

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK**

**FACULTAD DE CIENCIAS DEL TRABAJO Y  
COMPORTAMIENTO HUMANO**

Trabajo de fin de carrera titulado:

**“EVALUACION DEL RIESGO DEBIDO A UNA ATMOSFERA  
EXPLOSIVA EN EL AREA DE TANQUES DE PROCESO DE  
UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CRUDO EN EL  
ORIENTE ECUATORIANO”**

Realizado por:

**JORGE JAVIER GALABAY SUCUZHAGÑAY**

Director del proyecto:

**ALONSO ARIAS B.**

Como requisito para la obtención del título de:

**MAGISTER EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y SALUD OCUPACIONAL**

Quito, 23 de Julio del 2015



## **DECLARACION JURAMENTADA**

Yo, JORGE JAVIER GALABAY SUCUZHAGÑAY, con cédula de identidad # 171036451-2, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jorge Javier Galabay Sucuzhagñay

C.C.: 171036451-2

## **DECLARATORIA**

El presente trabajo de investigación titulado:

**“EVALUACION DEL RIESGO DEBIDO A UNA ATMOSFERA EXPLOSIVA EN  
EL AREA DE TANQUES DE PROCESO DE UNA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE CRUDO EN EL ORIENTE ECUATORIANO”**

Realizado por:

**JORGE JAVIER GALABAY SUCUZHAGÑAY**

como Requisito para la Obtención del Título de:

**MAGISTER EN SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL**

ha sido dirigido por el profesor

**ALONSO ARIAS B.**

quien considera que constituye un trabajo original de su autor

Alonso Arias B.

**DIRECTOR**

## **DECLARATORIA PROFESORES INFORMANTES**

Los Profesores Informantes:

**CARLOS JUAN CANCHIG LOYA**

**LUIS FERNANDO FREIRE CONSTANTE**

Después de revisar el trabajo presentado,  
lo han calificado como apto para su defensa oral ante  
el tribunal examinador

**Carlos Juan Canchig L.**

**Luis Fernando Freire C.**

Quito, 8 de julio del 2015

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mi madre Aleja, ejemplo de amor, trabajo y perseverancia.

A mi padre Manuel, por enseñarme que en la vida hay tropiezos,

pero hay que saberlos superar.

A mi esposa Sandra, por soportar esas horas dedicadas exclusivamente

a la elaboración de este trabajo.

## **AGRADECIMIENTO**

Al profesor Alonso Arias, por ayudarme a encaminar la presente investigación.

A la Empresa, por su apoyo necesario para continuar con mi crecimiento profesional.

A cada uno de los compañeros de trabajo, por sus aportes en el proceso de investigación.

A la Universidad Internacional SEK, por brindarme la oportunidad de culminar el MSSO.

## CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XV
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT .....	XVII
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.1.1 Diagnóstico problema.....	2
1.1.1.2 Pronóstico .....	2
1.1.1.3 Control de pronóstico .....	2
1.1.2 Formulación del problema (Pregunta de la investigación) .....	3
1.1.3 Sistematización del problema (Preguntas directrices) .....	3
1.1.4 Objetivo General.....	3
1.1.5 Objetivos Específicos.....	4
1.1.6 Justificaciones .....	4
1.1.6.1 Justificación Teórica.....	4
1.1.6.2 Justificación Metodológica.....	4
1.1.6.3 Justificación Práctica .....	5
1.1.6.4 Justificación Legal.....	5
1.1.6.5 Relevancia Social .....	5
1.2    MARCO TEÓRICO.....	6
1.2.1 Estado actual del conocimiento sobre el tema .....	11
1.2.1.1 Determinación del uso previsto .....	12
1.2.1.2 Identificación de peligros, eventos y situaciones riesgosas.....	13
1.2.1.3 Estimación del riesgo.....	15

1.2.1.4	Evaluación del riesgo.....	16
1.2.1.5	Análisis de las opciones para reducción del riesgo .....	16
1.2.1.6	Métodos y / o técnicas disponibles para el análisis de riesgos .....	18
1.2.2	Adopción de una perspectiva teórica .....	19
1.2.2.1	Descripción del lugar de trabajo.....	20
1.2.2.2	Identificación de las sustancias y las fuentes de escape .....	21
1.2.2.3	Cálculo de la tasa de liberación .....	26
1.2.2.4	Estimación de la dimensión de la nube .....	46
1.2.2.5	Identificación de las fuentes de ignición y estimación de la probabilidad de ignición	53
1.2.2.6	Cálculo de las frecuencias y consecuencias de explosión .....	62
1.2.2.7	Cálculo del riesgo .....	70
1.2.3	Marco Conceptual.....	78
1.2.4	Hipótesis .....	84
1.2.5	Identificación y caracterización de variables .....	84
CAPITULO II .....		86
METODO.....		86
2.1	NIVEL DE ESTUDIO.....	86
2.2	MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN .....	86
2.3	MÉTODO .....	87
2.4	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	87
2.5	SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	88
2.6	VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS .....	88
2.7	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES .....	89
2.8	PROCESAMIENTO DE DATOS .....	92
CAPITULO III .....		93
RESULTADOS.....		93
3.1	LEVANTAMIENTO DE DATOS / INFORMACIÓN .....	93
3.2	CASO DE ESTUDIO.....	97
CAPITULO IV .....		129
DISCUSION.....		129

4.1	CONCLUSIONES.....	129
4.2	RECOMENDACIONES .....	133
	ANEXO A.....	134
	ÁRBOL DE PROBLEMAS .....	134
	ANEXO B .....	135
	ÁRBOL DE OBJETIVOS.....	135
	ANEXO C .....	136
	EJEMPLO DE UNA LISTA DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS .....	136
	ANEXO D.....	137
	CARTAS UTILIZADAS EN EL MÉTODO MULTI-ENERGÍA .....	137
	ANEXO E .....	138
	RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO .....	138
	E.1 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE ESCAPE.....	139
	E.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS POSIBLES ESCAPES .....	143
	E.3 CARACTERIZACIÓN DE LA NUBE FORMADA POR LAS FUENTES DE ESCAPE .....	147
	E.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ZONAS ORIGINADAS POR LOS ESCAPES.....	151
	E.5 DIMENSIONES DE LAS ZONAS PELIGROSAS TÍPICAS .....	155
	E.6 PROBABILIDADES DE IGNICIÓN Y EXPLOSIÓN.....	157
	E.7 FRECUENCIA DE EVENTOS EN EL ÁREA DE TANQUES.....	162
	E.8 CONSECUENCIAS DE LA EXPLOSIÓN EN FUNCIÓN DE LAS DOSIS DE EXPOSICIÓN A SOBRE PRESIÓN .....	166
	E.9 CONSECUENCIAS DE LA EXPLOSIÓN EN EL CONTROL ROOM Y SHELTER DE GENERACIÓN.....	170
	REFERENCIAS .....	175

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Análisis de riesgos de un sistema de protección .....	15
Tabla 2 Clasificación de aberturas según su tipo .....	23
Tabla 3 Efecto de las aberturas en el grado de escape .....	23
Tabla 4 Designación de zonas según la probabilidad de formación y duración. ....	25
Tabla 5 Relación del grado de escape con la zona y frecuencia de formación de la atmósfera explosiva.....	26
Tabla 6 Estimaciones de las dimensiones de los escapes.....	27
Tabla 7 Estimaciones de las dimensiones de los escapes.....	28
Tabla 8 Clasificación del grado de ventilación .....	32
Tabla 9 Valores de ineficacia de ventilación en ambientes cerrados con ventilación natural o artificial .....	33
Tabla 10 Valores de ineficacia de ventilación en ambientes abiertos con ventilación .....	34
Tabla 11 Disponibilidad de la ventilación.....	35
Tabla 12 Clasificación de zonas según la ventilación.....	36
Tabla 13 Estimación de la presión de vapor .....	41
Tabla 14 Procedimiento para sumar escapes múltiples en un volumen $V_z$ .....	48
Tabla 15 Procedimiento para sumar fuentes de escape múltiples primarias.....	48
Tabla 16 Potencia de las fuentes de ignición .....	54
Tabla 17 Frecuencia de falla de accesorios .....	64
Tabla 18 Cálculo del riesgo individual .....	71
Tabla 19 Cálculo del riesgo agregado .....	73
Tabla 20 Matriz de variables independientes .....	90
Tabla 21 Matriz de variables dependientes .....	91
Tabla 22 Resumen de ecuaciones, tablas y figuras utilizadas en el procedimiento para la evaluación del riesgo de explosión.....	94
Tabla 23 Tiempo de permanencia del personal en el control room y shelter de generación de la planta .....	98

Tabla 24 Tiempo de ocupación del personal en el control room y shelter de generación de la planta .....	99
Tabla 25 Condiciones ambientales de la planta .....	100
Tabla 26 Parámetros de operación del área de tanques de proceso de la planta .....	100
Tabla 27 Características físico-químicas del crudo y gas natural .....	102
Tabla 28 Identificación de las posibles fuentes de escape .....	103
Tabla 29 Caracterización de los posibles escapes .....	104
Tabla 30 Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape.....	106
Tabla 31 Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape .....	107
Tabla 32 Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva.....	108
Tabla 33. Cálculo de las probabilidades de ignición y de explosión .....	113
Tabla 34 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en el área de tanques .....	115
Tabla 35. Distancias límite para efectos reversibles (sobre presión de 3000 Pa) y 1% de letalidad (sobre presión de 12500 Pa). .....	117
Tabla 36 Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en el área de tanques de la planta.....	119
Tabla 37 Máximo riesgo individual al que está expuesto el control room .....	121
Tabla 38 Máximo riesgo individual al que está expuesto el shelter.....	122
Tabla 39 Riesgo agregado al que está expuesto todo el personal que trabaja en el control room .....	123
Tabla 40 Frecuencia acumulada en función de las personas afectadas en el control room (input para el gráfico F – N) .....	124
Tabla 41 Riesgo agregado al que está expuesto todo el personal que trabaja en el shelter de generación .....	126
Tabla 42 Frecuencia acumulada en función de las personas afectadas en el shelter .....	127
Tabla 43 Ejemplo de lista de identificación de peligros .....	136
Tabla 44 Identificación de las posibles fuentes de escape tanque T-109.....	139
Tabla 45 Identificación de las posibles fuentes de escape tanque T-110A .....	140
Tabla 46 Identificación de las posibles fuentes de escape tanque T-110B .....	141
Tabla 47 Identificación de las posibles fuentes de escape bota de gas V-124 .....	142
Tabla 48 Identificación de las posibles fuentes de escape bota de gas V-125 .....	142
Tabla 49 Caracterización de los posibles escapes tanque T-109 .....	143
Tabla 50 Caracterización de los posibles escapes tanque T-110A.....	144

Tabla 51 Caracterización de los posibles escapes tanque T-110B.....	145
Tabla 52 Caracterización de los posibles escapes bota de gas V-124.....	146
Tabla 53 Caracterización de los posibles escapes bota de gas V-125.....	146
Tabla 54 Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en el tanque T-109 .....	147
Tabla 55 Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en el tanque T- 110A.....	148
Tabla 56 Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en el tanque T- 110B.....	149
Tabla 57 Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en la bota de gas V- 124.....	150
Tabla 58 Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en la bota de gas V- 125.....	150
Tabla 59 Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en el tanque T-109..	151
Tabla 60 Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en el tanque T-110A	152
Tabla 61 Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en el tanque T-110B	153
Tabla 62 Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en la bota de gas V-124 .....	154
Tabla 63 Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en la bota de gas V-125 .....	154
Tabla 64 Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva tanque T-109.....	155
Tabla 65 Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva tanque T-110A.....	155
Tabla 66 Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva tanque T-110B.....	156
Tabla 67 Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva bota de gas V-124.....	156
Tabla 68. Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva bota de gas V-125.....	156
Tabla 69 Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión en el tanque T- 109.....	157
Tabla 70 Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión en el tanque T- 110A.....	158

Tabla 71 Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión tanque en el T-110B .....	159
Tabla 72 Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión en la bota de gas V-124.....	160
Tabla 73 Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión en la bota de gas V-125.....	161
Tabla 74 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en el tanque T-109 .....	162
Tabla 75 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en el tanque T-110A .....	163
Tabla 76 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en el tanque T-110B .....	164
Tabla 77 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en la bota de gas V-124 .....	165
Tabla 78 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en la bota de gas V-125 .....	165
Tabla 79 Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en el tanque T-109 .....	166
Tabla 80 Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en el tanque T-110A.....	167
Tabla 81 Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en el tanque T-110B.....	168
Tabla 82 Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en bota de gas V-124 .....	169
Tabla 83 Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en bota de gas V-125 .....	169
Tabla 84 Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en el tanque T-109 .....	170
Tabla 85 Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en el tanque T-110A .....	171
Tabla 86 Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en el tanque T-110B.....	172
Tabla 87 Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en la bota V-124.....	173
Tabla 88 Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en la bota V-125.....	174

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de pérdidas producto de grandes accidentes en plantas de hidrocarburo – químicas .....	7
Figura 2 Diagrama de bloques para la evaluación del riesgo debido a la presencia de atmósferas explosivas.....	20
Figura 3 Gráfica para determinar $R^{0,2}$ .....	42
Figura 4 Delimitación del área peligrosa .....	43
Figura 5 Árbol de eventos para determinación de las frecuencias .....	65
Figura 6 Sobre presión versus vulnerabilidad .....	77
Figura 7 Identificación y caracterización de las variables .....	84
Figura 8 Modelo para la evaluación del riesgo de explosión.....	95
Figura 9 Layout de la planta de tratamiento de crudo, del caso estudio .....	101
Figura 10 Plano de clasificación de zonas en el área de tanques de proceso.....	110
Figura 11 Detalle de la clasificación de áreas de un tanque de almacenamiento, según norma API RP 505.....	111
Figura 12 Detalle de la clasificación de áreas de un recipiente a presión, según norma API RP 505.....	112
Figura 13 Árbol de eventos para el escape #15 del tanque T-109 .....	116
Figura 14 Valores de sobre presión en función del alcance por explosión de una nube formada por el escape # 2, en el tanque T-109.....	120
Figura 15 Curva F – N del riesgo agregado para las personas del control room .....	125
Figura 16 Curva F – N del riesgo agregado para las personas del shelter de generación .....	128
Figura 17 Árbol de problemas.....	134
Figura 18 Árbol de objetivos.....	135
Figura 19 Modelo de Multi-Energía TNO para explosiones de nubes de vapor.....	137

## RESUMEN

El presente trabajo se elaboró por la necesidad de disponer de un modelo cuantitativo para evaluar el riesgo de explosión en una planta de tratamiento de crudo. Se conoce que la explosión de una nube de vapor (VCE) puede ocurrir cuando se cumplen las siguientes condiciones: que el material sea inflamable y en condiciones adecuadas para formar una nube de vapor; que aparezca una fuente de ignición, diferida con respecto a la formación de una nube de suficiente tamaño; que exista una turbulencia, típicamente formada por los obstáculos de la planta, para que se produzca la aceleración del frente de llama de la explosión y; que se produzca el confinamiento de la nube debido a los obstáculos. Luego de realizar una revisión exhaustiva en bibliografía especializada sobre el tema, se propuso el modelo que a continuación se describe: el primer paso es realizar una descripción del lugar; luego se realiza la identificación de las posibles fuentes de escape, en donde se debe tomar en cuenta que las mismas no pueden ser originadas por fallos catastróficos, solamente se producen durante funcionamiento normal, o en tareas de revisión o mantenimiento de válvulas, bridas, venteos, sellos, discos de ruptura, etc.; a partir de esto se determina el grado de escape, se modela la fuga, se caracteriza la nube formada y se realiza la clasificación de áreas peligrosas; en un siguiente paso, a partir de las frecuencias de escape, de las probabilidades de ignición y de explosión y utilizando el método de árbol de eventos se determinan los escenarios más probables; después se modelan las consecuencias de la explosión utilizando el método multi energía; para finalmente obtener el riesgo individual y agregado.

**Palabras clave:** Explosión, nube de vapor, escape, ignición, riesgo individual y agregado

## ABSTRACT

This paper was prepared by the need for a quantitative model to assess the risk of explosion at oil treatment plant. It is known that a vapor cloud explosion (VCE) can occur when the following conditions are met: the material is flammable and under conditions suitable to form a vapor cloud; a source of ignition occur, delayed respect to the formation of a cloud of sufficient size; there turbulence, typically formed by obstacles of the plant, so that the acceleration of the flame front of the explosion is produced and; that the confinement of the cloud due to obstacles occur. The model described then is performed after an exhaustive review of specialized literature on the subject, proposed: the first step is to describe the place; then identifying possible sources of release, where they must take into account that they can not be caused by catastrophic failures only occur during normal operation, or in tasks or maintenance of valves, flanges, vents, seals, rupture discs, etc.; from this the degree of release is determined, the leak is modeled, the cloud formed features and classification of hazardous areas is done; in a next step, based on the frequency of release, of the probability of ignition and explosion and using the event tree method most likely scenarios are determined; then the consequences of the explosion are modeled using multi energy method; to finally get the individual and aggregate risk.

**Keywords:** Explosion, vapor cloud, release, ignition, individual and aggregate risk

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 El Problema de investigación**

##### **1.1.1 Planteamiento del problema**

En una planta de tratamiento de crudo, en los diferentes procesos se forman nubes de vapor de hidrocarburo, confinado o no confinado, ya sea de manera permanente, temporal o accidental, que al tomar contacto con una fuente de ignición, pueden desencadenar una explosión, siendo necesario modelar la tasa de liberación de la nube, su dimensión y determinar las consecuencias de la explosión.

Las técnicas aplicadas para la determinación del riesgo de explosión en los lugares de trabajo generalmente es cualitativo o semi cuantitativo. La aplicación de estos métodos frecuentemente causa una sobre estimación del riesgo asociado con la explosión de la nube inflamable resultante de pequeñas liberaciones, especialmente en las confinadas.

### **1.1.1.1 Diagnóstico problema**

La Empresa de Servicios Petroleros (nombre confidencial) no cuenta con un modelo que permita evaluar cualitativamente o cuantitativamente el riesgo generado por la formación de atmósferas explosivas en el área de tanques de proceso de su planta de tratamiento de crudo ubicada en el Oriente Ecuatoriano.

### **1.1.1.2 Pronóstico**

Al no evaluar cuáles serían las consecuencias de una explosión en el área de tanques de proceso de la planta de tratamiento de crudo, no se podría determinar las medidas preventivas y de protección que ayuden a evitar o minimizar la exposición a este tipo de riesgo, del personal propio o Contratista que trabaja en la misma. Además no se puede determinar si la energía liberada en una posible explosión podría afectar a terceros, vecinos de la planta, generar impacto al ambiente, suelo y a las fuentes de agua existentes en sus cercanías, ni las consecuentes pérdidas materiales y económicas, esta última por pérdida de la producción.

### **1.1.1.3 Control de pronóstico**

Es necesario entonces implementar un modelo para evaluar el riesgo de explosión por ignición de nube inflamable en el área de tanques de proceso de la planta.

### 1.1.2 Formulación del problema (Pregunta de la investigación)

¿Con el modelo propuesto se puede evaluar el riesgo explosión en el área de tanques de proceso de la planta de tratamiento de crudo?

### 1.1.3 Sistematización del problema (Preguntas directrices)

- ✚ ¿Cuáles son las posibles fuentes de escape de vapores inflamables?
- ✚ ¿Cómo se puede caracterizar la nube inflamable de estos escapes?
- ✚ ¿Qué tipo de áreas peligrosas determinan estos escapes?
- ✚ ¿Cuáles son las posibles fuentes de ignición?
- ✚ ¿Cuál es la probabilidad de ignición de la nube inflamable?
- ✚ ¿Cuál es el escenario creíble de explosión?
- ✚ ¿Cómo se puede caracterizar las consecuencias de la explosión?
- ✚ ¿Cómo se puede determinar el riesgo de explosión?
- ✚ ¿La energía liberada durante la explosión puede afectar a los trabajadores de la planta?

Para un mayor entendimiento de la problemática ver el árbol de problemas (Anexo A).

### 1.1.4 Objetivo General

Proponer un modelo que permita evaluar el riesgo de explosión en el área de tanques de proceso de una planta de tratamiento de crudo.

Para un mayor entendimiento del objetivo general propuesto ver el árbol de objetivos (Anexo B).

### **1.1.5 Objetivos Específicos**

- a) Determinar las fuentes de escape de gases o vapores inflamables.
- b) Determinar un modelo para caracterizar el escape de una nube inflamable.
- c) Determinar un método para clasificación de áreas peligrosas.
- d) Determinar las fuentes de ignición de la instalación.
- e) Determinar un método para estimar la probabilidad de ignición inmediata o diferida de una nube inflamable.
- f) Determinar un modelo para caracterizar las consecuencias de una explosión.
- g) Determinar un método para estimar la probabilidad de afectación a las personas en la instalación, debido a una explosión.

Para un mayor entendimiento de los objetivos específicos propuestos ver el Anexo B.

### **1.1.6 Justificaciones**

#### **1.1.6.1 Justificación Teórica**

Al no encontrarse estudios similares, a nivel nacional, el presente trabajo busca ser el referente académico para la evaluación del riesgo de explosión en instalaciones de procesamiento de hidrocarburos.

#### **1.1.6.2 Justificación Metodológica**

Se busca alcanzar la solución del problema planteado, a través del uso de metodologías validadas internacionalmente en lo concerniente a análisis cuantitativo del riesgo de explosión por ignición de nubes inflamables no confinadas.

### **1.1.6.3 Justificación Práctica**

Al evaluar el riesgo de explosión del sitio estudiado se podrán elaborar las instrucciones de trabajo específicas tendientes a reducir la probabilidad de la ignición de nubes inflamables, así como dimensionar adecuadamente los equipos eléctricos o electrónicos a utilizarse dentro de áreas peligrosas.

### **1.1.6.4 Justificación Legal**

El presente trabajo se fundamenta en la parte legal por lo siguiente:

- ✚ En la CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL ESTADO respecto al TRABAJO Y SALUD, Art. 326, numeral 5.
- ✚ En el REGLAMENTO PARA EL SISTEMA DE AUDITORIA DE RIESGOS DEL TRABAJO “SART”, numeral 2.2 MEDICION respecto de la GESTION TECNICA.
- ✚ Art. 15, literal f), del REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD DE LOS TRABAJADORES Y MEJORAMIENTO DEL MEDIO AMBIENTE DE TRABAJO, Decreto Ejecutivo No. 2393, RO/ 565 de 17 de Noviembre de 1986.

### **1.1.6.5 Relevancia Social**

Al determinarse las consecuencias de una explosión se podrán tomar las medidas preventivas y de protección que beneficien tanto al trabajador propio y/o contratista, así como a los vecinos asentados alrededor de la planta de tratamiento de crudo, propiciando un ambiente de trabajo seguro y las buenas relaciones con la comunidad.

## 1.2 Marco Teórico

### Introducción

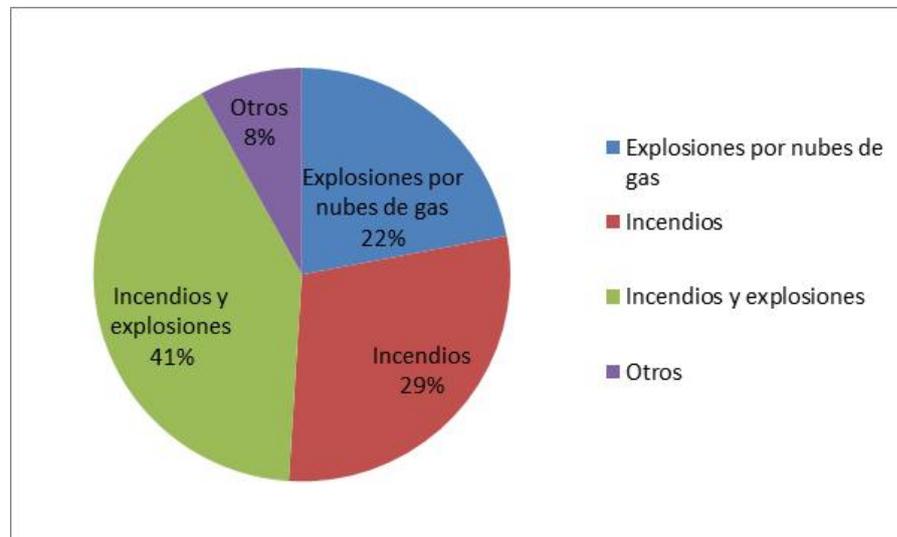
La evolución social y en especial el desarrollo industrial, conllevan al incremento potencial de los riesgos, en número y gravedad, los cuáles si no son debidamente controlados se manifestarán en la ocurrencia de accidentes (MAPFRE, 1996).

Los incendios y explosiones en la industria de procesos, son eventos raros, sin embargo ocurren y pueden causar la pérdida de vidas, daños al ambiente, pérdida de equipos e instalaciones, interrupción del negocio y pérdida de imagen. Las explosiones pueden ocurrir en sitios específicos de las instalaciones y en la transportación. Además de la industria química, estos accidentes también pueden ocurrir en otras industrias, como las de procesamiento de alimentos, servicios, celulosa y papel, y productos farmacéuticos, por citar unos pocos (Crowl, 2003).

Los potenciales fenómenos de explosión incluyen explosiones de nubes de vapor (VCE), explosiones confinadas, explosiones en fase de condensación, reacciones químicas exotérmicas, explosiones debido a expansión de vapores de líquidos en ebullición (BLEVE), y ruptura de presión-volumen (PV). En cambio los potenciales fenómenos de incendio incluyen incendios flash (flash fires), de charco (pool fires), dardos de fuego (jet fires) y bolas de fuego (fireballs).

Las pérdidas económicas son considerablemente altas para accidentes que involucran explosiones. La explosión de nubes de vapor no confinadas, son el tipo más dañino de estos eventos, donde una gran nube de vapor volátil e inflamable es liberada y dispersada por toda la planta seguida por una ignición y explosión de la nube. Un análisis de los más grandes accidentes en plantas químicas (basado en accidentes ocurridos en el mundo y en dólares de 1998) se muestra en la Figura 1 (Crowl, 2011). Como se puede observar las explosiones de nubes de vapor representan un gran

porcentaje de pérdidas. La categoría “otros” de la Figura 1 incluyen pérdidas resultantes de inundaciones y huracanes.



**Figura 1** Tipos de pérdidas producto de grandes accidentes en plantas de hidrocarburo – químicas<sup>1</sup>

## Explosiones

Una explosión puede ser definida como un fenómeno donde una onda expansiva (de presión o de choque) es generada por una rápida liberación de energía. Esta liberación puede haber sido originalmente almacenada en el sistema en una variedad de formas (por ejemplo energía nuclear, química, eléctrica o de presión). Para ser considerada explosiva, la liberación de energía debe ser lo suficientemente rápida y concentrada como para producir una onda de presión que pueda ser escuchada.

La onda expansiva resultante es la gran responsable de los daños causados. Las edificaciones pueden ser dañadas y las personas pueden ser lesionadas por la onda, con efectos adicionales indirectos como la generación de proyectiles, cráteres,

<sup>1</sup> Los datos corresponden a las 100 Grandes Pérdidas ocurridas entre 1972-2001

movimiento de suelo e incendios.

Generalmente conforme la onda expansiva viaja lejos del centro de la explosión, pierde energía, de tal forma que la magnitud de la onda de sobre presión y otros efectos experimentados como resultado de la onda expansiva disminuyen conforme aumenta la distancia con respecto al origen de la explosión.

Las explosiones causadas por liberación de energía química en plantas de procesos deben ser caracterizadas como detonación o deflagración.

En la deflagración, el mecanismo para la reacción de propagación de la explosión dentro del material no combustionado se debe a la transferencia de masa y calor. El material alrededor del sitio inicial de la explosión es calentado por sobre su temperatura de auto ignición, permitiendo la reacción de propagación. La transferencia de energía por estos medios es un proceso relativamente lento, siempre que la velocidad de propagación sea menor a la velocidad del viento en el material sin reaccionar.

En una detonación, el mecanismo de propagación de la explosión se debe al calentamiento en la fase de compresión de la onda de choque. La detonación avanza rápidamente a causa de la rápida transmisión de las fuerzas mecánicas involucradas en el fenómeno. Las velocidades de propagación de la detonación siempre serán más grandes que la velocidad del sonido.

### **Explosiones de nubes de vapor**

La explosión de una nube de vapor (VCE) resulta de la ignición de una mezcla inflamable de vapor, gas, aerosol o niebla, en la cual la velocidad de la flama se acelera a velocidades suficientemente altas para producir una sobre presión significativa (citado por AIChE, 1996).

Las explosiones de nubes de vapor están generalmente asociadas con la liberación (fuga) de una cantidad suficiente de gas inflamable o líquido evaporándose desde un tanque de almacenamiento, recipiente de proceso o de transporte o de un sistema de tubería.

En general cinco condiciones mínimas deben cumplirse antes de que una VCE con una sobre presión dañina pueda ocurrir (citado por AIChE, 1996):

1. El material debe ser inflamable y en condiciones adecuadas para formar una nube de vapor. Alguna porción de la nube resultante debe contener aire en mezcla, de tal forma que las concentraciones se encuentren dentro del rango de inflamabilidad del material.
2. Una fuente de ignición es necesaria para iniciar la explosión. La presencia de una fuente de ignición deberá ser siempre asumida, porque los incendios y explosiones han ocurrido donde ninguna fuente de ignición obvia pudo ser identificada. Fuentes de alta energía de ignición más altas pueden llevar a una explosión más severa que otras de baja energía.
3. La ignición de una nube de vapor inflamable debería ser diferida hasta que una nube de suficiente tamaño sea formada. Si la ignición ocurre inmediatamente al escapar el material, podría ocurrir un gran incendio, dardo de fuego o bola de fuego, pero una VCE es improbable. La probabilidad de explosión en lugar de un incendio aumenta con el tamaño de la nube, ya que la cantidad de la mezcla dentro del rango de inflamabilidad aumenta. Paradójicamente las medidas de seguridad para eliminar las fuentes de ignición de una planta pueden contribuir para la formación de grandes nubes de vapor inflamable con potencial de explosiones muy severas.
4. La turbulencia es requerida para que el frente de llama se acelere a las velocidades

requeridas para que ocurra un VCE, caso contrario el fenómeno resultante sería un incendio flash. Esta turbulencia es típicamente formada por la interacción entre el frente de llama y los obstáculos tales como estructuras o equipamiento existente en una planta. Esta turbulencia también podría resultar del material liberado explosivamente o mediante dardos de presión. Los efectos del estallido producidos por VCE's pueden variar enormemente y están fuertemente ligados a la velocidad de flama. En la mayoría de casos la propagación de la flama será en modo de deflagración, solo bajo condiciones extraordinarias una detonación con efectos más severos, producto del estallido, podrían ocurrir. En ausencia de turbulencia, bajo condiciones laminares o cercanamente laminares, la velocidad de la flama será muy baja para producir una sobrepresión significativa producto del estallido, en dicho caso la nube simplemente se quemará como un incendio flash (flash fire).

5. El confinamiento de la nube por obstáculos puede resultar en el rápido incremento de presión durante la combustión. En cambio, la ausencia de confinamiento por obstáculos permite expansión ilimitada hacia el exterior de la nube durante la combustión, limitando el incremento de presión. Las nubes no confinadas usualmente no generarán suficiente velocidad de flama que resulte en efectos de sobre presión. El grado de confinamiento en plantas de proceso, con su distribución de equipos y estructuras congestionados es generalmente alto.

Los siguientes factores afectan la probabilidad, magnitud y efecto de una VCE:

- ✚ Cantidad de material inflamable en la nube, dentro de un área donde hay objetos que inducirían turbulencia y crearían un grado de confinamiento.
- ✚ Grado de mezcla de la nube (composición).
- ✚ Reactividad del material (afecta la severidad de la explosión, materiales altamente reactivo incrementan la posibilidad de la transición de una bola de

fuego a una VCE).

- ✚ Fundamentalmente la velocidad de combustión.
- ✚ Energía de la fuente de ignición.
- ✚ Condiciones del escape (escapes a alta presión generan mayor turbulencia que escapes a baja presión).
- ✚ Presencia de obstáculos, o confinamiento, u otros mecanismos que favorezcan la turbulencia.
- ✚ Configuración de la nube (algunos incidentes han mostrado efectos direccionales al estallar).
- ✚ Velocidad y dirección del viento.

En resumen una explosión de nubes de vapor es el resultado del escape de material inflamable en la atmósfera, una subsecuente fase de dispersión y después de un retardo de tiempo, una ignición de la nube de vapor. Una flama debería propagarse a una considerable velocidad para generar el estallido, especialmente en ambientes 2-D (configuración de dos planos) y 3-D (denso-con obstáculos), el problema que se plantea ahora es como evaluar el riesgo de estas explosiones.

### **1.2.1 Estado actual del conocimiento sobre el tema**

Una metodología para evaluación de riesgos necesita contestar las siguientes preguntas básicas (RASE, 2000):

- ✚ ¿Qué sabemos? ¿Cuál es el riesgo?
- ✚ ¿Se espera que ocurra un incidente?
- ✚ ¿Qué acción podemos tomar?
- ✚ ¿Cuán probable es que ocurra?
- ✚ ¿Cuál es la cadena de eventos que puede resultar en daños?

- ✚ ¿Se pueden tolerar las potenciales consecuencias a la probabilidad estimada?
- ✚ ¿Cuáles son los beneficios y costos de las alternativas tecnológicas?

En los métodos revisados los siguientes pasos intentan responder estas preguntas:

- ✚ Determinación del uso previsto (análisis funcional / de estado )
- ✚ Identificación de peligros, situaciones y eventos de riesgo
- ✚ Estimación de consecuencias / probabilidades del riesgo
- ✚ Evaluación del riesgo
- ✚ Análisis de las opciones para reducción del riesgo

### **1.2.1.1 Determinación del uso previsto**

#### **Descripción del sistema**

La primera etapa en la evaluación del riesgo de un sistema o equipo es determinar su uso previsto (producto, capacidad, límite de carga). El riesgo de una explosión puede provocarlo el mismo equipo, así como el producto que manipula, ambas características del equipo y del producto deben ser documentadas.

Las características del equipo permiten conocer su funcionamiento deseado, aspectos como la actuación como una fuente ignición, materiales de construcción y la formación de atmósferas peligrosas.

En cuanto al producto se debe listar sus características de inflamabilidad y explosividad del material manejado.

#### **Análisis funcional / de estado**

Para equipamiento complejo un diagrama de flujo del equipo / proceso es la base

para el análisis funcional / de estado con la inclusión de niveles de energía (temperatura, presión, etc.) para cada fase de la operación del equipo.

Un diagrama no solo ayuda a definir el uso previsto, también puede ser usado como una parte clave del proceso de evaluación de riesgos.

### **1.2.1.2 Identificación de peligros, eventos y situaciones riesgosas**

La identificación del peligro es la parte más importante de la evaluación de riesgos. Con el propósito de realizar exitosamente este paso, previamente se debería definir con suficiente detalle el equipo. Una vez que el peligro ha sido identificado, el diseño puede ser cambiado para minimizarlo, se haya estimado o no el grado de riesgo; a menos que el peligro sea reconocido, su rediseño no puede ser realizado. Un total entendimiento del uso correcto e incorrecto del equipo también es primordial en este paso.

Un proyecto o proceso tiene un diseño seguro cuando se han tomado medidas preventivas o de protección adecuadas (procedimientos de seguridad, producción, operación y mantenimiento) de acuerdo a los riesgos involucrados (lesiones al personal, daño a la planta o al ambiente).

El sistema debe ser examinado para determinar qué fuentes de ignición están presentes. La norma EN 1127 define las siguientes fuentes de ignición:

- ✚ Superficies calientes
- ✚ Flamas o gases calientes (incluyendo partículas calientes)
- ✚ Chispas generadas mecánicamente
- ✚ Aparatos eléctricos
- ✚ Fugas de corriente eléctrica, protección catódica
- ✚ Electricidad estática

- ✚ Rayos
- ✚ Ondas electromagnéticas de radiofrecuencia desde  $10^4$  Hz a  $3 \times 10^{12}$  Hz
- ✚ Ondas electromagnéticas desde  $3 \times 10^{11}$  Hz hasta  $e \times 10^{15}$  Hz
- ✚ Radiación ionizante
- ✚ Ultrasonido
- ✚ Ondas adiabáticas de compresión y de choque
- ✚ Reacciones exotérmicas, incluyendo auto ignición de polvo

De las fuentes de ignición anotadas se debe determinar cuáles son las más significativas, es decir aquellas que generan una de ignición que alcanza o supera la energía mínima de ignición (MIE) de la atmósfera potencialmente explosiva.

El resultado de la identificación de peligros es una lista numerada de eventos como el que se muestra a modo de ejemplo en el Anexo C.

La identificación de peligros debe analizar el sistema para identificar todas las posibilidades de ocurrencia de una atmósfera potencialmente explosiva.

La probabilidad de ocurrencia de la fuente de ignición puede ser usada como una medida para determinar la categoría del equipo, en términos de la clasificación de áreas peligrosas.

Además del procedimiento de identificación descrito arriba, es necesario llevar a cabo un análisis para determinar la posibilidad de que un sistema de protección cause la ignición de la atmósfera explosiva. Los resultados de este análisis deben ser documentados en una lista como la que se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 1** Análisis de riesgos de un sistema de protección

Ref.	Desviación de la operación prevista	Posible razón	Consecuencias
1	No apertura a la presión definida	Falla del mecanismo de resorte	Alta sobre presión
2	No apertura a la presión definida	Mecanismo de resorte atascado	Alta sobre presión
Etc.			

### 1.2.1.3 Estimación del riesgo

Después de la identificación de peligros, se deben determinar los elementos para la estimación del riesgo para cada peligro o para todos los eventos peligrosos de explosión. El riesgo asociado con una situación particular o proceso es derivado de la combinación de estos elementos.

El riesgo en término de seguridad de la explosión es fundamentalmente realizado por dos elementos: la severidad del posible daño y la probabilidad de ocurrencia de ese daño.

La severidad o consecuencia de una explosión puede ser adecuadamente caracterizada, sin embargo la probabilidad de su ocurrencia usualmente es más difícil de cuantificar.

El riesgo es usualmente expresado de tres formas:

1. Cualitativamente, por ejemplo como alto, medio, bajo tolerable, intolerable, aceptable.
2. Cuantitativamente, por el cálculo de la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de determinado evento.
3. Semi cuantitativamente, donde los elementos del riesgo tales como la consecuencia, exposición y probabilidad están dados como una calificación

numérica, la que está combinada de alguna forma para dar un valor de riesgo pseudo cuantitativo, que permite que los riesgos sean clasificados unos contra otros.

En algunas situaciones no es posible determinar exactamente todos los factores que afectan el riesgo, en particular aquellos que contribuyen a la probabilidad de ocurrencia de un evento específico.

#### **1.2.1.4 Evaluación del riesgo**

Luego de la estimación del riesgo, la evaluación debe ser realizada para determinar si la reducción de riesgos es requerida o permitida.

En el caso de que el nivel de riesgo resulte intolerable, deben tomarse medidas de seguridad apropiadas para reducir el riesgo. Si el nivel de riesgo es aceptable, no se requiere reducir el riesgo y el análisis de riesgos se encuentra completo.

Alternativamente el proceso de evaluación de riesgos puede ser determinado por comparación con equipos similares con riesgo de explosión. En este caso es esencial que los siguientes parámetros sean comparables:

- ✚ Peligros y elementos de la estimación de riesgos.
- ✚ Tipo de equipo, sus límites tecnológicos y operacionales
- ✚ Uso y condiciones de uso

#### **1.2.1.5 Análisis de las opciones para reducción del riesgo**

En la práctica pocas veces el riesgo puede ser eliminado, excepto por la eliminación de actividades, frecuentemente solo se minimiza.

