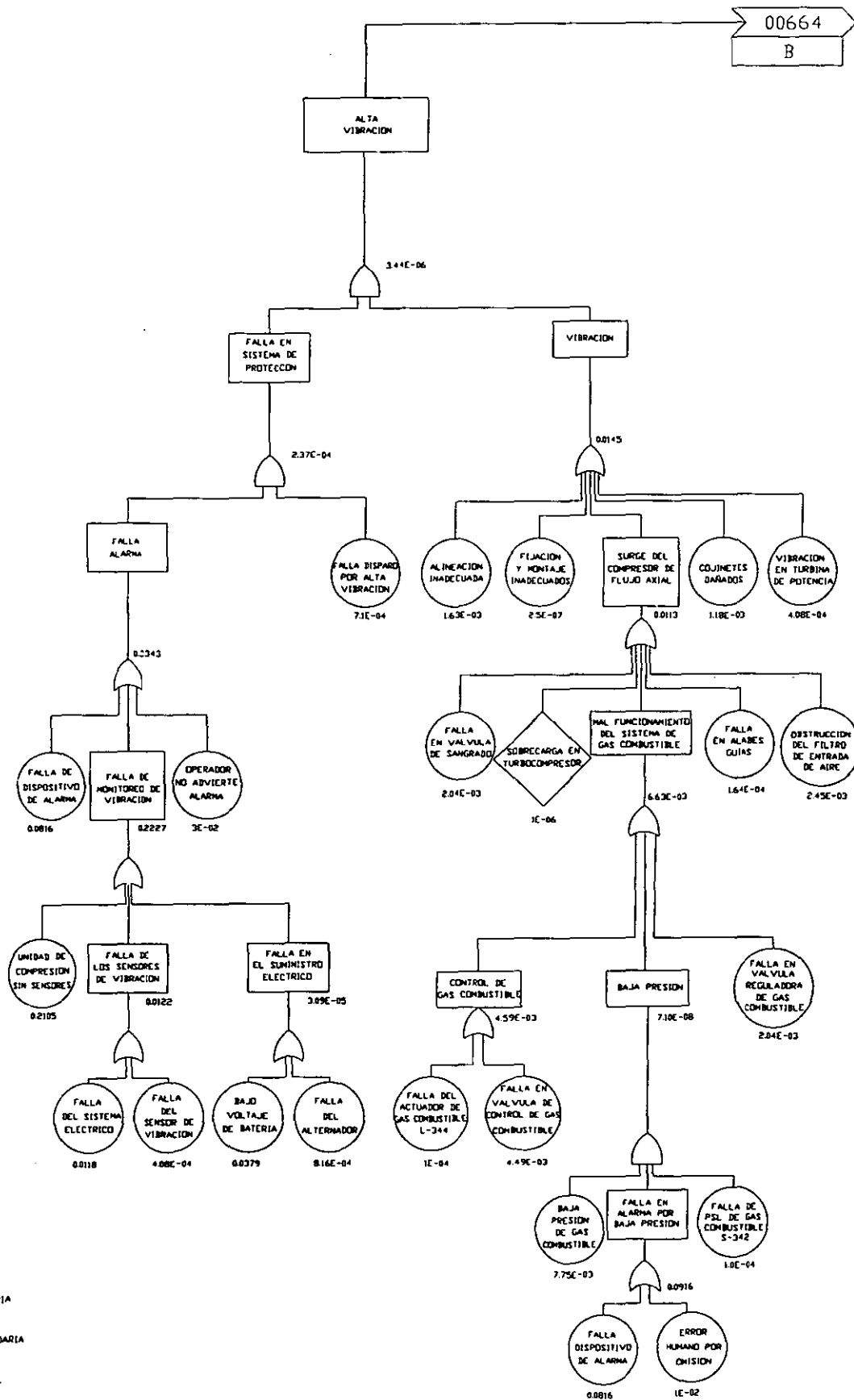


- CAUSA PRIMARIA
- ◇ CAUSA SECUNDARIA
- CAUSA NORMAL
- ⌋ PUERTA "D"
- ⌋ PUERTA "Y"
- EVENTO O SUBEVENTO
- EVENTO CONDICIONAL

**ARBOL DE FALLAS EN TURBO COMPRESOR**  
 ESTACION DE COMPRESION SAMARA II

00664

B



ARBOL DE FALLAS EN TURBO COMPRESOR  
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA N

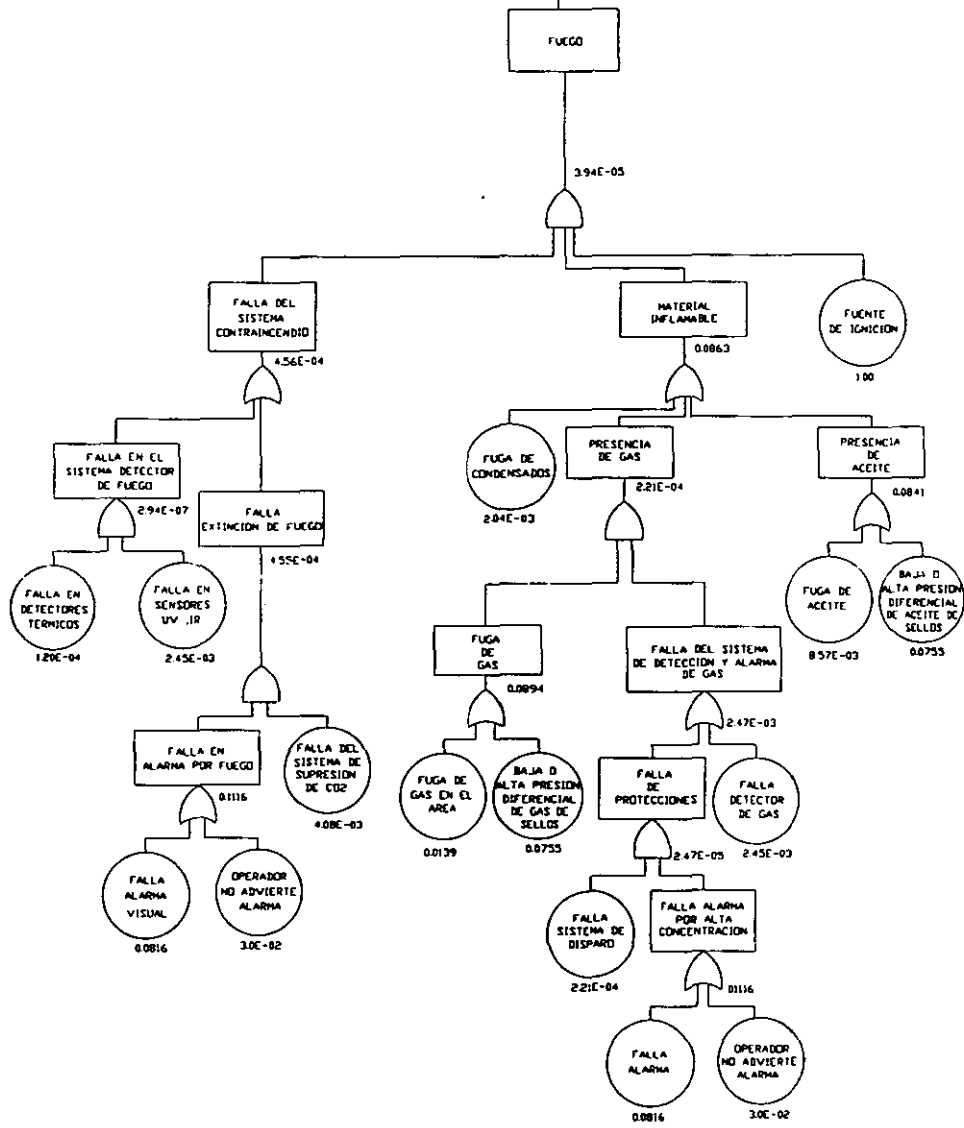
ESCM-  
ACDT. Em

Dib. No. 00664B

REV. 0



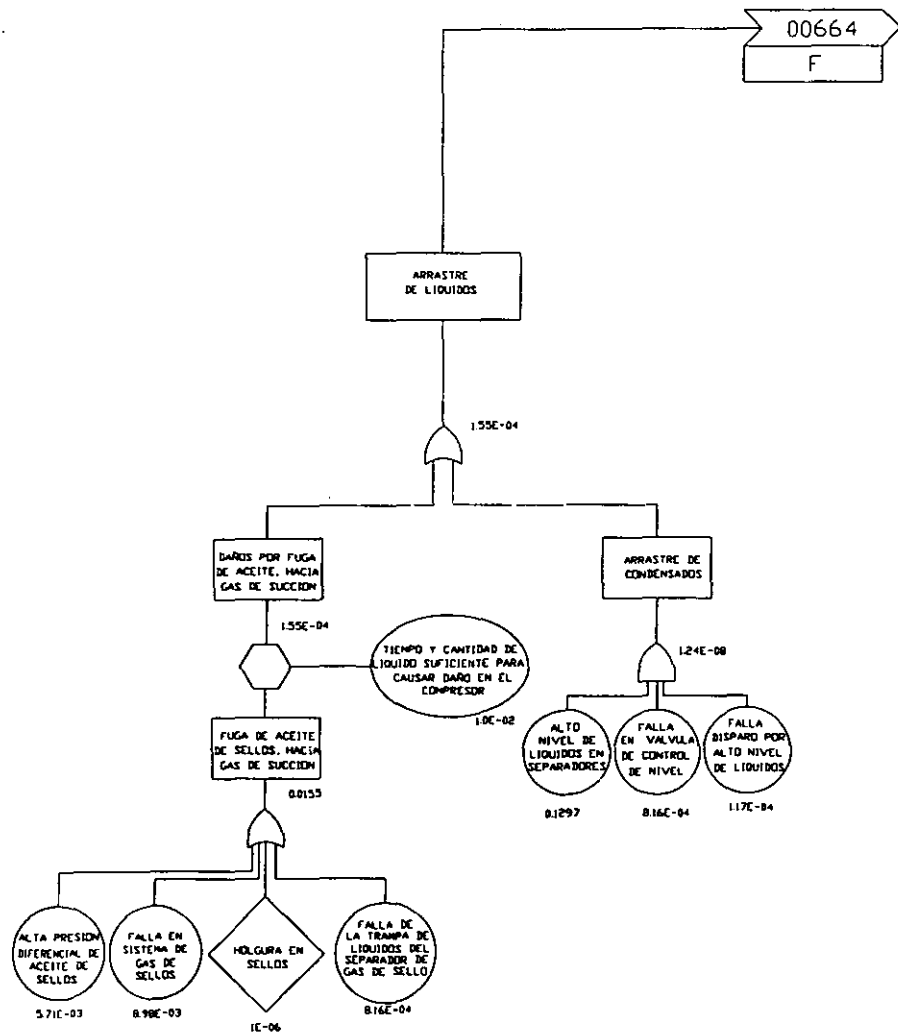
00664  
D



- CAUSA PRIMARIA
- ◇ CAUSA SECUNDARIA
- CAUSA NORMAL
- ⤴ PUERTA 'D'
- ⤵ PUERTA 'Y'
- ▭ EVENTO O SUBEVENTO
- EVENTO CONDICIONAL