La eficacia en la reducción del riesgo siempre comienza con cambios en el concepto de diseño, por ejemplo diseño intrínsecamente seguro.

Una vez que el riesgo ha sido estimado y evaluado, el análisis de opciones para la reducción de riesgos debe llevar a la decisión final de si la solución encontrada reduce o no el riesgo a un nivel aceptable. Esta decisión incluye el punto de vista tecnológico y económico basado en una apropiada clasificación de la categoría del equipo.

Existen algunos factores a tomar en cuenta cuando se analizan las opciones para la reducción del riesgo. La más importante es si la cantidad de la reducción de riesgo es suficiente para reducir el riesgo a niveles tolerables. El analista decide cuanto mejora la seguridad de un diseño, cuando una característica de seguridad es incluida. En general la remoción de un peligro es más efectiva que poner algún resguardo, que a su vez es más efectivo que usar equipo de protección personal o sistemas de trabajo seguro. La confiabilidad del resguardo también debe ser tomada en cuenta. La vida útil esperada del resguardo también debe coincidir con lo que necesita el equipo, para realizar el seguimiento y sustitución de los componentes que se desgasten.

También es importante comparar el costo beneficio de las opciones, de modo que los siguientes aspectos deben considerarse para rechazar/aceptar un resguardo:

- ✚ Costo total
- ✚ Productividad
- ✚ Eficiencia energética
- ✚ Costos de mantenimiento
- ✚ Otros costos operacionales

Otros aspectos relevantes a tomarse en cuenta cuando se compara una opción son:

- ✚ Exigencias de leyes o códigos de práctica, cuando una opción es requerida por una ley entonces este es el argumento para seleccionar una alternativa. Los códigos de práctica y guías de la industria son también fuentes invaluable de información acerca de las opciones más efectivas para la reducción de riesgos específicos.
- ✚ La vida útil de un peligro, en situaciones donde un peligro existe por un período de tiempo, un resguardo diseñado para existir permanentemente puede ser inapropiado.

En algunos casos es poco probable que una opción para reducción del riesgo sea una solución completa para un problema particular, a menudo se requiere una combinación de opciones.

Después de que se han tomado todas las medidas para reducir la probabilidad y consecuencias de un evento peligroso específico es necesario hacer frente al riesgo residual. Los riesgos residuales son aquellos contra las que la reducción del riesgo mediante las técnicas de diseño y resguardos, puede o no ser totalmente efectivas.

Los usuarios deben estar informados sobre los riesgos residuales. Las instrucciones y advertencias son ejemplos de los modos y procedimientos de operación, para superar el peligro en cuestión.

#### **1.2.1.6 Métodos y / o técnicas disponibles para el análisis de riesgos**

No existe ninguna regla para adoptar un método o técnica para el análisis de riesgos.

En general los métodos y técnicas pueden ser clasificados en:

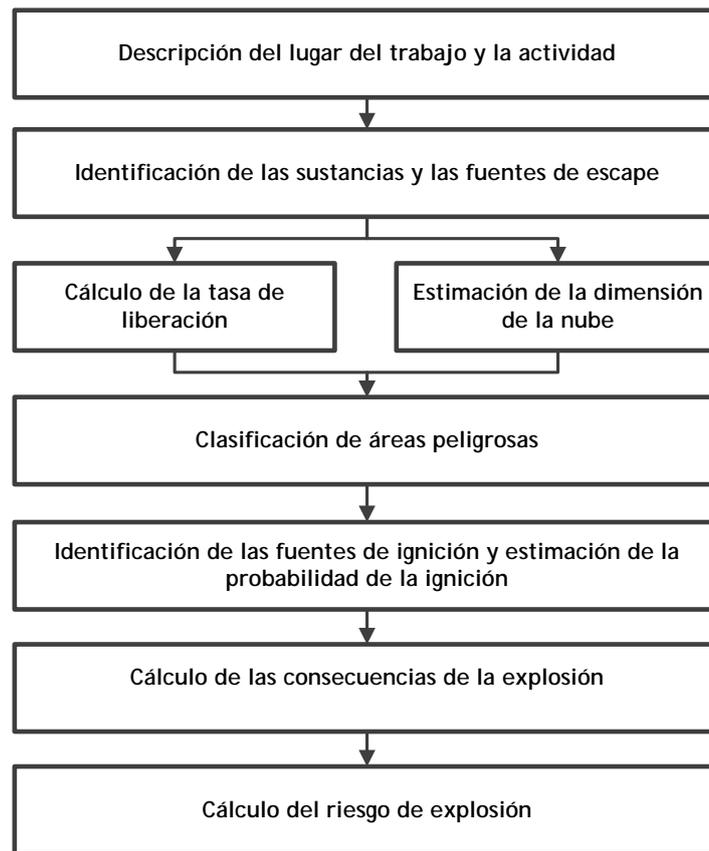
- ✚ Cualitativos: Consisten en frases cualitativas como “Es probable que ocurra un evento peligroso”, “Lesiones graves”, “riesgo inaceptable”, “riesgo alto”, “riesgo bajo” y así sucesivamente.

- ✚ Cuantitativos: El escenario del incidente es modelado en detalle, por ejemplo utilizando un análisis de árbol de fallos y árbol de frecuencias, así que la estimación puede ser realizada usando los datos disponibles o la experiencia de la frecuencia o probabilidad de todos los posibles eventos que afectan a la frecuencia total de un evento o consecuencia definido como peligroso. Los resultados pueden ser directamente comparados con datos estadísticos de accidentes a fin de validar el método, o para tomar decisiones en cuanto a si el riesgo es aceptable.
- ✚ Semi cuantitativos: Son categorías combinadas numéricamente o mediante diagramas para obtener valores de riesgo numéricos (pseudo cuantitativo).

### **1.2.2 Adopción de una perspectiva teórica**

El modelo aplicado para el análisis del riesgo de explosión en los lugares de trabajo es generalmente cualitativo o semi cuantitativo. La aplicación de un método cualitativo frecuentemente causa una sobre estimación del riesgo asociado con la explosión de la nube inflamable resultante de pequeños escapes, particularmente, en espacios confinados (Lisi y Milazzo, 2010).

Luego de revisar los modelos disponibles para análisis cuantitativo de riesgo se plantea implementar un modelo como el mostrado en la figura 2.



**Figura 2** Diagrama de bloques para la evaluación del riesgo debido a la presencia de atmósferas explosivas

### 1.2.2.1 Descripción del lugar de trabajo

El modelo planteado debe ser aplicado en plantas de proceso que manejen sustancias inflamables, como es el caso de la planta de tratamiento de crudo.

La planta en estudio se debe dividir en sectores (unidades) de actividad, donde existe peligro de atmósfera explosiva. En el presente trabajo se estudiará el sector de tanques de proceso.

La descripción debe incluir datos como nombre de la empresa, tipo de instalación, denominación de la instalación, edificio o local, responsables de la empresa y número de trabajadores.

Las especificaciones constructivas y su ubicación geográfica se

documentarán mediante planos de situación y planos de instalaciones. Deben incluirse en los detalles las salidas de emergencia y vías de evacuación.

### **1.2.2.2 Identificación de las sustancias y las fuentes de escape**

#### **Identificación de sustancias**

Se realizará la descripción de las sustancias que provocan la formación de una atmósfera explosiva y las condiciones en que se produce ésta.

Para gases y vapores producidos por líquidos inflamables deben incluirse los siguientes parámetros:

- ✚ Temperatura Mínima de Inflamación
- ✚ Límite Inferior y Límite Superior de Explosividad
- ✚ Grupo y Subgrupo de gas, IIA, IIB o IIC
- ✚ Punto de destello.
- ✚ Densidad del gas respecto del aire

Cuando no se cuente con las características físico – químicas de la sustancia inflamable se pueden buscar valores referenciales en bibliografía o calcularlos a utilizando correlaciones o gráficos (por ejemplo API para refinamiento del crudo), en los dos casos se requiere conocer ciertos parámetros de partida (por ejemplo el ensayo de destilación del crudo).

#### **Identificación de fuentes de escape**

Cualquier equipo dentro de la planta que contenga o procese una sustancia inflamable debe ser considerado como potencial fuente de escape, si está comprobado que el mismo puede liberar sustancia inflamable a la atmósfera, entonces debe determinarse si el grado de escape es continuo, primario o secundario.

En el presente trabajo se utilizará como referencia la norma UNE 60079-10-1 (2010) para realizar la identificación de fuentes de escape en el área de estudio.

Los escapes de grado continuo y de grado primario son emisiones previstas durante el funcionamiento normal, por lo que pueden ser definidas tanto por su duración, como por su frecuencia de emisión.

Una emisión que aunque ocurra poco frecuentemente y durante breves periodos de tiempo, durante funcionamiento normal, no debe ser considerada de grado secundario, sino que en general se considerará de grado primario.

Los escapes de grado secundario no están previstos durante el funcionamiento normal, generalmente se atribuyen a eventos no deseados. Para definir su duración y frecuencia normalmente se debe hacer referencia al tipo o frecuencia de las revisiones y al mantenimiento de los sistemas de contención de las sustancias inflamables.

Es necesario resaltar que aquellas partes de los sistemas cerrados de proceso que son abiertos (por ejemplo, durante un cambio de filtros o una carga de producto) deben considerarse como fuentes de escape.

La clasificación de zonas no se realiza considerando situaciones “catastróficas” (por ejemplo la rotura de una tubería soldada o de un recipiente).

En algunas instalaciones las aberturas que permiten la comunicación entre distintos lugares peligrosos deben considerarse como fuentes de escape. En la tabla 2 se presenta una clasificación de aberturas, su efecto en el grado de escape se muestra en la tabla 3.

**Tabla 2** Clasificación de aberturas según su tipo

<b>Tipo de abertura</b>	<b>Descripción</b>
A	Aberturas que no cumplen las características de los tipos B, C y D. Por ejemplo, tuberías y conductos abiertos a través de paredes, techos y suelos, orificios fijos de ventilación.
B	Aberturas que están normalmente cerradas (por ejemplo, con cierre automático) y raramente abiertas y son con cierre forzado.
C	Aberturas del tipo B que además tengan un sistema de cierre, tipo junta, o bien dos aberturas del Tipo B en serie con sistemas de cierre independientes.
D	Aberturas del tipo C que sólo se abren con medios especiales o en caso de emergencia. Son herméticas o pueden ser una combinación de una abertura de tipo C en el lado del emplazamiento peligroso con una abertura de tipo B en serie.

*Nota:* Tomado de Escuer y García (2005).

**Tabla 3** Efecto de las aberturas en el grado de escape

<b>Zona al otro lado de la abertura</b>	<b>Tipo de abertura</b>	<b>Grado de escape de la abertura considerada como fuente de escape</b>
Zona 0	A	Continuo
	B	(Continuo) / Primario
	C	Secundario
	D	Sin escape
Zona 1	A	Primario
	B	(Primario) / Secundario
	C	(Secundario) / Sin escape
	D	Sin escape
Zona 2	A	Secundario
	B	(Secundario) / Sin escape Sin escape
	C	Sin escape
	D	

*Nota:* Para los grupos de escape indicados entre paréntesis tomar en cuenta la frecuencia de funcionamiento de la abertura. Tomado de la norma UNE 60079-10-1 (2010).

A continuación se citan algunos ejemplos de fuentes de escape, según UNE-EN 60079-10 para gases.

#### **Ejemplos fuentes que dan un escape de grado continuo**

- a) La superficie de un líquido inflamable en un tanque de techo fijo con un venteo permanente en la atmósfera.
- b) La superficie de un líquido inflamable que está abierto a la atmósfera continuamente o por largos períodos (por ejemplo un separador de aceite/agua).

#### **Ejemplos de fuentes que dan un escape de grado primario**

- a) Sellos de bombas, compresores y válvulas si se espera que en funcionamiento normal fuguen sustancias inflamables.
- b) Puntos de drenaje de agua de recipientes que contengan líquidos inflamables, que puedan desprender sustancias inflamables a la atmósfera cuando drenen en funcionamiento normal.
- c) Válvulas de seguridad, venteos y otras aberturas de donde se espere que puedan escapar sustancias inflamables durante el funcionamiento normal.

#### **Ejemplos de fuentes que dan escapes de grado secundario**

- a) Sellos de bombas, compresores y válvulas en las que no se espera que se desprendan sustancias inflamables en funcionamiento normal.
- b) Bridas, uniones y accesorios de tuberías donde no se esperan escapes de sustancias inflamables en funcionamiento normal.
- c) Tomas de muestra en las que no se espera que se produzcan escapes de sustancias inflamables en funcionamiento normal.

- d) Válvulas de seguridad, venteos y otras aberturas donde no se espera que se fuguen sustancias inflamable durante el funcionamiento normal.

### **Clasificación de áreas peligrosas**

De los métodos disponibles para clasificación de zonas se adoptará la norma UNE-EN 60079-10-1 (2010).

La clasificación de zonas según esta norma, se fundamenta en la probabilidad de la presencia de una atmósfera explosiva como consecuencia de un escape, en la tabla 4 se presenta un resumen de las zonas en función de la formación y presencia de una atmósfera explosiva.

**Tabla 4** Designación de zonas según la probabilidad de formación y duración.

<b>Frecuencia y duración de la atmósfera explosiva</b>	<b>Zona</b>
Permanente o presente frecuentemente	0
Probable, de forma ocasional	1
Improbable y por poco tiempo	2
No cabe esperar su formación	Sin riesgo

Para establecer las zonas peligrosas es necesario que la identificación de fuentes de escape y la determinación de su grado hayan sido realizadas. Luego de esto se debe cuantificar el escape y otros factores importantes, como la ventilación, que pueden influir en el tipo y extensión de la zona.

Generalmente un escape de grado continuo origina en su alrededor una zona 0, uno de grado primario una zona 1 y uno de grado secundario una zona 2, sin embargo una ventilación eficaz puede disminuir el tipo de zona que origina un escape.

**Tabla 5** Relación del grado de escape con la zona y frecuencia de formación de la atmósfera explosiva

Grado de escape	Zona	Probabilidad de atmósfera explosiva en 365 día	Duración global (horas/año)
Continuo	0	$P > 10^{-1}$	> 1000
Primario	1	$10^{-1} \geq P > 10^{-3}$	10 - 1000
Secundario	2	$10^{-3} \geq P > 10^{-5}$	0,1* -10

\* Cuando la duración de la atmósfera explosiva no llega a 0.1 h al año, el lugar no se considera peligroso. Tomado de la norma UNE 60079-10-1 (2010).

La norma establece una regla práctica para evaluar los escapes esperables durante un año, suma las duraciones de los eventos individuales y lo relaciona según su grado de escape, según se puede apreciar en la tabla 5.

### 1.2.2.3 Cálculo de la tasa de liberación

Las sustancias inflamables pueden escapar de los sistemas de contención de modo diverso en relación con el estado y la velocidad de emisión (Escuer y García, 2005).

Un resumen de las modalidades de escape se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6** Estimaciones de las dimensiones de los escapes

Fluido emitido	Modalidad de escape	
	Velocidad de emisión	Modalidad de dispersión
Gas o vapor	Alta	Chorro que se mezcla con el aire
	Baja	Neblina de gas o vapor
Líquido que no se evapora en la emisión	Alta	Chorro de líquido que es lanzado lejos y al caer forma un charco distante del punto de emisión, desde donde se produce una lenta evaporación.
	Baja	Hilillo o gotas que caen al suelo y forman un charco, desde el que se produce la evaporación.
Líquido que se evapora en la emisión	Alta	Chorro de vapor y niebla que se evapora durante la caída al suelo.
	Baja	Rastro de líquido en evaporación durante la caída, que forma un charco, desde el que se produce una rápida evaporación.

*Nota:* Tomado de Escuer y García (2005)

### **Estimación de las dimensiones de los orificios de escape debido a fallos**

Antes de calcular la tasa de escape o liberación se debe establecer las dimensiones de los orificios en caso de fallo de los componentes (fuentes de escape) de la instalación.

La valoración de las dimensiones de los orificios es difícil, por lo que a continuación se presentan algunas estimaciones encontradas en bibliografía, mismas que serán de utilidad en los cálculos posteriores.

**Tabla 7** Estimaciones de las dimensiones de los escapes

Componente	Estimación de las dimensiones de los orificios
Bridas	<p data-bbox="549 338 1353 412">Junta de fibra comprimida <math>2.5 \text{ mm}^2</math> y hasta <math>1 \text{ mm}</math> de espesor en multiplicado por el largo de toda la sección en caso de fallo grave.</p> <p data-bbox="549 517 1353 591">Junta en espiral <math>0.25 \text{ mm}^2</math> y hasta <math>0.005 \text{ mm}</math> de espesor en multiplicado por el largo de toda la sección en caso de fallo grave.</p> <p data-bbox="549 640 1353 712">Junta en anillo metal sobre metal: <math>0,1 \text{ mm}^2</math> y hasta <math>0,5 \text{ mm}^2</math> en caso de fallo grave.</p>
Válvulas	<p data-bbox="549 763 1070 792">Se considera el orificio de escape por el vástago.</p> <p data-bbox="549 831 1235 860">Válvulas de diámetro <math>\leq 6''</math> de uso general considerar <math>0.25 \text{ mm}^2</math>.</p> <p data-bbox="549 909 1251 936">Válvulas de diámetro <math>&gt; 6''</math> de uso general o de servicio peligroso.</p>
Válvulas de seguridad, discos de seguridad y juntas hidráulicas	<p data-bbox="549 981 1098 1010">Deben ser considerados escapes de grado primario.</p> <p data-bbox="549 1048 1353 1211">Válvulas de seguridad sin junta entre asiento y obturador, <math>1 \text{ mm}^2</math> con presión del sistema de contención muy baja, <math>0.25 \text{ mm}^2</math> con presión del sistema de contención muy alta, variable entre <math>1 \text{ mm}^2</math> y <math>0.25 \text{ mm}^2</math> para presiones intermedias.</p> <p data-bbox="549 1261 1353 1424">Válvulas de seguridad con junta entre asiento y obturador o cuando esté insertado sobre la tubería de descarga de la válvula de seguridad un sistema de sifón con líquido que permita revelar eventuales fugas, considera <math>0.25 \text{ mm}^2</math>.</p> <p data-bbox="549 1473 1353 1547">Juntas hidráulicas el área del orificio debe valorarse caso por caso siendo los sistemas muy diferentes entre ellos.</p>
Bombas centrifugas con juntas mecánicas de estanquidad	<p data-bbox="549 1592 1050 1621">Orificio de emisión por instalación defectuosa:</p> $A = \pi \times l \times d$ <p data-bbox="549 1740 1353 1809">Donde <math>A =</math> área del orificio anular en <math>\text{mm}^2</math>, <math>l =</math> espesor del orificio anular en <math>\text{mm}</math>, <math>d =</math> diámetro del árbol en <math>\text{mm}</math></p>

**Tabla 7 (Cont.)**

Componente	Estimación de las dimensiones de los orificios
Bombas centrifugas con juntas mecánicas de estanquidad	<p>Para bombas con eje de diámetro 25 mm, considerar 25 mm<sup>2</sup> con junta mecánica sin abrazadera de control de flujo en la salida y 5 mm<sup>2</sup> con junta mecánica provista de abrazadera de control de flujo a la salida.</p> <p>Bombas con eje de otro diámetro considerar el área del orificio proporcional al diámetro.</p>
Compresores alternativos	Considerar un orificio de 2.5 mm <sup>2</sup> para las emisiones por las juntas y por otros puntos de las válvulas
Compresores centrífugos	<p>Compresores con diámetro = 150 mm, por instalación defectuosa, considerar 250 mm<sup>2</sup> con junta de laberinto y 50 mm<sup>2</sup> con junta de anillo flotante.</p> <p>Para compresores con eje de otras dimensiones considerar el área del orificio proporcional al diámetro.</p> <p>Compresores con diámetro = 150 mm, por rotura o agrietado, considerar 5 mm<sup>2</sup> con junta de laberinto y 1 mm<sup>2</sup> con junta de anillo flotante.</p> <p>Para compresores con eje de otras dimensiones considerar el área del orificio proporcional al diámetro.</p>
Conexiones de pequeñas dimensiones	<p>Conexiones típicas de pequeñas dimensiones son las de las uniones de la instrumentación de proceso.</p> <p>Considerar un orificio de 0.25 mm<sup>2</sup> (no se considera la rotura completa del tubo)</p>
Puntos de drenaje y de toma de muestras	<p>Los puntos de drenaje están constituidos generalmente por válvulas (manuales o de cierre automático).</p> <p>La fuga puede ser despreciada cuando se prevea doble válvula de interceptación, una válvula más una junta ciega o un tapón, o para toma muestras de dosis predeterminadas cuando la cantidad extraída es de pocos cm<sup>3</sup>.</p>

**Tabla 7 (Cont.)**

Componente	Estimación de las dimensiones de los orificios
Puntos de drenaje y de toma de muestras	<p>Cuando no se pueda excluir la posibilidad de que la válvula de drenaje o de toma de muestras sea dejada o se quede abierta, las dimensiones del orificio se pueden considerar la válvula completamente abierta.</p> <p>El diámetro típico de escape de los puntos de toma de muestras es de 20 mm.</p> <p>Se pueden considerar orificios más pequeños, de aproximadamente 1/10 del diámetro de la válvula.</p>

### **Actuaciones frente atmósferas explosivas de gases y vapores**

La ventilación del emplazamiento peligroso a un caudal apropiado puede influir en el tipo de zona a clasificar en un emplazamiento peligroso.

Existen dos tipos de ventilación: ventilación natural y ventilación artificial, esta última puede ser local (focalizada) o general.

#### Ventilación natural

Este tipo de ventilación es generado por el movimiento del aire causado por el viento o los gradientes de temperatura y normalmente es suficiente para asegurar la dispersión de la atmósfera explosiva presente en el emplazamiento.

#### Ventilación artificial

Este tipo de ventilación es proporcionado por medios artificiales (por ejemplo extractores o ventiladores). Normalmente se utiliza en espacios cerrados, sin embargo, también se lo puede utilizar en aquellos espacios abiertos al aire libre, pero que tienen restricciones o impedimentos en la ventilación natural debido a obstáculos.

Se recomienda que antes de instalar un sistema de ventilación se tomen en cuenta los siguientes factores que afectan a la clasificación de emplazamientos peligrosos:

1. El aire para no debe tomarse de una zona no peligrosa.
2. Se debe definir la localización, el grado de escape y cuantificarlo, antes de determinar el tamaño y diseño de sistema de ventilación.
3. Los gases y vapores inflamables normalmente tienen densidades diferentes con respecto al aire, por lo que tenderán a acumularse en el suelo o en el techo de un emplazamiento cerrado, donde el movimiento de aire puede ser reducido.
4. La densidad de los gases varía con la temperatura.
5. Las barreras y obstáculos pueden reducir el movimiento del aire, por lo tanto dejar sin ventilación ciertas partes del emplazamiento.

Para diluir estos escapes es mejor aislarlos y utilizar extracción focalizada, evitando por un lado que estas emisiones se dispersen por todo el local y por otro que la renovación de aire deba realizarse en un pequeño volumen, en lugar de todo el emplazamiento, lo cual se traduce en costos.

La eficacia de la ventilación para controlar la dispersión y la permanencia de la atmósfera explosiva, depende del grado y disponibilidad de ventilación.

#### Grado de ventilación

La intensidad o grado de ventilación se clasifica en tres niveles:

**Tabla 8** Clasificación del grado de ventilación

<b>Grado de ventilación</b>	<b>Descripción</b>
Alto	Ventilación capaz de reducir de forma prácticamente instantánea la concentración en la fuente de escape, obteniéndose una concentración menor que el límite inferior de inflamabilidad. Así resulta una zona de pequeña extensión, casi despreciable (grado asociado a la presencia de equipos de ventilación o extracción artificial).
Medio	Ventilación capaz de controlar la dispersión, manteniendo una situación estable, con una concentración inferior al límite inferior inflamabilidad mientras el escape se está produciendo. Cuando el escape cesa, la atmósfera explosiva no persiste durante mucho tiempo. Esta ventilación puede reducir el tamaño de la zona.
Bajo	Este tipo de ventilación no puede controlar la concentración durante el escape, o cuando éste ha cesado y es incapaz de evitar la permanencia de la atmósfera explosiva durante bastante tiempo.

*Nota:* Tomado de la norma UNE 60079-10 (2010)

El caudal mínimo de aire necesario para estar por debajo de los índices de toxicidad de sustancias tóxicas o nocivas para la salud de los trabajadores es muy superior al caudal de aire que se necesitaría para diluir una atmósfera explosiva, por lo tanto el grado de ventilación que habitualmente se encontrará en una planta de proceso será un grado Medio.

#### Ineficacia de la ventilación ( $f_v$ )

En una planta pueden existir barreras u obstáculos que dificulten la circulación del aire de ventilación y hacen que el número de renovaciones de aire por unidad de tiempo se vea reducido.

Esta reducción se conoce como el factor de ineficacia de la ventilación ( $f_v$ ). Este factor puede tomar valores desde 1 (ventilación ideal) hasta 5 (dificultad en la ventilación).

En la tabla 9 se muestran los posibles valores para recintos cerrados (interior de edificios), mientras que en la tabla 10 los valores para ambientes abiertos.

**Tabla 9** Valores de ineficacia de ventilación en ambientes cerrados con ventilación natural o artificial

Factor $f_v$	Descripción
1	Ambiente cerrado con libre circulación del aire y prácticamente ausencia de impedimentos que puedan reducir la capacidad efectiva de dilución de la atmósfera explosiva en el volumen afectado por el escape (aberturas de entrada y salida bien distribuidas que permiten una renovación correcta del aire en todas partes del local).
2	Ambiente cerrado con presencia de algún impedimento a la libre circulación del aire que puede reducir de modo poco significativo su capacidad efectiva de dilución de la atmósfera explosiva (local con diferentes estructuras abiertas y cerradas).
3	Ambiente cerrado con presencia de un número medio de impedimentos a la libre circulación del aire que puede reducir de modo significativo su capacidad efectiva de dilución de la atmósfera explosiva (local con ventilación no muy correcta).
4	Ambiente cerrado con presencia de un gran número de impedimentos a la libre circulación del aire que pueden reducir mucho su capacidad efectiva de dilución de la atmósfera explosiva (local con pocas renovaciones de aire, locales bajos con gases ligeros o locales con fosos con gases pesados).
5	Ambiente cerrado con presencia de un grandísimo número de impedimentos a la libre circulación del aire que pueden reducir mucho su capacidad efectiva de dilución de la atmósfera explosiva (serias restricciones de flujo de aire).

*Nota:* Tomado de la norma UNE 202007:2006 IN

**Tabla 10** Valores de ineficacia de ventilación en ambientes abiertos con ventilación

Factor $f_v$	Descripción
1	Ambiente abierto con libre circulación del aire y práctica ausencia de impedimentos que puedan reducir la eficacia de la mezcla de sustancias inflamables en el volumen afectado por el escape (ambiente totalmente abierto a la atmósfera).
2	Ambiente abierto con presencia de algún impedimento a la libre circulación del aire que puede reducir de modo poco significativo su capacidad efectiva de dilución de la atmósfera explosiva (depresión poco profunda del terreno).
3	Ambiente abierto con presencia de número medio de impedimentos a la libre circulación del aire que pueden reducir significativamente, su capacidad de dilución de la atmósfera explosiva (interior de cubetos y depresiones medias del terreno).
4	Ambiente abierto con presencia de un gran número de impedimentos a la libre circulación del aire que puede reducir mucho su capacidad efectiva de dilución de la atmósfera explosiva (cubeto con muros altos y fosos exteriores).
5	Ambiente abierto con una presencia de un grandísimo número de impedimentos a la libre circulación del aire que puede reducir mucho su capacidad efectiva de dilución de la atmósfera explosiva (existen serias restricciones de flujo de aire).

*Nota:* Tomado de la norma UNE 202007:2006 IN

### Disponibilidad de la ventilación

Para una ventilación natural con un viento de 0,5 m/s (300 renovaciones/h) la disponibilidad de la ventilación natural puede considerarse Muy Buena (condiciones para un día de calma). Normalmente en emplazamientos interiores o al aire libre siempre hay disponibilidad de ventilación natural, por lo que casi siempre tendremos una disponibilidad Buena, como mínimo.

Al evaluar la disponibilidad de ventilación artificial se debe considerar la fiabilidad del equipo y la existencia de equipos redundantes que en caso de paro o fallo de uno, el equipo redundante entre en funcionamiento. Además se debe evaluar la existencia o no de enclavamientos, es decir sistemas que en caso de fuga o emisión paren el proceso o se adopten medidas para evitar la ignición de la sustancia inflamable liberada. Con estos supuestos se puede considerar una disponibilidad

Muy Buena.

En la siguiente tabla se definen tres niveles de disponibilidad de la ventilación:

**Tabla 11** Disponibilidad de la ventilación

<b>Disponibilidad de la ventilación</b>	<b>Descripción</b>
Muy Buena	La ventilación se mantiene continua, sin interrupciones.
Buena	La ventilación se espera que exista durante el funcionamiento normal. Las interrupciones permiten siempre que se produzcan de forma poco frecuente y por cortos períodos.
Mediocre	La ventilación no cumple los criterios de ventilación muy buena o buena, pero no se espera que haya interrupciones prolongadas.

*Nota:* Tomado de la norma UNE 202007:2006 IN

El tipo de zona (0, 1 o 2) en función del grado de escape y la disponibilidad de la ventilación se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12** Clasificación de zonas según la ventilación

Grado de la ventilación		Alto			Medio		Bajo
Disponibilidad de la ventilación	Muy buena	Buena	Mediocre	Muy buena	Buena	Mediocre	Muy buena, buena o mediocre
<b>Grado de escape</b>	Continuo	(Zona 0 ED) emplazamiento no peligroso	(Zona 0 ED) Zona 2	(Zona 0 ED) Zona 1	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1 Zona 0
	Primario	(Zona 1 ED) emplazamiento no peligroso	(Zona 1 ED) Zona 2	(Zona 1 ED) Zona 2	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2 Zona 1 o Zona 0 (ver Nota 2)
	Secundario	(Zona 2 ED) emplazamiento no peligroso	(Zona 2 ED) emplazamiento no peligroso	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2 Zona 1 o también Zona 0 (ver Nota 2)
“+”	Significa “rodeado por”.						
Nota 1:	Zona 0 ED, 1ED o 2ED indican una zona teórica donde, en condiciones normales, la extensión es despreciable.						
Nota 2:	Cuando existen zonas que pueden definirse como “sin ventilación”.						
Nota 3:	Un caudal de ventilación alto y una disponibilidad alta, pueden conducir a disminuir el tamaño de la zona, de tal forma que ésta sea prácticamente inexistente (la zona se puede desclasificar) o disminuir la calificación de la zona al reducir el riesgo de presencia de atmósfera explosiva.						
Nota 4:	Por otro lado, un bajo caudal de ventilación, independientemente de la disponibilidad, originaría zonas de clasificación más exigente que el grado de escape que las origina. Tomado de la norma UNE 60079-10 (2010).						

### Cálculo de la tasa de escape

Una vez calculado el grado de escape se debe determinar la tasa de escape, para lo cual se partirá de la ecuación general para determinar la masa emitida a través de un orificio (Ec. 1):

**Ecuación 1.** 
$$G = C_d a P \left[ \left( \frac{\delta M}{RT} \right) \left( \frac{2}{\delta} + 1 \right) \left( \delta + \frac{1}{\delta} + 1 \right) \right]^{0.5}$$

Donde:

G = caudal másico de sustancia emitida por el escape ( $\text{kg s}^{-1}$ )

$C_d$  = Coeficiente de descarga (valor máximo 0,8)

a = área transversal ( $\text{m}^2$ )

P = presión aguas arriba ( $\text{N m}^{-2}$ )

$\delta$  = relación entre los calores específicos  $C_p / C_v$  (1,4 para la mayoría de los gases)

M = masa molecular de la sustancia emitida ( $\text{g mol}^{-1}$ )

R = constante de los gases ( $8314 \text{ J kmol}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$ )

T = temperatura absoluta ( $^\circ\text{K}$ )

A partir de esta ecuación se obtienen las fórmulas para caracterizar las fugas de gas o vapor, fugas de líquido a temperatura inferior a su punto de ebullición y fugas de líquido a temperatura superior a su punto de ebullición (Mc Millan, 2002).

Fugas de gas o vapor

Se determina el caudal másico del escape, en kg/s, mediante:

**Ecuación 2.**  $G = 0,006aP(M/T)^{0,5}$  si  $P > 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

o mediante:

**Ecuación 3.**  $G = 3,95[M(P - 10^5)]^{0,5}$  si  $P \leq 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Se puede convertir el caudal másico en caudal de escape en volumen, en  $\text{m}^3/\text{s}$ , mediante:

**Ecuación 4.**  $Q = 0,082GT/M$

Se puede calcular la extensión X, en m, de la dispersión del chorro mediante:

**Ecuación 5.**  $X = 2,1 \times 10^3 \left[ \frac{G}{LEL^2 M^{1,5} T^{0,5}} \right]^{0,5}$  si  $P > 2 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

o mediante:

**Ecuación 6.**  $X = 10,8[GT/LEL M]^{0,5}$  si  $P \leq 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Donde.

LEL = Límite Inferior de Explosividad (%)

Si el escape se produce a menos de 1,5 m del suelo, el valor calculado debe multiplicarse por un factor de 1,5.

Fugas de líquido a temperatura inferior a su punto de ebullición

El caudal másico del escape se determina en kg/s, mediante:

$$\text{Ecuación 7.} \quad G = 1,13a[\sigma_l(P - 10^5)]^{0,5}$$

Donde  $\sigma_l$  es la densidad del líquido en kg/m<sup>3</sup>, en condiciones atmosféricas.

La velocidad de escape del líquido se calcula mediante:

$$\text{Ecuación 8.} \quad v = 1,13[(P - 10^5)/\sigma_l]^{0,5}$$

Si el chorro de líquido sale formando un ángulo por encima de la horizontal, se calcula la distancia  $d$ , en m, hasta donde llega el chorro del líquido mediante:

$$\text{Ecuación 9.} \quad d = (2v^2h/g)^{0,5}$$

Donde  $v$  = velocidad de escape del líquido (m/s),  $h$  = altura (m) a la que se produce la fuga y  $g$  = aceleración de la gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>).

Si el chorro sale por debajo de la horizontal formando con ella un ángulo  $\phi$ , la distancia se calcula mediante:

$$\text{Ecuación 10.} \quad d = v \cos\phi[(v \sin\phi - 2gh)^{0,5} - v \sin\phi]/g$$

El caudal másico de vapor  $G_{\text{vap}}$ , en kg/s, producido por la evaporación del líquido del charco formado se calcula mediante:

**Ecuación 11.** 
$$G_{\text{vap}} = 2 \times 10^{-3} A p_v M / R^{0,2}$$

Donde A es el área del charco, en m<sup>2</sup>, y p<sub>v</sub> la presión de vapor del líquido, expresada como fracción de la presión atmosférica.

La velocidad de vaporización o caudal de escape en volumen Q, en m<sup>3</sup>/s, se calcula mediante:

**Ecuación 12.** 
$$Q = 8,2 A K_g p_v T / 10^2$$

Donde:

T = Temperatura ambiente

K<sub>g</sub> es el coeficiente de transferencia de masa. Este coeficiente está relacionado con el número de Reynolds, R, mediante la expresión, válida para una velocidad del viento de 2 m/s y una viscosidad cinemática del aire de 1,5 x 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>:

**Ecuación 13.** 
$$K_g = 2 \times 10^{-3} / R^{0,2}$$

Si se desconoce p<sub>v</sub>, se puede estimar a partir de la temperatura de ebullición del líquido y la temperatura ambiente aplicando los valores de la tabla 13.

**Tabla 13** Estimación de la presión de vapor

Temp. de ebullición del líquido (°C)	Presión de vapor (fracción de la presión atmosférica)				
	T <sub>amb</sub> =32°C	T <sub>amb</sub> =40°C	T <sub>amb</sub> =60°C	T <sub>amb</sub> =80°C	T <sub>amb</sub> =100°C
35	0,96	1	1	1	1
40	0,76	1	1	1	1
50	0,54	0,72	1	1	1
60	0,38	0,56	1	1	1
70	0,26	0,42	0,72	1	1
80	0,18	0,30	0,56	1	1
90	0,13	0,20	0,42	0,72	1
100	0,092	0,14	0,30	0,56	1
110	0,062	0,10	0,20	0,42	0,72
120	0,042	0,072	0,14	0,30	0,56
130	0,028	0,058	0,10	0,20	0,42
140	0,018	0,027	0,072	0,14	0,30
150	0,010	0,018	0,058	0,10	0,20

*Nota:* Tomado de Mc Millan (2002)

El área del charco formado A (m<sup>2</sup>) se calcula mediante:

$$\text{Ecuación 14.} \quad A = 5,65 \times 10^2 a [\sigma_1 (P - 10^5)]^{0,5} R^{0,2} / (\Delta p M)$$

Normalmente el cálculo del área se realiza para un valor medio para R<sup>0,2</sup> de 16. Con el valor del área obtenido se determina un R<sup>0,2</sup> ajustado a partir de la figura 3, este nuevo valor se utiliza para volver a calcular y ajustar el área.

Con el área ajustada se obtiene el radio r del charco, aplicando la fórmula simple de cálculo del radio de un área circular.

**Ecuación 15.** 
$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

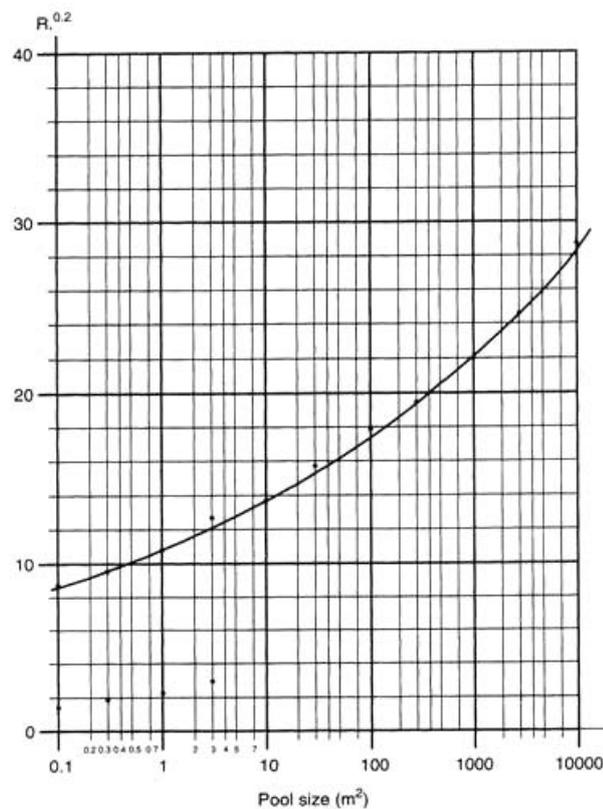
La extensión del charco, en m, se calcula mediante:

**Ecuación 16.** 
$$X = \left[ 5,8 A^{0,5} \Delta p \frac{T}{10^2} / (LEL R^{0,2}) \right]^{1,14}$$

Donde:

$LEL$  = Límite inferior de inflamabilidad (%)

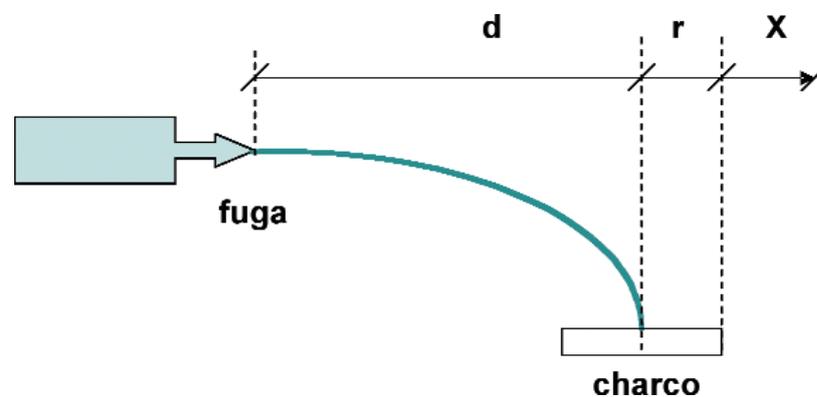
$T$  = Temperatura ambiente (°K)



**Figura 3** Gráfica para determinar  $R^{0,2}$

Para el caso de recipientes, tanques o contenedores abiertos de sustancias inflamables, cuyo grado de escape es continuo, estimar el valor de  $R^{0.2}$  (figura 3) utilizando el valor de la superficie del fluido ( $m^2$ ), luego calcular el caudal másico de evaporación mediante la ecuación 11.