ARBOL DE FALLAS EN TURBO COMPRESOR  
ESTACION DE COMPRESION SAMARIA

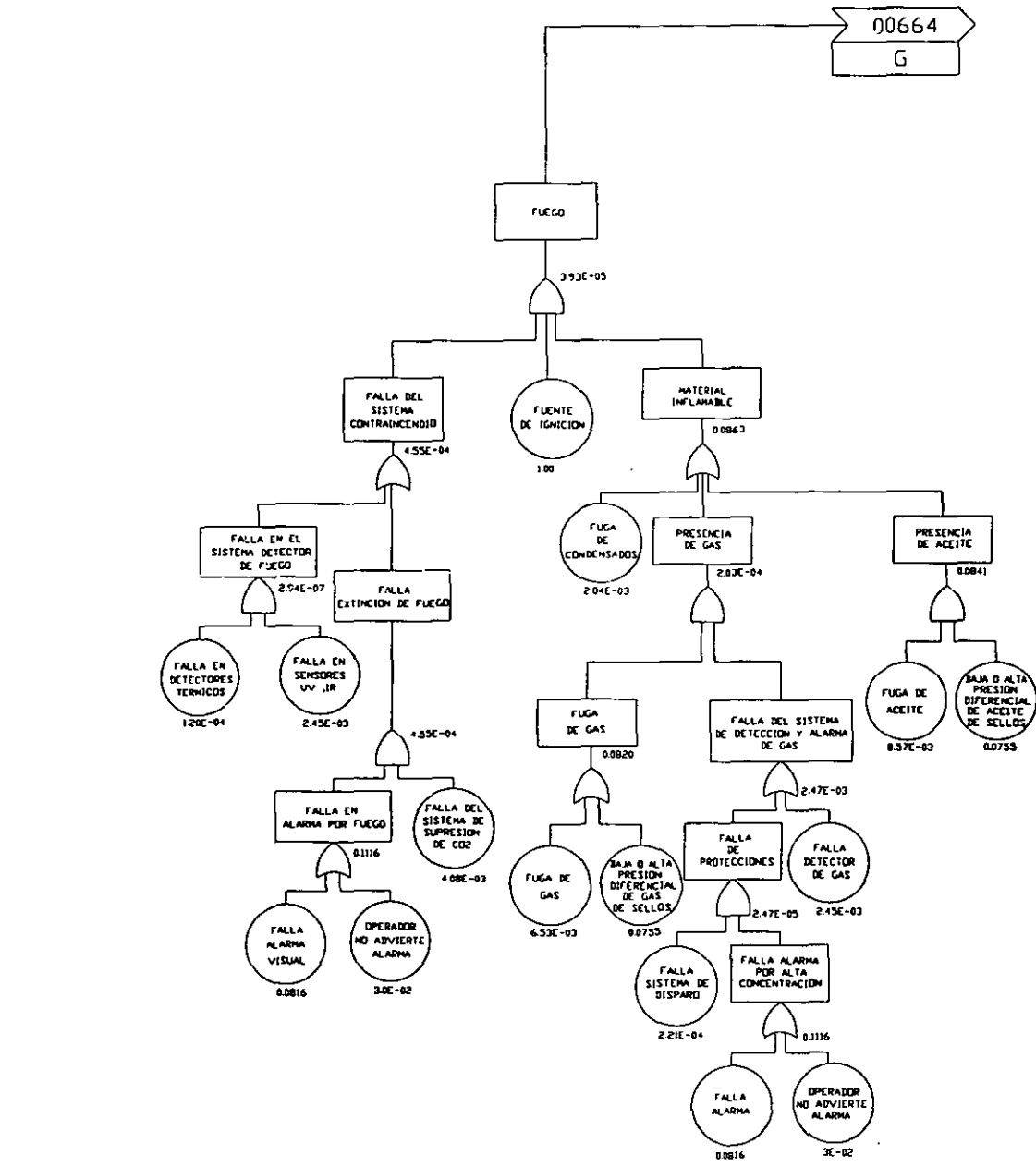




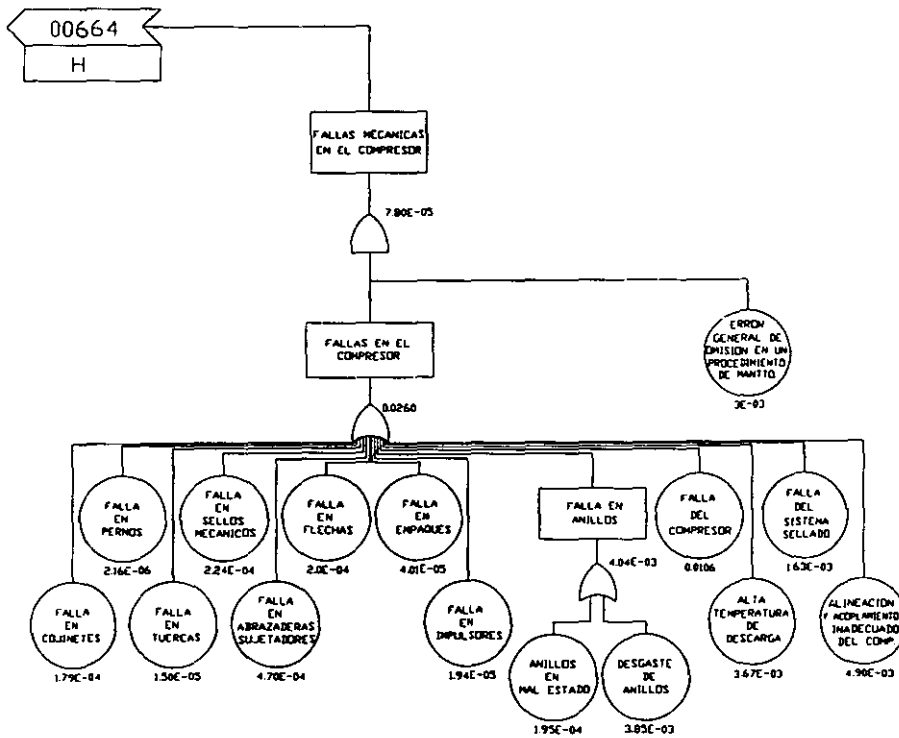
- CAUSA PRIMARIA
- ◇ CAUSA SECUNDARIA
- CAUSA NORMAL
- ⤴ PUERTA "O"
- ⤵ PUERTA "Y"
- ▭ EVENTO O SUBEVENTO
- EVENTO CONDICIONAL

ARBOL DE FALLAS EN TURBO COMPRESOR  
 ESTACION DE COMPRESION SANARIA II

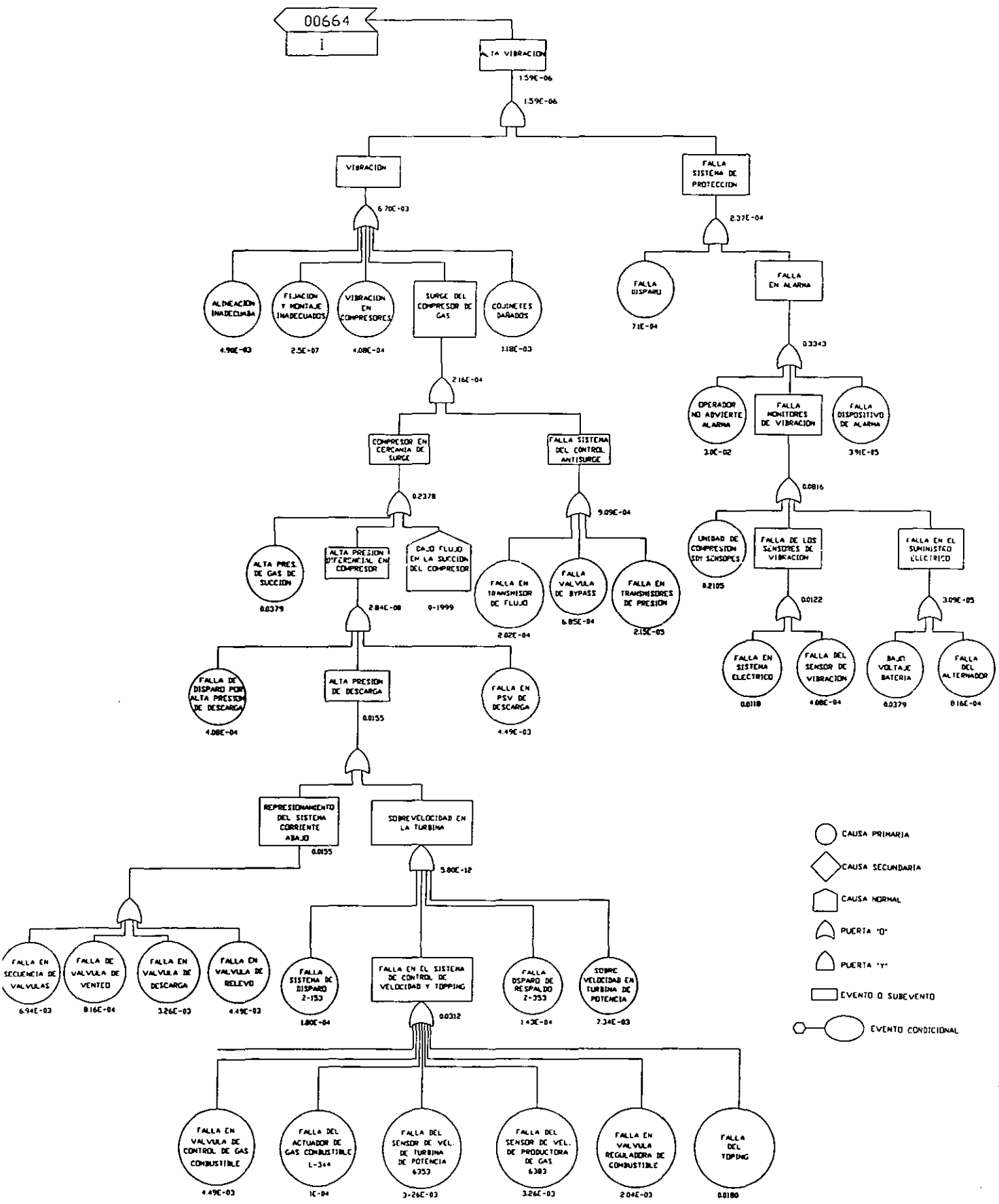




- CAUSA PRIMARIA
- ◇ CAUSA SECUNDARIA
- CAUSA NORMAL
- ⤴ PUERTA "0"
- ⤵ PUERTA "1"
- ▭ EVENTO O SUBEVENTO
- EVENTO CONDICIONAL