En la figura 4 (Escuer y García, 2005) se muestra la forma de delimitar el área peligrosa formada en este tipo de escapes.



**Figura 4** Delimitación del área peligrosa

#### Fugas de líquido a temperatura superior a su punto de ebullición

La fracción de masa  $M_g$  que sale por el orificio en forma de vapor se calcula mediante:

**Ecuación 17**                       $M_g = (T_1 - T_c)C_1/L$

Donde:

$T_1$  = Temperatura de operación del líquido, en °K

$T_c$  = Temperatura a una temperatura dada  $P_c$ , en °K

$P_c = 0,55 \times$  Presión de vapor del líquido contenido a la temperatura de operación en  $kg/m^2$

$C_1$  = Capacidad calorífica del líquido en kJ / kg / °K

$L$  = Calor latente de vaporización en kJ / Kg

La fracción del líquido que se evapora de la mezcla fugada  $M_{vap}$ , se calcula mediante:

$$\text{Ecuación 18} \quad M_{vap} = 1 - [(T_1 - T_b)/L]C_1$$

Donde:

$T_b$  = Temperatura de ebullición del líquido en °K.

Ahora la densidad de la mezcla se calcula mediante:

$$\text{Ecuación 19} \quad \sigma_m = 1/[(M_g/\sigma_v) + (1 - M_g)/\sigma_l]$$

Donde:

$\sigma_m$  = densidad de la mezcla fugada en kg/m<sup>3</sup>

$\sigma_v$  = densidad de vapor a  $T_1$  en kg/m<sup>3</sup>

$\sigma_l$  = densidad del líquido a  $T_1$  en kg/m<sup>3</sup>

La tasa de escape (caudal másico) de la mezcla que sale por el escape  $G$ , en kg/s, se calcula aplicando:

$$\text{Ecuación 20} \quad G = 0,8A[2\sigma_m(P_1 - P_c)]^{0,5}$$

Donde:

$A$  = Área de la sección del orificio de fuga en m<sup>2</sup>

$\sigma_m$  = densidad de la mezcla fugada en kg/m<sup>3</sup>

$P_1$  = Presión del líquido contenido antes de la fuga en kg/m<sup>2</sup>

$$P_c = 0,55 \times \text{Presión de vapor del líquido contenido}$$

La fracción del líquido que se vaporiza el momento del escape a presión atmosférica,  $G_{\text{vap}}$ , se calcula mediante:

$$\text{Ecuación 21} \quad G_{\text{vap}} = [(T_1 - T_b)/\delta]C_1$$

Donde:

$T_1$  = Temperatura de liberación del líquido, en °K

$T_b$  = Punto de ebullición del líquido, en °K

$\delta$  = Calor latente de vaporización en kJ / kg

$C_1$  = Capacidad calorífica del líquido en kJ / kg / °K

La vaporización junto al orificio será liberado como un chorro que será dispersado a una distancia que se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 22} \quad X = 2,10 \times 10^3 [G/LEL^2 M^{1,5} T^{0,5}]^{0,5}$$

Esta distancia debe ser multiplicada por un factor de 1,5 si el escape se produce a menos de 1,5 del suelo.

El líquido que no se vaporiza en el escape, se supone formará un charco a una distancia  $d$ , cuyo alcance se calculará con la ecuación 9 cuando el chorro escapa formando un ángulo por encima de la horizontal y con la ecuación 10 cuando el chorro sale por debajo de la horizontal formando un ángulo  $\phi$ .

La vaporización del líquido se producirá en cuanto el mismo tome contacto con el suelo, la extensión alcanzada por el charco se calcula mediante la ecuación 6. Si el escape se produce a menos de 1,5 m del suelo, este valor debe multiplicarse por un factor de 1,5.

#### **1.2.2.4 Estimación de la dimensión de la nube**

A continuación se explican los pasos a seguir para calcular la dimensión de las zonas en el interior de edificios y en emplazamientos con ventilación natural, según normas UNE 202007:2006 IN y UNE EN 60079-10-1:2010.

##### **Interior de edificios**

###### Estimación del volumen teórico $V_z$

El volumen teórico  $V_z$  es un indicativo del volumen de la envolvente inflamable de una fuente de escape, pero normalmente no equivale al volumen del emplazamiento peligroso ya que éste podrá tener una forma u otra según las condiciones de ventilación (grado y disponibilidad). Al determinar la velocidad del viento (ventilación natural) o de los sistemas de ventilación (ventilación artificial) se debe escoger el mínimo caudal posible.

Debido a que difícilmente se puede predecir el comportamiento de una atmósfera explosiva en pequeñas distancias, generalmente se considerará que el volumen del emplazamiento será mayor al del volumen teórico  $V_z$  que se calcula. Esta diferencia se corrige mediante coeficientes de seguridad.

Previo a evaluar el grado de ventilación se requiere conocer la tasa de escape de la fuga de gas o vapor de la fuente de escape, esto se realiza a partir de las ecuaciones mencionadas en el numeral 1.2.2.3 o a partir de datos estadísticos de tasas de escape para gases y vapores.

Luego se calcula el caudal mínimo teórico de ventilación necesario para diluir el escape de una sustancia inflamable, hasta una concentración por debajo del límite inferior de explosión. Esto se realiza mediante la siguiente expresión:

**Ecuación 23.** 
$$Q_{v \min} = \frac{G_e}{k \cdot \text{LIE}} f_T \quad (\text{kg/m}^3)$$

Donde:

$Q_{v \min}$  = Caudal mínimo en volumen de aire fresco por segundo, en  $\text{m}^3/\text{s}$

$G_e$  = Tasa máxima de escape de la fuente, en  $\text{kg/s}$

$K$  = Coeficiente de seguridad, de tal modo que la concentración se diluya  $k$  veces por debajo del LIE. Toma un valor de 0,25 para escapes continuos y primarios (ventilación que permite obtener 25% del LIE) y 0,5 para escapes secundarios (ventilación que permite obtener 50% del LIE).

LIE = Límite inferior de inflamabilidad, en  $\text{kg/m}^3$

$f_T$  = Factor de corrección de la temperatura

**Ecuación 24.** 
$$f_T = T/293$$

El LIE en  $\text{kg/m}^3$  se puede calcular a cualquier temperatura mediante la siguiente ecuación:

**Ecuación 25.** 
$$\text{LIE} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{LIE}(\%)}{100} \mathbf{m} \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) \frac{293}{22,4 T \left( \frac{1}{\text{mol}} \right)} \quad (\text{kg/m}^3)$$

El cálculo del caudal mínimo necesario para ventilar el lugar se realiza considerando a la mezcla como una sustancia explosiva respecto al 100% de aire puro.

El procedimiento para la suma de escapes múltiples en un determinado volumen se muestra en la tabla 14:

**Tabla 14** Procedimiento para sumar escapes múltiples en un volumen  $V_z$ 

Grado de escape	Acción para $Q_{v \min}$
Continuo	Sumar todos los valores de $Q_{v \min}$ y aplicar el resultado total en las fórmulas de cálculo.
Primario	Sumar el número correspondiente de la tabla 15 de los valores mayores de $Q_{v \min}$ y aplicar el resultado total en las fórmulas de cálculo.
Secundario	Usar sólo el mayor valor de $Q_{v \min}$ y aplicarlo en las fórmulas de cálculo.

*Nota:* Tomado de la norma UNE 60079-10-1 (2010)

**Tabla 15** Procedimiento para sumar fuentes de escape múltiples primarias

Número de fuentes de escape Primarias	Número de escapes primarios
1	1
2	2
3 a 5	3
6 a 9	4
10 a 13	5
14 a 18	6
19 a 23	7
24 a 27	8
28 a 33	9
34 a 39	10
40 a 45	11
46 a 51	12

*Nota:* Tomado de la norma UNE 60079-10-1 (2010)

El cálculo de  $V_z$  para un volumen  $V_o$  ( $m^3$ ) totalmente ventilado, en función de un determinado caudal  $Q_o$  ( $m^3/s$ ) de ventilación en la instalación, se realiza con la siguiente ecuación:

**Ecuación 26.** 
$$V_z = \frac{Q_{v \min}}{Q_o} V_o \quad (m^3)$$

La expresión de  $Q_o/V_o$  también se puede expresar como el número dado de cambios de aire por unidad de tiempo C, en función de la ventilación general del emplazamiento (renovaciones de aire):

$$\text{Ecuación 27.} \quad C = \frac{Q_o}{V_o} \quad (s^{-1})$$

En edificios cerrados (ventanas y puertas cerradas) el valor de C generalmente es del orden de 0,25 a 1 renovaciones/h, sin embargo este valor también puede ser calculado utilizando la expresión  $Q_o/V_o$ , que no es más que el cociente entre el caudal de aire que entra en la sala a través de las aberturas (velocidad de ventilación multiplicado por el área que atraviesa el caudal) y el volumen de la sala.

La ecuación 27 es el caso ideal de un lugar donde se produce la mezcla instantánea y homogénea en condiciones ideales de intercambio de aire fresco. Esto en la práctica no sucede, debido a que algunas partes del lugar pudieran estar mal ventiladas por la existencia de obstáculos (por ejemplo los mismos equipos). Esta condición crea la necesidad de incorporar un factor ( $f_v$ ) de ineficacia de la ventilación (ver la tabla 9), con lo cual el cálculo del volumen teórico se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 28.} \quad V_z = \frac{Q_v \min}{C} f_v \quad (m^3)$$

#### Estimación del tiempo de permanencia ( $t_p$ )

El tiempo de permanencia  $t_p$  es el período requerido para que la concentración media descienda desde un valor inicial  $X_o$  hasta un % por debajo de LIE (k), después que el

escape ha terminado (por ello el cálculo del tiempo de permanencia en escapes continuos no tiene sentido):

**Ecuación 29.** 
$$t_p = \frac{-f_v}{C} \ln \frac{LIE \cdot k}{X_o}$$
 (En las mismas unidades de C)

Donde:

C = Renovaciones de aire fresco por unidad de tiempo, en s<sup>-1</sup>

t<sub>p</sub> = Tiempo de permanencia, en s<sup>-1</sup>

f<sub>v</sub> = Ineficacia de ventilación para espacios cerrados (tabla 9)

k = Factor de seguridad aplicado a LIE, adimensional

LIE = Límite inferior de inflamabilidad, en kg/m<sup>3</sup>

X<sub>o</sub> = es la concentración inicial de sustancia inflamable expresada en las mismas unidades que el LIE, en la práctica parece razonable tomar para X<sub>o</sub> valores mayores que el LIE.

Determinados V<sub>z</sub> y t<sub>p</sub> se puede calcular el tipo de zona y su extensión, si V<sub>z</sub> es menor que el volumen del emplazamiento cerrado, se puede clasificar como peligroso sólo una parte del mismo, mientras que en el caso donde el V<sub>z</sub> tiene un volumen similar al del local cerrado convendría clasificar como peligroso todo el recinto cerrado.

Un valor de V<sub>z</sub> mucho mayor que el del recinto cerrado corresponde a una situación con grado de ventilación bajo, este caso se presenta en aquellas zonas donde la ventilación no es suficiente para dispersar la atmósfera explosiva.

Con estos parámetros calculados se calcula la extensión de la zona, tomando una geometría esférica desde la fuente de escape.

**Ecuación 30.** 
$$R = \left( \frac{3 \cdot V_z}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

R = radio de la esfera, en m

$V_z$  = volumen de la atmósfera inflamable, en m<sup>3</sup>

### **Emplazamientos con ventilación natural**

#### Estimación del volumen teórico $V_z$

Se realizan las mismas consideraciones que en espacios interiores, respecto al volumen teórico  $V_z$ .

Según bibliografía en emplazamientos con ventilación natural se puede admitir un valor mínimo de velocidad del viento de 0,5 m/s, lo cual determina un número de renovaciones de  $C=100 \text{ h}^{-1} = 0,03 \text{ s}^{-1}$  (para este cálculo se considera un volumen cúbico hipotético de 15 m de lado).

De manera similar que en los emplazamientos interiores, antes de realizar la evaluación del grado de ventilación se requiere cuantificar el caudal másico (tasa de escape) de gas o vapor de la fuente de escape.

El siguiente paso es el cálculo del caudal mínimo teórico  $Q_{vmin}$  de ventilación necesario para diluir un escape dado de una sustancia inflamable hasta una concentración por debajo del límite inferior de explosión. Esto se realiza mediante las ecuaciones 23, 24 y 25.

El procedimiento para la suma de escapes múltiples se realiza de la misma forma que para espacios interiores, utilizando las tablas 14 y 15.

El cálculo de las renovaciones de aire en espacios abiertos se puede realizar considerando un volumen cúbico de 15 m de lado, de la siguiente manera: la superficie de uno de los lados de este cubo se multiplica por la velocidad del viento predominante (m/s) y se divide para el volumen del cubo (m<sup>3</sup>). Alternativamente se puede considerar un valor de 0,03 renovaciones por segundo, siempre que la velocidad del viento sea mayor o igual a 0,5 m/s, con esto más la consideración del factor de ineficacia de la ventilación  $f_v$  para espacios abiertos (tabla 10), el cálculo del volumen teórico  $V_z$  queda de la siguiente manera:

**Ecuación 31.** 
$$V_z = \frac{Q_v \min}{0,03} f_v \quad (\text{m}^3)$$

Calculado el volumen teórico  $V_z$  se puede determinar el grado de ventilación de cada fuente de escape tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✚ Si  $V_z$  es  $\leq 0.1$  el grado de ventilación es Alto.
- ✚ Si  $0.1 < V_z \leq 3400$  el grado de ventilación es Medio.
- ✚ Si  $V_z > 3400$  el grado de ventilación es Bajo.

#### Estimación del tiempo de permanencia ( $t_p$ )

El tiempo de permanencia  $t_p$  se calcula de la siguiente manera:

**Ecuación 32.** 
$$t_p = \frac{-f_v}{0,03} \ln \frac{LIE.k}{X_o} \quad (\text{En las mismas unidades de C})$$

Donde:

$t_p$  = Tiempo de permanencia, en  $s^{-1}$

$f_v$  = Ineficacia de ventilación para espacios abiertos (tabla 10)

$k$  = Factor de seguridad aplicado a LIE, adimensional

LIE = Límite inferior de inflamabilidad, en  $kg/m^3$

$X_o$  = es la concentración inicial de sustancia inflamable, con las mismas consideraciones que para espacios cerrados.

Determinados  $V_z$  y  $t_p$ , se puede calcular el tipo de zona y su extensión. Es de esperar que el valor de  $V_z$  en el exterior con ventilación natural sea mayor que el volumen en el interior de un recinto cerrado con ventilación natural.

La extensión de la zona se calcula de la misma forma que en espacios interiores, utilizando la ecuación 30.

#### **1.2.2.5 Identificación de las fuentes de ignición y estimación de la probabilidad de ignición**

##### **Identificación de las fuentes de ignición**

Las potenciales fuentes de ignición presentes en el lugar se identifican utilizando como referencia la tabla 16. Es necesario aclarar que estas fuentes de ignición deben ser evaluadas durante el análisis de la probabilidad de ignición retardada y que las mismas deben estar dentro del alcance de la nube inflamable.

##### **Factores que influyen en la Probabilidad de Ignición Inmediata (POII)**

Las siguientes variables pueden influir en la probabilidad de una ignición inmediata:

- ✚ Mínima energía de Ignición (MIE) del material liberado.

- ✚ Temperatura de liberación, en relación con la Temperatura de Auto Ignición (AIT) o con el efecto que produce la Mínima Energía de Ignición (MIE).
- ✚ Liberación de material pirofórico.
- ✚ Presión / velocidad de descarga.
- ✚ Tamaño de las gotitas, cuando la liberación es en spray.
- ✚ Presencia de partículas el momento de la liberación, producidas por defecto del equipo que contiene el material inflamable.
- ✚ Configuración / orientación del equipo cerca / junto al punto de liberación.
- ✚ Fase de liberación, la POII de un mismo material liberado es tres veces más alto que en fase líquida
- ✚ Flash Point y Tasa de liberación

**Tabla 16** Potencia de las fuentes de ignición

Tipo de fuente de ignición	Fuente de ignición	Potencia "S"
Puntos	Calentadores	0,9
	Calderos (exterior)	0,45
	Calderos (interior)	70,23
	Teas	1
	Motores de vehículos	0,3
	Buques	0,4
	Trenes a diésel	0,4
	Trenes eléctricos	0,8
	Superficies calientes	$S=0,5+0,0025[T-AIT-100(CS)]$ CS es la velocidad de la nube en m/s
Líneas	Líneas eléctricas de alta tensión	0,001 x longitud de la línea cubierta por la nube (en pies)
	Vías (si el área de la nube es conocida)	$1-0,7^V$ (V=número promedio de vehículos cubiertos por la nube)

**Tabla 16 (Cont.)**

<b>Tipo de fuente de ignición</b>	<b>Fuente de ignición</b>	<b>Potencia "S"</b>
Áreas	Unidades de proceso (si el área de la nube es conocida)	0,9 x fracción de la unidad cubierta por la nube inflamable
	Población interna (si el área de la nube es conocida)	$1-0,99^N$ (N=número de personas cubiertas por la nube)
	Áreas de proceso de alta densidad (exterior)	0,25
	Áreas de proceso de mediana densidad (exterior)	0,15
	Áreas de proceso de baja densidad (exterior)	0,1
	Espacios confinados con /sin equipamiento	0,02
	Áreas de proceso al aire libre	0,1

*Nota:* Tomado de CCPS (2014)

### **Factores que influyen en la Probabilidad de Ignición Demorada (PODI)**

Las variables que pueden influir la probabilidad de ignición retardada (demorada) en lugares abiertos o al interior son:

- ✚ Número y potencia de las fuentes de ignición (ver tabla 16)
- ✚ Duración de la exposición
- ✚ Tasa / cantidad del escape
- ✚ Material liberado, en relación con su volatilidad
- ✚ Fase de liberación, flash point y punto de ebullición
- ✚ Distancia desde el punto de liberación a la fuente de ignición

- ✚ Condiciones meteorológicas, que influyen en la dispersión
- ✚ Eventos originados en interiores además deben considerar lo siguiente:
  - Material liberado (volatilidad, ignitabilidad, propiedades electrostáticas)
  - Tasa de liberación vs tasa de ventilación
  - Presencia de detectores de gas, planes de activación / respuesta
  - Humedad
  - Fracción de tiempo que el espacio tiene actividad humana
  - Medidas de prevención de la ignición, existentes en el lugar

Luego de revisar los factores que pueden influir en la probabilidad de una ignición, inmediata o retardada, para su cálculo se utilizarán los algoritmos (Nivel 1 y Nivel 2) propuestos por CCPS (2014). Se elige uno de los dos niveles considerando la información de entrada disponible, para el estudio de caso del presente trabajo se utilizará el Nivel 2 para determinar las probabilidades de ignición.

### **Algoritmos básicos para calcular la probabilidad de ignición (Nivel 1)**

#### Algoritmos Nivel 1 para calcular la Probabilidad de Ignición Inmediata (POII)

##### a) Contribución de la ignición estática

Para este nivel se asume un valor de 0,05.

##### b) Contribución de la auto ignición

Las relaciones utilizadas aquí son:

**Ecuación 33.** Si  $\frac{T}{AIT} < 0,9$  entonces  $P_{ai} = 0$

**Ecuación 34.** Si  $\frac{T}{AIT} > 1,2$  entonces  $P_{ai} = 1$

**Ecuación 35.** Si  $0,9 < \frac{T}{AIT} < 1,2$  entonces  $P_{ai} = 1 - 5000e^{-9,5(\frac{T}{AIT})}$

Donde las temperaturas están en grados Fahrenheit, para materiales pirofóricos la probabilidad de ignición inmediata se asume que es 1. Estas relaciones no producen resultados válidos para químicos con temperaturas de auto ignición extremadamente baja (por ejemplo menores a cero).

c) Algoritmos combinados para el cálculo de POII

La probabilidad de ignición inmediata, nivel 1, se calcula mediante:

**Ecuación 36.**  $POII_{Nivel\ 1} = 0,05 + (1 - 0,05) \times P_{ai}$

$P_{ai}$  es calculado en el literal anterior. Este análisis solo requiere como datos de entrada la AIT del material liberado y la temperatura de proceso. El valor de POII está limitado a 0,99 con el objeto de preservar la porción correspondiente a la ignición retardada en el árbol de eventos.

Algoritmos Nivel 1 para el cálculo de la Probabilidad Demorada de Ignición (PODI)

La probabilidad de ignición demorada, nivel 1, se calcula mediante:

**Ecuación 37.**  $PODI = 0,15 - 0,25 \log MIE$

La PODI determinada utilizando esta ecuación tendrá un valor máximo de 1 y un mínimo de 0,001.

Para eventos al aire libre, cuando no se conoce la Energía Mínima de Ignición (MIE) del químico o la mezcla se puede usar un valor de MIE bajo de 0,2 mJ (resultando una PODI de 0,25). Si el evento es en interiores la PODI Nivel 1 calculada debe ser multiplicada por un factor de 1,5.

### **Algoritmos básicos para calcular la probabilidad de ignición (Nivel 2)**

#### Algoritmos Nivel 2 para calcular la Probabilidad de Ignición Inmediata (POII)

a) Contribución de la ignición estática

**Ecuación 38.** 
$$POII_{estática} = 0,003 \times P^{1/3} \times MIE^{-0,6}$$

Donde P está en unidades P está en psig y MIE en mJ.

El siguiente paso es convertir el MIE del líquido en un MIE de vapor equivalente:

**Ecuación 39.** 
$$MIE_v = MIE_{reportado} \times (10000/P_{líquido})^{0,25}$$

Donde  $MIE_v$  es el MIE de vapor equivalente,  $MIE_{reportado}$  es el valor encontrado en bibliografía y  $P_{líquido}$  es la presión del proceso.

Ahora se introduce se calcula el MIE con ajuste de temperatura:

**Ecuación 40.** 
$$MIE_{adj} = MIE_v \times \exp[0,0044(60 - T)]$$

Donde T es la temperatura del proceso. Finalmente el algoritmo queda de la siguiente manera:

**Ecuación 41.** 
$$POII_{estática} = 0,003 \times P^{1/3} \times MIE_{adj}^{-0,6}$$

b) Contribución de la auto ignición

La contribución de la probabilidad de auto ignición se calcula de la misma manera que para el Nivel 1 (ver ecuaciones 33, 34 y 35).

c) Algoritmos combinados para el cálculo de POII

**Ecuación 42.** 
$$POII_{Nivel\ 2} = P_{ai} + (1 - P_{ai}) * POII_{estática}$$

Algoritmos Nivel 2 para el cálculo de la Probabilidad Demorada de Ignición (PODI)

Se calcula el modificador de potencia y duración de la fuente de ignición:

**Ecuación 43.** 
$$PODI_{S/D} = 1 - [(1 - S^2) \times e^{-St}]$$

Donde S es el valor de la potencia de la fuente de ignición, obtenido de la tabla 16, t está expresada en minutos.

Luego se calcula los modificadores de magnitud del escape:

**Ecuación 44.** 
$$M_{MAG_{Cant\ Liberada\ (líquido)}} = (Cant.\ liberada/5000)^{0,3}$$

**Ecuación 45.** 
$$M_{MAG_{Cant\ Liberada\ (vapor)}} = (Cant.\ liberada/1000)^{0,5}$$

**Ecuación 46.** 
$$M_{MAG_{Diám\ Orificio\ (líquido)}} = (Diámetro\ del\ Orificio)^{0,6}$$

**Ecuación 47.** 
$$M_{MAG_{Diám\ Orificio\ (vapor)}} = (Diámetro\ del\ Orificio)$$

Donde la cantidad liberada está en libras y el diámetro del orificio en pulgadas.

$M_{MAG\ Cant}$  Liberada puede tomar un valor máximo de 2.

$M_{MAG\ Diám}$  Orificio puede tomar valores entre 0,3 y 3.

Ahora se calcula el modificador del material liberado (MIE):

**Ecuación 48.**  $M_{MAT} = 0,5 - 1,7 \log(MIE)$

Se calculan los modificadores de temperatura / Flash Point / Punto de ebullición del escape:

**Ecuación 49.**  $M_T = 1 - (NBP - T)/230$

$M_T$  es el modificador de temperatura, NBP es el Punto de Ebullición Normal del material liberado y T es la temperatura del proceso (en grados Fahrenheit).

Alternativamente puede ser expresado así:

**Ecuación 50.**  $M_T = 0,4 + (T - 1,3 \times FP)/230$

Donde FP es el *flash point* en grados Fahrenheit.

Se calcula el modificador de lugar  $M_{IN/OUT}$ , el cuál toma un valor de 1,5 si el escape es en espacios interiores, y de 1 en espacios al aire libre.

Finalmente se calcula el algoritmo combinado para la PODI:

**Ecuación 51.**  $PODI_{Nivel\ 2} = PODI_{S/D} \times M_{MAG} \times M_{MAT} \times M_T \times M_{IN/OUT}$

### **Cálculo de PODI de múltiples fuentes de ignición**

Cuando existen múltiples fuentes de ignición contenidas dentro de la misma área de estudio, como ocurre en el caso de estudio, la Probabilidad de Ignición Retardada (PODI) se calcula de la siguiente manera:

**Ecuación 52.** 
$$PODI = 1 - \prod(1 - PODI_i)$$

Donde  $PODI_i$  es la  $PODI$  de la  $i$ -ésima fuente de ignición calculada como se mencionó anteriormente.

### **Algoritmos para calcular la Probabilidad de la Explosión Producida la Ignición**

#### **Demorada (POEGDI)**

##### Algoritmos POEGDI Nivel 1

Para este nivel se considera que la Probabilidad de Explosión Producida la Ignición Demorada tiene un valor de 0.3

##### Algoritmos POEGDI Nivel 2

Se calcula el modificador del químico,  $M_{CHEM}$ , con las siguientes consideraciones:

**Ecuación 53.**  $M_{CHEM} = 0.5$  si  $FBV \leq 45$  cm/s (reactividad baja).

**Ecuación 54.**  $M_{CHEM} = 1.0$  si  $45 < FBV \leq 75$  cm/s (reactividad media)

**Ecuación 55.**  $M_{CHEM} = 2.0$  si  $FBV > 75$  cm/s (reactividad media)

Donde FBV es la Velocidad de Combustión Fundamental, para este trabajo se asumirá un valor de 1 puesto que de acuerdo a bibliografía la mayoría de materiales fallan en el rango de la reactividad media (CCPS, 2014)

Se obtiene el modificador de magnitud, para la probabilidad de explosión, utilizando valores calculados para la PODI Nivel 2:

**Ecuación 56.** 
$$M_{MAGE} = (PODI M_{MAG})^{0,5}$$

Luego se determina el modificador de ubicación,  $M_{IN/OUT}$ , que toma un valor de 1.5 para escapes en espacios interiores, de 1 en espacios abiertos y de 0.5 cuando la liberación se produce en un tanque de almacenamiento ó en lugares remotos al aire libre.

Finalmente se calcula el algoritmo para POEGDI:

**Ecuación 57.** 
$$POEGDI_{Nivel\ 2} = 0.3 \times M_{CHEM} \times M_{MAGE} \times M_{IN/OUT}$$

Esta ecuación puede tomar un valor máximo de 1 (CCPS, 2014).

### 1.2.2.6 Cálculo de las frecuencias y consecuencias de explosión

#### Cálculo de frecuencias

Par estimar a frecuencia de fuga de los equipos de la planta se utilizará los valores estadísticos propuestos por DNV (Det Norske Veritas, 2006). El análisis propuesto por DNV distingue tres diferentes escenarios:

- ✚ Escapes completos, consisten en un flujo a través de un orificio definido, que comienza con una presión de operación normal y continúa hasta que es

controlado por el sistema de emergencia de shut-down (si están disponibles y operables) o hasta que se extinga el producto almacenado. Este escenario es invariablemente modelado en un Análisis de Riesgo Cuantitativo (QRA).

- ✚ Escapes limitados, son casos en los que la presión no es cero, pero la cantidad liberada es mucho menor que la de un escape completo. Esto puede ser debido a que el escape es aislado localmente por intervención humana (por ejemplo cerrando una válvula abierta involuntariamente), o por una restricción en el flujo del stock del producto (por ejemplo escapes de fluido acumulado entre los sellos del eje de la bomba). Este escenario puede ser modelado, dependiendo del nivel de detalle del QRA.
- ✚ Escapes a presión cero, son aquellas donde la presión a interior del equipo con fuga es virtualmente cero (0,01 barg o menos). Esto puede ser debido a que la presión de operación normal del equipo es cero (por ejemplo drenajes abiertos) o a causa de que el equipo ha sido despresurizado para mantenimiento. Este escenario es típicamente excluido de un QRA.

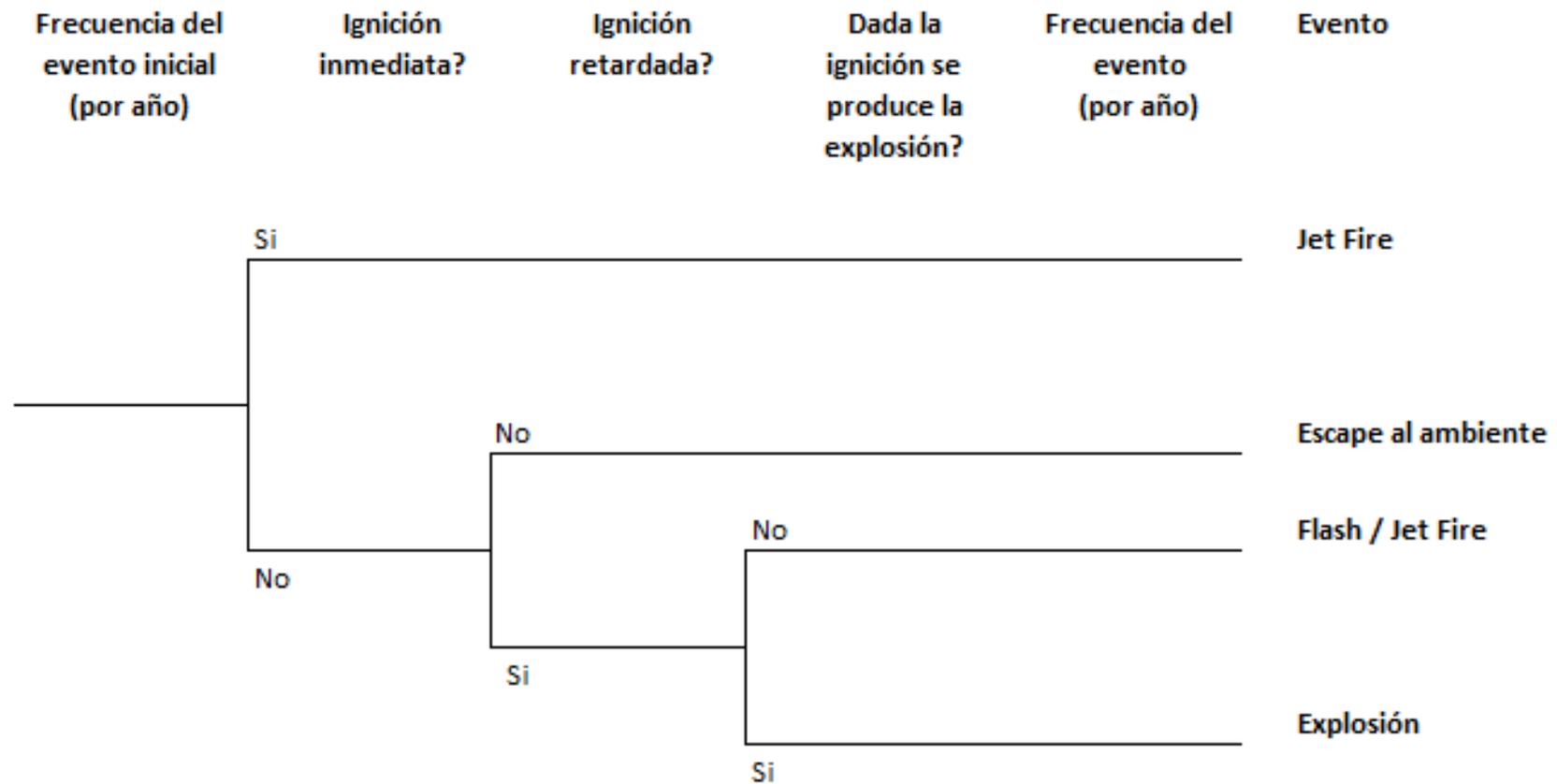
Para el presente trabajo se utilizarán las frecuencias de falla para escapes completos. En la tabla 17 se muestran las frecuencias de falla para algunos accesorios en función de su diámetro, considerando un orificio de escape de diámetro 1 - 3 mm.

**Tabla 17** Frecuencia de falla de accesorios

Tipo accesorio	Ø accesorio (plg)	Frecuencia de falla (ocurrencias / año)
Válvulas	12	9,00E-05
	10	7,17E-05
	8	5,33E-05
	6	3,50E-05
	4	2,25E-05
	2	1,00E-05
	1	3,75E-06
Brida	30	1,88E-04
	48x48	3,32E-04
	10	4,80E-05
	8	4,00E-05
	6	3,20E-05
	4	2,75E-05
	3	2,53E-05
Tapa	24	1,40E-04
	PSV	1,90E-04
Instrumentos	1	1,40E-04

*Nota:* Orificios de diámetro 1 – 3 mm, escape completo (Det Norske Veritas, 2006)

Una vez que hemos determinado la frecuencia de falla o evento iniciador (escape), se debe determinar la frecuencia de ocurrencia del escenario (explosión), para lo cual se utilizará un árbol de eventos como el que se muestra en la figura 5 (CCPS, 2012). El árbol de eventos es un método que utiliza un criterio común para cuantificar la frecuencia de cada escenario. El árbol de eventos puede ser visto como un espejo del árbol de fallas.



**Figura 5** Árbol de eventos para determinación de las frecuencias

### **Cálculo de las consecuencias**

Para modelar las consecuencias de la explosión se utilizará el método de multi-energía, el cual asume, para la modelación del estallido, que se trata de una combustión deflagrante, este supuesto se basa en el hecho de que la detonación de una nube de vapor no confinada es extremadamente imposible.

Este método se basa en que la energía de explosión es altamente dependiente del nivel de congestión y menos dependiente del combustible en la nube.

El método propone el siguiente procedimiento para modelar las consecuencias de la explosión de una nube de vapor (citado por CCPS, 2000):

1. Realizar un análisis de dispersión para determinar la extensión de la nube. Generalmente esto se ejecuta asumiendo que los equipos y edificaciones no están presentes. Esto debido a las limitaciones de modelar la dispersión en áreas congestionadas.
2. Inspeccionar en campo para identificar áreas congestionadas. Normalmente los vapores pesados tienden a moverse cuesta abajo.
3. Identificar potenciales fuentes de explosión presentes dentro del área cubierta por la nube inflamable. Potenciales fuentes de explosión incluyen:
  - a. Áreas y edificaciones tales como equipos de proceso en plantas químicas o refinerías, cajas o pallets apilados y racks de tuberías.
  - b. Planos paralelos extendidos entre los espacios (por ejemplo áreas cercanas de parqueo de autos) y edificaciones extensas (estacionamientos de varios pisos).
  - c. Espacios dentro de estructuras tubulares, por ejemplo túneles, pasarelas, corredores, sistemas de aguas residuales, alcantarillas.
  - d. Mezcla turbulenta de combustible-aire de gran intensidad, que dan como

resultado un chorro de alta presión.

Se asume que el resto de la mezcla combustible-aire producirá una explosión menos fuerte.

4. Estimar la energía equivalente de las cargas combustible-aire.
  - a. Considere separadamente cada fuente de explosión.
  - b. Asuma que la cantidad total de la mezcla combustible-aire presente dentro de las áreas y/o chorros parcialmente confinados/obstruidos, identificados como fuentes de explosión en la nube, contribuyen a la explosión.
  - c. Estime los volúmenes de mezcla combustible-aire presentes en las áreas individuales identificadas como fuentes de explosión. Esta estimación puede ser realizada sobre las dimensiones totales de las áreas y/o chorros. Tenga en cuenta que la mezcla inflamable puede no llenar todo el volumen de la fuente de explosión y que el volumen de los equipos debe ser considerado como una porción representativa del volumen total.
  - d. Calcular la energía de combustión  $E$  (J) para cada explosión, multiplicando los volúmenes individuales de la mezcla por  $3,5 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ . Este valor es el promedio típico para el calor de combustión de los hidrocarburos en mezcla estequiométrica (citado por CCPS, 2000).
5. Estimar la potencia de las explosiones individuales. Algunas compañías han definido procedimientos para esto, sin embargo muchos analistas de riesgos prefieren usar su propio criterio.
  - a. Una estimación segura y muy conservadora puede ser realizada al escoger un valor de 10 para la potencia de una fuente de explosión fuerte (este valor representa una detonación). Sin embargo, una potencia de la fuente

de 7 parece un valor más preciso, dada la experiencia actual. Además para un pico de sobre presión menor o igual a 0,5 bar, no se observan diferencias tomando valores de 7 a 10 para la potencia de las fuentes o intensidad del estallido.

- b. La explosión resultante del resto de la nube no confinada, no obstruida, puede ser modelada asumiendo una baja potencia inicial. Para partes alargadas estáticas se asume una potencia mínima de 1. Para las demás partes no estáticas, que tienen un movimiento turbulento de baja intensidad se asume una potencia de 3.
6. Una vez que las cantidades de energía E y la potencia inicial de la explosión de las cargas individuales combustible-aire son estimados, el pico de sobre presión y la duración en fase positiva a una distancia R desde una fuente de explosión son determinadas a partir de las cartas mostradas en el Anexo D, luego de calcular la distancia escalada:

**Ecuación 58.** 
$$\bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}$$

Donde:

$\bar{R}$  Es la distancia escalada desde la carga, adimensional

R Es la distancia desde la carga, en m

E Es la energía de combustión de la carga, en J

$P_0$  Es la presión ambiente, en Pa

El pico de sobre presión de la explosión y la duración de la fase positiva son calculadas de las cantidades escaladas:

**Ecuación 59.**  $P_s = \Delta \bar{P}_s \cdot P_0$  y

**Ecuación 60.**  $t_d = \bar{t}_d \left[ \frac{(E/P_0)^{1/3}}{c_0} \right]$

Donde:

$P_s$  Es el pico de sobrepresión, en Pa

$\Delta \bar{P}_s$  Es el pico de sobrepresión escalado, adimensional

$P_0$  Es la presión ambiente, en Pa

$t_d$  Es la duración de la fase positiva, en s

$\bar{t}_d$  Es la duración escalada de la fase positiva, adimensional

$E$  Es la energía de combustión de la carga, en J

$C_0$  La velocidad del sonido en condiciones ambientales (m/s)

Si las fuentes de explosión están ubicadas muy cerca entre ellas deben ser introducidas casi simultáneamente. La coincidencia de su explosión en un lugar alejado no debe ser excluida, y sus respectivas explosiones deben ser superpuestas. Una aproximación más conservativa consiste en asumir una potencia máxima inicial de 10 e ir sumando la energía de combustión de cada fuente en cuestión.