- CAUSA PRIMARIA
- ◇ CAUSA SECUNDARIA
- CAUSA NORMAL
- ∩ PUERTA "O"
- ∪ PUERTA "Y"
- ▭ EVENTO O SUBEVENTO
- EVENTO CONDICIONAL



**ARBOL DE FALLAS EN TURBO COMPRESOR**  
 ESTACION DE COMPRESION SAMARIA II  
 ESCALA: 1/1000  
 Dib. No. 006641  
 OFV. A

## **A N E X O F**

### **VALORES IDLH Y ERPG PARA MATERIALES TÓXICOS**

VALORES IDLH PARA MATERIALES TÓXICOS

Substancia	Valor IDLH	Substancia	Valor IDLH
Acetaldehyde	2,000 ppm	Chloropicrin	2 ppm
Acetic acid	50 ppm	Cumene	900 ppm [LEL]
Acetic anhydride	200 ppm	Cyclohexane	1,300 ppm [LEL]
Acetone	2,500 ppm [LEL]	Cyclohexanone	700 ppm
Acetonitrile	500 ppm	Cyclohexene	2,000 ppm
Acrolein	2 ppm	Diacetone alcohol	1,800 ppm [LEL]
Acrylonitrile	85 ppm	Diborane	15 ppm
Allyl alcohol	20 ppm	Dichlorodifluoromethane	15,000 ppm
Allyl chloride	250 ppm	1,1-Dichloroethane	3,000 ppm
Ammonia	300 ppm	Diethylamine	200 ppm
Aniline	100 ppm [Unch]	Diisobutyl ketone	500 ppm
Arsenic (inorganic compounds, as As)	5 mg As/m <sup>3</sup>	Dimethyl acetamide	300 ppm
Benzene	500 ppm	Dimethylamine	500 ppm
Benzyl chloride	10 ppm [Unch]	Dimethylformamide	500 ppm
Boron oxide	2,000 mg/m <sup>3</sup>	Dimethylphthalate	2,000 mg/m <sup>3</sup>
Boron trifluoride	25 ppm	Dinitrotoluene	50 mg/m <sup>3</sup>
Bromine	3 ppm	Diphenyl	100 mg/m <sup>3</sup>
1,3-Butadiene	2,000 ppm [LEL]	Epichlorohydrin	75 ppm
2-Butanone	3,000 ppm [Unch]	Ethyl acetate	2,000 ppm [LEL]
n-Butyl acetate	1,700 ppm [LEL]	Ethyl acrylate	300 ppm
n-Butyl alcohol	1,400 ppm [LEL]	Ethyl alcohol	3,300 ppm [LEL]
n-Butylamine	300 ppm	Ethylamine	600 ppm
n-Butyl glycidyl ether	250 ppm	Ethyl benzene	800 ppm [LEL]
p-tert-Butyltoluene	100 ppm	Ethyl bromide	2,000 ppm
Calcium oxide	25 mg/m <sup>3</sup>	Ethyl chloride	3,800 ppm [LEL]
Carbon disulfide	500 ppm [Unch]	Ethylenediamine	1,000 ppm
Carbon monoxide	1,200 ppm	Ethylene oxide	800 ppm [Unch]
Carbon tetrachloride	200 ppm	Ethyl mercaptan	500 ppm
Chlorine	10 ppm	Fluorine	25 ppm [Unch]
Chlorine dioxide	5 ppm	Formaldehyde	20 ppm
Chlorine trifluoride	20 ppm [Unch]	Formic acid	30 ppm [Unch]
Chloroacetaldehyde	45 ppm	n-Heptane	750 ppm
Chlorobenzene	1,000 ppm	Hexachloroethane	300 ppm [Unch]
Chlorobromomethane	2,000 ppm	Hexachloronaphthalene	2 mg/m <sup>3</sup> [Unch]
Chloroform	500 ppm	n-Hexane	1,100 ppm [LEL]

VALORES IDLH PARA MATERIALES TÓXICOS

Substancia	Valor IDLH	Substancia	Valor IDLH
2-Hexanone	1,600 ppm	Methyl methacrylate	1,000 ppm
Hexone	500 ppm	Methyl styrene	700 ppm
Hydrazine	50 ppm	Nitric acid	25 ppm
Hydrogen bromide	30 ppm	Nitric oxide	100 ppm [Unch]
Hydrogen chloride	50 ppm	Nitrobenzene	200 ppm [Unch]
Hydrogen cyanide	50 ppm [Unch]	Nitroglycerine	75 mg/m <sup>3</sup>
Hydrogen fluoride (as F)	30 ppm [Unch]	Perchloryl fluoride	100 ppm
Hydrogen peroxide	75 ppm [Unch]	Petroleum distillates (naphtha)	1,100 ppm [LEL]
Hydrogen sulfide	100 ppm	Phenol	250 ppm [Unch]
Hydroquinone	50 mg/m <sup>3</sup>	Phosgene	2 ppm [Unch]
Isoamyl acetate	1,000 ppm	Phosphoric acid	1,000 mg/m <sup>3</sup>
Isobutyl acetate	1,300 ppm [LEL]	Phosphorus pentachloride	70 mg/m <sup>3</sup>
Isopropyl ether	1,400 ppm [LEL]	Phthalic anhydride	60 mg/m <sup>3</sup>
L.P.G.	2,000 ppm [LEL]	Propane	2,100 ppm [LEL]
Methyl acetate	3,100 ppm [LEL]	n-Propyl acetate	1,700 ppm
Methyl acetylene	1,700 ppm [LEL]	n-Propyl alcohol	800 ppm
Methyl acrylate	250 ppm	Propylene oxide	400 ppm
Methyl alcohol	6,000 ppm	Sodium hydroxide	10 mg/m <sup>3</sup>
Methylamine	100 ppm [Unch]	Styrene	700 ppm
Methyl bromide	250 ppm	Sulfur dioxide	100 ppm [Unch]
Methyl chloride	2,000 ppm	Sulfuric acid	15 mg/m <sup>3</sup>
Methyl chloroform	700 ppm	Sulfur pentafluoride	1 ppm [Unch]
Methylcyclohexane	1,200 ppm [LEL]	Sulfuryl fluoride	200 ppm
Methylcyclohexanol	500 ppm	Tetrachloroethylene	150 ppm
o-Methylcyclohexanone	600 ppm	Titanium dioxide	5,000 mg/m <sup>3</sup>
Methylene bisphenyl isocyanate	75 mg/m <sup>3</sup>	Toluene	500 ppm
Methylene chloride	2,300 ppm	o-Toluidine	50 ppm
Methyl hydrazine	20 ppm	1,1,2-Trichloroethane	100 ppm
Methyl iodide	100 ppm	Trichloroethylene	1,000 ppm [Unch]
Methyl isobutyl carbinol	400 ppm	Trichloronaphthalene	Unknown [Unch]
Methyl isocyanate	3 ppm	Triethylamine	200 ppm
Methyl mercaptan	150 ppm	Uranium (soluble compounds, as U)	10 mg U/m <sup>3</sup>

**VALORES ERPG PARA MATERIALES TÓXICOS**

<b>Material</b>	<b>ERPG-1<sup>a</sup></b>	<b>ERPG-2<sup>b</sup></b>	<b>ERPG-3<sup>c</sup></b>
Acetaldehyde	10 ppm	200 ppm	1000 ppm
Acrolein	0.1 ppm	0.5 ppm	3 ppm
Acrylic acid	2 ppm	50 ppm	750 ppm
Acrylonitrile	NA <sup>d</sup>	35 ppm	75 ppm
Allyl chloride	3 ppm	40 ppm	300 ppm
Ammonia	25 ppm	200 ppm	1000 ppm
Benzene	50 ppm	150 ppm	1000 ppm
Benzyl chloride	1 ppm	10 ppm	25 ppm
Bromine	0.2 ppm	1 ppm	5 ppm
1,3-Butadiene	10 ppm	50 ppm	5000 ppm
n-Butyl acrylate	0.05 ppm	25 ppm	250 ppm
n-Butyl isocyanate	0.01 ppm	0.05 ppm	1 ppm
Carbon disulfide	1 ppm	50 ppm	500 ppm
Carbon tetrachloride	20 ppm	100 ppm	750 ppm
Chlorine	1 ppm	3 ppm	20 ppm
Chlorine trifluoride	0.1 ppm	1 ppm	10 ppm
Chloroacetyl chloride	0.1 ppm	1 ppm	10 ppm
chloropocrin	NA <sup>d</sup>	0.2 ppm	3 ppm
Chlorosulfonic acid	2 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>	30 mg/m <sup>3</sup>
Chlorotrifluoroethylene	20 ppm	100 ppm	300 ppm
Crotonaldehyde	2 ppm	10 ppm	50 ppm
Diborane	NA <sup>d</sup>	1 ppm	3 ppm
Diketene	1 ppm	5 ppm	50 ppm
Dimethylamine	1 ppm	100 ppm	500 ppm
Dimethyl dichlorosilane	0.8 ppm	5 ppm	25 ppm
Dimethyl disulfide	0.01 ppm	50 ppm	250 ppm
Dimethyl sulfide	0.5 ppm	500 ppm	2000 ppm
Epichlorohydrin	2 ppm	20 ppm	100 ppm
Ethylene oxide	NA <sup>d</sup>	50 ppm	500 ppm
Formaldehyde	1 ppm	10 ppm	25 ppm
Hexachlorobutadiene	3 ppm	10 ppm	30 ppm
Hexafluoroacetone	NA <sup>d</sup>	1 ppm	50 ppm
Hexafluoropropylene	10 ppm	50 ppm	500 ppm
Hydrogen chloride	3 ppm	20 ppm	100 ppm
Hydrogen cyanide	NA <sup>d</sup>	10 ppm	25 ppm
Hydrogen fluoride	2 ppm	20 ppm	50 ppm
Hydrogen sulfide	0.1 ppm	30 ppm	100 ppm
Isobutyronitrile	10 ppm	50 ppm	200 ppm
2-Isocyanatoethyl methacrylate	NA <sup>d</sup>	0.1 ppm	1 ppm