La posibilidad de la detonación de una nube no confinada debe ser considerada si (a) las condiciones atmosféricas y ambientales son tales que la dispersión es muy lenta; (b) una gran ignición retardada o demorada es probable. En este caso la cantidad total de combustible mezclado dentro de sus límites de detonación debe ser asumida para la carga combustible-aire, que es una potencia inicial máxima de 10.

### 1.2.2.7 Cálculo del riesgo

El riesgo de un evento como consecuencia de un escenario peligroso es el producto de la vulnerabilidad de los ocupantes y la frecuencia a la cual el impacto es realizado (expresado en ocurrencias por año). Dependiendo del tipo de riesgo a calcular, otros factores tales como el factor de presencia (fracción del tiempo en la que un individuo está expuesto) y el nivel de ocupación, pueden intervenir en el cálculo (CCPS, 2012).

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia (oc/año)} \times \text{Vulnerab. de los ocupantes} \times [\text{otros factores}]$$

#### Riesgo individual

El cálculo del riesgo individual para una edificación ocupada por personas requiere de la combinación de la frecuencia de las consecuencias del evento, la vulnerabilidad de los ocupantes y en el presente trabajo el factor de presencia para los individuos más expuestos. La tabla 18 muestra una aproximación para el cálculo del riesgo individual para múltiples edificaciones dentro de plantas de proceso.

**Ecuación 61.** 
$$R_{1,1} = I_1 \cdot V_{1,1} \cdot T_1$$

Donde

$I_1$  Frecuencia del incidente

$V_{1,1}$  Vulnerabilidad de los ocupantes

$T_1$  Fracción del tiempo de permanencia calculado como horas por semana / 168, que los individuos más expuestos están en la edificación B1.

**Tabla 18** Cálculo del riesgo individual

Unidad de Proceso	No. de edificación	Frecuencia del incidente	Vulnerabilidad de los ocupantes	Tracción de tiempo de permanencia	Riesgo individual
U <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	f <sub>1</sub>	V <sub>1,1</sub>	T <sub>1</sub>	R <sub>1,1</sub>
U <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	f <sub>1</sub>	V <sub>1,2</sub>	T <sub>2</sub>	R <sub>1,2</sub>
U <sub>1</sub>	B <sub>3</sub>	f <sub>1</sub>	V <sub>1,3</sub>	T <sub>3</sub>	R <sub>1,3</sub>
U <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	V <sub>2,1</sub>	T <sub>1</sub>	R <sub>2,1</sub>
U <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	f <sub>2</sub>	V <sub>2,2</sub>	T <sub>2</sub>	R <sub>2,2</sub>
U <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	f <sub>2</sub>	V <sub>2,3</sub>	T <sub>3</sub>	R <sub>2,3</sub>

*Nota:* Tomado de CCPS (2012)

El riesgo total individual de los más expuestos en una edificación particular es la suma del componente del riesgo (por ejemplo de incendio o explosión) que ocasiona cada unidad de proceso (por ejemplo el área de tanques de proceso) a la edificación. Por ejemplo:

**Ecuación 62.** 
$$R(1) = R_{1,1} + R_{2,1}$$

Donde

$R(I)$  Riesgo individual de los más expuestos en un edificación B1 de la planta

$R_{1,I}$  Componente de riesgo de la unidad de proceso  $U_1$

$R_{2,I}$  Componente de riesgo de la unidad de proceso  $U_2$

### **Riesgo agregado**

En el riesgo individual el resultado de interés es la vulnerabilidad de los ocupantes.

En el riesgo agregado el resultado de interés es la vulnerabilidad de los ocupantes multiplicado por el número de ocupantes, lo cual resulta en un número esperado de personas que experimentan alguna consecuencia de interés. El número de ocupantes o nivel de ocupación típicamente no es un valor constante, así que una fracción de tiempo es frecuentemente utilizada para abordar los diferentes niveles de ocupación (por ejemplo día vs noche, por desplazamientos, normal vs pico de ocupación) de una edificación dada.

La tabla 19 muestra una tabla para el cálculo del riesgo agregado. El riesgo agregado está expresado como número de escenarios resultante en  $N$  daños serios o fatalidades por año.

La frecuencia  $f_{i,j,k}$  a la cual el escenario  $i$  podría afectar la edificación  $j$  durante una fracción de tiempo  $k$  puede ser calculada como sigue:

**Ecuación 63.** 
$$f_{i,j,k} = I_i x_{j,k}$$

**Tabla 19** Cálculo del riesgo agregado

Unidad de Proceso	No. de edificación	Frecuencia del incidente	Vulnerabilidad de los ocupantes	Ocupación de la edificación	Fracción de todos los tiempos en que este nivel de ocupación existe	Frecuencia de las consecuencias	No. De daños serios o fatalidades (consecuencias)
$U_1$	$B_1$	$f_1$	$V_{11}$	$M_{11}$	$X_{11}$	$f_{111}$	$N_{111}$
				.	.	.	.
				$M_{1n}$	$X_{1n}$	$f_{11n}$	$N_{11n}$
$U_1$	$B_2$	$f_1$	$V_{12}$	$M_{21}$	$X_{21}$	$f_{121}$	$N_{121}$
				.	.	.	.
				$M_{2n}$	$X_{2n}$	$f_{12n}$	$N_{12n}$
$U_1$	$B_3$	$f_1$	$V_{13}$	$M_{31}$	$X_{31}$	$f_{131}$	$N_{131}$
				.	.	.	.
				$M_{3n}$	$X_{3n}$	$f_{13n}$	$N_{13n}$
$U_2$	$B_1$	$f_2$	$V_{21}$	$M_{11}$	$X_{11}$	$f_{211}$	$N_{211}$
				.	.	.	.
				$M_{1n}$	$X_{1n}$	$f_{21n}$	$N_{21n}$
$U_2$	$B_2$	$f_2$	$V_{22}$	$M_{21}$	$X_{21}$	$f_{221}$	$N_{221}$
				.	.	.	.
				$M_{2n}$	$X_{2n}$	$f_{22n}$	$N_{22n}$
$U_2$	$B_3$	$f_2$	$V_{23}$	$M_{31}$	$X_{31}$	$f_{231}$	$N_{231}$
				.	.	.	.
				$M_{3n}$	$X_{3n}$	$f_{23n}$	$N_{23n}$

Nota: Tomado de CCPS (2012)

El número de fatalidades u otra consecuencia específica  $N_{i,j,k}$  en una edificación  $j$  causada por el escenario  $i$  durante la fracción de tiempo  $k$ , puede ser calculada como sigue:

**Ecuación 64.** 
$$N_{i,j,k} = p_{i,j} M_{j,k}$$

Donde

- $I_i$  Frecuencia del incidente
- $p_{i,j}$  Vulnerabilidad de los ocupantes de la edificación
- $M_{j,k}$  Ocupación de la edificación
- $x_{j,k}$  Fracción de tiempo  $M_{j,k}$  en que la ocupación existe
- $i$  Indicador del escenario
- $j$  Indicador de edificación
- $k$  Indicador del caso de ocupación

Los pares de frecuencia y consecuencia generados en la tabla 19 son ordenados de mayor a menor, por orden de consecuencias, siendo el escenario top el que resulte en el número más alto de daños. Luego se obtiene la frecuencia acumulada F para cada número de afectados N, obteniéndose finalmente la respectiva curva F – N.

### **Vulnerabilidad de los ocupantes**

De acuerdo a la norma API RP 752 Gestión de Peligros Asociados con la Ubicación de Construcciones en Plantas de Proceso (API, 1995), para evaluar la vulnerabilidad de los ocupantes se requiere la siguiente información:

- a. Tipo de edificación
- b. Sobre presión relacionada con cada tipo de edificación
- c. Relación daño en función de la vulnerabilidad

#### Tipo de edificación

Dentro de una instalación de facilidades existen diversos tipos de construcciones, sin

embargo estas pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- B1: Tráiler o caseta con estructura de madera.
- B2: Edificación pre fabricada con estructura de acero o revestimiento metálico.
- B3: Edificio con paredes no reforzadas con mampostería.
- B4: Estructura de acero u hormigón estructural relleno o revestido con mampostería reforzada.
- B5: Edificaciones con paredes de concreto o mampostería resistente al cizallamiento.

#### Daños por sobre presión en función del tipo de edificación

Los siguientes efectos por sobre presión, a las construcciones antes mencionada, se han determinado en base a la experiencia de accidentes pasados, pruebas de armas nucleares o de otra fuente por sobre (API RP 72, 1995).

- a. Edificaciones tipo B1: Mediante la observación de la destrucción causada por tormentas severas, se puede inferir (para edificaciones permanentes) que una explosión de aproximadamente la presión del viento o 0,2 psi marcarían el inicio de efectos graves para estos edificios.
- b. Edificaciones tipo B2: La estructura en este tipo de edificaciones provee soporte para el techo, el cual es independiente de las paredes. Registros de guerra indican que las láminas son arrancadas y las paredes internas son dañadas a sobrepresiones mayores a 1,5 psi; la estructura del edificio permanece en pie, pero el revestimiento y las paredes son dañadas a más de 2,5 psi. El colapso completo del edificio ocurre a más de 5 psi.
- c. Edificaciones tipo B3: Este tipo de edificaciones es similar a pequeñas

construcciones comerciales o domésticas. Las paredes colapsan a 1 psi aproximadamente y el colapso total de la edificación ocurre a un valor cercano a 1,5 psi.

- d. Edificaciones tipo B4: Este tipo de edificios regularmente sufre daños en condiciones de tormenta; sin embargo este tipo de edificios proporciona un comportamiento robusto durante una explosión. El daño a las paredes puede ocurrir a 1,0 psi. La losa del techo puede colapsar a 2,0 psi y el colapso total del edificio se produce a 2,5 psi.
- e. Edificaciones tipo B5: La edificación está generalmente diseñada para soportar 2,0 psi, así que un daño mínimo ocurrirá. Las paredes externas y techo se desviarán bajo carga y las paredes internas sufrirán daño a 4,0 psi aproximadamente. La edificación tendrá el mayor daño y posible colapso a 6,0 psi.

#### Relación entre daño por sobre presión y vulnerabilidad

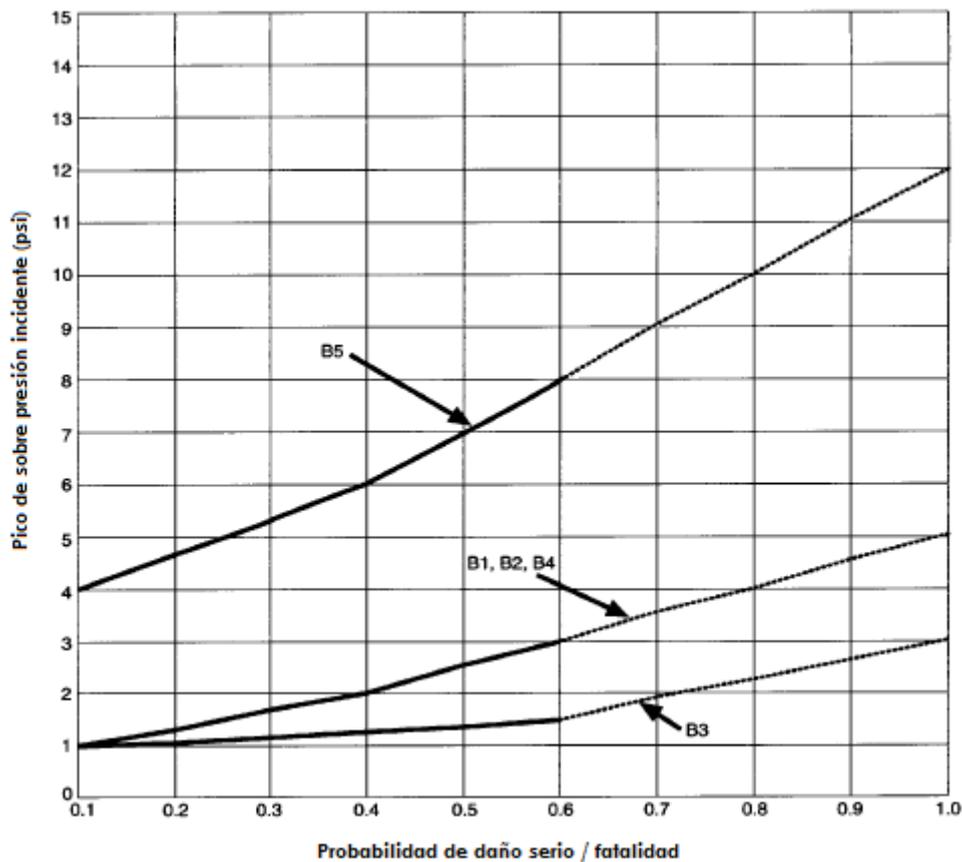
Algunos datos generales de esta relación, también llamada probabilidad de fatalidad (letalidad), se mencionan a continuación:

- a. Destrucción del edificio: Una vulnerabilidad de 1,0 psi, es escogida para edificaciones expuestas a una onda de presión significativamente más grande que la que conduce al colapso de la edificación, tal como se muestra con líneas punteadas en la figura 6.
- b. Colapso del edificio: Una vulnerabilidad de 0,6 fue escogida basado en los datos de colapso de edificios por terremotos, guerras y accidentes ocurridos.
- c. Daño menor: En base a los estudios reportados por Lees (citado por API

RP 752), se asumió que la vulnerabilidad de los ocupantes sería de 0,01 para daños menores, tales como rotura de vidrios.

### Gráfico de Sobre presión versus vulnerabilidad

Un resumen de la relación entre niveles de sobre presión y vulnerabilidades para los ocupantes por tipo de edificación se muestra en la figura 6 (CCPS, 2012).



**Figura 6** Sobre presión versus vulnerabilidad

### **1.2.3 Marco Conceptual**

#### **Atmósfera no explosiva (Ambiente Inerte o purgado)**

Es todo ambiente o recinto que dispone de aire limpio o inerte a un determinado flujo y presión positiva, que garantiza la no concentración de mezcla inflamable y posterior ignición. Para la instalación eléctrica en estos ambientes se pueden utilizar los productos estándar.

#### **Atmósfera explosiva (Hazardous Area/ Hazardous Location)**

Es una atmósfera en la que existe o está presente una mezcla de aire con gases, vapores o nieblas inflamables en condiciones atmosféricas normales, en la que luego de producida la ignición (chispa) la combustión se propaga a través de toda la mezcla de gas o vapor dispersada en el área.

#### **Área no peligrosa**

Es un área en la cual no se espera que exista una atmósfera explosiva en cantidades tales como para requerir precauciones especiales. En alguna literatura también se puede referir a este lugar como emplazamiento peligroso.

#### **Congestión**

Obstáculos ubicados en la trayectoria de la flama que generan turbulencia.

#### **Consecuencia**

Resultado no deseado de un incidente, usualmente medido en efectos para la salud y seguridad de los trabajadores, impactos al ambiente, daños a la propiedad y costos de

la interrupción de la continuidad del negocio. Las consecuencias pueden ser descritas de manera cualitativa o cuantitativa.

### **Curva F-N**

Un gráfico de la frecuencia acumulada en función de las consecuencias, expresado como número de fatalidades.

### **Deflagración**

Onda de combustión que se propaga a una velocidad menor que la velocidad del sonido (velocidad subsónica).

### **Detonación**

Explosión que se propaga a una velocidad mayor que la del sonido (velocidad supersónica) y que lleva asociada una onda de choque.

### **Estallido**

Un cambio transitorio en la densidad del gas, presión y velocidad del aire que rodea a un punto de explosión. El cambio inicialmente puede ser gradual o continuo. Un cambio discontinuo es referido como una onda de choque, y un cambio gradual es conocido como una onda de presión.

### **Edificación**

Estructura rígida y cerrada.

### **Equipo a prueba de explosión (*Explosion Proof*)**

Es un equipo cerrado y protegido de manera que sea capaz de resistir la explosión de un gas o vapor especificado, que pueda ocurrir en su interior y de impedir, en forma efectiva que la explosión o disturbios internos (chispas, destellos, etc.) produzcan una explosión en el exterior del equipo, si éste se encuentra en una atmósfera explosiva o inflamable.

### **Equipo Eléctrico y Electrónico (Electrical and Electronic Equipment)**

Los materiales, accesorios, dispositivos, artefactos o similares que son parte de, o están en conexión con una instalación eléctrica. El equipo portátil o móvil que tiene su propia fuente de suministro, como el equipo operado por batería, pudiera ser potencialmente una fuente de ignición en lugares peligrosos (clasificados).

### **Equipo intrínsecamente seguro**

Equipo que en condiciones normales o anormales de operación, no libera energía que pueda inflamar cualquier mezcla (circuitos de corrientes y voltajes bajos para control e instrumentación).

### **Equipo con presión positiva**

Es un equipo Es un equipo que en su interior contiene aire limpio o gas inerte a mayor presión que la ambiental, por lo cual no permite la entrada de mezclas explosivas o inflamables.

### **Equipo de seguridad aumentada**

Es un equipo que bajo condiciones normales de operación no provoca, ni genera arcos, chispas o calentamientos excesivos.

**Escenario**

Evento no planeado o secuencia de incidentes que resulta en una pérdida y sus impactos asociados, incluyendo los sucesos o fallas de los resguardos (protecciones) involucrados en la secuencia de eventos.

**Evaluación de riesgo**

Proceso global de estimar la magnitud de los riesgos y decidir si un riesgo es o no es tolerable.

**Explosión**

Una liberación de energía a causa de un estallido.

**Frecuencia**

Número de ocurrencias de un evento por unidad de tiempo.

**Fuente de Ignición**

Es todo aquello capaz de provocar el incendio de una mezcla inflamable, pudiendo ser: una superficie caliente (con elevada temperatura), arco eléctrico, energía estática, chispas, uso de equipo eléctrico no aprobado.

**Fuente de emisión o escape**

Es el lugar a partir del cual se puede liberar al ambiente: gas, vapor, niebla o líquido inflamable de tal forma se origine una atmósfera explosiva.

**Impulso**

Una medida que puede ser usada para definir la capacidad que tiene una onda explosiva para causar daño. Es calculado por la integración de la curva de presión versus tiempo.

**Límites de inflamabilidad**

Las concentraciones mínima y máxima de un material combustible en mezcla homogénea con un oxidante gaseoso, el cual propagará la flama.

**Límite inferior de inflamabilidad**

Concentración de un material combustible en el aire, bajo la cual la ignición no ocurrirá. También es referido en la literatura como Límite Bajo de Explosividad.

**Mezcla Explosiva**

Es la mezcla de aire y vapores ó gases inflamables en una proporción tal que, en contacto con una energía calorífica, inicia un fuego o una explosión.

**Producto Inflamable**

Todo producto líquido que tiene su punto de inflamabilidad (*flash point*), por debajo de los 37.8 °C, se clasifican en productos Clase IA, IB, IC (NFPA 70, Tabla A-1-7.3 Clasificación comparativa de los líquidos).

**Punto de inflamabilidad o *Flash Point***

Temperatura mínima a la cual un producto líquido inflamable o combustible emite suficientes vapores como para formar una mezcla inflamable con aire.

**Riesgos**

Evaluación de un evento peligroso asociado con su probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias.

**Riesgo individual**

El riesgo para la persona en la vecindad de un peligro. Esto incluye la naturaleza del daño al individuo, la probabilidad de ocurrencia del daño, y el período de tiempo sobre el cual el daño puede ocurrir.

**Riesgo Agregado**

Riesgo societario para un grupo de trabajadores presentes en una facilidad, dentro de una edificación.

**Sobrepresión**

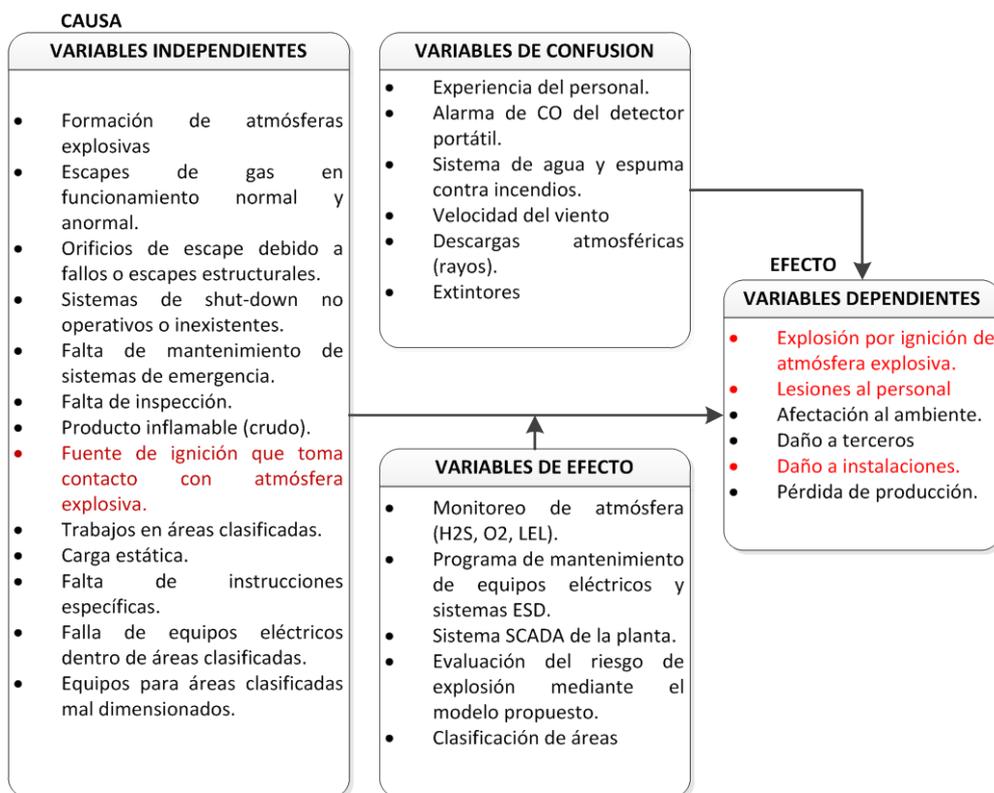
Una presión sobre la atmosférica causada por una explosión

### 1.2.4 Hipótesis

¿Con el modelo de evaluación propuesto se puede determinar el riesgo de explosión de la planta de tratamiento de crudo?

### 1.2.5 Identificación y caracterización de variables

En la figura 7 se muestra la caracterización de las variables identificadas en el problema planteado.



**Figura 7** Identificación y caracterización de las variables

De las variables identificadas se han seleccionado las siguientes variables independientes y dependientes, que tienen concordancia con el problema planteado y los objetivos del presente trabajo:

<b>Tipo de variable</b>	<b>Nombre de la variable</b>
Independiente	Fuente de ignición que toma contacto con atmósfera explosiva.
Dependientes	Explosión por ignición de atmósfera explosiva. Lesiones al personal. Daño a instalaciones.

## **CAPITULO II**

### **METODO**

#### **2.1 Nivel de estudio**

##### **Descriptiva:**

Se busca caracterizar el riesgo de explosión por ignición de atmósfera peligrosa, analizando previamente los métodos de evaluación disponibles, para luego escoger uno de ellos y finalmente realizar un caso práctico de aplicación. Los resultados de la investigación no se compararán con los de otros estudios realizados dentro de este ámbito.

#### **2.2 Modalidad de investigación**

##### **De campo**

Los datos como características constructivas, tipo de ventilación, extensión de las mezclas liberadas, así como los procedimientos de operación y mantenimiento, se levantarán directamente en la planta de tratamiento de crudo.

### **Documental**

Se revisarán los planos, diagramas, registros de mantenimiento, datos técnicos del petróleo crudo, en el medio de soporte que se encuentren disponibles.

### **Proyecto de desarrollo**

Esta investigación tiene por objeto diseñar un modelo para el cálculo de las consecuencias de una explosión por ignición de nube inflamable, para que a futuro se puedan determinar el conjunto de medidas preventivas y de protección para minimizar y/o mitigar este evento en el área de tanques de la planta de tratamiento de crudo.

## **2.3 Método**

### **Método Lógico - deductivo**

Se aplicarán los métodos desarrollados para el análisis de riesgos de explosión, que se encuentren en bibliografía especializada para dar solución a la problemática planteada en el presente trabajo.

## **2.4 Población y muestra**

**Población:** Estudio de caso aplicable al área de tanques de proceso de la planta de tratamiento de crudo de la Empresa de Servicios Petroleros (nombre confidencial).

**Muestra:** No es aplicable en estudio de caso.

## 2.5 Selección de instrumentos de investigación

En el proceso de investigación se revisarán planos, diagramas P&ID, procedimientos / registros de operación y mantenimiento, hojas de datos de crudo / gas natural, hojas técnicas de los equipos eléctricos / electrónicos. Adicionalmente se utilizarán los siguientes instrumentos de investigación:

### Observación directa

Los procedimientos de mantenimiento y operación, las posibles fuentes de escape, la existencia de fuentes de ignición, grado e ineficacia de la ventilación, congestión / confinamiento de los equipos, se observarán directamente en sitio.

### Entrevistas

Se entrevistará a los responsables de operación y mantenimiento de la planta, así como a expertos en el área de ingeniería de facilidades.

## 2.6 Validez y confiabilidad de los instrumentos

Instrumento	Validez	Confiabilidad
Observación	Se categorizarán previamente los hechos a observar, específicamente en el área de tanques de la planta.	Se solicitará al Ingeniero de Facilidades realizar las mismas observaciones para compararlas con las realizadas por el Investigador.

<b>Instrumento</b>	<b>Validez</b>	<b>Confiabledad</b>
Entrevistas	Los datos recogidos en las entrevistas, durante las visitas de campo, serán enviados a los informantes para su validación.	Los datos obtenidos se contrastarán con la información disponible en los documentos de la instalación y con la encontrada en bibliografía especializada.

## 2.7 Operacionalización de las variables

En las tablas 20 y 21 se presenta la operacionalización de las variables seleccionadas en el punto 1.2.5.

**Tabla 20** Matriz de variables independientes

<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>				
<b>NOMBRE DE LA VARIABLE</b>	<b>DEFINICION CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICION OPERACIONAL</b>	<b>NIVEL DE MEDICION</b>	<b>INDICADORES</b>
Fuente de ignición que toma contacto con atmósfera explosiva.	Punto de ignición: condiciones físicas necesarias para que una sustancia empiece a arder y se mantenga la llama sin necesidad de añadir calor exterior.	Estimar la probabilidad de ignición inmediata y retardada.	Numérica adimensional	Probabilidad de ignición retardada

**Tabla 21** Matriz de variables dependientes

<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>				
<b>NOMBRE DE LA VARIABLE</b>	<b>DEFINICION CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICION OPERACIONAL</b>	<b>NIVEL DE MEDICION</b>	<b>INDICADORES</b>
Explosión por ignición de atmósfera explosiva.	Explosión de una nube de vapor que resulta de la ignición de una mezcla inflamable de vapor, gas o niebla, cuya velocidad de flama se acelera para producir una sobre presión significativa.	Estimar la probabilidad de la explosión una vez que se ha producido la ignición retardada de cada escape.	Numérica adimensional	Probabilidad de explosión
Lesiones al personal	Daños que puede sufrir el personal de la instalación como consecuencia directa de la explosión (sobre presión) o indirectamente por la proyección de fragmentos (misiles).	Estimar el pico de presión en función de la distancia recorrida por la onda	Numérica	Sobre presión vs distancia recorrida por la onda
Daño a instalaciones.	Efectos sobre las estructuras de la instalación, que están relacionados con la duración de la sobre presión de la explosión.	Estimar los daños a estructuras en base a la sobre presión calculada	Tablas de estimación de daños encontradas en bibliografía.	Sobre presión vs daños estructurales

## **2.8 Procesamiento de datos**

Los datos serán procesados mediante un procesador de texto (Word) y hojas de cálculo (Excel). Adicionalmente el plano de clasificación del área de tanques será elaborado en Autocad.

## **CAPITULO III**

### **RESULTADOS**

#### **3.1 Levantamiento de datos / información**

El diagrama de bloques de la figura 8 muestra el procedimiento para la evaluación del riesgo de explosión, por ignición de una nube inflamable, el cual será aplicado al caso estudio.

La tabla 22 resume las ecuaciones, tablas y figuras utilizadas en cada paso del procedimiento.

**Tabla 22** Resumen de ecuaciones, tablas y figuras utilizadas en el procedimiento para la evaluación del riesgo de explosión

Paso	Ecuación	Tabla	Figura
Identificación de fuentes de escape		2, 3	
Caracterización del escape		6, 7	
Escape de líquido con $T \leq T_b$	7 a la 16	13	3, 4
Escape de líquido con $T > T_b$	6, 9, 10, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26		
Escape de gas o vapor	2, 3, 4, 5, 6		
Condiciones ambientales	24		
Inflamabilidad	25		
Caracterización de la nube	23, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32	14, 15	
Clasificación de zonas		4, 5, 8, 9, 10, 11, 12	
Identificación de fuentes de ignición		16	
Cálculo de la probabilidad de ignición	33 a la 52		
Cálculo de la probabilidad de la explosión	53, 54, 55, 56, 57		
Frecuencia de eventos iniciadores		17	
Cálculo de la frecuencia de la explosión			5
Consecuencias de la explosión	58, 59, 60		16
Riesgo individual	61, 62	18	
Riesgo agregado	63, 64	19	
Vulnerabilidad de los ocupantes	61, 64	18, 19	6
Fracción de tiempo de permanencia	61		
Fracción de tiempo de ocupación	64		

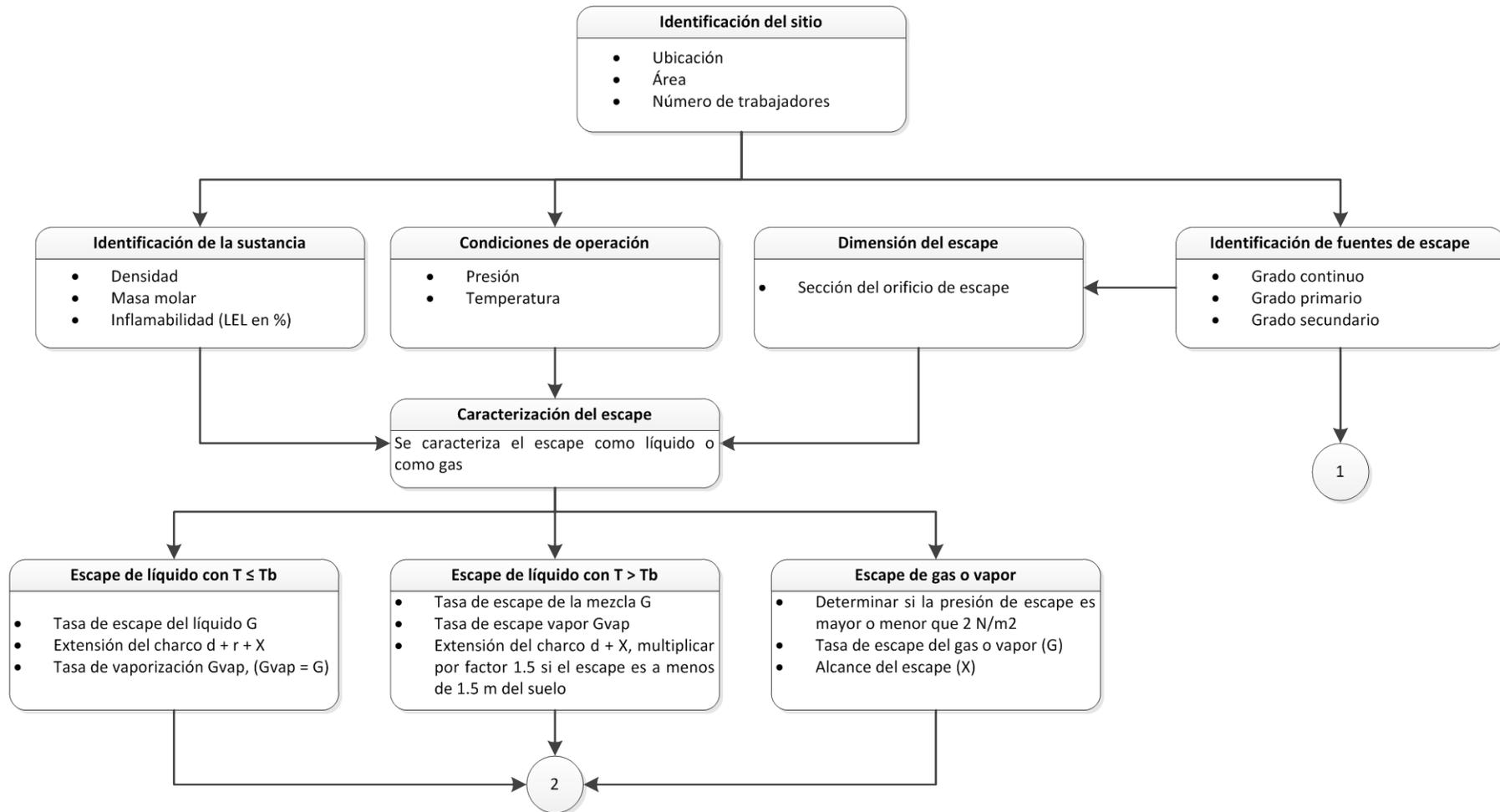


Figura 8 Modelo para la evaluación del riesgo de explosión

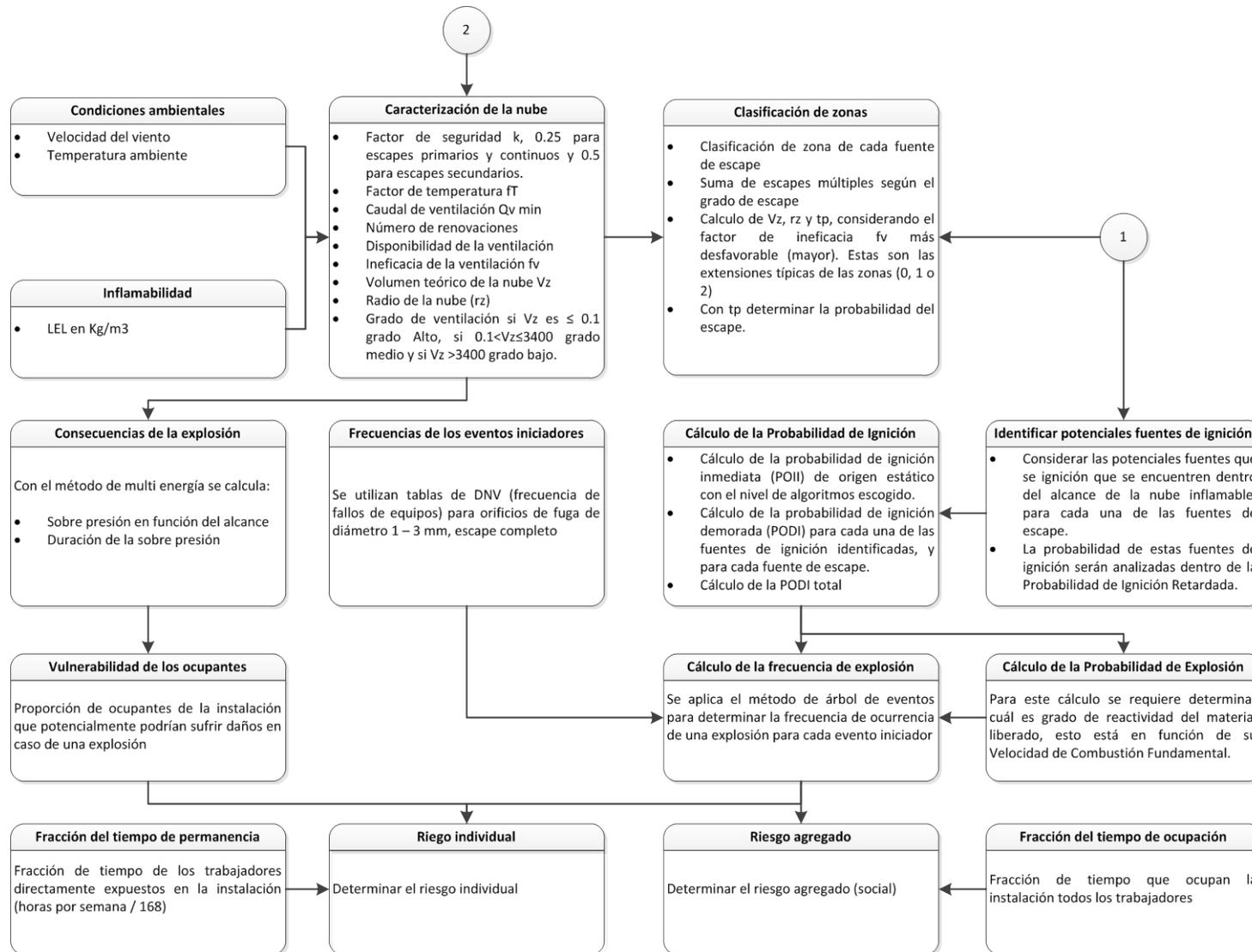


Figura 8 (Cont.)

### 3.2 Caso de estudio

El método de evaluación propuesto en el capítulo anterior ha sido aplicado a la planta de tratamiento de crudo, específicamente al área de tanques de proceso.

#### Identificación del lugar de trabajo

Planta de tratamiento de crudo (nombre confidencial)

Ubicación: Provincia de Orellana a 46 km de la ciudad de El Coca

Longitud: 76° 40'

Latitud: 0° 20' Sur

Área total del centro de facilidades de producción: 65650 m<sup>2</sup>

Área total de la planta: 23250 m<sup>2</sup>

Área de tanques de proceso: 2270 m<sup>2</sup>

Número de personas fijas en la planta: 14

La planta está compuesta por 2 manifolds, 4 separadores, 3 tanques de proceso (lavado, estabilización y oleoducto) de 10000 bls c/u, 2 botas de gas, 1 sistema de inyección de agua (2 tanques de agua de formación, filtros, bombas y variadores), 3 bombas de despacho, sumidero, pileta API, piscina de contingencia, 1 tanque de agua contra incendios, 1 tanque de agua de servicios, 3 teas, 2 áreas de generación, 1 shelter de generación, área de transformadores y variadores, 1 planta de tratamiento de gas, 3 KOD drums, scrubers.

El área de servicios generales compuesto de oficinas, cuarto de control (control room), comedor, sala de entretenimiento y dormitorios.

La permanencia del personal de operaciones en el control room y shelter de generación, respectivamente, se muestra en la tabla 23. La ocupación de las

instalaciones mencionadas, por parte de la población fija de la planta, se presenta en la tabla 24.

El Operador de planta realiza el aforo de tanques diariamente a las 04h00, 12h00 y 16h00, con un tiempo de exposición máxima de 10 minutos por cada tanque. Este trabajo se efectúa por la boca de aforo ubicada en el techo del tanque, utilizando una cinta de aforo provista con pinza de puesta a tierra.

Adicionalmente el Operador o el Laboratorista toman muestras de crudo en la toma de muestras del tanque T-109 dos veces al día, con una exposición máxima de 5 minutos.

El bombeo de petróleo desde los tanques T-110A y T-110B se realiza de tal forma que se mantienen en un nivel de 6' promedio.