Material	ERPG-1 <sup>a</sup>	ERPG-2 <sup>b</sup>	ERPG-3 <sup>c</sup>
Lithium hydride	25 µg/m <sup>3</sup>	100 µg/m <sup>3</sup>	500 µg/m <sup>3</sup>
Methanol	200 ppm	1000 ppm	5000 ppm
Methyl chloride	NA <sup>d</sup>	400 ppm	1000 ppm
Methylene chloride	200 ppm	750 ppm	4000 ppm
Methyl iodide	25 ppm	50 ppm	125 ppm
Methyl isocyanate	0.025 ppm	0.5 ppm	5 ppm
Methyl mercaptan	0.005 ppm	25 ppm	100 ppm
Methyl trichlorosilane	0.5 ppm	3 ppm	15 ppm
Monomethylamine	10 ppm	100 ppm	500 ppm
Perfluoroisobutylene	NA <sup>d</sup>	0.1 ppm	0.3 ppm
Phenol	10 ppm	50 ppm	200 ppm
Phosgene NA <sup>d</sup>	NA <sup>d</sup>	0.2 ppm	1 ppm
Phosphorous pentoxide	5 mg/m <sup>3</sup>	25 mg/m <sup>3</sup>	100 mg/m <sup>3</sup>
Propylene oxide	50 ppm	250 ppm	750 ppm
Styrene	50 ppm	250 ppm	1000 ppm
Sulfur dioxide	0.3 ppm	3 ppm	15 ppm
Sulfuric acid (oleum, sulfur trioxide, and sulfuric acid)	2 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>	30 mg/m <sup>3</sup>
Tetrafluoroethylene	200 ppm	1000 ppm	10,000 ppm
Titanium tetrachloride	5 mg/m <sup>3</sup>	20 mg/m <sup>3</sup>	100 mg/m <sup>3</sup>
Toluene	50 ppm	300 ppm	1000 ppm
Trimethylamine	0.1 ppm	100 ppm	500 ppm
Uranium hexafluoride	5 mg/m <sup>3</sup>	15 mg/m <sup>3</sup>	30 mg/m <sup>3</sup>
Vinyl acetate	5 ppm	75 ppm	500 ppm

<sup>a</sup> ERPG-1 está definido como la máxima concentración en el aire bajo la cual se cree, que todos los individuos pueden estar expuestos por más de una hora sin experimentar efectos moderadamente adversos a la salud o sin percibir un olor objeccionable claramente definido.

<sup>b</sup> ERPG-2 está definido como la máxima concentración en el aire bajo la cual se cree que todos los individuos que estén cerca, pueden estar expuestos más de una hora sin experimentar o desarrollar efectos irreversibles o serios a la salud, o síntomas los cuales podrían deteriorar la habilidad de un individuo para tomar una acción de protección.

<sup>b</sup> ERPG-3 está definido como la máxima concentración en el aire bajo la cual se cree que todos los individuos que estén cerca, pueden estar expuestos por más de una hora sin experimentar o desarrollar efectos a la salud que pongan en peligro la vida.

<sup>d</sup> El ERPG-1 es inapropiado porque el olor o la concentración de irritación es mayor que la correspondiente al valor ERPG-2 para este químico.