**Tabla 23** Tiempo de permanencia del personal en el control room y shelter de generación de la planta

<b>Lugar</b>	<b>Tiempo de permanencia (h)</b>	<b>Fracción permanencia</b>
Control room	23,5	0,98
Shelter de generación	10,5	0,44

**Tabla 24** Tiempo de ocupación del personal en el control room y shelter de generación de la planta

<b>Lugar</b>	<b>Tiempo de ocupación</b>	<b>Número ocupantes promedio</b>	<b>Fracción de tiempo</b>
Control room	6:00 am - 6:30 am	4	0,02
	6:30 am - 7:00 am	14	0,02
	7:00 am - 12:30 pm	5	0,23
	13:00 pm - 18:00 pm	3	0,34
	18:00 pm - 18:30 pm	3	0,02
	18:30 pm - 06:00 am	2	0,48
Shelter de generación	07:00 am - 08:00 am	1	0,04
	08:00 am - 08:30 am	3	0,02
	08:30 am - 12:30 pm	1	0,17
	13:00 pm - 14:00 pm	1	0,04
	14:00 pm - 15:00 pm	2	0,04
	15:00 pm - 18:00 pm	1	0,13

En la figura 9 se presenta el layout de planta mostrando la ubicación el área de tanques de proceso, el control room y el shelter de generación.

#### Condiciones ambientales

En la siguiente tabla se presenta las condiciones ambientales de la planta:

**Tabla 25** Condiciones ambientales de la planta

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Temperatura máxima verano	32	°C
Presión atmosférica media	755	mmHg
Velocidad del viento (E0)	9,7	Km/h
Altura sobre el nivel del mar	255	m
Rango de humedad	85 - 90	%
Pluviosidad máxima	400	mm/mes
Nivel sísmico	2A	

Parámetros de operación del área de tanques

Los parámetros de operación de cada uno de los recipientes del área de tanques se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 26** Parámetros de operación del área de tanques de proceso de la planta

<b>Descripción</b>	<b>Código</b>	<b>Temp. °F</b>	<b>Temp. °K</b>
Bota de gas	V-124	130	327
Bota de gas	V-125	133	329
Tanque de lavado 10000 bls cap.	T-109	130	327
Tanque de surgencia 10000 bls cap.	T-110A	112	317
Tanque de oleoducto 10000 lbs cap.	T-110B	72	295



Figura 9 Layout de la planta de tratamiento de crudo, del caso estudio

Identificación de las sustancias

En la siguiente tabla se presenta las características físicas – químicas del crudo y gas natural, respectivamente:

**Tabla 27** Características físico-químicas del crudo y gas natural

Parámetro / Nombre		Petróleo crudo	Gas natural
Punto de destello (°C)		43,09	43,09
Densidad relativa del aire del gas o vapor			1,1
Densidad del líquido $\rho_{liq}$ (kg/m <sup>3</sup> )		923,9	-
Coefficiente de difusión $C_d$ (m <sup>2</sup> /h)			0,090
Relación entre los calores específicos $\gamma$ ( $C_p / C_v$ )			1,184
Calor específico a presión constante, $C_p$ (btu /lbm*°F)		27,079	0,412
Calor específico a volumen constante, $C_v$ (btu /lbm*°F)		154,06	0,348
Masa molecular $M$ kg/kmol		197,53	31,82
Límite de explosividad en aire	LIE % vol.	2,92	2,92
	LSE % vol.	6	6
Volatilidad	Temp. de ebullición (°C)	274,4	274,4
	Tensión de vapor a 32°C (Pa)	3,93E+04	
	Tensión de vapor a 37,7°C (Pa)	4,69E+04	
	Tensión de vapor a 32°C fracción pv (Pa)	0,39	
Temperatura de auto ignición °C		407	482
MIE mJ		0,4	0,4
Grupo y clase de temperatura		IIAT3	IIAT1

Identificación de las fuentes de escape

La tabla 28 muestra el grado de escape para las 10 conexiones con mayor tasa de escape, en el Anexo E.1 se detalla las posibles fuentes de escape de todos los recipientes del área de tanques.

**Tabla 28** Identificación de las posibles fuentes de escape

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Diámetro Ø (plg)	Altura (mm)	Sustancia	LIE (% Vol. Aire)	Densidad del Líq. $\sigma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Masa molecular (Kg/Kmol)	Grado escape
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-109	10	560	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
2	Salida de crudo	Válvula	T-109	12	455	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
8	Ingreso de agua tratada	Válvula	T-109	10	4515	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
13	Libre	Brida	T-109	4	3100	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
1	Entrada de producto	Válvula	V-124	8	914	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
2	Salida de producto	Válvula	V-124	8	1800	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
8	Manómetro	Instrumento	V-124	1	1611	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
1	Entrada de producto	Válvula	V-125	8	914	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
2	Salida de producto	Válvula	V-125	8	1800	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario
8	Manómetro	Instrumento	V-125	1	1475	crudo	2,92	923,9	197,53	Secundario

Caracterización de los escapes por cada fuente de escape

La tabla 29 muestra las 10 conexiones con mayor tasa de escape ( $G_e$ ), en el Anexo E.2 se detalla el cálculo de  $G_e$  para todas las posibles fuentes de escape de los recipientes.

**Tabla 29** Caracterización de los posibles escapes

# Escape	Descripción de la conexión	Cód. ubicación	Grado escape	Presión Operación (N/m <sup>2</sup> )	Temperatura Operación (°K)	LIE (Kg/m <sup>3</sup> )	Sección orificio "a" (m <sup>2</sup> )	Tasa de escape $G_e$ (kg/s)	d + r + X (m)	Gvap charco (kg/s)
1	Ingreso de crudo	T-109	Secundario	1,74E+05	327,44	0,23	2,50E-06	2,33E-02	4,39	2,33E-02
2	Salida de crudo	T-109	Secundario	1,75E+05	327,44	0,23	2,50E-06	2,35E-02	4,08	2,35E-02
8	Ingreso de agua tratada	T-109	Secundario	1,38E+05	327,44	0,23	2,50E-06	1,67E-02	7,77	1,67E-02
13	Libre	T-109	Secundario	1,51E+05	327,44	0,23	2,50E-06	1,94E-02	7,55	1,94E-02
1	Entrada de producto	V-124	Secundario	1,71E+05	327,44	0,23	2,50E-06	2,28E-02	5,23	2,28E-02
2	Salida de producto	V-124	Secundario	1,63E+05	327,44	0,23	2,50E-06	2,15E-02	6,57	2,15E-02
8	Manómetro	V-124	Secundario	1,64E+05	327,44	0,23	2,50E-06	2,18E-02	6,35	2,18E-02
1	Entrada de producto	V-125	Secundario	1,71E+05	329,11	0,23	2,50E-06	2,28E-02	5,23	2,28E-02
2	Salida de producto	V-125	Secundario	1,63E+05	329,11	0,23	2,50E-06	2,15E-02	6,57	2,15E-02
8	Manómetro	V-125	Secundario	1,66E+05	329,11	0,23	2,50E-06	2,20E-02	6,17	2,20E-02

En esta tabla se determina el máximo alcance de la fuga que formará un charco, que para el caso del tanque T-109 sería el del escape #8 con un valor de 7,77 m, el cual redondeado nos daría un valor de 8m, mismo que se hará extensivo a los tanques T-110A y T-

110B, ya que estos pueden operar en determinado momento a su máxima capacidad, bajo las mismas condiciones que el tanque T-109. Este valor es el máximo alcance de la zona 2 para cada tanque.

Realizando el mismo razonamiento se deduce que para las botas de gas V-124 y V-125, el alcance máximo para la zona 2 es de 6,57 m, que redondeado dará un valor de 7 m.

Caracterización de la nube formada por las fuentes de escape

La tabla 30 muestra el volumen teórico  $V_z$ , el radio de la nube  $r_z$  y el tiempo de permanencia  $t_p$  para las 10 conexiones con mayor tasa de escape, en el Anexo E.3 se detalla el cálculo de estos parámetros para todas las posibles fuentes de escape de los recipientes.

**Tabla 30** Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape

# Escape	Descripción de la conexión	Cód. ubicación	Tasa de escape $G_e$ (kg/s)	k	$f_T$	$Q_{vmin}$ ( $m^3/s$ )	Veloc. Viento V (m/s)	Renov. Aire c ( $s^{-1}$ )	Ineficacia ventilación $f_v$	Volumen teórico $V_z$ ( $m^3$ )	Radio esfera $r_z$ (m)	Tiempo de permanencia t (s)
1	Ingreso de crudo	T-109	2,33E-02	0,5	1,04	0,21	2,69	0,18	3	3,52	0,94	70,59
2	Salida de crudo	T-109	2,35E-02	0,5	1,04	0,21	2,69	0,18	3	3,54	0,95	70,59
8	Ingreso de agua tratada	T-109	1,67E-02	0,5	1,04	0,15	2,69	0,18	3	2,53	0,84	70,59
13	Libre	T-109	1,94E-02	0,5	1,04	0,17	2,69	0,18	3	2,92	0,89	70,59
1	Entrada de producto	V-124	2,28E-02	0,5	1,04	0,21	2,69	0,18	3	3,44	0,94	70,59
2	Salida de producto	V-124	2,15E-02	0,5	1,04	0,19	2,69	0,18	3	3,24	0,92	70,59
8	Manómetro	V-124	2,18E-02	0,5	1,04	0,20	2,69	0,18	3	3,29	0,92	70,59
1	Entrada de producto	V-125	2,28E-02	0,5	1,04	0,21	2,69	0,18	3	3,46	0,94	70,59
2	Salida de producto	V-125	2,15E-02	0,5	1,04	0,20	2,69	0,18	3	3,26	0,92	70,59
8	Manómetro	V-125	2,20E-02	0,5	1,04	0,20	2,69	0,18	3	3,33	0,93	70,59

Clasificación de las zonas originadas por los escapes

La tabla 31 muestra la clasificación de zonas peligrosa para las 10 conexiones con mayor tasa de escape, en el Anexo E.4 se detalla la clasificación de zonas de todos los recipientes.

**Tabla 31** Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape

# Escape	Descripción de la conexión	Cód. ubicación	Grado escape	Disponib. de la ventilación	Grado de ventilación	Tipo de zona
1	Ingreso de crudo	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
2	Salida de crudo	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
8	Ingreso de agua tratada	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
13	Libre	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
1	Entrada de producto	V-124	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
2	Salida de producto	V-124	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
8	Manómetro	V-124	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
1	Entrada de producto	V-125	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
2	Salida de producto	V-125	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
8	Manómetro	V-125	Secundario	Buena	Medio	Zona 2

Dimensiones de las zonas peligrosas típicas

La tabla 32 resume las dimensiones de las zonas típicas de cada uno de los recipientes, en el Anexo E.5 se presenta el cálculo pormenorizado de las de las dimensiones correspondientes a las zonas típicas de cada uno de los recipientes.

La clasificación de zonas peligrosas del área de tanques de almacenamiento se muestra en la figura 10.

**Tabla 32** Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva

Clasificación de zona	T-109		T-110A		T-110B		V-124		V-125	
	$r_z$ (m)	$t_p$ (h)								
Zona 0										
Zona 1	0,58	0,023	0,21	0,008	0,21	0,008				
Zona 2	0,95	0,020	0,73	0,020	0,72	0,020	0,94	0,020	0,94	0,020

Para el caso del tanque T-109, dado que el gas escapado es ligeramente menos denso que el aire, se adoptará el doble de los valores de  $r_z$  calculados, para la zona 1 y zona 2 respectivamente. Entonces el radio de la zona 1 será de  $0,58 \times 2 = 1,16$  m, el cual se redondeará a 1,20 m, para la zona 2 será de  $0,95 \times 2 = 1,90$  m, mismo que se redondeará a 2 m. Estos valores se harán extensivos a los tanques T-110A y T-110B, debido a que en determinado momento pueden operar a su máxima capacidad, bajo las mismas condiciones que el tanque T-109. La figura 11 muestra un detalle de las zonas peligrosas de un tanque de almacenamiento.

Haciendo las mismas consideraciones para el caso de las botas de gas, el radio  $r_z$ , de la zona 2 quedaría con una dimensión de  $0,94 \times 2 = 1,88$  m, el cual se aproximará a 2 m. La figura 12 muestra un detalle de las zonas peligrosas de un recipiente a presión, como es la bota de gas.

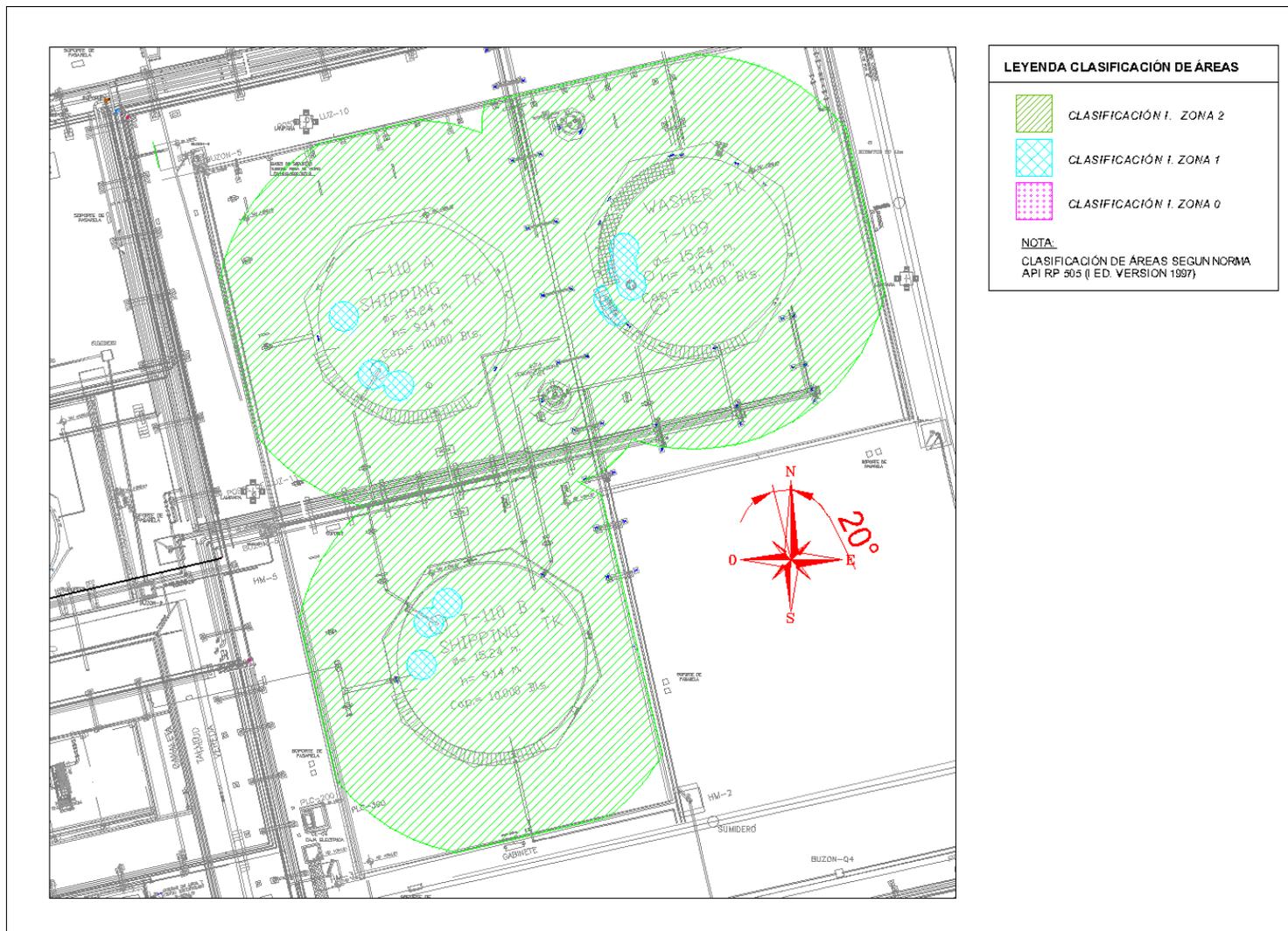
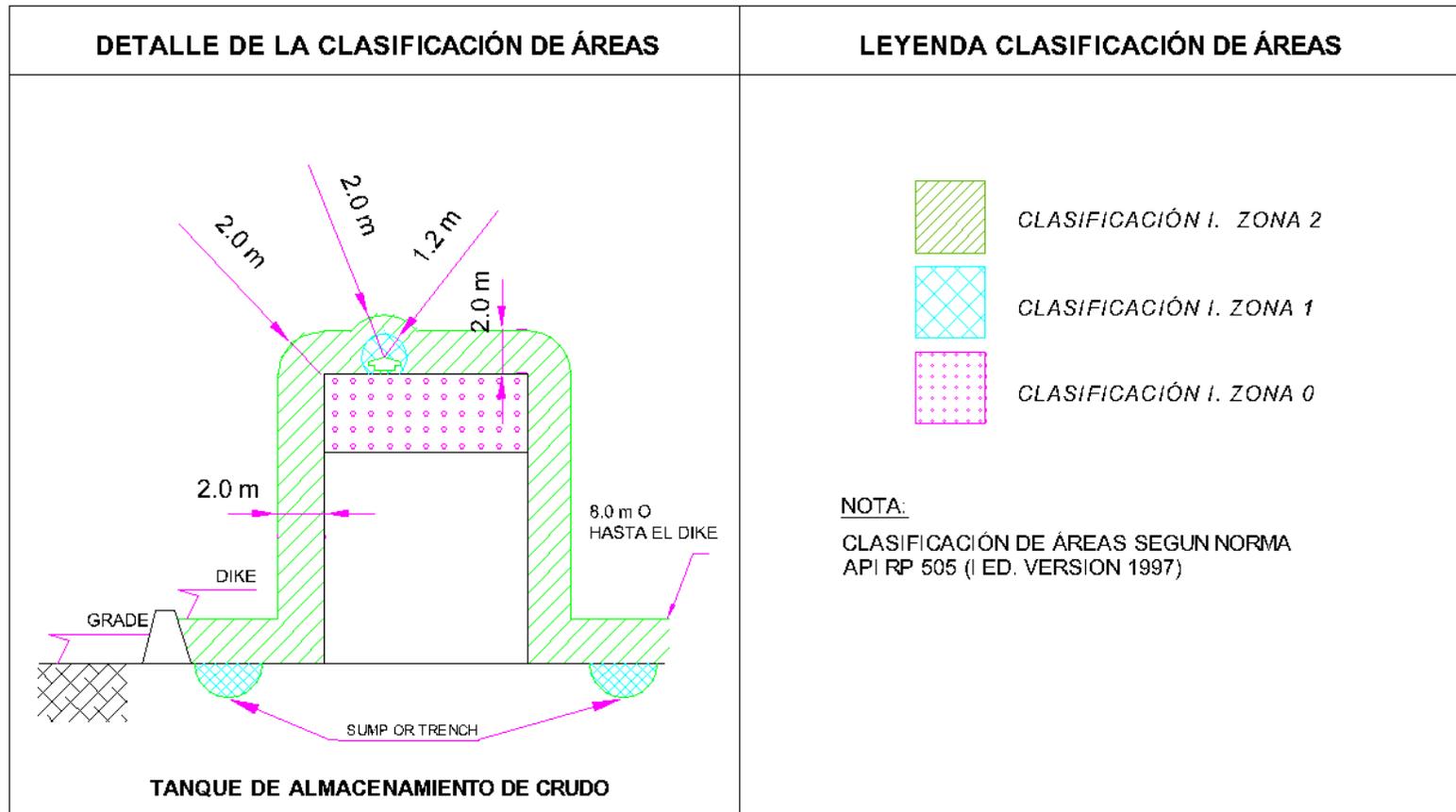
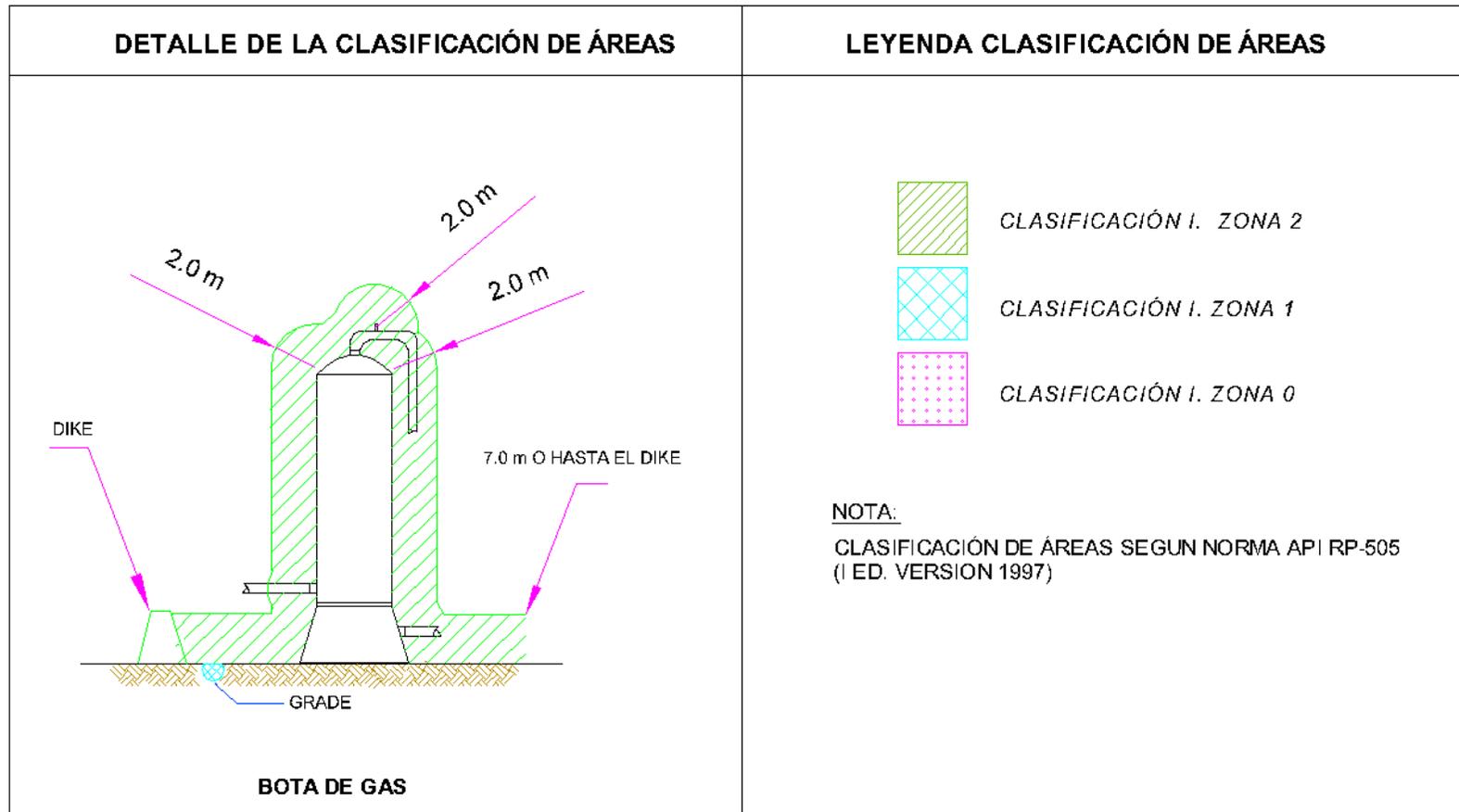


Figura 10 Plano de clasificación de zonas en el área de tanques de proceso



**Figura 11** Detalle de la clasificación de áreas de un tanque de almacenamiento, según norma API RP 505



**Figura 12** Detalle de la clasificación de áreas de un recipiente a presión, según norma API RP 505

Probabilidades de ignición y explosión

La tabla 33 muestra los 10 escenarios con mayor probabilidad de ignición retardada y por lo tanto de mayor probabilidad de explosión, en el Anexo E.6 se presenta el cálculo de probabilidades de ignición y explosión para cada uno de los escenarios en el área de tanques de proceso.

**Tabla 33.** Cálculo de las probabilidades de ignición y de explosión

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Probabilidades de Ignición		Probabilidad de explosión POEGDI
				POII	PODI	
15	Ingreso de espuma	Brida	T-109	5,74E-03	1,31E-02	3,99E-04
18	Ingreso de gas blanketing	Brida	T-109	5,72E-03	4,53E-03	4,77E-05
19	Venteo de gas	Brida	T-109	5,72E-03	4,53E-03	4,77E-05
20	Conexión para level switch	Brida	T-109	5,72E-03	4,53E-03	4,77E-05
22	Libre	Brida	T-109	5,72E-03	4,53E-03	4,77E-05
24	Toma muestras	Válvula	T-109	7,39E-03	6,57E-03	1,00E-04
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110A	5,89E-03	1,01E-02	3,09E-04
7	Libre	Válvula	T-110A	5,80E-03	5,07E-03	7,75E-05
8	Libre	Válvula	T-110A	5,72E-03	5,07E-03	7,75E-05
9	Termómetro	Instrumento	V-124	7,27E-03	9,95E-03	2,30E-04
9	Termómetro	Instrumento	V-125	7,35E-03	1,03E-02	2,39E-04

*Nota:* POII = Probabilidad de ignición inmediata, PODI = Probabilidad de ignición retardada, POEGDI = Probabilidad de explosión dada la ignición retardada.

Para el cálculo de ignición retardada se han considerado como potenciales fuentes de ignición los siguientes casos:

- ✚ Operador de la planta
- ✚ Proceso medianamente denso

### Frecuencia de eventos en el área de tanques

Para la evaluación de la frecuencia de ocurrencia de eventos (consecuencias) se utilizó el método de árbol de eventos, en la figura 13 se muestra un ejemplo de aplicación de este método.

La tabla 34 resume el cálculo de frecuencias para los diferentes eventos en el área de tanques de la planta, en el Anexo E.7 se detalla el cálculo de frecuencias de eventos para cada uno de los recipientes del caso estudio.

**Tabla 34** Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en el área de tanques

Lugar del escenario	Eventos (ocurrencia/año)			
	Jet Fire	Escape al ambiente	Flash / Jet Fire	Explosión
Tanque T-109	4,96E-06	7,85E-04	2,68E-06	2,65E-10
Tanque T-110A	7,68E-06	1,35E-03	5,25E-06	1,11E-09
Tanque T-110B	6,68E-06	1,30E-03	1,84E-06	1,43E-10
Bota de gas V-124	3,22E-06	4,37E-04	1,86E-06	3,44E-10
Bota de gas V-125	3,25E-06	4,36E-04	1,93E-06	3,71E-10
<b>Frecuencia Total</b>	<b>2,58E-05</b>	<b>4,31E-03</b>	<b>1,36E-05</b>	<b>2,23E-09</b>

Del cuadro inferior se puede inferir que el evento con mayor frecuencia de ocurrencia, en el área de tanques de la planta, es un escape al ambiente, seguido por un jet fire / flash fire y en último lugar una explosión.

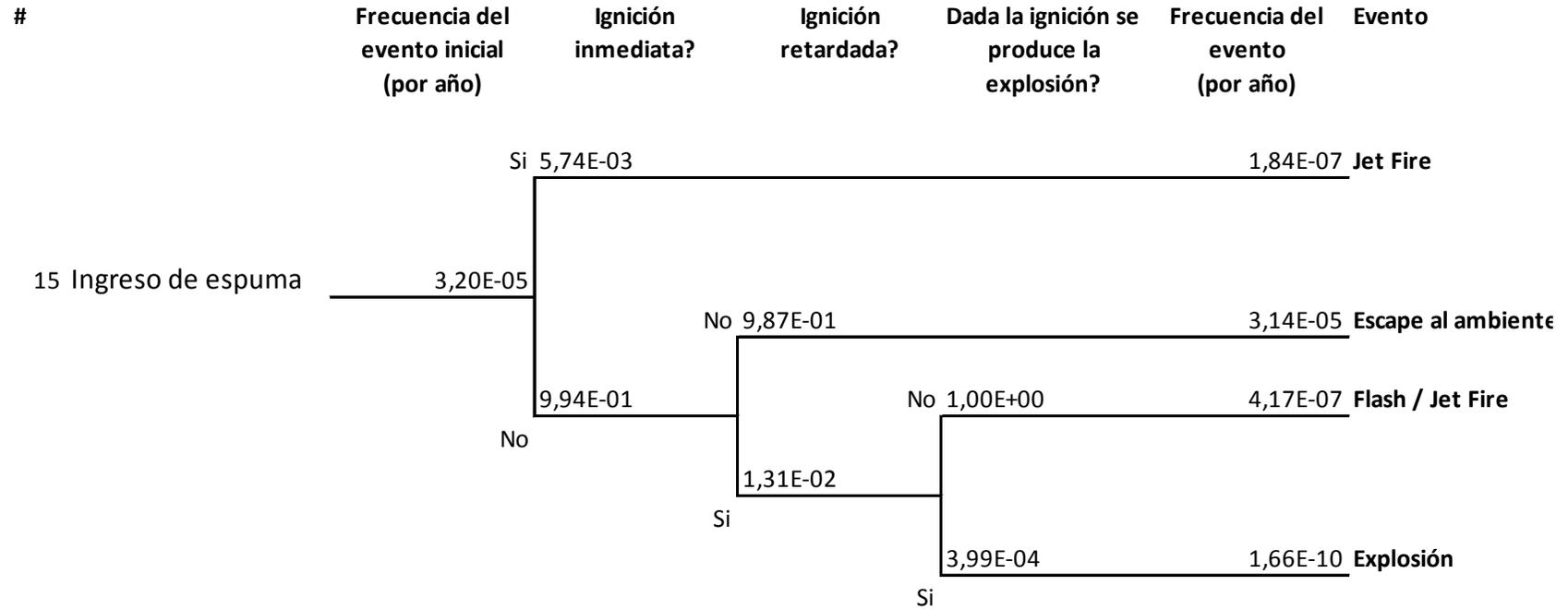


Figura 13 Árbol de eventos para el escape #15 del tanque T-109

Consecuencias de la explosión en el área de tanques

La tabla 35 muestra las distancias límite (r) calculadas a las sobre presiones de 3 kPa y 12,5 kPa, que producirían efectos reversibles y daños en el orden del 1% de letalidad, respectivamente, en caso de explosión de una nube no confinada en los sitios indicados.

**Tabla 35.** Distancias límite para efectos reversibles (sobre presión de 3000 Pa) y 1% de letalidad (sobre presión de 12500 Pa).

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. Ubicación	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Distancia @ 3 kPa (con efectos reversibles)				Distancia @ 12,5 kPa (1% letalidad)			
						$\Delta P_s$ (Pa)	$\Delta P_s'$ escalada	r' escalada	r (m)	$\Delta P_s$ (Pa)	$\Delta P_s'$ escalada	r' escalada	r (m)
2	Salida de crudo	Válvula	T-109	1,24E+07	7	3000	2,98E-02	6,5	32,35	1,25E+04	0,12	2,5	12,44
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110A	5,77E+06	7	3000	2,98E-02	6,5	25,07	1,25E+04	0,12	2,5	9,64
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110B	5,37E+06	7	3000	2,98E-02	6,5	24,47	1,25E+04	0,12	2,5	9,41
1	Entrada de producto	Válvula	V-124	1,21E+07	7	3000	2,98E-02	6,5	32,04	1,25E+04	0,12	2,5	12,32
1	Entrada de producto	Válvula	V-125	1,21E+07	7	3000	2,98E-02	6,5	32,09	1,25E+04	0,12	2,5	12,34

En el Anexo E.8 se detalla las distancias límite para cada uno de los escenarios, a estas dosis de sobre presión.

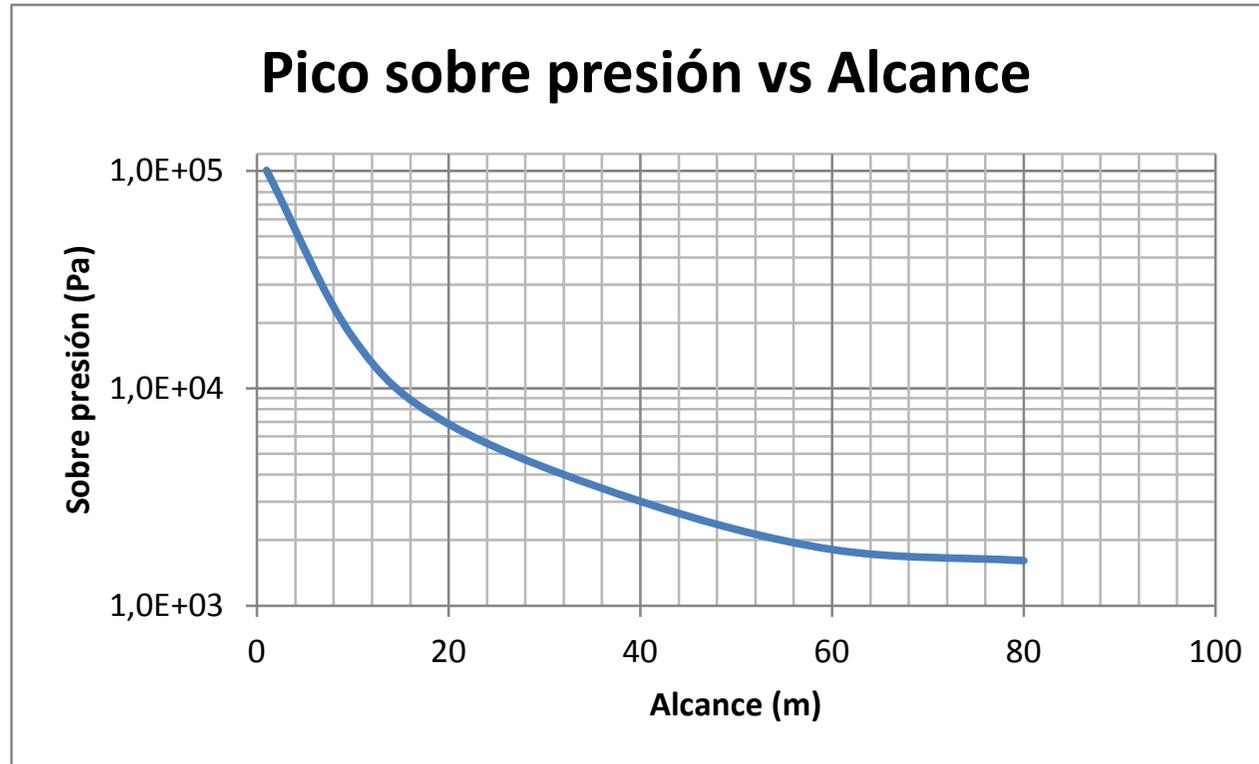
La tabla 36 muestra los valores máximos de sobre presión ( $P_s$ ) calculados en función de la distancia, que soportaría tanto el control room como el shelter de generación, en caso de explosión de una nube no confinada en los sitios indicados. En el Anexo E.9 se detallan los valores de sobre presión que soportarían estas dos edificaciones en cada uno de los escenarios.

**Tabla 36** Pico de sobre presión máxima<sup>2</sup> que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en el área de tanques de la planta

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. Ubicación	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Control room				Shelter de generación			
						Distancia al recipiente (m)	Distancia escalada	Sobre presión escalada	Sobre presión Ps (psi)	Distancia al recipiente (m)	Distancia escalada	Sobre presión escalada	Sobre presión Ps (psi)
2	Salida de crudo	Válvula	T-109	1,24E+07	7	68	13,66	0,02	0,26	35	7,03	0,04	0,51
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110A	5,77E+06	7	83	17,63	0,01	0,20	43	9,08	0,03	0,36
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110B	5,37E+06	7	68	18,07	0,01	0,19	68	9,30	0,03	0,37
1	Entrada de producto	Válvula	V-124	1,21E+07	7	70	13,80	0,02	0,25	47	7,10	0,04	0,51
1	Entrada de producto	Válvula	V-125	1,21E+07	7	69	13,77	0,02	0,25	25	7,09	0,04	0,51

<sup>2</sup> Valores obtenidos por el método de multi energía

El gráfico de la figura 14 muestra un ejemplo de aplicación del método multi energía.



**Figura 14** Valores de sobre presión en función del alcance por explosión de una nube formada por el escape # 2, en el tanque T-109.

Cálculo del Riesgo individual

El máximo riesgo individual al que está expuesto el control room y el shelter de generación, por un escenario de explosión en el área de tanques de la planta, se muestra en la tabla 37 y 38, respectivamente. Para su cálculo se utiliza las frecuencias de ocurrencia de una explosión, en cada uno de los recipientes, obtenidos en la tabla 34.

**Tabla 37** Máximo riesgo individual al que está expuesto el control room

#	Ubicación del escenario	Frecuencia del incidente (ocur./año)	Vulnerab. Ocupación	Fracción Tiempo de permanencia	Riesgo indiv. (ocur./año)
1	Tanque de lavado T-109	2,64583E-10	0,01	0,98	2,591E-12
2	Tanque de surgencia T-110A	1,10957E-09	0,01	0,98	1,086E-11
3	Tanque de oleoducto T-110B	1,43345E-10	0,01	0,98	1,404E-12
4	Bota de gas V-124	3,44331E-10	0,01	0,98	3,372E-12
5	Bota de gas V-125	3,70844E-10	0,01	0,98	3,631E-12
<b>Máximo riesgo individual</b>					<b>2,186E-11</b>

**Tabla 38** Máximo riesgo individual al que está expuesto el shelter

#	Ubicación del escenario	Frecuencia del incidente (ocur./año)	Vulnerab. Ocupación	Fracción Tiempo de permanencia	Riesgo indiv. (ocur./año)
1	Tanque de lavado T-109	2,64583E-10	0,1	0,44	1,158E-11
2	Tanque de surgencia T-110A	1,10957E-09	0,1	0,44	4,854E-11
3	Tanque de oleoducto T-110B	1,43345E-10	0,1	0,44	6,271E-12
4	Bota de gas V-124	3,44331E-10	0,1	0,44	1,506E-11
5	Bota de gas V-125	3,70844E-10	0,1	0,44	1,622E-11
<b>Máximo riesgo individual</b>					9,768E-11

Cálculo del Riesgo Agregado

El riesgo agregado al que está expuesto todo el personal que trabaja en el control room y shelter de generación, se muestra en la tabla 39 y 40, respectivamente. Para su cálculo se utiliza la frecuencia total de ocurrencia de una explosión obtenida en la tabla 34.

**Tabla 39** Riesgo agregado al que está expuesto todo el personal que trabaja en el control room

#	Unidad	Frecuencia del incidente (ocur./año)	Vulnerab. Ocupación	Número de ocupantes	Fracción Tiempo de ocupación	Frecuencia f del evento (ocur./año)	No. De personas afectadas N
1	Área de tanques	2,23E-09	0,01	4	0,02	4,65E-11	0,04
		2,23E-09	0,01	14	0,02	4,65E-11	0,14
		2,23E-09	0,01	5	0,23	5,12E-10	0,05
		2,23E-09	0,01	3	0,34	7,58E-10	0,03
		2,23E-09	0,01	3	0,02	4,65E-11	0,03
		2,23E-09	0,01	2	0,48	1,07E-09	0,02

**Tabla 40** Frecuencia acumulada en función de las personas afectadas en el control room  
(input para el gráfico F – N)

N (No. De personas afectadas)	f (Frecuencia del evento) (ocur./año)	F (Frecuencia acumulada) (ocur./año)
0,14	4,651E-11	4,651E-11
0,05	5,117E-10	5,582E-10
0,04	4,651E-11	5,582E-10
0,03	8,040E-10	8,505E-10
0,02	1,070E-09	1,874E-09

A partir de los datos obtenidos en la tabla 40 se elabora la curva F-N (figura 15) para los ocupantes del control room.

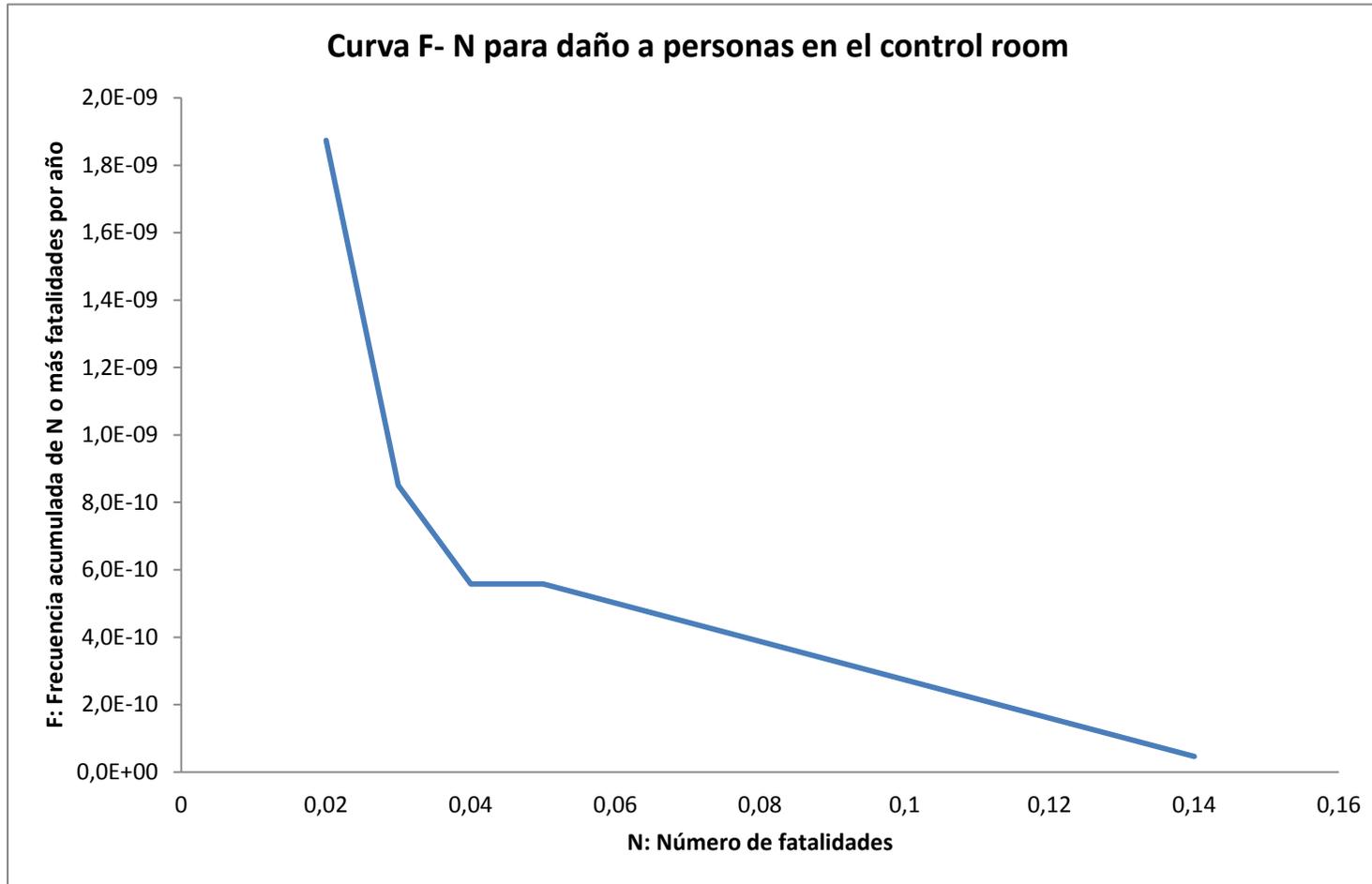


Figura 15 Curva F – N del riesgo agregado para las personas del control room

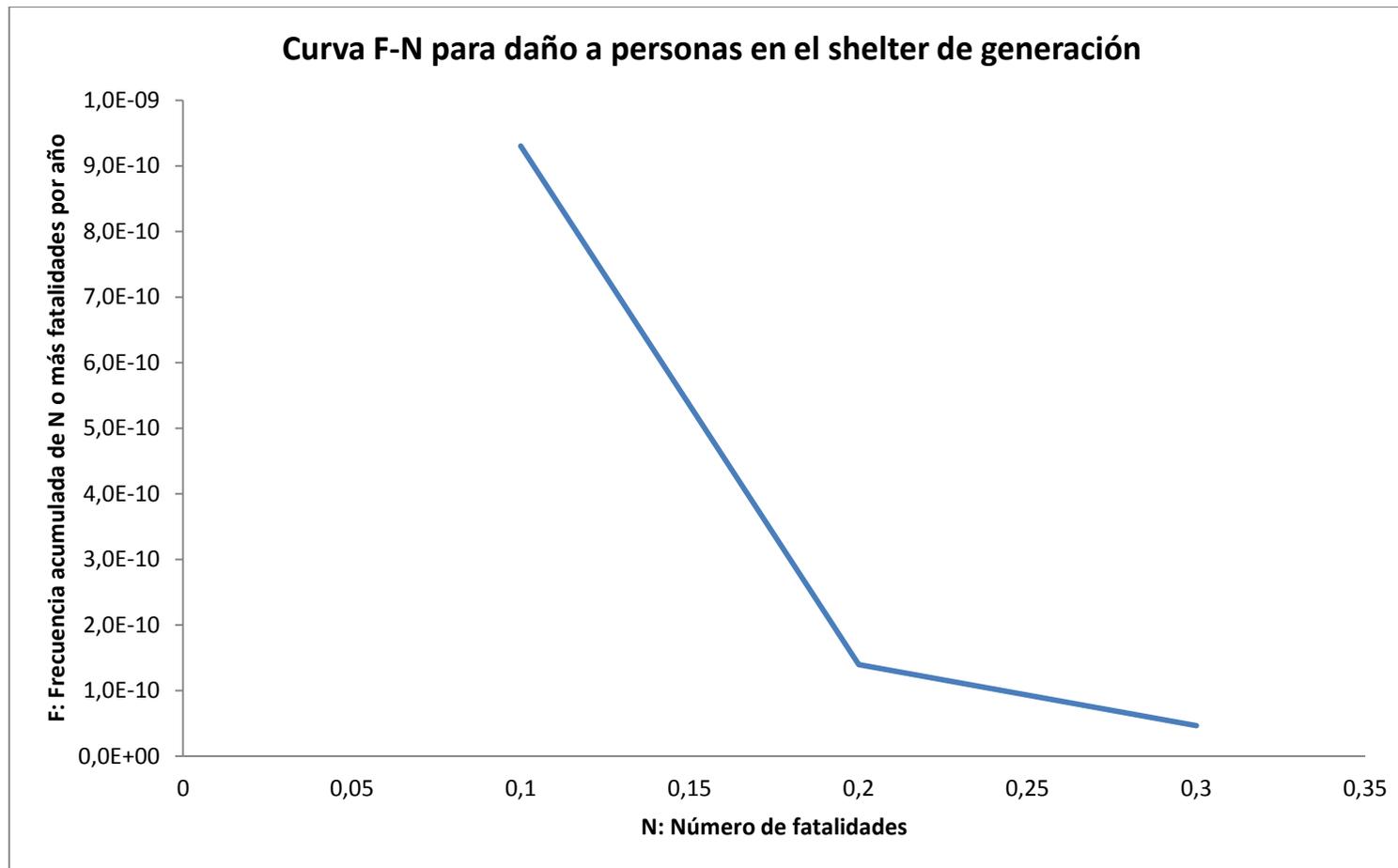
**Tabla 41** Riesgo agregado al que está expuesto todo el personal que trabaja en el shelter de generación

#	Unidad	Frecuencia del incidente (ocur./año)	Vulnerab. Ocupación	Número de ocupantes	Fracción Tiempo de ocupación	Frecuencia f del evento (/año)	No. De personas afectadas N
1	Área de tanques	2,23E-09	0,1	1	0,04	9,30E-11	0,1
		2,23E-09	0,1	3	0,02	4,65E-11	0,3
		2,23E-09	0,1	1	0,17	3,72E-10	0,1
		2,23E-09	0,1	1	0,04	9,30E-11	0,1
		2,23E-09	0,1	2	0,04	9,30E-11	0,2
		2,23E-09	0,1	1	0,13	2,79E-10	0,1

**Tabla 42** Frecuencia acumulada en función de las personas afectadas en el shelter

N (No. De personas afectadas)	f (Frecuencia del evento) (ocur./año)	F (Frecuencia acumulada) (ocur./año)
0,3	4,651E-11	4,651E-11
0,2	9,303E-11	1,395E-10
0,1	8,373E-10	9,303E-10

A partir de los datos obtenidos en la tabla 42 se elabora la curva F-N (figura 16) para los ocupantes del shelter de generación.



**Figura 16** Curva F – N del riesgo agregado para las personas del shelter de generación

## CAPITULO IV

### DISCUSION

#### 4.1 Conclusiones

- ✚ En base a una revisión exhaustiva de la bibliografía disponible referente a evaluación del riesgo de explosión, se ha propuesto un modelo que permite evaluar las consecuencias de la materialización de este riesgo en plantas de tratamiento de crudo.

El modelo fue aplicado a la planta de tratamiento de crudo, del caso estudio, con resultados descritos en el capítulo 3.

- ✚ La identificación de fuentes de escape juega un papel preponderante en el modelo de evaluación del riesgo de explosión planteado, esto debido a que no se puede gestionar un peligro si no se lo ha identificado. Esta parte de la investigación ha sido sustentada a través de la norma UNE 60079-10-1.
- ✚ Se estableció un método cuantitativo para caracterizar los posibles escapes de líquidos o vapores inflamables, es decir se determinó la tasa de escape y alcance de la fuga, esto a su vez se utilizó para caracterizar la nube inflamable y para calcular las dimensiones horizontales de las zonas.
- ✚ Se estableció un método cuantitativo para caracterizar la nube, es decir se determinó el volumen, radio y tiempo de permanencia de la nube, esto a su vez se utilizó para calcular las dimensiones verticales de las zonas, en la clasificación de áreas, y la energía de las cargas explosivas, en el análisis de consecuencias de la explosión.

Adicionalmente con este método se puede conocer el caudal mínimo necesario para ventilar un emplazamiento cerrado o abierto.

- ✚ La clasificación de zonas se fundamentó en el procedimiento sugerido por la norma UNE 202007 IN, guía de aplicación de la norma UNE 60079-10-1.

Al realizar la clasificación de áreas peligrosas en el área de tanques del caso estudio, básicamente se ha podido observar que el mayor alcance horizontal de la zona 2 es de 8 m en tanques de almacenamiento y de 7 m para las botas de gas, esto debido a la columna de fluido existente en el punto de fuga. Sin embargo en el caso de los tanques de almacenamiento, la zona 1 tiene una dimensión vertical de 1.20 m, la zona 2 una dimensión vertical de 2 m y la zona 0 está definida por todo el espacio interno entre la superficie del producto y el techo de los mismos. En el caso de las botas de gas la dimensión vertical de la zona 2 es de 2 m, la zona 1 no existe.

Con la clasificación de zonas de los recipientes del área de tanques de proceso, se pueden determinar las características eléctricas, de clasificación, que debe cumplir el equipamiento instalado o que se requiera instalar a futuro en este lugar.

- ✚ Se ha determinado la tipología para identificar las posibles fuentes de ignición de cualquier instalación, en función de su potencia.

En base a esta clasificación se han determinado dos posibles fuentes de ignición en el caso estudio, por un lado están las actividades que realiza el operador de la planta y por otro el mismo proceso, considerado este último como medianamente denso.

- ✚ Se han planteado dos niveles de algoritmos para estimar las probabilidades de ignición inmediata, diferida y de explosión de una nube inflamable. El nivel de algoritmo utilizado depende de la cantidad de información de entrada disponible.

La probabilidad que una explosión ocurra, parte del hecho que la fuente de ignición ha aparecido con cierto tiempo de retardo con respecto a la aparición del escape,

caso contrario la explosión no ocurrirá, por lo tanto no se podrá calcular la probabilidad de ignición diferida.

- El método escogido para evaluar las frecuencias de ocurrencia de los posibles escenarios fue el árbol de eventos, mismo que utiliza como datos de entrada las frecuencias de falla (escapes), las probabilidades de ignición y de explosión calculadas.

En el caso estudio se estableció que el escenario de mayor frecuencia es un escape al ambiente con  $4.31 \times 10^{-3}$  ocurrencias/año, seguido por un jet fire con  $2.58 \times 10^{-5}$  ocurrencias/año, luego un flash fire con  $1.36 \times 10^{-5}$  ocurrencias/año y por último una explosión con  $2.23 \times 10^{-9}$  ocurrencias /año.

- El modelo planteado para caracterizar las consecuencias de una explosión, fue el método de multi energía, cuyo inconveniente radica en que el nivel de intensidad del estallido debe ser supuesto, basado en la experiencia del evaluador, estimado cualitativamente o acogiendo las recomendaciones encontradas en la bibliografía.

En el caso estudio se ha asumido un nivel de estallido 7 para áreas congestionadas y un nivel 3 para áreas no congestionadas, lo cual ha producido valores aceptables de sobre presión, que son consecuentes con el diseño actual de la planta.

Se ha calculado que un valor máximo de sobre presión de 0.26 psi (1812 Pa) impactará al control room en el caso de una explosión producida en el área de tanques. La bibliografía refiere que con este valor existe una probabilidad de 0.95 de no sufrir daño, los proyectiles llegarían limitadamente, se produciría cierto daño en el techo y la rotura de los cristales de las ventanas en un 10%. En cambio el shelter sería impactado por una sobre presión máxima de 0.51 psi (3523 Pa), lo que provocaría la destrucción de los cristales y ocasionalmente daño a las estructuras de las ventanas.

- El riesgo de afectación de las personas e instalaciones por explosión en el área de tanques ha sido abordado con los conceptos de riesgo individual y agregado respectivamente.

Para el caso estudio, el shelter de generación tiene el más alto valor de riesgo individual con un valor de  $9.8 \times 10^{-11}$ , encontrándose muy por debajo del nivel sugerido para una zona industrial de  $0.5 \times 10^{-4}$ .

## 4.2 Recomendaciones

- ✚ Completar la evaluación del riesgo de explosión del resto de unidades de la planta (manifold, separadores, scrubbers, etc.), pues el caso estudio solo contempló la evaluación del área de tanques. En base a esto determinar las medidas preventivas y de control, necesarias para eliminar o minimizar el riesgo de explosión.
- ✚ Complementar la evaluación del riesgo de explosión con el análisis de riesgos de incendio y toxicidad, para obtener el riesgo total de la planta.
- ✚ Incluir en las instrucciones de trabajo para aforo de tanques el uso obligatorio del monitor portátil de gases, así como la obligatoriedad de colocar a tierra la cinta para aforar, esto con el fin de minimizar la formación de fuentes de ignición en esta actividad.
- ✚ Considerar la opción de incluir en los procedimientos operativos, el no transferir crudo durante tormentas eléctricas, esto con la finalidad de minimizar la formación de nubes inflamables en las válvulas de presión y alivio de los tanques de proceso de la planta.
- ✚ Entrenar a los operadores para que el llenado de un tanque vacío se realice muy lentamente, hasta que la línea de llenado quede sumergida, esto con la finalidad de minimizar la generación de energía estática en el recipiente.
- ✚ Entrenar al personal de operaciones y mantenimiento para que evite el uso de contenedores de material no conductor, esto para evitar la formación de una fuente de ignición.
- ✚ Cuando se requiera construir una edificación dentro o en cercanías de la planta, siempre realizar un análisis de riesgos para determinar por un lado la distancia más adecuada a la que se puede ubicar, con respecto a las unidades de la planta, y por otro las características de la misma.

## ANEXO A

### ÁRBOL DE PROBLEMAS

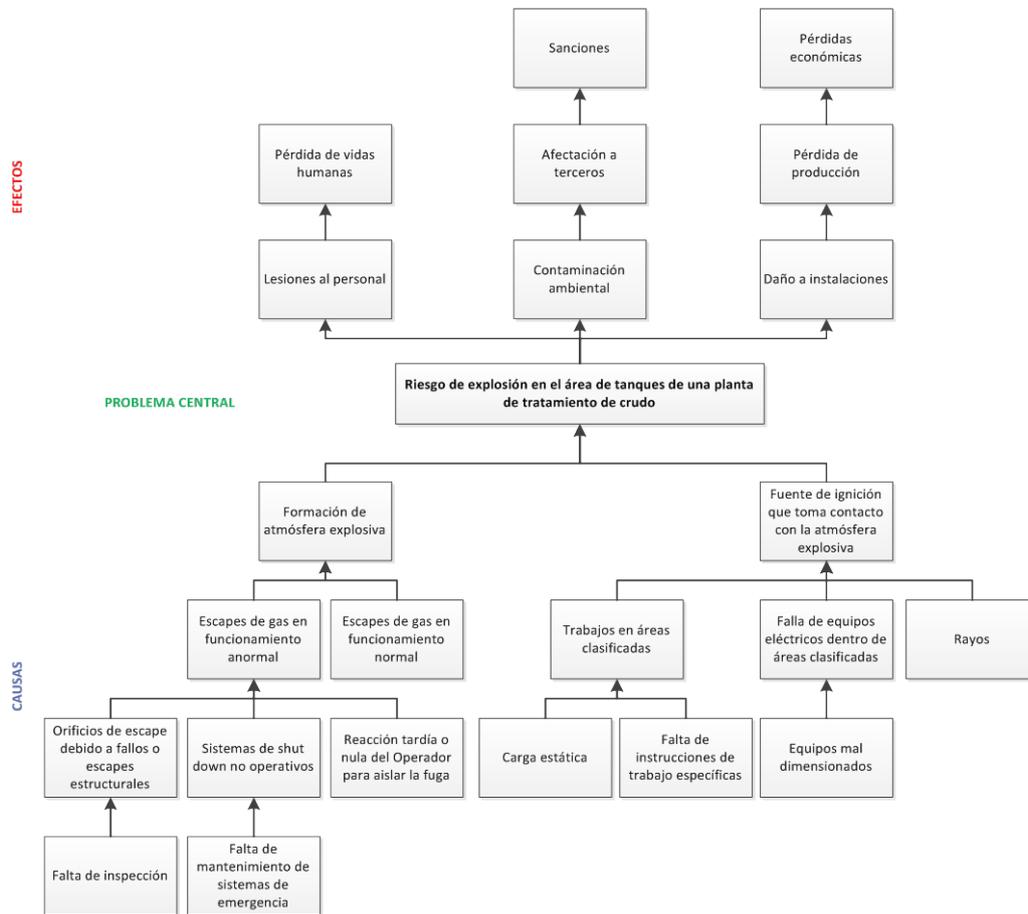


Figura 17 Árbol de problemas

## ANEXO B

### ÁRBOL DE OBJETIVOS

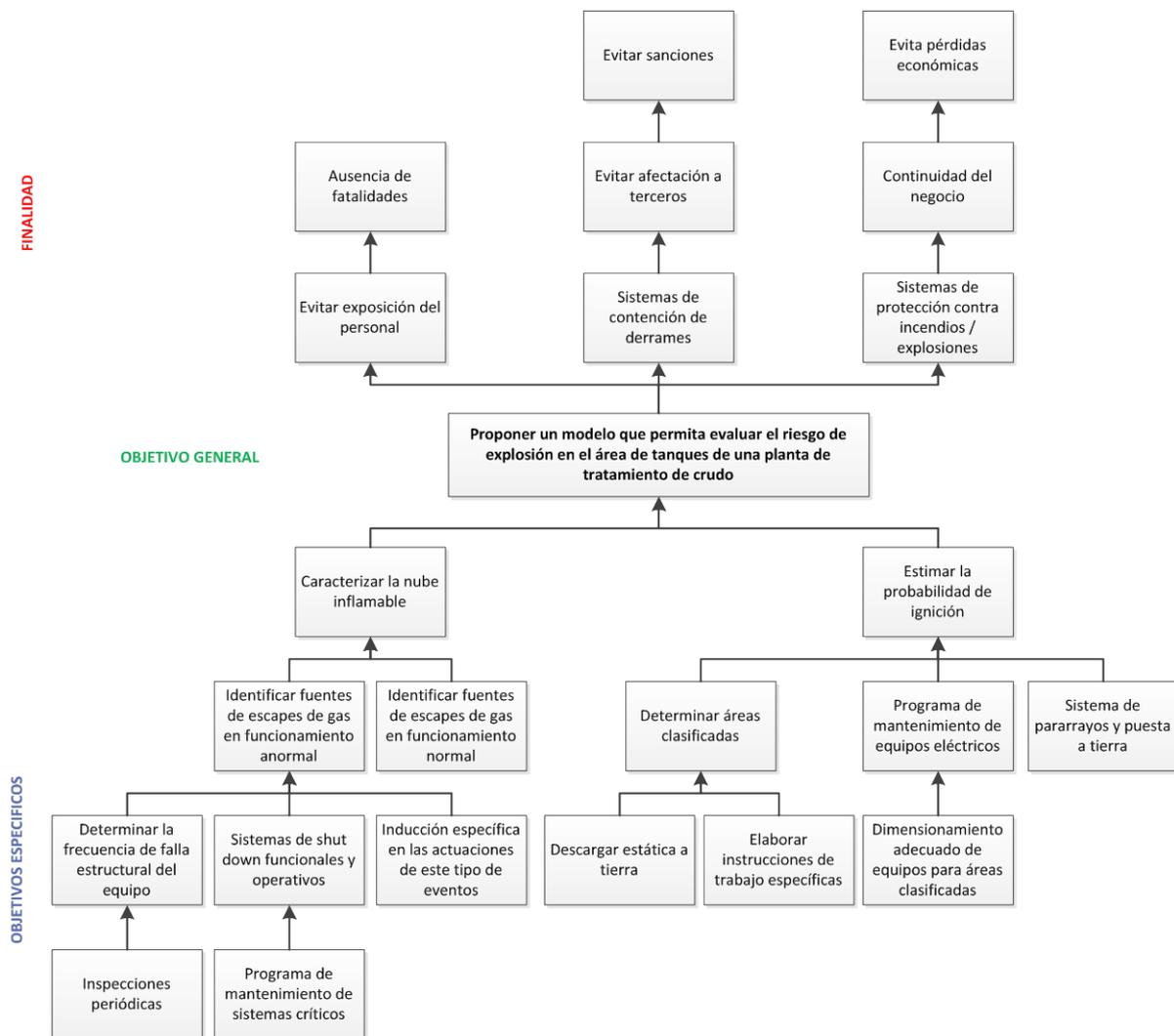


Figura 18 Árbol de objetivos

## ANEXO C

### EJEMPLO DE UNA LISTA DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

**Tabla 43** Ejemplo de lista de identificación de peligros

Atmósfera explosiva				Fuente de ignición			
Ref.	Tipo	Frecuencia de ocurrencia	Ubicación	Tipo	Causa	Probabilidad	Efectividad de la fuente de ignición
1	Mezcla de vapor de hexano con aire	Corto período de tiempo al final del llenado	Afuera del manhole de llenado	Calentamiento en el ventilador del motor	Sobrecarga del motor	Durante un mal funcionamiento	Alta como una temperatura mayor a la temperatura de ignición
2	Nube de polvo de azúcar explosiva	Presente frecuentemente en operación normal	Dentro del alojamiento elevador	Chispas en el alojamiento elevador	Fricción de la canastilla sobre el alojamiento	Ocasionalmente en operación normal	Baja debido a la velocidad baja del cubo
Etc.							

ANEXO D

CARTAS UTILIZADAS EN EL MÉTODO MULTI-ENERGÍA

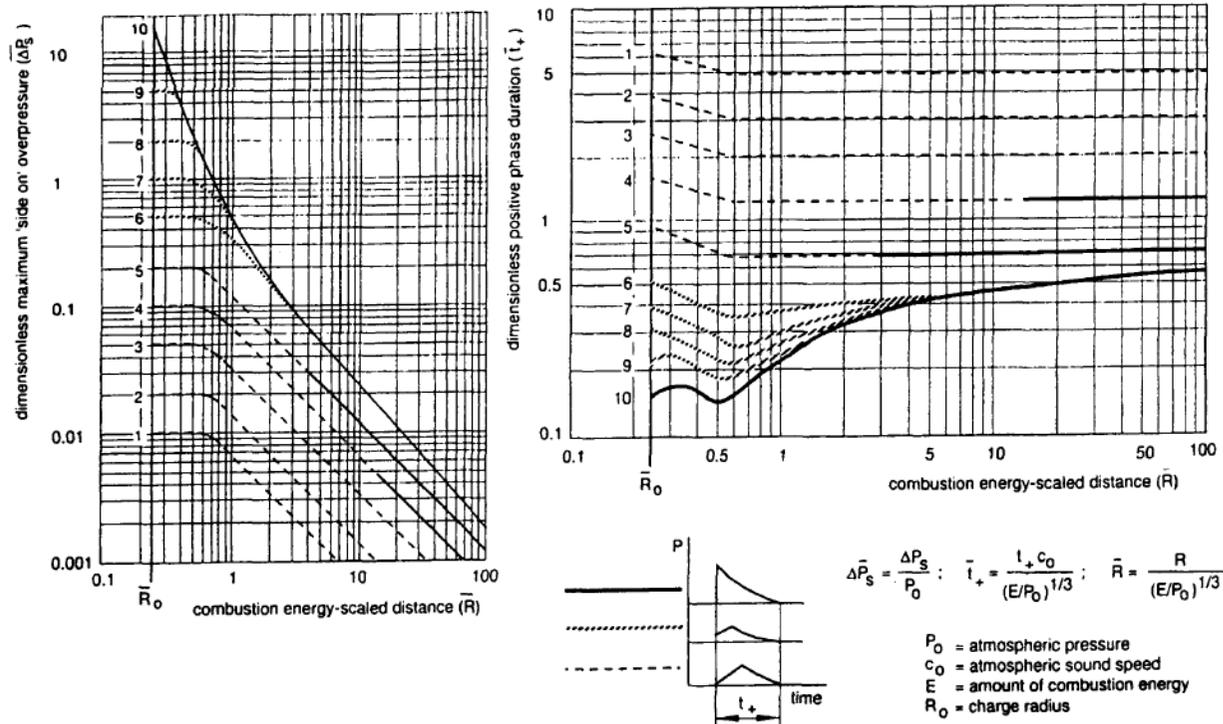


Figura 19 Modelo de Multi-Energía TNO para explosiones de nubes de vapor

## **ANEXO E**

### **RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO**

E.1 Identificación de fuentes de escape

E.2 Caracterización de los posibles escapes

E.3 Caracterización de la nube formada por las fuentes de escape

E.4 Clasificación de las zonas originadas por los escapes

E.5 Dimensiones de las zonas peligrosas típicas

E.6 Probabilidades de ignición y explosión

E.7 Frecuencia de eventos en el área de tanques

E.8 Consecuencias de la explosión en función de las dosis de exposición a sobre presión

E.9 Consecuencias de la explosión en el control room y shelter de generación

### E.1 Identificación de fuentes de escape

**Tabla 44** Identificación de las posibles fuentes de escape tanque T-109

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Diámetro Ø (pulg)	Altura (mm)	Sustancia	LIE % Vol. Aire	Densidad del Líq. σ	Masa molecular Kg/Kmol	Grado escape
0	Superficie del crudo	N/A	T-109	600	8636	crudo	2,9	923,9	197,53	Continuo
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-109	10	560	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
2	Salida de crudo	Válvula	T-109	12	455	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
4	Rebose 2	Brida	T-109	8	6815	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
8	Ingreso de agua tratada	Válvula	T-109	10	4515	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
13	Libre	Brida	T-109	4	3100	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
15	Ingreso de espuma	Brida	T-109	6	8600	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
18	Ingreso de gas blanketing	Brida	T-109	2	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
19	Venteo de gas	Brida	T-109	6	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
20	Conexión para level switch	Brida	T-109	4	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
21	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-109	8	9144	gas	2,9	-	31,82	Primario
22	Libre	Brida	T-109	6	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
23	Manhole de techo	Tapa	T-109	24	9144	gas	2,9	-	31,82	Primario
24	Tomamuestras	Válvula	T-109	1	956	crudo	2,9	923,9	197,53	Primario
26	Mirilla 2	Válvula	T-109	1	2646	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
27	Mirilla 3	Válvula	T-109	1	4135	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
28	Mirilla 4	Válvula	T-109	1	5625	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario

**Tabla 45** Identificación de las posibles fuentes de escape tanque T-110A

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Diámetro Ø (plg)	Altura (mm)	Sustancia	LIE % Vol. Aire	Densidad del Líq. $\sigma$	Masa molecular Kg/Kmol	Grado escape
0	Superficie del crudo	N/A	T-110A	600	1828	crudo	2,9	923,9	197,53	Continuo
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-110A	8	650	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
2	Salida de crudo	Válvula	T-110A	12	544	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
3	Drenaje de fondo (sumidero)	Válvula	T-110A	6	411	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
4	Drenaje	Válvula	T-110A	4	447	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
5	Manhole de pared	Brida	T-110A	30	955	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110A	48x48	0	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
7	Libre	Válvula	T-110A	2	403	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
8	Libre	Válvula	T-110A	6	755	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
9	Ingreso de espuma	Brida	T-110A	6	8600	gas	2,9	-	31,82	Secundario
10	Rebose libre	Brida	T-110A	8	8744	gas	2,9	-	31,82	Secundario
11	Rebose libre	Válvula	T-110A	10	7790	gas	2,9	-	31,82	Secundario
12	Manhole de techo	Tapa	T-110A	24	9144	gas	2,9	-	31,82	Primario
13	Libre	Brida	T-110A	3	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
14	Libre	Brida	T-110A	4	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
15	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-110A	8	9144	gas	2,9	-	31,82	Primario
16	Conexión para level switch	Brida	T-110A	4	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
17	Venteo de gas	Brida	T-110A	8	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario

**Tabla 46** Identificación de las posibles fuentes de escape tanque T-110B

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Diámetro Ø (plg)	Altura (mm)	Sustancia	LIE % Vol. Aire	Densidad del Líq. σ	Masa molecular Kg/Kmol	Grado escape
0	Superficie del crudo	N/A	T-110B	600	1828	crudo	2,9	923,9	197,53	Continuo
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-110B	8	667,5	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
2	Salida de crudo	Válvula	T-110B	12	542,5	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
3	Drenaje de fondo (sumidero)	Válvula	T-110B	6	465	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
4	Ventoeo de gas	Brida	T-110B	6	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
5	Manhole de pared	Brida	T-110B	30	750	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110B	48x48	0	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
7	Transmisor de fondo de tanque	Válvula	T-110B	2	411	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
8	Conexión para level switch	Brida	T-110B	4	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
9	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-110B	8	9144	gas	2,9	-	31,82	Primario
10	Drenaje	Válvula	T-110B	4	438	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
11	Rebose de shipping	Válvula	T-110B	8	7790,5	gas	2,9	-	31,82	Secundario
12	Rebose a canaleta	Brida	T-110B	10	8517,5	gas	2,9	-	31,82	Secundario
13	Ingreso de espuma	Brida	T-110B	6	1685	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
14	Manhole de techo	Tapa	T-110B	24	9144	gas	2,9	-	31,82	Primario
15	Libre	Brida	T-110B	3	9144	gas	2,9	-	31,82	Secundario
16	Libre	Brida	T-110B	6	765	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario

**Tabla 47** Identificación de las posibles fuentes de escape bota de gas V-124

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Diámetro Ø (plg)	Altura (mm)	Sustancia	LIE % Vol. Aire	Densidad del Líq. σ	Masa molecular Kg/Kmol	Grado escape
0	Superficie del crudo	N/A	V-124	48	1828	crudo	2,9	923,9	197,53	Continuo
1	Entrada de producto	Válvula	V-124	8	914	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
2	Salida de producto	Válvula	V-124	8	1800	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
3	Salida de gas	Brida	V-124	6	12801	gas	2,9	-	31,82	Secundario
4	Disponible	Brida	V-124	2	976	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
8	Manómetro	Instrumento	V-124	1	1611	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
9	Termómetro	Instrumento	V-124	1	1611	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario

**Tabla 48** Identificación de las posibles fuentes de escape bota de gas V-125

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Diámetro Ø (plg)	Altura (mm)	Sustancia	LIE % Vol. Aire	Densidad del Líq. σ	Masa molecular Kg/Kmol	Grado escape
0	Superficie del crudo	N/A	V-125	54	1828	crudo	2,9	923,9	197,53	Continuo
1	Entrada de producto	Válvula	V-125	8	914	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
2	Salida de producto	Válvula	V-125	8	1800	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
3	Salida de gas	Brida	V-125	6	12801	gas	2,9	-	31,82	Secundario
4	Disponible	Brida	V-125	2	976	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
8	Manómetro	Instrumento	V-125	1	1475	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario
9	Termómetro	Instrumento	V-125	1	1475	crudo	2,9	923,9	197,53	Secundario

## E.2 Caracterización de los posibles escapes

**Tabla 49** Caracterización de los posibles escapes tanque T-109

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Presión Oper. (N/m <sup>2</sup> )	Temp. Operación (°K)	LIE (Kg/m <sup>3</sup> )	a (m <sup>2</sup> )	Tasa escape Ge (kg/s)	d + r + X (m)	Gvap charco (kg/s)
0	Superficie del crudo	N/A	T-109	Continuo	1,01E+05	327,44	0,230				
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-109	Secundario	1,74E+05	327,44	0,230	2,50E-06	2,33E-02	4,39	2,33E-02
2	Salida de crudo	Válvula	T-109	Secundario	1,75E+05	327,44	0,230	2,50E-06	2,35E-02	4,08	2,35E-02
4	Rebose 2	Brida	T-109	Secundario	1,17E+05	327,44	0,230	2,50E-06	1,12E-02	6,40	1,12E-02
8	Ingreso de agua tratada	Válvula	T-109	Secundario	1,38E+05	327,44	0,230	2,50E-06	1,67E-02	7,77	1,67E-02
13	Libre	Brida	T-109	Secundario	1,51E+05	327,44	0,230	2,50E-06	1,94E-02	7,55	1,94E-02
15	Ingreso de espuma	Brida	T-109	Secundario	1,01E+05	327,44	0,230	2,50E-06	2,69E-03	1,83	2,69E-03
18	Ingreso de gas blanketing	Brida	T-109	Secundario	1,00E+05	327,44	0,037	2,50E-06	4,43E-05		
19	Venteo de gas	Brida	T-109	Secundario	1,00E+05	327,44	0,037	2,50E-06	4,43E-05		
20	Conexión para level switch	Brida	T-109	Secundario	1,00E+05	327,44	0,037	2,50E-06	4,43E-05		
21	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-109	Primario	1,00E+05	327,44	0,037	1,00E-06	1,77E-05		
22	Libre	Brida	T-109	Secundario	1,00E+05	327,44	0,037	2,50E-06	4,43E-05		
23	Manhole de techo	Tapa	T-109	Primario	1,00E+05	327,44	0,037	2,50E-06	4,43E-05		
24	Tomamuestras	Válvula	T-109	Primario	1,70E+05	327,44	0,230	2,50E-07	2,28E-03	4,63	2,28E-03
26	Mirilla 2	Válvula	T-109	Secundario	1,55E+05	327,44	0,230	2,50E-07	2,01E-03	6,66	2,01E-03
27	Mirilla 3	Válvula	T-109	Secundario	1,41E+05	327,44	0,230	2,50E-07	1,75E-03	7,19	1,75E-03
28	Mirilla 4	Válvula	T-109	Secundario	1,28E+05	327,44	0,230	2,50E-07	1,44E-03	6,87	1,44E-03

**Tabla 50** Caracterización de los posibles escapes tanque T-110A

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Presión Oper. (N/m <sup>2</sup> )	Temp. Operación (°K)	LIE (Kg/m <sup>3</sup> )	a (m <sup>2</sup> )	Tasa escape Ge (kg/s)	d + r + X (m)	Gvap charco (kg/s)
0	Superficie del crudo	N/A	T-110A	Continuo	1,01E+05	317,44	0,238				
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-110A	Secundario	1,11E+05	317,44	0,238	2,50E-06	9,15E-03	2,03	9,15E-03
2	Salida de crudo	Válvula	T-110A	Secundario	1,12E+05	317,44	0,238	2,50E-06	9,52E-03	1,97	9,52E-03
3	Drenaje de fondo (sumidero)	Válvula	T-110A	Secundario	1,14E+05	317,44	0,238	2,50E-07	9,98E-04	1,43	9,98E-04
4	Drenaje	Válvula	T-110A	Secundario	1,13E+05	317,44	0,238	2,50E-07	9,86E-04	1,47	9,86E-04
5	Manhole de pared	Brida	T-110A	Secundario	1,09E+05	317,44	0,238	2,50E-06	7,95E-03	2,06	7,95E-03
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110A	Secundario	1,17E+05	317,44	0,238	2,50E-06	1,13E-02	0,66	1,13E-02
7	Libre	Válvula	T-110A	Secundario	1,14E+05	317,44	0,238	2,50E-07	1,00E-03	1,42	1,00E-03
8	Libre	Válvula	T-110A	Secundario	1,10E+05	317,44	0,238	2,50E-07	8,75E-04	1,65	8,75E-04
9	Ingreso de espuma	Brida	T-110A	Secundario	1,00E+05	317,44	0,038	2,50E-06	4,50E-05		
10	Rebose libre	Brida	T-110A	Secundario	1,00E+05	317,44	0,038	2,50E-06	4,50E-05		
11	Rebose libre	Válvula	T-110A	Secundario	1,00E+05	317,44	0,038	2,50E-06	4,50E-05		
12	Manhole de techo	Tapa	T-110A	Primario	1,00E+05	317,44	0,038	2,50E-06	4,50E-05		
13	Libre	Brida	T-110A	Secundario	1,00E+05	317,44	0,038	2,50E-06	4,50E-05		
14	Libre	Brida	T-110A	Secundario	1,00E+05	317,44	0,038	2,50E-06	4,50E-05		
15	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-110A	Primario	1,00E+05	317,44	0,038	1,00E-06	1,80E-05		
16	Conexión para level switch	Brida	T-110A	Secundario	1,00E+05	317,44	0,038	2,50E-06	4,50E-05		
17	Venteo de gas	Brida	T-110A	Secundario	1,00E+05	317,44	0,038	2,50E-06	4,50E-05		

**Tabla 51** Caracterización de los posibles escapes tanque T-110B

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Presión Oper. (N/m <sup>2</sup> )	Temp. Operación (°K)	LIE (Kg/m <sup>3</sup> )	a (m <sup>2</sup> )	Tasa escape Ge (kg/s)	d + r + X (m)	Gvap charco (kg/s)
0	Superficie del crudo	N/A	T-110B	Continuo	1,01E+05	295,22	0,256				
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-110B	Secundario	1,11E+05	295,22	0,256	2,50E-06	9,08E-03	2,04	9,08E-03
2	Salida de crudo	Válvula	T-110B	Secundario	1,12E+05	295,22	0,256	2,50E-06	9,53E-03	1,97	9,53E-03
3	Drenaje de fondo (sumidero)	Válvula	T-110B	Secundario	1,13E+05	295,22	0,256	2,50E-07	9,80E-04	1,48	9,80E-04
4	Venteo de gas	Brida	T-110B	Secundario	1,00E+05	295,22	0,041	2,50E-07	4,66E-06		
5	Manhole de pared	Brida	T-110B	Secundario	1,10E+05	295,22	0,256	2,50E-06	8,77E-03	2,06	8,77E-03
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110B	Secundario	1,17E+05	295,22	0,256	2,50E-06	1,13E-02	0,66	1,13E-02
7	Transmisor de fondo de tanque	Válvula	T-110B	Secundario	1,14E+05	295,22	0,256	2,50E-07	9,98E-04	1,43	9,98E-04
8	Conexión para level switch	Brida	T-110B	Secundario	1,00E+05	295,22	0,041	2,50E-06	4,66E-05		
9	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-110B	Primario	1,00E+05	295,22	0,041	1,00E-06	1,87E-05		
10	Drenaje	Válvula	T-110B	Secundario	1,13E+05	295,22	0,256	2,50E-07	9,89E-04	1,46	9,89E-04
11	Rebose de shipping	Válvula	T-110B	Secundario	1,00E+05	295,22	0,041	2,50E-06	4,66E-05		
12	Rebose a canaleta	Brida	T-110B	Secundario	1,00E+05	295,22	0,041	2,50E-06	4,66E-05		
13	Ingreso de espuma	Brida	T-110B	Secundario	1,02E+05	295,22	0,256	2,50E-06	3,80E-03	1,33	3,80E-03
14	Manhole de techo	Tapa	T-110B	Primario	1,00E+05	295,22	0,041	2,50E-06	4,66E-05		
15	Libre	Brida	T-110B	Secundario	1,00E+05	295,22	0,041	2,50E-06	4,66E-05		
16	Libre	Brida	T-110B	Secundario	1,10E+05	295,22	0,256	2,50E-07	8,71E-04	1,66	8,71E-04

**Tabla 52** Caracterización de los posibles escapes bota de gas V-124

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Presión Oper. (N/m <sup>2</sup> )	Temp. Operación (°K)	LIE (Kg/m <sup>3</sup> )	a (m <sup>2</sup> )	Tasa escape Ge (kg/s)	d + r + X (m)	Gvap charco (kg/s)
0	Superficie del crudo	N/A	V-124	Continuo	1,62E+05	327,44	0,230				
1	Entrada de producto	Válvula	V-124	Secundario	1,71E+05	327,44	0,230	2,50E-06	2,28E-02	5,23	2,28E-02
2	Salida de producto	Válvula	V-124	Secundario	1,63E+05	327,44	0,230	2,50E-06	2,15E-02	6,57	2,15E-02
3	Salida de gas	Brida	V-124	Secundario	1,69E+05	327,44	0,037	2,50E-07	8,08E-05		
4	Disponible	Brida	V-124	Secundario	1,70E+05	327,44	0,230	2,50E-07	2,27E-03	4,67	2,27E-03
8	Manómetro	Instrumento	V-124	Secundario	1,64E+05	327,44	0,230	2,50E-06	2,18E-02	6,35	2,18E-02
9	Termómetro	Instrumento	V-124	Secundario	1,64E+05	327,44	0,230	1,00E-06	8,71E-03	5,98	8,71E-03

**Tabla 53** Caracterización de los posibles escapes bota de gas V-125

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Presión Oper. N/m <sup>2</sup>	Temp. Operación °K	LIE Kg/m <sup>3</sup>	a m <sup>2</sup>	Tasa escape Ge (kg/s)	d + r + X (m)	Gvap charco (kg/s)
0	Superficie del crudo	N/A	V-125	Continuo	1,62E+05	329,11	0,229				
1	Entrada de producto	Válvula	V-125	Secundario	1,71E+05	329,11	0,229	2,50E-06	2,28E-02	5,23	2,28E-02
2	Salida de producto	Válvula	V-125	Secundario	1,63E+05	329,11	0,229	2,50E-06	2,15E-02	6,57	2,15E-02
3	Salida de gas	Brida	V-125	Secundario	1,69E+05	329,11	0,037	2,50E-07	8,06E-05		
4	Disponible	Brida	V-125	Secundario	1,70E+05	329,11	0,229	2,50E-07	2,27E-03	4,67	2,27E-03
8	Manómetro	Instrumento	V-125	Secundario	1,66E+05	329,11	0,229	2,50E-06	2,20E-02	6,17	2,20E-02
9	Termómetro	Instrumento	V-125	Secundario	1,66E+05	329,11	0,229	1,00E-06	8,79E-03	5,80	8,79E-03

### E.3 Caracterización de la nube formada por las fuentes de escape

**Tabla 54** Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en el tanque T-109

# Escape	Descripción de la conexión	Cód. ubicación	Tasa escape Ge (kg/s)	k	f <sub>T</sub>	Q <sub>vmin</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad viento V (m/s)	Renov. aire c (s <sup>-1</sup> )	Ineficacia ventilación f <sub>v</sub>	Volumen teórico V <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	Radio esfera r <sub>z</sub> (m)	Tiempo t <sub>p</sub> (s)
0	Superficie del crudo	T-109										
1	Ingreso de crudo	T-109	2,33E-02	0,5	1,04	2,11E-01	2,69	0,18	3	3,52	0,94	70,59
2	Salida de crudo	T-109	2,35E-02	0,5	1,04	2,12E-01	2,69	0,18	3	3,54	0,95	70,59
4	Rebose 2	T-109	1,12E-02	0,5	1,04	1,02E-01	2,69	0,18	3	1,70	0,74	70,59
8	Ingreso de agua tratada	T-109	1,67E-02	0,5	1,04	1,51E-01	2,69	0,18	3	2,53	0,84	70,59
13	Libre	T-109	1,94E-02	0,5	1,04	1,75E-01	2,69	0,18	3	2,92	0,89	70,59
15	Ingreso de espuma	T-109	2,69E-03	0,5	1,04	2,43E-02	2,69	0,18	3	0,41	0,46	70,59
18	Ingreso de gas blanketing	T-109	4,43E-05	0,5	1,04	2,48E-03	2,69	0,18	3	0,04	0,21	70,59
19	Ventoeo de gas	T-109	4,43E-05	0,5	1,04	2,48E-03	2,69	0,18	3	0,04	0,21	70,59
20	Conexión para level switch	T-109	4,43E-05	0,5	1,04	2,48E-03	2,69	0,18	3	0,04	0,21	70,59
21	Conexión para válvula de presión y vacío	T-109	1,77E-05	0,25	1,04	1,99E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,14	27,39
22	Libre	T-109	4,43E-05	0,5	1,04	2,48E-03	2,69	0,18	3	0,04	0,21	70,59
23	Manhole de techo	T-109	4,43E-05	0,25	1,04	4,97E-03	2,69	0,18	1	0,03	0,19	27,39
24	Tomamuestras	T-109	2,28E-03	0,25	1,04	4,11E-02	2,69	0,18	3	0,69	0,55	82,17
26	Mirilla 2	T-109	2,01E-03	0,5	1,04	1,82E-02	2,69	0,18	3	0,30	0,42	70,59
27	Mirilla 3	T-109	1,75E-03	0,5	1,04	1,58E-02	2,69	0,18	3	0,26	0,4	70,59
28	Mirilla 4	T-109	1,44E-03	0,5	1,04	1,30E-02	2,69	0,18	3	0,22	0,37	70,59

**Tabla 55** Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en el tanque T-110A

# Escape	Descripción de la conexión	Cód. ubicación	Tasa escape Ge (kg/s)	k	f <sub>T</sub>	Q <sub>vmin</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad viento V (m/s)	Renov. aire c (s <sup>-1</sup> )	Ineficacia ventilación f <sub>v</sub>	Volumen teórico V <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	Radio esfera r <sub>z</sub> (m)	Tiempo t <sub>p</sub> (s)
0	Superficie del crudo	T-110A										
1	Ingreso de crudo	T-110A	9,15E-03	0,5	1,04	8,01E-02	2,69	0,18	3	1,34	0,68	70,59
2	Salida de crudo	T-110A	9,52E-03	0,5	1,04	8,34E-02	2,69	0,18	3	1,39	0,69	70,59
3	Drenaje de fondo (sumidero)	T-110A	9,98E-04	0,5	1,04	8,74E-03	2,69	0,18	3	0,15	0,33	70,59
4	Drenaje	T-110A	9,86E-04	0,5	1,04	8,64E-03	2,69	0,18	3	0,14	0,33	70,59
5	Manhole de pared	T-110A	7,95E-03	0,5	1,04	6,97E-02	2,69	0,18	3	1,16	0,65	70,59
6	Tapa de limpieza	T-110A	1,13E-02	0,5	1,04	9,87E-02	2,69	0,18	3	1,65	0,73	70,59
7	Libre	T-110A	1,00E-03	0,5	1,04	8,77E-03	2,69	0,18	3	0,15	0,33	70,59
8	Libre	T-110A	8,75E-04	0,5	1,04	7,67E-03	2,69	0,18	3	0,13	0,31	70,59
9	Ingreso de espuma	T-110A	4,50E-05	0,5	1,04	2,45E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
10	Rebose libre	T-110A	4,50E-05	0,5	1,04	2,45E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
11	Rebose libre	T-110A	4,50E-05	0,5	1,04	2,45E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
12	Manhole de techo	T-110A	4,50E-05	0,25	1,04	4,89E-03	2,69	0,18	1	0,03	0,19	27,39
13	Libre	T-110A	4,50E-05	0,5	1,04	2,45E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
14	Libre	T-110A	4,50E-05	0,5	1,04	2,45E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
15	Conexión para válvula de presión y vacío	T-110A	1,80E-05	0,25	1,04	1,96E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,14	27,39
16	Conexión para level switch	T-110A	4,50E-05	0,5	1,04	2,45E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
17	Ventoeo de gas	T-110A	4,50E-05	0,5	1,04	2,45E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53

**Tabla 56** Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en el tanque T-110B

# Escape	Descripción de la conexión	Cód. ubicación	Tasa escape Ge (kg/s)	k	f <sub>T</sub>	Q <sub>vmin</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad viento V (m/s)	Renov. aire c (s <sup>-1</sup> )	Ineficacia ventilación f <sub>v</sub>	Volumen teórico V <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	Radio esfera r <sub>z</sub> (m)	Tiempo t <sub>p</sub> (s)
0	Superficie del crudo	T-110B										
1	Ingreso de crudo	T-110B	9,08E-03	0,5	1,04	7,40E-02	2,69	0,18	3	1,24	0,67	70,59
2	Salida de crudo	T-110B	9,53E-03	0,5	1,04	7,76E-02	2,69	0,18	3	1,30	0,68	70,59
3	Drenaje de fondo (sumidero)	T-110B	9,80E-04	0,5	1,04	7,98E-03	2,69	0,18	3	0,13	0,32	70,59
4	Ventoeo de gas	T-110B	4,66E-06	0,5	1,04	2,36E-04	2,69	0,18	1	0,00	0,07	23,53
5	Manhole de pared	T-110B	8,77E-03	0,5	1,04	7,15E-02	2,69	0,18	3	1,19	0,66	70,59
6	Tapa de limpieza	T-110B	1,13E-02	0,5	1,04	9,18E-02	2,69	0,18	3	1,53	0,72	70,59
7	Transmisor de fondo de tanque	T-110B	9,98E-04	0,5	1,04	8,13E-03	2,69	0,18	3	0,14	0,32	70,59
8	Conexión para level switch	T-110B	4,66E-05	0,5	1,04	2,36E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
9	Conexión para válvula de presión y vacío	T-110B	1,87E-05	0,25	1,04	1,89E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,14	27,39
10	Drenaje	T-110B	9,89E-04	0,5	1,04	8,06E-03	2,69	0,18	3	0,13	0,32	70,59
11	Rebose de shipping	T-110B	4,66E-05	0,5	1,04	2,36E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
12	Rebose a canaleta	T-110B	4,66E-05	0,5	1,04	2,36E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
13	Ingreso de espuma	T-110B	3,80E-03	0,5	1,04	3,10E-02	2,69	0,18	1	0,17	0,35	23,53
14	Manhole de techo	T-110B	4,66E-05	0,25	1,04	4,72E-03	2,69	0,18	1	0,03	0,18	27,39
15	Libre	T-110B	4,66E-05	0,5	1,04	2,36E-03	2,69	0,18	1	0,01	0,15	23,53
16	Libre	T-110B	8,71E-04	0,5	1,04	7,10E-03	2,69	0,18	3	0,12	0,3	70,59

**Tabla 57** Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en la bota de gas V-124

# Escape	Descripción de la conexión	Cód. ubicación	Tasa escape Ge (kg/s)	k	$f_T$	$Q_{vmin}$ ( $m^3/s$ )	Velocidad viento V (m/s)	Renov. aire c ( $s^{-1}$ )	Ineficacia ventilación $f_v$	Volumen teórico $V_z$ ( $m^3$ )	Radio esfera $r_z$ (m)	Tiempo $t_p$ (s)
0	Superficie del crudo	V-124										
1	Entrada de producto	V-124	2,28E-02	0,5	1,04	2,06E-01	2,69	0,18	3	3,44	0,94	70,59
2	Salida de producto	V-124	2,15E-02	0,5	1,04	1,94E-01	2,69	0,18	3	3,24	0,92	70,59
3	Salida de gas	V-124	8,08E-05	0,5	1,04	4,53E-03	2,69	0,18	1	0,03	0,18	23,53
4	Disponible	V-124	2,27E-03	0,5	1,04	2,05E-02	2,69	0,18	3	0,34	0,43	70,59
8	Manómetro	V-124	2,18E-02	0,5	1,04	1,97E-01	2,69	0,18	3	3,29	0,92	70,59
9	Termómetro	V-124	8,71E-03	0,5	1,04	7,87E-02	2,69	0,18	3	1,31	0,68	70,59

**Tabla 58** Caracterización de la nube inflamable originada por cada escape en la bota de gas V-125

# Escape	Descripción de la conexión	Cód. ubicación	Tasa escape Ge (kg/s)	k	$f_T$	$Q_{vmin}$ ( $m^3/s$ )	Velocidad viento V (m/s)	Renov. aire c ( $s^{-1}$ )	Ineficacia ventilación $f_v$	Volumen teórico $V_z$ ( $m^3$ )	Radio esfera $r_z$ (m)	Tiempo $t_p$ (s)
0	Superficie del crudo	V-125										
1	Entrada de producto	V-125	2,28E-02	0,5	1,04	2,07E-01	2,69	0,18	3	3,46	0,94	70,59
2	Salida de producto	V-125	2,15E-02	0,5	1,04	1,95E-01	2,69	0,18	3	3,26	0,92	70,59
3	Salida de gas	V-125	8,06E-05	0,5	1,04	4,55E-03	2,69	0,18	1	0,03	0,18	23,53
4	Disponible	V-125	2,27E-03	0,5	1,04	2,06E-02	2,69	0,18	3	0,34	0,43	70,59
8	Manómetro	V-125	2,20E-02	0,5	1,04	2,00E-01	2,69	0,18	3	3,33	0,93	70,59
9	Termómetro	V-125	8,79E-03	0,5	1,04	7,99E-02	2,69	0,18	3	1,33	0,68	70,59

**E.4 Clasificación de las zonas originadas por los escapes****Tabla 59** Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en el tanque T-109

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Disponibilidad de la ventilación	Grado de ventilación	Tipo de zona
0	Superficie del crudo	N/A	T-109	Continuo			Zona 0
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
2	Salida de crudo	Válvula	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
4	Rebose 2	Brida	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
8	Ingreso de agua tratada	Válvula	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
13	Libre	Brida	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
15	Ingreso de espuma	Brida	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
18	Ingreso de gas blanketing	Brida	T-109	Secundario	Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
19	Venteo de gas	Brida	T-109	Secundario	Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
20	Conexión para level switch	Brida	T-109	Secundario	Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
21	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-109	Primario	Muy Buena	Alto	Zona 1 ED (1)
22	Libre	Brida	T-109	Secundario	Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
23	Manhole de techo	Tapa	T-109	Primario	Muy Buena	Alto	Zona 1 ED (1)
24	Tomamuestras	Válvula	T-109	Primario	Buena	Medio	Zona 1 + Zona 2
26	Mirilla 2	Válvula	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
27	Mirilla 3	Válvula	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
28	Mirilla 4	Válvula	T-109	Secundario	Buena	Medio	Zona 2

**Tabla 60** Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en el tanque T-110A

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Disponibilidad de la ventilación	Grado de ventilación	Tipo de zona
0	Superficie del crudo	N/A	T-110A	Continuo			Zona 0
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-110A	Secundario	Buena	Medio	Zona 2 (4)
2	Salida de crudo	Válvula	T-110A	Secundario	Buena	Medio	Zona 2 (4)
3	Drenaje de fondo (sumidero)	Válvula	T-110A	Secundario	Buena	Medio	Zona 2 (4)
4	Drenaje	Válvula	T-110A	Secundario	Buena	Medio	Zona 2 (4)
5	Manhole de pared	Brida	T-110A	Secundario	Buena	Medio	Zona 2 (4)
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110A	Secundario	Buena	Medio	Zona 2 (4)
7	Libre	Válvula	T-110A	Secundario	Buena	Medio	Zona 2 (4)
8	Libre	Válvula	T-110A	Secundario	Buena	Medio	Zona 2 (4)
9	Ingreso de espuma	Brida	T-110A	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
10	Rebose libre	Brida	T-110A	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
11	Rebose libre	Válvula	T-110A	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
12	Manhole de techo	Tapa	T-110A	Primario	Muy Buena	Alto	Zona 1 ED (1)
13	Libre	Brida	T-110A	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
14	Libre	Brida	T-110A	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
15	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-110A	Primario	Muy Buena	Alto	Zona 1 ED (1)
16	Conexión para level switch	Brida	T-110A	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED (1)
17	Venteo de gas	Brida	T-110A	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED (1)

**Tabla 61** Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en el tanque T-110B

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Disponibilidad de la ventilación	Grado de ventilación	Tipo de zona
0	Superficie del crudo	N/A	T-110B	Continuo			Zona 0
1	Ingreso de crudo	Válvula	T-110B	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
2	Salida de crudo	Válvula	T-110B	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
3	Drenaje de fondo (sumidero)	Válvula	T-110B	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
4	Ventoeo de gas	Brida	T-110B	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED
5	Manhole de pared	Brida	T-110B	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
6	Tapa de limpieza	Brida	T-110B	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
7	Transmisor de fondo de tanque	Válvula	T-110B	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
8	Conexión para level switch	Brida	T-110B	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED
9	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	T-110B	Primario	Muy Buena	Alto	Zona 1 ED (1)
10	Drenaje	Válvula	T-110B	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
11	Rebose de shipping	Válvula	T-110B	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED
12	Rebose a canaleta	Brida	T-110B	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED
13	Ingreso de espuma	Brida	T-110B	Secundario	Muy Buena	Medio	Zona 2
14	Manhole de techo	Tapa	T-110B	Primario	Muy Buena	Alto	Zona 1 ED (1)
15	Libre	Brida	T-110B	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED
16	Libre	Brida	T-110B	Secundario	Buena	Medio	Zona 2

**Tabla 62** Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en la bota de gas V-124

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Disponibilidad de la ventilación	Grado de ventilación	Tipo de zona
0	Superficie del crudo	N/A	V-124	Continuo			Zona 0
1	Entrada de producto	Válvula	V-124	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
2	Salida de producto	Válvula	V-124	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
3	Salida de gas	Brida	V-124	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED
4	Disponibile	Brida	V-124	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
8	Manómetro	Instrumento	V-124	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
9	Termómetro	Instrumento	V-124	Secundario	Buena	Medio	Zona 2

**Tabla 63** Clasificación de zonas originadas por cada fuente de escape en la bota de gas V-125

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Cód. ubicación	Grado escape	Disponibilidad de la ventilación	Grado de ventilación	Tipo de zona
0	Superficie del crudo	N/A	V-125	Continuo			Zona 0
1	Entrada de producto	Válvula	V-125	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
2	Salida de producto	Válvula	V-125	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
3	Salida de gas	Brida	V-125	Secundario	Muy Buena	Alto	Zona 2 ED
4	Disponibile	Brida	V-125	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
8	Manómetro	Instrumento	V-125	Secundario	Buena	Medio	Zona 2
9	Termómetro	Instrumento	V-125	Secundario	Buena	Medio	Zona 2

### E.5 Dimensiones de las zonas peligrosas típicas

**Tabla 64** Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva tanque T-109

Descripción	Grado escape	$Q_{vmin}$ (m <sup>3</sup> /s)	k	c (renov./s)	Ineficacia ventilación $f_v$	$V_z$ (m <sup>3</sup> )	$r_z$ (m)	Tiempo de permanencia $t_p$ (s)	Tiempo de permanencia $t_p$ (h)
Extensión típica para la zona 0	Continuo	0,00E+00	0,25						
Extensión típica para la zona 1	Primario	4,81E-02	0,25	0,18	3	0,80	0,58	82,17	0,023
Extensión típica para la zona 2	Secundario	2,12E-01	0,50	0,18	3	3,54	0,95	70,59	0,020

**Tabla 65** Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva tanque T-110A

Descripción	Grado escape	$Q_{vmin}$ (m <sup>3</sup> /s)	k	c (renov./s)	Ineficacia ventilación $f_v$	$V_z$ (m <sup>3</sup> )	$r_z$ (m)	Tiempo de permanencia $t_p$ (s)	Tiempo de permanencia $t_p$ (h)
Extensión típica para la zona 0	Continuo	0,00E+00	0,25						
Extensión típica para la zona 1	Primario	6,85E-03	0,25	0,18	1	0,04	0,21	27,39	0,008
Extensión típica para la zona 2	Secundario	9,87E-02	0,50	0,18	3	1,65	0,73	70,59	0,020

**Tabla 66** Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva tanque T-110B

Descripción	Grado escape	Q <sub>vmin</sub> (m <sup>3</sup> /s)	k	c (renov./s)	Ineficacia ventilación f <sub>v</sub>	V <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	r <sub>z</sub> (m)	Tiempo de permanencia t <sub>p</sub> (s)	Tiempo de permanencia t <sub>p</sub> (h)
Extensión típica para la zona 0	Continuo	0,00E+00	0,25						
Extensión típica para la zona 1	Primario	6,60E-03	0,25	0,18	1	0,04	0,21	27,39	0,008
Extensión típica para la zona 2	Secundario	9,18E-02	0,50	0,18	3	1,53	0,72	70,59	0,020

**Tabla 67** Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva bota de gas V-124

Descripción	Grado escape	Q <sub>vmin</sub> (m <sup>3</sup> /s)	k	c (renov./s)	Ineficacia ventilación f <sub>v</sub>	V <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	r <sub>z</sub> (m)	Tiempo de permanencia t <sub>p</sub> (s)	Tiempo de permanencia t <sub>p</sub> (h)
Extensión típica para la zona 0	Continuo	0,00E+00	0,25						
Extensión típica para la zona 1	Primario	0,00E+00	0,25						
Extensión típica para la zona 2	Secundario	2,06E-01	0,50	0,18	3	3,44	0,94	70,59	0,020

**Tabla 68.** Dimensión de las zonas peligrosas y tiempo de permanencia de la atmósfera explosiva bota de gas V-125.

Descripción	Grado escape	Q <sub>vmin</sub> (m <sup>3</sup> /s)	k	c (renov./s)	Ineficacia ventilación f <sub>v</sub>	V <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	r <sub>z</sub> (m)	Tiempo de permanencia t <sub>p</sub> (s)	Tiempo de permanencia t <sub>p</sub> (h)
Extensión típica para la zona 0	Continuo	0,00E+00	0,25						
Extensión típica para la zona 1	Primario	0,00E+00	0,25						
Extensión típica para la zona 2	Secundario	2,07E-01	0,50	0,18	3	3,46	0,94	70,59	0,020

## E.6 Probabilidades de ignición y explosión

Tabla 69 Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión en el tanque T-109

# Escape	Tipo accesorio	Probabilidades de ignición														Probabilidad de explosión											
		POII	CASO 1: Operador de planta						CASO 2: Proceso medianamente denso						PODI Total	M CHEM	M MAGE	M IN/OUT	POEGDI								
			PODI S/D	M MAG	M MAT	M T	M IN/OUT	PODI	PODI final	PODI S/D	M MAG	M MAT	M T	M IN/OUT						PODI	PODI final						
0	N/A	5,74E-03														2,3E-02	0,00	1,18	0,34	1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1	0,0E+00	0,5	0,0E+00
1	Válvula	7,47E-03														2,3E-02	0,20	1,18	0,34	1	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	3,7E-04	0,5	5,6E-05
2	Válvula	7,49E-03														2,3E-02	0,20	1,18	0,34	1	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	3,7E-04	0,5	5,6E-05
4	Brida	6,17E-03														2,3E-02	0,20	1,18	0,34	1	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	3,7E-04	0,5	5,6E-05
8	Válvula	6,68E-03														2,3E-02	0,20	1,18	0,34	1	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	3,7E-04	0,5	5,6E-05
13	Brida	6,97E-03														2,3E-02	0,20	1,18	0,34	1	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	3,7E-04	0,5	5,6E-05
15	Brida	5,74E-03	1,18E-03	0,20	1,18	0,34	1	9,7E-05	9,6E-05	1,6E-01	0,20	1,18	0,34	1	1,3E-02	1,3E-02	1,3E-02	1	2,7E-03	0,5	4,0E-04						
18	Brida	5,72E-03	1,18E-03	0,07	1,18	0,34	1	3,4E-05	3,3E-05	1,6E-01	0,07	1,18	0,34	1	4,5E-03	4,5E-03	4,5E-03	1	3,2E-04	0,5	4,8E-05						
19	Brida	5,72E-03	1,18E-03	0,07	1,18	0,34	1	3,4E-05	3,3E-05	1,6E-01	0,07	1,18	0,34	1	4,5E-03	4,5E-03	4,5E-03	1	3,2E-04	0,5	4,8E-05						
20	Brida	5,72E-03	1,18E-03	0,07	1,18	0,34	1	3,4E-05	3,3E-05	1,6E-01	0,07	1,18	0,34	1	4,5E-03	4,5E-03	4,5E-03	1	3,2E-04	0,5	4,8E-05						
21	PSV	5,72E-03	4,57E-04	0,04	1,18	0,34	1	8,2E-06	8,2E-06	1,6E-01	0,04	1,18	0,34	1	2,9E-03	2,8E-03	2,9E-03	1	1,3E-04	0,5	1,9E-05						
22	Brida	5,72E-03	1,18E-03	0,07	1,18	0,34	1	3,4E-05	3,3E-05	1,6E-01	0,07	1,18	0,34	1	4,5E-03	4,5E-03	4,5E-03	1	3,2E-04	0,5	4,8E-05						
23	Tapa	5,72E-03	4,57E-04	0,07	1,18	0,34	1	1,3E-05	1,3E-05	1,6E-01	0,07	1,18	0,34	1	4,5E-03	4,5E-03	4,5E-03	1	3,2E-04	0,5	4,7E-05						
24	Válvula	7,39E-03	1,37E-03	0,10	1,18	0,34	1	5,7E-05	5,6E-05	1,6E-01	0,10	1,18	0,34	1	6,6E-03	6,5E-03	6,6E-03	1	6,7E-04	0,5	1,0E-04						
26	Válvula	7,07E-03														2,3E-02	0,10	1,18	0,34	1	9,3E-04	9,2E-04	9,2E-04	1	9,4E-05	0,5	1,4E-05
27	Válvula	6,76E-03														2,3E-02	0,10	1,18	0,34	1	9,3E-04	9,2E-04	9,2E-04	1	9,4E-05	0,5	1,4E-05
28	Válvula	6,44E-03														2,3E-02	0,10	1,18	0,34	1	9,3E-04	9,2E-04	9,2E-04	1	9,4E-05	0,5	1,4E-05

Nota: POII = Probabilidad de ignición inmediata, PODI = Probabilidad de ignición retardada, POEGDI = Probabilidad de explosión dada la ignición retardada.

**Tabla 70** Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión en el tanque T-110A

# Escape	Tipo accesorio	Probabilidades de ignición														Probabilidad de explosión					
		CASO 1: Operador de planta							CASO 2: Proceso medianamente denso							PODI Total	M CHEM	M MAGE	MIN/OUT	POEGDI	
		POII	PODI S/D	M MAG	M MAT	M T	MIN/OUT	PODI	PODI final	PODI S/D	M MAG	M MAT	M T	MIN/OUT	PODI						PODI final
0	N/A	5,47E-03							2,3E-02	0,00	1,18	0,27	1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1	0,0E+00	0,5	0,0E+00	
1	Válvula	5,74E-03							2,3E-02	0,20	1,18	0,27	1	1,4E-03	1,4E-03	1,4E-03	1	2,9E-04	0,5	4,3E-05	
2	Válvula	5,77E-03							2,3E-02	0,20	1,18	0,27	1	1,4E-03	1,4E-03	1,4E-03	1	2,9E-04	0,5	4,3E-05	
3	Válvula	5,80E-03							2,3E-02	0,10	1,18	0,27	1	7,2E-04	7,1E-04	7,1E-04	1	7,3E-05	0,5	1,1E-05	
4	Válvula	5,79E-03							2,3E-02	0,10	1,18	0,27	1	7,2E-04	7,1E-04	7,1E-04	1	7,3E-05	0,5	1,1E-05	
5	Brida	5,67E-03							2,3E-02	0,20	1,18	0,27	1	1,4E-03	1,4E-03	1,4E-03	1	2,9E-04	0,5	4,3E-05	
6	Brida	5,89E-03	1,18E-03	0,20	1,18	0,27	1	7,5E-05	7,5E-05	1,6E-01	0,20	1,18	0,27	1	1,0E-02	1,0E-02	1,0E-02	1	2,1E-03	0,5	3,1E-04
7	Válvula	5,80E-03	1,18E-03	0,10	1,18	0,27	1	3,8E-05	3,7E-05	1,6E-01	0,10	1,18	0,27	1	5,1E-03	5,0E-03	5,1E-03	1	5,2E-04	0,5	7,8E-05
8	Válvula	5,72E-03	1,18E-03	0,10	1,18	0,27	1	3,8E-05	3,7E-05	1,6E-01	0,10	1,18	0,27	1	5,1E-03	5,0E-03	5,1E-03	1	5,2E-04	0,5	7,8E-05
9	Brida	5,46E-03	3,93E-04	0,07	1,18	0,27	1	8,7E-06	8,6E-06	1,6E-01	0,07	1,18	0,27	1	3,5E-03	3,5E-03	3,5E-03	1	2,4E-04	0,5	3,7E-05
10	Brida	5,46E-03	3,93E-04	0,07	1,18	0,27	1	8,7E-06	8,6E-06	1,6E-01	0,07	1,18	0,27	1	3,5E-03	3,5E-03	3,5E-03	1	2,4E-04	0,5	3,7E-05
11	Válvula	5,46E-03	3,93E-04	0,07	1,18	0,27	1	8,7E-06	8,6E-06	1,6E-01	0,07	1,18	0,27	1	3,5E-03	3,5E-03	3,5E-03	1	2,4E-04	0,5	3,7E-05
12	Tapa	5,46E-03	4,57E-04	0,07	1,18	0,27	1	1,0E-05	1,0E-05	1,6E-01	0,07	1,18	0,27	1	3,5E-03	3,5E-03	3,5E-03	1	2,4E-04	0,5	3,7E-05
13	Brida	5,46E-03	3,93E-04	0,07	1,18	0,27	1	8,7E-06	8,6E-06	1,6E-01	0,07	1,18	0,27	1	3,5E-03	3,5E-03	3,5E-03	1	2,4E-04	0,5	3,7E-05
14	Brida	5,46E-03							2,3E-02	0,07	1,18	0,27	1	5,0E-04	4,9E-04	4,9E-04	1	3,5E-05	0,5	5,2E-06	
15	PSV	5,46E-03							2,3E-02	0,04	1,18	0,27	1	3,1E-04	3,1E-04	3,1E-04	1	1,4E-05	0,5	2,1E-06	
16	Brida	5,46E-03							2,3E-02	0,07	1,18	0,27	1	5,0E-04	4,9E-04	4,9E-04	1	3,5E-05	0,5	5,2E-06	
17	Brida	5,46E-03							2,3E-02	0,07	1,18	0,27	1	5,0E-04	4,9E-04	4,9E-04	1	3,5E-05	0,5	5,2E-06	

Nota: POII = Probabilidad de ignición inmediata, PODI = Probabilidad de ignición retardada, POEGDI = Probabilidad de explosión dada la ignición retardada.

**Tabla 71** Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión tanque en el T-110B

# Escape	Tipo accesorio	Probabilidades de ignición														Probabilidad de explosión											
		POII	CASO 1: Operador de planta						CASO 2: Proceso medianamente denso						PODI Total	M CHEM	M MAGE	M IN/OUT	POEGDI								
			PODI S/D	MMAG	MMAT	MT	MIN/OUT	PODI	PODI final	PODI S/D	MMAG	MMAT	MT	MIN/OUT						PODI	PODI final						
0	N/A	4,92E-03														2,3E-02	0,00	1,18	0,09	1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1	0,0E+00	0,5	0,0E+00
1	Válvula	5,16E-03														2,3E-02	0,20	1,18	0,09	1	5,0E-04	5,0E-04	5,0E-04	1	1,0E-04	0,5	1,5E-05
2	Válvula	5,19E-03														2,3E-02	0,20	1,18	0,09	1	5,0E-04	5,0E-04	5,0E-04	1	1,0E-04	0,5	1,5E-05
3	Válvula	5,20E-03														2,3E-02	0,10	1,18	0,09	1	2,5E-04	2,5E-04	2,5E-04	1	2,5E-05	0,5	3,8E-06
4	Brida	4,91E-03														2,3E-02	0,02	1,18	0,09	1	5,4E-05	5,4E-05	5,4E-05	1	1,2E-06	0,5	1,8E-07
5	Brida	5,15E-03														2,3E-02	0,20	1,18	0,09	1	5,0E-04	5,0E-04	5,0E-04	1	1,0E-04	0,5	1,5E-05
6	Brida	5,30E-03	1,18E-03	0,20	1,18	0,09	1	2,6E-05	2,6E-05	1,6E-01	0,20	1,18	0,09	1	3,5E-03	3,5E-03	3,5E-03	1	7,1E-04	0,5	1,1E-04						
7	Válvula	5,22E-03	1,18E-03	0,10	1,18	0,09	1	1,3E-05	1,3E-05	1,6E-01	0,10	1,18	0,09	1	1,8E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	1,8E-04	0,5	2,7E-05						
8	Brida	4,91E-03	3,93E-04	0,07	1,18	0,09	1	3,0E-06	3,0E-06	1,6E-01	0,07	1,18	0,09	1	1,2E-03	1,2E-03	1,2E-03	1	8,5E-05	0,5	1,3E-05						
9	PSV	4,91E-03	4,57E-04	0,04	1,18	0,09	1	2,2E-06	2,2E-06	1,6E-01	0,04	1,18	0,09	1	7,7E-04	7,6E-04	7,7E-04	1	3,4E-05	0,5	5,1E-06						
10	Válvula	5,21E-03	1,18E-03	0,10	1,18	0,09	1	1,3E-05	1,3E-05	1,6E-01	0,10	1,18	0,09	1	1,8E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	1,8E-04	0,5	2,7E-05						
11	Válvula	4,91E-03	3,93E-04	0,07	1,18	0,09	1	3,0E-06	3,0E-06	1,6E-01	0,07	1,18	0,09	1	1,2E-03	1,2E-03	1,2E-03	1	8,5E-05	0,5	1,3E-05						
12	Brida	4,91E-03	3,93E-04	0,07	1,18	0,09	1	3,0E-06	3,0E-06	1,6E-01	0,07	1,18	0,09	1	1,2E-03	1,2E-03	1,2E-03	1	8,5E-05	0,5	1,3E-05						
13	Brida	4,95E-03	3,93E-04	0,20	1,18	0,09	1	8,7E-06	8,7E-06	1,6E-01	0,20	1,18	0,09	1	3,5E-03	3,5E-03	3,5E-03	1	7,1E-04	0,5	1,1E-04						
14	Tapa	4,91E-03														2,3E-02	0,07	1,18	0,09	1	1,7E-04	1,7E-04	1,7E-04	1	1,2E-05	0,5	1,8E-06
15	Brida	4,91E-03														2,3E-02	0,07	1,18	0,09	1	1,7E-04	1,7E-04	1,7E-04	1	1,2E-05	0,5	1,8E-06
16	Brida	5,14E-03														2,3E-02	0,10	1,18	0,09	1	2,5E-04	2,5E-04	2,5E-04	1	2,5E-05	0,5	3,8E-06

Nota: POII = Probabilidad de ignición inmediata, PODI = Probabilidad de ignición retardada, POEGDI = Probabilidad de explosión dada la ignición retardada.

**Tabla 72** Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión en la bota de gas V-124

# Escape	Tipo accesorio	Probabilidades de ignición														Probabilidad de explosión					
		CASO 1: Operador de planta							CASO 2: Proceso medianamente denso							PODI Total	M CHEM	M MAGE	MIN/OUT	POEGDI	
		POIH	PODI S/D	M MAG	M MAT	M T	MIN/OUT	PODI	PODI final	PODI S/D	M MAG	M MAT	M T	MIN/OUT	PODI						PODI final
0	N/A	7,23E-03								2,3E-02	0,00	1,18	0,34	1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1	0,0E+00	0,5	0,0E+00
1	Válvula	7,40E-03								2,3E-02	0,20	1,18	0,34	1	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	3,7E-04	0,5	5,6E-05
2	Válvula	7,23E-03								2,3E-02	0,20	1,18	0,34	1	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	3,7E-04	0,5	5,6E-05
3	Brida	7,37E-03								2,3E-02	0,02	1,18	0,34	1	2,0E-04	2,0E-04	2,0E-04	1	4,5E-06	0,5	6,7E-07
4	Brida	7,39E-03								2,3E-02	0,10	1,18	0,34	1	9,3E-04	9,2E-04	9,2E-04	1	9,4E-05	0,5	1,4E-05
8	Instrumento	7,27E-03								2,3E-02	0,20	1,18	0,34	1	1,9E-03	1,8E-03	1,8E-03	1	3,7E-04	0,5	5,6E-05
9	Instrumento	7,27E-03	1,18E-03	0,15	1,18	0,34	1	7,4E-05	7,3E-05	1,6E-01	0,15	1,18	0,34	1	9,9E-03	9,9E-03	1,0E-02	1	1,5E-03	0,5	2,3E-04

**Tabla 73** Cálculo de las probabilidades inmediata, retardada y de explosión en la bota de gas V-125

# Escape	Tipo accesorio	Probabilidades de ignición														Probabilidad de explosión					
		CASO 1: Operador de planta							CASO 2: Proceso medianamente denso							PODI Total	M CHEM	M MAGE	M IN/OUT	POEGDI	
		POII	PODI S/D	M MAG	M MAT	M T	M IN/OUT	PODI	PODI final	PODI S/D	M MAG	M MAT	M T	M IN/OUT	PODI						PODI final
0	N/A	7,28E-03								2,3E-02	0,00	1,18	0,36	1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	1	0,0E+00	0,5	0,0E+00
1	Válvula	7,46E-03								2,3E-02	0,20	1,18	0,36	1	1,9E-03	1,9E-03	1,9E-03	1	3,9E-04	0,5	5,8E-05
2	Válvula	7,29E-03								2,3E-02	0,20	1,18	0,36	1	1,9E-03	1,9E-03	1,9E-03	1	3,9E-04	0,5	5,8E-05
3	Brida	7,43E-03								2,3E-02	0,02	1,18	0,36	1	2,1E-04	2,1E-04	2,1E-04	1	4,6E-06	0,5	7,0E-07
4	Brida	7,45E-03								2,3E-02	0,10	1,18	0,36	1	9,6E-04	9,6E-04	9,6E-04	1	9,8E-05	0,5	1,5E-05
8	Instrumento	7,35E-03								2,3E-02	0,20	1,18	0,36	1	1,9E-03	1,9E-03	1,9E-03	1	3,9E-04	0,5	5,8E-05
9	Instrumento	7,35E-03	1,18E-03	0,15	1,18	0,36	1	7,6E-05	7,6E-05	1,6E-01	0,15	1,18	0,36	1	1,0E-02	1,0E-02	1,0E-02	1	1,6E-03	0,5	2,4E-04

## E.7 Frecuencia de eventos en el área de tanques

Tabla 74 Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en el tanque T-109

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Diámetro Ø (plg)	Ø Orificio (mm)	Frec. evento iniciador oc / año	Prob. Ignición Inmediata POII	Prob. Ignición Retardada PODI	Prob. DE Explosión POEGDI	Jet Fire	Escape al ambiente	Flash / Jet Fire	Explosión
0	Superficie del crudo	N/A	600	0,00		5,74E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	Ingreso de crudo	Válvula	10	1,78	7,17E-05	7,47E-03	1,84E-03	5,62E-05	5,36E-07	7,10E-05	1,31E-07	7,38E-12
2	Salida de crudo	Válvula	12	1,78	9,00E-05	7,49E-03	1,84E-03	5,62E-05	6,74E-07	8,92E-05	1,65E-07	9,26E-12
4	Rebose 2	Brida	8	1,78	4,00E-05	6,17E-03	1,84E-03	5,62E-05	2,47E-07	3,97E-05	7,33E-08	4,12E-12
8	Ingreso de agua tratada	Válvula	10	1,78	7,17E-05	6,68E-03	1,84E-03	5,62E-05	4,79E-07	7,11E-05	1,31E-07	7,38E-12
13	Libre	Brida	4	1,78	2,75E-05	6,97E-03	1,84E-03	5,62E-05	1,92E-07	2,73E-05	5,04E-08	2,83E-12
15	Ingreso de espuma	Brida	6	1,78	3,20E-05	5,74E-03	1,31E-02	3,99E-04	1,84E-07	3,14E-05	4,17E-07	1,66E-10
18	Ingreso de gas blanketing	Brida	2	1,78	2,30E-05	5,72E-03	4,53E-03	4,77E-05	1,32E-07	2,28E-05	1,04E-07	4,94E-12
19	Venteo de gas	Brida	6	1,78	3,20E-05	5,72E-03	4,53E-03	4,77E-05	1,83E-07	3,17E-05	1,44E-07	6,87E-12
20	Conexión para level switch	Brida	4	1,78	2,75E-05	5,72E-03	4,53E-03	4,77E-05	1,57E-07	2,72E-05	1,24E-07	5,91E-12
21	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	8	1,13	1,90E-04	5,72E-03	2,85E-03	1,90E-05	1,09E-06	1,88E-04	5,39E-07	1,02E-11
22	Libre	Brida	6	1,78	3,20E-05	5,72E-03	4,53E-03	4,77E-05	1,83E-07	3,17E-05	1,44E-07	6,87E-12
23	Manhole de techo	Tapa	24	1,78	1,40E-04	5,72E-03	4,51E-03	4,75E-05	8,01E-07	1,39E-04	6,27E-07	2,98E-11
24	Tomamuestras	Válvula	1	0,56	3,75E-06	7,39E-03	6,57E-03	1,00E-04	2,77E-08	3,70E-06	2,45E-08	2,46E-12
26	Mirilla 2	Válvula	1	0,56	3,75E-06	7,07E-03	9,24E-04	1,41E-05	2,65E-08	3,72E-06	3,44E-09	4,86E-14
27	Mirilla 3	Válvula	1	0,56	3,75E-06	6,76E-03	9,24E-04	1,41E-05	2,54E-08	3,72E-06	3,44E-09	4,86E-14
28	Mirilla 4	Válvula	1	0,56	3,75E-06	6,44E-03	9,24E-04	1,41E-05	2,42E-08	3,72E-06	3,44E-09	4,86E-14
									<b>4,96E-06</b>	<b>7,85E-04</b>	<b>2,68E-06</b>	<b>2,65E-10</b>

**Tabla 75** Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en el tanque T-110A

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Diámetro Ø (plg)	Ø Orificio (mm)	Frec. evento iniciador oc / año	Prob. Ignición Inmediata POII	Prob. Ignición Retardada PODI	Prob. DE Explosión POEGDI	Jet Fire	Escape al ambiente	Flash / Jet Fire	Explosión
0	Superficie del crudo	N/A	600	0,00		5,47E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	Ingreso de crudo	Válvula	8	1,78	5,33E-05	5,74E-03	1,43E-03	4,35E-05	3,06E-07	5,29E-05	7,55E-08	3,28E-12
2	Salida de crudo	Válvula	12	1,78	9,00E-05	5,77E-03	1,43E-03	4,35E-05	5,19E-07	8,94E-05	1,28E-07	5,54E-12
3	Drenaje de fondo (sumidero)	Válvula	6	0,56	3,50E-05	5,80E-03	7,14E-04	1,09E-05	2,03E-07	3,48E-05	2,49E-08	2,71E-13
4	Drenaje	Válvula	4	0,56	2,25E-05	5,79E-03	7,14E-04	1,09E-05	1,30E-07	2,24E-05	1,60E-08	1,74E-13
5	Manhole de pared	Brida	30	1,78	1,88E-04	5,67E-03	1,43E-03	4,35E-05	1,07E-06	1,87E-04	2,66E-07	1,16E-11
6	Tapa de limpieza	Brida	48x48	1,78	3,32E-04	5,89E-03	1,01E-02	3,09E-04	1,95E-06	3,27E-04	3,34E-06	1,03E-09
7	Libre	Válvula	2	0,56	1,00E-05	5,80E-03	5,07E-03	7,75E-05	5,80E-08	9,89E-06	5,05E-08	3,91E-12
8	Libre	Válvula	6	0,56	3,50E-05	5,72E-03	5,07E-03	7,75E-05	2,00E-07	3,46E-05	1,77E-07	1,37E-11
9	Ingreso de espuma	Brida	6	1,78	3,20E-05	5,46E-03	3,48E-03	3,67E-05	1,75E-07	3,17E-05	1,11E-07	4,07E-12
10	Rebose libre	Brida	8	1,78	4,00E-05	5,46E-03	3,48E-03	3,67E-05	2,18E-07	3,96E-05	1,39E-07	5,08E-12
11	Rebose libre	Válvula	10	1,78	7,17E-05	5,46E-03	3,48E-03	3,67E-05	3,91E-07	7,11E-05	2,48E-07	9,11E-12
12	Manhole de techo	Tapa	24	1,78	1,40E-04	5,46E-03	3,48E-03	3,67E-05	7,64E-07	1,39E-04	4,85E-07	1,78E-11
13	Libre	Brida	3	1,78	2,53E-05	5,46E-03	3,48E-03	3,67E-05	1,38E-07	2,51E-05	8,76E-08	3,22E-12
14	Libre	Brida	4	1,78	2,75E-05	5,46E-03	4,93E-04	5,19E-06	1,50E-07	2,73E-05	1,35E-08	7,00E-14
15	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	8	1,13	1,90E-04	5,46E-03	3,12E-04	2,08E-06	1,04E-06	1,89E-04	5,89E-08	1,22E-13
16	Conexión para level switch	Brida	4	1,78	2,75E-05	5,46E-03	4,93E-04	5,19E-06	1,50E-07	2,73E-05	1,35E-08	7,00E-14
17	Ventoeo de gas	Brida	8	1,78	4,00E-05	5,46E-03	4,93E-04	5,19E-06	2,18E-07	3,98E-05	1,96E-08	1,02E-13
									<b>7,68E-06</b>	<b>1,35E-03</b>	<b>5,25E-06</b>	<b>1,11E-09</b>

**Tabla 76** Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en el tanque T-110B

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Diámetro Ø (plg)	Ø Orificio (mm)	Frec. evento iniciador oc / año	Prob. Ignición Inmediata POII	Prob. Ignición Retardada PODI	Prob. DE Explosión POEGDI	Jet Fire	Escape al ambiente	Flash / Jet Fire	Explosión
0	Superficie del crudo	N/A	600	0,00		4,92E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	Ingreso de crudo	Válvula	8	1,78	5,33E-05	5,16E-03	4,95E-04	1,51E-05	2,75E-07	5,30E-05	2,63E-08	3,97E-13
2	Salida de crudo	Válvula	12	1,78	9,00E-05	5,19E-03	4,95E-04	1,51E-05	4,67E-07	8,95E-05	4,43E-08	6,70E-13
3	Drenaje de fondo (sumidero)	Válvula	6	0,56	3,50E-05	5,20E-03	2,48E-04	3,79E-06	1,82E-07	3,48E-05	8,64E-09	3,28E-14
4	Ventoeo de gas	Brida	6	0,56	3,20E-05	4,91E-03	5,41E-05	1,80E-07	1,57E-07	3,18E-05	1,72E-09	3,11E-16
5	Manhole de pared	Brida	30	1,78	1,88E-04	5,15E-03	4,95E-04	1,51E-05	9,68E-07	1,87E-04	9,26E-08	1,40E-12
6	Tapa de limpieza	Brida	48x48	1,78	3,32E-04	5,30E-03	3,52E-03	1,07E-04	1,76E-06	3,29E-04	1,16E-06	1,25E-10
7	Transmisor de fondo de tanque	Válvula	2	0,56	1,00E-05	5,22E-03	1,76E-03	2,69E-05	5,22E-08	9,93E-06	1,75E-08	4,73E-13
8	Conexión para level switch	Brida	4	1,78	2,75E-05	4,91E-03	1,21E-03	1,28E-05	1,35E-07	2,73E-05	3,31E-08	4,22E-13
9	Conexión para válvula de presión y vacío	PSV	8	1,13	1,90E-04	4,91E-03	7,66E-04	5,10E-06	9,33E-07	1,89E-04	1,45E-07	7,39E-13
10	Drenaje	Válvula	4	0,56	2,25E-05	5,21E-03	1,76E-03	2,69E-05	1,17E-07	2,23E-05	3,95E-08	1,06E-12
11	Rebose de shipping	Válvula	8	1,78	5,33E-05	4,91E-03	1,21E-03	1,28E-05	2,62E-07	5,30E-05	6,42E-08	8,18E-13
12	Rebose a canaleta	Brida	10	1,78	4,80E-05	4,91E-03	1,21E-03	1,28E-05	2,36E-07	4,77E-05	5,78E-08	7,37E-13
13	Ingreso de espuma	Brida	6	1,78	3,20E-05	4,95E-03	3,50E-03	1,07E-04	1,58E-07	3,17E-05	1,11E-07	1,19E-11
14	Manhole de techo	Tapa	24	1,78	1,40E-04	4,91E-03	1,71E-04	1,80E-06	6,88E-07	1,39E-04	2,39E-08	4,30E-14
15	Libre	Brida	3	1,78	2,53E-05	4,91E-03	1,71E-04	1,80E-06	1,24E-07	2,52E-05	4,31E-09	7,77E-15
16	Libre	Brida	6	0,56	3,20E-05	5,14E-03	2,48E-04	3,79E-06	1,65E-07	3,18E-05	7,90E-09	3,00E-14
									<b>6,68E-06</b>	<b>1,30E-03</b>	<b>1,84E-06</b>	<b>1,43E-10</b>

**Tabla 77** Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en la bota de gas V-124

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Diámetro Ø (plg)	Ø Orificio (mm)	Frec. evento iniciador oc / año	Prob. Ignición Inmediata POII	Prob. Ignición Retardada PODI	Prob. DE Explosión POEGDI	Jet Fire	Escape al ambiente	Flash / Jet Fire	Explosión
0	Superficie del crudo	N/A	48	0,00		7,23E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	Entrada de producto	Válvula	8	1,78	5,33E-05	7,40E-03	1,84E-03	5,62E-05	3,95E-07	5,28E-05	9,76E-08	5,48E-12
2	Salida de producto	Válvula	8	1,78	5,33E-05	7,23E-03	1,84E-03	5,62E-05	3,85E-07	5,28E-05	9,76E-08	5,48E-12
3	Salida de gas	Brida	6	0,56	3,20E-05	7,37E-03	2,02E-04	6,72E-07	2,36E-07	3,18E-05	6,40E-09	4,30E-15
4	Disponibile	Brida	2	0,56	2,30E-05	7,39E-03	9,24E-04	1,41E-05	1,70E-07	2,28E-05	2,11E-08	2,98E-13
8	Manómetro	Instrumento	1	1,78	1,40E-04	7,27E-03	1,84E-03	5,62E-05	1,02E-06	1,39E-04	2,56E-07	1,44E-11
9	Termómetro	Instrumento	1	1,13	1,40E-04	7,27E-03	9,95E-03	2,30E-04	1,02E-06	1,38E-04	1,38E-06	3,19E-10
									<b>3,22E-06</b>	<b>4,37E-04</b>	<b>1,86E-06</b>	<b>3,44E-10</b>

**Tabla 78** Cálculo de las frecuencias de ocurrencia de eventos en la bota de gas V-125

# Escape	Descripción de la conexión	Tipo accesorio	Diámetro Ø (plg)	Ø Orificio (mm)	Frec. evento iniciador oc / año	Prob. Ignición Inmediata POII	Prob. Ignición Retardada PODI	Prob. DE Explosión POEGDI	Jet Fire	Escape al ambiente	Flash / Jet Fire	Explosión
0	Superficie del crudo	N/A	54	0,00		7,28E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	Entrada de producto	Válvula	8	1,78	5,33E-05	7,46E-03	1,91E-03	5,83E-05	3,98E-07	5,28E-05	1,01E-07	5,91E-12
2	Salida de producto	Válvula	8	1,78	5,33E-05	7,29E-03	1,91E-03	5,83E-05	3,89E-07	5,28E-05	1,01E-07	5,91E-12
3	Salida de gas	Brida	6	0,56	3,20E-05	7,43E-03	2,09E-04	6,97E-07	2,38E-07	3,18E-05	6,64E-09	4,63E-15
4	Disponibile	Brida	2	0,56	2,30E-05	7,45E-03	9,59E-04	1,47E-05	1,71E-07	2,28E-05	2,19E-08	3,21E-13
8	Manómetro	Instrumento	1	1,78	1,40E-04	7,35E-03	1,91E-03	5,83E-05	1,03E-06	1,39E-04	2,66E-07	1,55E-11
9	Termómetro	Instrumento	1	1,13	1,40E-04	7,35E-03	1,03E-02	2,39E-04	1,03E-06	1,38E-04	1,43E-06	3,43E-10
									<b>3,25E-06</b>	<b>4,36E-04</b>	<b>1,93E-06</b>	<b>3,71E-10</b>

## E.8 Consecuencias de la explosión en función de las dosis de exposición a sobre presión

Tabla 79 Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en el tanque T-109

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Calor de combustión (J/m <sup>3</sup> )	Presión ambiente (Pa)	Velocidad del sonido	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Distancia @ 3 kPa (con efectos reversibles)				Distancia @ 12,5 kPa (1% letalidad)				
							$\Delta P_s$ (Pa)	$\Delta P_s'$ escalada	r' escalada	r (m)	$\Delta P_s$ (Pa)	$\Delta P_s'$ escalada	r' escalada	r (m)	
0	0,0E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	0,0E+00										
1	3,5E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,2E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	32,28	1,25E+04	0,12	2,5	12,41	
2	3,5E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,2E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	32,35	1,25E+04	0,12	2,5	12,44	
4	1,7E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	5,9E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	25,31	1,25E+04	0,12	2,5	9,73	
8	2,5E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	8,8E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	28,89	1,25E+04	0,12	2,5	11,11	
13	2,9E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,0E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	30,33	1,25E+04	0,12	2,5	11,66	
15	4,1E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	1,4E+06	3	3,00E+03	0,03	0,85	2,06	1,25E+04	0,12			
18	4,1E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	1,5E+05	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,96	1,25E+04	0,12			
19	4,1E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	1,5E+05	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,96	1,25E+04	0,12			
20	4,1E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	1,5E+05	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,96	1,25E+04	0,12			
21	1,1E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	3,9E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,62	1,25E+04	0,12			
22	4,1E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	1,5E+05	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,96	1,25E+04	0,12			
23	2,8E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	9,7E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,84	1,25E+04	0,12			
24	6,9E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	2,4E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	18,72	1,25E+04	0,12	2,5	7,20	
26	3,0E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	1,1E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	14,26	1,25E+04	0,12	2,5	5,49	
27	2,6E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	9,2E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	13,61	1,25E+04	0,12	2,5	5,23	
28	2,2E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	7,6E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	12,74	1,25E+04	0,12	2,5	4,90	

**Tabla 80** Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en el tanque T-110A

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Calor de combustión (J/m <sup>3</sup> )	Presión ambiente (Pa)	Velocidad del sonido	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Distancia @ 3 kPa (con efectos reversibles)				Distancia @ 12,5 kPa (1% letalidad)			
							$\Delta P_s$ (Pa)	$\Delta P_s'$ escalada	r' escalada	r (m)	$\Delta P_s$ (Pa)	$\Delta P_s'$ escalada	r' escalada	r (m)
0	0,0E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	0,0E+00									
1	1,3E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	4,7E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	23,38	1,25E+04	0,12	2,5	8,99
2	1,4E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	4,9E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	23,70	1,25E+04	0,12	2,5	9,11
3	1,5E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	5,1E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	11,17	1,25E+04	0,12	2,5	4,30
4	1,4E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	5,0E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	11,13	1,25E+04	0,12	2,5	4,28
5	1,2E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	4,1E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	22,31	1,25E+04	0,12	2,5	8,58
6	1,6E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	5,8E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	25,07	1,25E+04	0,12	2,5	9,64
7	1,5E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	5,1E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	11,18	1,25E+04	0,12	2,5	4,30
8	1,3E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	4,5E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	10,69	1,25E+04	0,12	2,5	4,11
9	1,4E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,66	1,25E+04	0,12		
10	1,4E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,66	1,25E+04	0,12		
11	1,4E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,66	1,25E+04	0,12		
12	2,7E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	9,5E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,83	1,25E+04	0,12		
13	1,4E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,66	1,25E+04	0,12		
14	1,4E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,66	1,25E+04	0,12		
15	1,1E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	3,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,61	1,25E+04	0,12		
16	1,4E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,66	1,25E+04	0,12		
17	1,4E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,66	1,25E+04	0,12		

**Tabla 81** Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en el tanque T-110B

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Calor de combustión (J/m <sup>3</sup> )	Presión ambiente (Pa)	Velocidad del sonido	Energía Total (J)	Intensidad del estallido (Pa)	Distancia @ 3 kPa (con efectos reversibles)				Distancia @ 12,5 kPa (1% letalidad)				
							ΔPs (Pa)	ΔPs' escalada	r' escalada	r (m)	ΔPs (Pa)	ΔPs' escalada	r' escalada	r (m)	
0	0,0E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	0,0E+00										
1	1,2E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	4,3E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	22,76	1,25E+04	0,12	2,5	8,76	
2	1,3E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	4,5E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	23,13	1,25E+04	0,12	2,5	8,90	
3	1,3E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	4,7E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	10,84	1,25E+04	0,12	2,5	4,17	
4	1,3E-03	3,50E+06	1,01E+05	344	4,6E+03	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,30	1,25E+04	0,12			
5	1,2E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	4,2E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	22,50	1,25E+04	0,12	2,5	8,66	
6	1,5E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	5,4E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	24,47	1,25E+04	0,12	2,5	9,41	
7	1,4E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	4,8E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	10,90	1,25E+04	0,12	2,5	4,19	
8	1,3E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,6E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,65	1,25E+04	0,12			
9	1,1E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	3,7E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,61	1,25E+04	0,12			
10	1,3E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	4,7E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	10,87	1,25E+04	0,12	2,5	4,18	
11	1,3E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,6E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,65	1,25E+04	0,12			
12	1,3E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,6E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,65	1,25E+04	0,12			
13	1,7E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	6,0E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	11,81	1,25E+04	0,12	2,5	4,54	
14	2,6E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	9,2E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,82	1,25E+04	0,12			
15	1,3E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	4,6E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,65	1,25E+04	0,12			
16	1,2E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	4,1E+05	7	3,00E+03	0,03	6,5	10,42	1,25E+04	0,12	2,5	4,01	

**Tabla 82** Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en bota de gas V-124

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Calor de combustión (J/m <sup>3</sup> )	Presión ambiente (Pa)	Velocidad del sonido	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Distancia @ 3 kPa (con efectos reversibles)				Distancia @ 12,5 kPa (1% letalidad)			
							ΔPs	ΔPs'	r'	r	ΔPs	ΔPs'	r'	r
							(Pa)	escalada	escalada	(m)	(Pa)	escalada	escalada	(m)
0	0,0E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	0,0E+00									
1	3,4E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,2E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	32,04	1,25E+04	0,12	2,5	12,32
2	3,2E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,1E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	31,40	1,25E+04	0,12	2,5	12,08
3	2,5E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	8,8E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,81	1,25E+04	0,12		
4	3,4E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	1,2E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	14,85	1,25E+04	0,12	2,5	5,71
8	3,3E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,2E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	31,54	1,25E+04	0,12	2,5	12,13
9	1,3E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	4,6E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	23,24	1,25E+04	0,12	2,5	8,94

**Tabla 83** Distancias límite para efectos reversibles y 1% de letalidad por explosión en bota de gas V-125

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Calor de combustión (J/m <sup>3</sup> )	Presión ambiente (Pa)	Velocidad del sonido	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Distancia @ 3 kPa (con efectos reversibles)				Distancia @ 12,5 kPa (1% letalidad)			
							ΔPs	ΔPs'	r' escalada	r	ΔPs	ΔPs'	r' escalada	r
							(Pa)	escalada		(m)	(Pa)	escalada		(m)
0	0,0E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	0,0E+00									
1	3,5E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,2E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	32,09	1,25E+04	0,12	2,5	12,34
2	3,3E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,1E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	31,45	1,25E+04	0,12	2,5	12,10
3	2,5E-02	3,50E+06	1,01E+05	344	8,9E+04	3	3,00E+03	0,03	0,85	0,81	1,25E+04	0,12		0,00
4	3,4E-01	3,50E+06	1,01E+05	344	1,2E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	14,88	1,25E+04	0,12	2,5	5,72
8	3,3E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	1,2E+07	7	3,00E+03	0,03	6,5	31,70	1,25E+04	0,12	2,5	12,19
9	1,3E+00	3,50E+06	1,01E+05	344	4,7E+06	7	3,00E+03	0,03	6,5	23,35	1,25E+04	0,12	2,5	

**E.9 Consecuencias de la explosión en el control room y shelter de generación****Tabla 84** Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en el tanque T-109

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Control room ubicado a: 68 m					Shelter de generación ubicado a: 35 m						
				Distancia escalada	Sobre presión escalada	Pico sobre presión Ps (Pa)	Sobre presión Ps (psi)	Duración escalada	Duración en (seg)	Distancia escalada	Sobre presión escalada	Pico sobre presión Ps (Pa)	Sobre presión Ps (psi)	Duración escalada	Duración en (seg)
0	0,0E+00	0,0E+00													
1	3,5E+00	1,2E+07	7	13,7	0,018	1811,9	0,26	0,46	0,0	7,0	0,035	3523,0	0,51	0,45	0,0065
2	3,5E+00	1,2E+07	7	13,7	0,018	1811,9	0,26	0,46	0,0	7,0	0,035	3523,0	0,51	0,45	0,0065
4	1,7E+00	5,9E+06	7	17,5	0,014	1409,2	0,20	0,49	0,0	9,0	0,026	2617,1	0,38	0,47	0,0053
8	2,5E+00	8,8E+06	7	15,3	0,016	1610,5	0,23	0,18	0,0	7,9	0,03	3019,8	0,44	0,44	0,0057
13	2,9E+00	1,0E+07	7	14,6	0,017	1711,2	0,25	0,47	0,0	7,5	0,032	3221,1	0,47	0,435	0,0059
15	4,1E-01	1,4E+06	3	28,1	0,0012	120,8	0,02	2	0,0	14,5	0,0024	241,6	0,04	2	0,0141
18	4,1E-02	1,5E+05	3	60,2		0,0	0,00	2	0,0	31,0	0,0012	120,8	0,02	2	0,0066
19	4,1E-02	1,5E+05	3	60,2		0,0	0,00	2	0,0	31,0	0,0012	120,8	0,02	2	0,0066
20	4,1E-02	1,5E+05	3	60,2		0,0	0,00	2	0,0	31,0	0,0012	120,8	0,02	2	0,0066
21	1,1E-02	3,9E+04	3	93,5		0,0	0,00	2	0,0	48,1		0,0	0,00	2	0,0042
22	4,1E-02	1,5E+05	3	60,2		0,0	0,00	2	0,0	31,0	0,0012	120,8	0,02	2	0,0066
23	2,8E-02	9,7E+04	3	68,9		0,0	0,00	2	0,0	35,5	0,001	100,7	0,01	2	0,0057
24	6,9E-01	2,4E+06	7	23,6	0,009	905,9	0,13	0,5	0,0	12,2	0,02	2013,2	0,29	0,47	0,0039
26	3,0E-01	1,1E+06	7	31,0	0,0065	654,3	0,09	0,51	0,0	16,0	0,015	1509,9	0,22	0,48	0,0031
27	2,6E-01	9,2E+05	7	32,5	0,0062	624,1	0,09	0,515	0,0	16,7	0,014	1409,2	0,20	0,485	0,0030
28	2,2E-01	7,6E+05	7	34,7	0,006	604,0	0,09	0,52	0,0	17,9	0,013	1308,6	0,19	0,49	0,0028

**Tabla 85** Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en el tanque T-110A

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Control room ubicado a: 83 m						Shelter de generación ubicado a: 43 m					
				Distancia	Sobre	Pico sobre	Sobre	Duración	Duración	Distancia	Sobre	Pico sobre	Sobre	Duración	Duración
				escalada	presión escalada	presión Ps (Pa)	presión Ps (psi)	escalada	en (seg)	escalada	presión escalada	presión Ps (Pa)	presión Ps (psi)	escalada	en (seg)
0	0,0E+00	0,0E+00													
1	1,3E+00	4,7E+06	7	18,9	0,012	1207,9	0,18	0,495	0,0	9,7	0,025	2516,5	0,36	0,47	0,0049
2	1,4E+00	4,9E+06	7	18,7	0,013	1308,6	0,19	0,49	0,0	9,6	0,0245	2466,1	0,36	0,46	0,0049
3	1,5E-01	5,1E+05	7	39,6	0,0055	553,6	0,08	0,53	0,0	20,4	0,011	1107,2	0,16	0,5	0,0025
4	1,4E-01	5,0E+05	7	39,7	0,0058	583,8	0,08	0,535	0,0	20,4	0,011	1107,2	0,16	0,5	0,0025
5	1,2E+00	4,1E+06	7	19,8	0,012	1207,9	0,18	0,5	0,0	10,2	0,02	2013,2	0,29	0,47	0,0047
6	1,6E+00	5,8E+06	7	17,6	0,014	1409,2	0,20	0,48	0,0	9,1	0,025	2516,5	0,36	0,465	0,0052
7	1,5E-01	5,1E+05	7	39,5	0,0052	523,4	0,08	0,52	0,0	20,3	0,0105	1056,9	0,15	0,5	0,0025
8	1,3E-01	4,5E+05	7	41,3	0,005	503,3	0,07	0,525	0,0	21,3	0,01	1006,6	0,15	0,505	0,0024
9	1,4E-02	4,8E+04	3	87,3		0,0	0,00	2	0,0	44,9		0,0	0,00	2	0,0045
10	1,4E-02	4,8E+04	3	87,3		0,0	0,00	2	0,0	44,9		0,0	0,00	2	0,0045
11	1,4E-02	4,8E+04	3	87,3		0,0	0,00	2	0,0	44,9		0,0	0,00	2	0,0045
12	2,7E-02	9,5E+04	3	69,3		0,0	0,00	2	0,0	35,6	0,001	100,7	0,01	2	0,0057
13	1,4E-02	4,8E+04	3	87,3		0,0	0,00	2	0,0	44,9		0,0	0,00	2	0,0045
14	1,4E-02	4,8E+04	3	87,3		0,0	0,00	2	0,0	44,9		0,0	0,00	2	0,0045
15	1,1E-02	3,8E+04	3	94,0		0,0	0,00	2	0,0	48,4		0,0	0,00	2	0,0042
16	1,4E-02	4,8E+04	3	87,3		0,0	0,00	2	0,0	44,9		0,0	0,00	2	0,0045
17	1,4E-02	4,8E+04	3	87,3		0,0	0,00	2	0,0	44,9		0,0	0,00	2	0,0045

**Tabla 86** Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en el tanque T-110B

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Control room ubicado a: 68 m						Shelter de generación ubicado a: 68 m					
				Distancia	Sobre	Pico sobre	Sobre	Duración	Duración en	Distancia	Sobre	Pico sobre	Sobre	Duración	Duración
				escalada	presión escalada	presión Ps (Pa)	presión Ps (psi)	escalada	(seg)	escalada	presión escalada	presión Ps (Pa)	presión Ps (psi)	escalada	en (seg)
0	0,0E+00	0,0E+00													
1	1,2E+00	4,3E+06	7	19,4	0,012	1207,9	0,18	0,5	0,0	10,0	0,022	2214,5	0,32	0,47	0,0048
2	1,3E+00	4,5E+06	7	19,1	0,0125	1258,2	0,18	0,5	0,0	9,8	0,025	2516,5	0,36	0,465	0,0048
3	1,3E-01	4,7E+05	7	40,8	0,005	503,3	0,07	0,515	0,0	21,0	0,01	1006,6	0,15	0,505	0,0024
4	1,3E-03	4,6E+03	3	190,3		0,0	0,00	2	0,0	97,9		0,0	0,00	2	0,0021
5	1,2E+00	4,2E+06	7	19,6	0,012	1207,9	0,18	0,505	0,0	10,1	0,0205	2063,5	0,30	0,48	0,0048
6	1,5E+00	5,4E+06	7	18,1	0,013	1308,6	0,19	0,5	0,0	9,3	0,02505	2521,5	0,37	0,47	0,0051
7	1,4E-01	4,8E+05	7	40,5	0,005	503,3	0,07	0,55	0,0	20,9	0,01	1006,6	0,15	0,505	0,0025
8	1,3E-02	4,6E+04	3	88,3		0,0	0,00	2	0,0	45,5		0,0	0,00	2	0,0045
9	1,1E-02	3,7E+04	3	95,1		0,0	0,00	2	0,0	49,0		0,0	0,00	2	0,0042
10	1,3E-01	4,7E+05	7	40,7	0,005	503,3	0,07	0,55	0,0	20,9	0,01	1006,6	0,15	0,505	0,0025
11	1,3E-02	4,6E+04	3	88,3		0,0	0,00	2	0,0	45,5		0,0	0,00	2	0,0045
12	1,3E-02	4,6E+04	3	88,3		0,0	0,00	2	0,0	45,5		0,0	0,00	2	0,0045
13	1,7E-01	6,0E+05	7	37,4	0,0058	583,8	0,08	0,51	0,0	19,3	0,013	1308,6	0,19	0,495	0,0026
14	2,6E-02	9,2E+04	3	70,1		0,0	0,00	2	0,0	36,1	0,001	100,7	0,01	2	0,0056
15	1,3E-02	4,6E+04	3	88,3		0,0	0,00	2	0,0	45,5		0,0	0,00	2	0,0045
16	1,2E-01	4,1E+05	7	42,4	0,0049	493,2	0,07	0,52	0,0	21,8	0,0095	956,3	0,14	0,505	0,0024

**Tabla 87** Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en la bota V-124

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Control room ubicado a: 70 m					Shelter de generación ubicado a: 47 m						
				Distancia escalada	Sobre presión escalada	Pico sobre presión Ps (Pa)	Sobre presión Ps (psi)	Duración escalada	Duración en (seg)	Distancia escalada	Sobre presión escalada	Pico sobre presión Ps (Pa)	Sobre presión Ps (psi)	Duración escalada	Duración en (seg)
0	0,0E+00	0,0E+00													
1	3,4E+00	1,2E+07	7	13,8	0,017	1711,2	0,25	0,49	0,0	7,1	0,035	3523,0	0,51	0,43	0,0062
2	3,2E+00	1,1E+07	7	14,1	0,016	1610,5	0,23	0,48	0,0	7,2	0,035	3523,0	0,51	0,43	0,0060
3	2,5E-02	8,8E+04	3	71,0		0,0	0,00	2	0,0	36,6	0,001	100,7	0,01	2	0,0056
4	3,4E-01	1,2E+06	7	29,8	0,007	704,6	0,10	0,505	0,0	15,3	0,017	1711,2	0,25	0,48	0,0032
8	3,3E+00	1,2E+07	7	14,0	0,016	1610,5	0,23	0,48	0,0	7,2	0,035	3523,0	0,51	0,43	0,0061
9	1,3E+00	4,6E+06	7	19,0	0,012	1207,9	0,18	0,495	0,0	9,8	0,023	2315,1	0,34	0,46	0,0048

**Tabla 88** Pico de sobre presión máxima que soportarían el control room y el shelter de generación, en caso de una explosión en la bota V-125

# Escape	V (m <sup>3</sup> )	Energía Total (J)	Intensidad del estallido	Control room ubicado a: 69 m					Shelter de generación ubicado a: 25 m						
				Distancia escalada	Sobre presión escalada	Pico sobre presión Ps (Pa)	Sobre presión Ps (psi)	Duración escalada	Duración en (seg)	Distancia escalada	Sobre presión escalada	Pico sobre presión Ps (Pa)	Sobre presión Ps (psi)	Duración escalada	Duración en (seg)
				0	0,0E+00	0,0E+00									
1	3,5E+00	1,2E+07	7	13,8	0,017	1711,2	0,25	0,49	0,0	7,1	0,035	3523,0	0,51	0,43	0,0062
2	3,3E+00	1,1E+07	7	14,1	0,016	1610,5	0,23	0,48	0,0	7,2	0,035	3523,0	0,51	0,43	0,0060
3	2,5E-02	8,9E+04	3	71,0		0,0	0,00	2	0,0	36,5	0,001	100,7	0,01	2	0,0056
4	3,4E-01	1,2E+06	7	29,7	0,007	704,6	0,10	0,505	0,0	15,3	0,017	1711,2	0,25	0,48	0,0032
8	3,3E+00	1,2E+07	7	13,9	0,016	1610,5	0,23	0,475	0,0	7,2	0,035	3523,0	0,51	0,43	0,0061
9	1,3E+00	4,7E+06	7	18,9	0,012	1207,9	0,18	0,49	0,0	9,7	0,023	2315,1	0,34	0,46	0,0048

## REFERENCIAS

- 1 API, *Recommended Practice for Design and Installation of Electrical Systems for Fixed and Floating Offshore Petroleum Facilities for Unclassified and Class I, Division 1 and Division 2 Locations*. API 14F. Cuarta Edición. Washington, D.C.: API (1999).
- 2 API, *Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class 1, Division 1 and Division 2*. API RP 500. Segunda Edición. Washington, D.C.: API (1997).
- 3 API, *Recommended Practice for Management of Hazards Associated With Location of Process Plant Buildings*. API RP 752. Primera Edición. Washington, D.C.: API (1985)
- 4 API, *Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2*. API RP 505. Primera Edición. Washington, D.C.: API (1997).
- 5 Bjerketvedt, D., Bakke, J.R. & Van Wingerden, K. (1997). *Gas Explosion Handbook*. Noruega: GSP 90-92.
- 6 Casal J., Montiel, H., Planas, E., & Vílchez, J. (1999). *Análisis de riesgo en instalaciones industriales*. Primera Edición. Barcelona: UPC.
- 7 Casal, J. *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants, Industrial Safety Series (Volumen 8)*. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/53399610/Evaluation-of-the-Effects-and-Consequences-of-Major-Accidents-in-Industrial-Plants>
- 8 Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions and Fires*. (1996)
- 9 Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions and Fires*. Segunda Edición. New York N.Y. (2012)
- 10 Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. Segunda Edición. New York N.Y. (2000)
- 11 Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*. New York N.Y. (1994)
- 12 Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Determining the Probability of Ignition of a Released Flammable Mass*. New York N.Y. (2014)
- 13 Cheremisinoff, N. (2001). *Practical Guide to Industrial Safety, Methods for Process Safety Professionals*. New York: Marcel Dekker Inc.

- 14 Cortés, J.M. (2007). *Seguridad e Higiene en el Trabajo, Técnicas de Prevención de Riesgos Laborales*. Novena Edición. Madrid: Tébar S.L.
- 15 Crowl D.A., & Louvar, J.F. (2002). *Chemical Process Safety Fundamental with Applications*. Segunda Edición. New Jersey: Prentice Hall.
- 16 Crowl D.A., & Louvar, J.F. (2011). *Chemical Process Safety Fundamental with Applications*. Tercera Edición. Boston: Prentice Hall.
- 17 Det Norske Veritas (2006). *Technical Note T14 Process Equipment Failure Frequencies* Revisión 3. DNV.
- 18 Crowl, D.A. (2003). *Understanding Explosions*. New York: AICHE.
- 19 Escuer F., & García, J. (2005). *Manual práctico Clasificación de zonas en atmósferas explosivas*. Edición Febrero de 2005. Barcelona: CETIB.
- 20 Franks A., & Hughes, G. (2000). *A comparison of accident experience with Quantitative Risk assessment (QRA) methodology*. Norwich: DNV Ltd. (HSE).
- 21 Guía Técnica Para La Evaluación y Prevención de los Riesgos Derivados de Atmósferas Explosivas en el Lugar de Trabajo, (Real Decreto 681/2003), INSHT.
- 22 INEN, *Código Eléctrico Nacional*. CPE INEN 19:2001. Primera Edición. Quito: INEN (2001).
- 23 Kletz, T. (1999). *Hazop and Hazan, Identifying and assessing process industry hazards*. Cuarta Edición. Warwickshire: IChem<sup>E</sup>.
- 24 Kletz, T. (1999). *What went wrong?, Case Histories of Process Plant Disasters*. Cuarta Edición. Houston: GPP
- 25 Kletz, T. (2001). *Learning from accidents*. Tercera Edición. Woburn: GPP.
- 26 Kletz, T. (2009). *What went wrong?, Case Histories of Process Plant Disasters*. Quinta Edición. Oxford: GPP
- 27 MAPFRE, (1996). *Distribución de los accidentes por décadas. Grandes incendios y explosiones con víctimas en el siglo XX*, 63, 47.
- 28 MAPFRE, (2011). *Manual de Seguridad en el Trabajo*. Segunda Edición. Madrid: MAPFRE.
- 29 McMillan, Alan (1998). *Electrical Installations in Hazardous Areas*. Primera Edición. Oxford: Elsevier Science Ltd.
- 30 NFPA, *National Electrical Code*. NFPA 70. Edición 2008. Quincy: NFPA (2007).
- 31 Nolan D. (1996). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities*. New Jersey: Noyes Publications.
- 32 Pérez, Carlos (2005). *Clasificación de emplazamientos peligrosos para atmósferas explosivas de gases y polvos combustibles* (Tesis de Maestría). Recuperada de <http://hdl.handle.net/2099.1/3142>.
- 33 RASE Project (2000). *Explosive Atmosphere: Risk Assessment of Unit Operations and Equipment*. Hamm: INBUREX GmbH.
- 34 Rubio, J.M. (2004). *Métodos de Evaluación de Riesgos Laborales*. Madrid: Ediciones Díaz Santos S.A.
- 35 Storch, J.M. (1998). *Manual de Seguridad Industrial en Plantas Químicas y Petroleras (Volumen I)*. Primera Edición. Madrid: McGRAW-HILL.
- 36 Storch, J.M. (1998). *Manual de Seguridad Industrial en Plantas Químicas y Petroleras (Volumen II)*. Primera Edición. Madrid: McGRAW-HILL.
- 37 UNE, *Atmósferas explosivas, Parte 10-1: Clasificación de emplazamientos, Atmósferas explosivas gaseosas*. UNE-EN 60079-10-1. Madrid: AENOR (2010).
- 38 UNE, *Guía de aplicación de la norma UNE-EN 60079-10, Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas, Clasificación de emplazamientos peligrosos*. UNE 202007 IN. Madrid: AENOR (2006).