

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

**FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO, GAS NATURAL Y
PETROQUÍMICA**



**“ESTIMACIÓN DE LA DISTANCIA DE SEGURIDAD BASADO EN LA
DISPERSIÓN DE VAPORES COMO CONSECUENCIA DE UN DERRAME
EN TIERRA DESDE TANQUES QUE ALMACENAN GNL, CON APLICACIÓN
DE UN SIMULADOR COMERCIAL”**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO PETROQUÍMICO

PRESENTADO POR:

JESSICA NELLY GÓMEZ POCOMUCHA

PROMOCIÓN 2002-0

LIMA - PERÚ

2006

INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
CAPITULO I	2
ASPECTOS GENERALES	2
1.1 DEFINICIONES	2
1.2 COMPONENTES DEL GAS NATURAL	6
1.3 PROPIEDADES DE GNL Y RIESGOS POTENCIALES	6
CAPITULO II	15
2.1 DISPERSIÓN DE GASES	15
2.1.1 DISPERSIÓN GAUSSIANA	17
2.1.2 DISPERSIÓN DE GASES DENSOS	22
2.2 APLICACIÓN DEL MODELO DEGADIS	49
2.2.1 DESCRIPCIÓN METEREOLÓGICA	50
2.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA LIBERACIÓN	51
CAPITULO III	55
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE GNL	56
3.2 COMPONENTES DEL ÁREA DE ALMACENAMIENTO DE GNL	57
3.3 COMPORTAMIENTO DE UN DERRAME DE GNL	60
3.4 INFORMACIÓN DE CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA ZONA	64
CAPITULO IV	66
4.1 ESCENARIOS A SIMULAR	67
• CORRIDA DE ESCENARIO 1	68
• CORRIDA DE ESCENARIO 2	75
• CORRIDA DE ESCENARIO 3	84
CAPITULO V	
5.1 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PLANTEADOS	94
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	97
GLOSARIO	98
ANEXO I	
PROGRAMA DEGADIS	99

INTRODUCCIÓN

El interés reciente en construir nuevas instalaciones de GNL en nuestro país, o de la probabilidad de expandirlas a un futuro, para el procesamiento y el almacenamiento de Gas Natural Licuado (GNL), genera e incrementa preocupación por las posibles consecuencias potenciales de incidentes involucrados con operaciones de transporte de GNL. Por ejemplo, el tamaño y extensión de un fuego posible o la distancia que una nube de vapor podría extenderse son los factores más importantes en estimar para la aceptabilidad de una nueva instalación.

Más allá de cualquier consideración rutinaria sobre los riesgos industriales, el GNL presenta consideraciones de seguridad específicas. En el caso de que ocurriera un derrame accidental de GNL, la zona de seguridad que rodea la instalación debe proteger a la población vecina de daños personales y daños a la propiedad. Las distancias de seguridad o zonas restringidas se basan en los datos de dispersión de vapores y en los contornos de la radiación térmica.

En las últimas décadas, la modelación se ha convertido en una herramienta común de diversas disciplinas que busca explicar o reproducir sucesos diferentes.

Al respecto, el presente trabajo estudia la influencia que tiene la dispersión de vapores de un derrame de GNL en el terreno, desde los contenedores que almacenan este líquido criogénico, en la distancia de seguridad, que será modelado a través del DEGADIS (dispersión de gas denso), software recomendado por NFPA 59A y que viene siendo aplicado por la industria del GNL.

ESTIMACIÓN DE LA DISTANCIA DE SEGURIDAD BASADO EN LA DISPERSIÓN DE VAPORES COMO CONSECUENCIA DE UN DERRAME EN TIERRA DESDE TANQUES QUE ALMACENAN GNL, CON APLICACIÓN DE UN SIMULADOR COMERCIAL

CAPITULO I

Aspectos generales

La seguridad y confiabilidad en el diseño de las instalaciones de Gas Natural Licuado y otras instalaciones industriales se apoyan en la aplicación de diversos códigos de práctica, códigos de diseño y estándares. Estos representan la acumulación de conocimiento y experiencia de individuos expertos y de la industria como un todo. Tales aplicaciones, están respaldadas por la experiencia de los ingenieros involucrados, quienes hubieron previamente trabajado en el diseño, construcción y operación de plantas similares.

Todas las instalaciones industriales que procesan, manipulan o transportan fluidos peligrosos están expuestas a sufrir incidentes de diversa gravedad y, a pesar de las técnicas empleadas y las medidas adoptadas en la prevención de estos accidentes, no es posible reducir a cero el riesgo de que sucedan. Siempre existirá alguna probabilidad finita de que ocurra un fallo con consecuencias potencialmente graves para las personas.

En el caso particular de los fluidos peligrosos, ya sean emisiones gaseosas o de vapores producidos por derrame de líquidos volátiles es importante establecer el contorno de la nube formada, a fin de delimitar las zonas donde la concentración de este fluido pone en riesgo la integridad de las personas.

1.1 Definiciones

Antes de continuar con el desarrollo, es importante definir algunos conceptos que se aplicarán en el presente trabajo:

1.1.1. Peligro:

Es la propiedad inherente de un agente químico, biológico o físico en una serie de condiciones.

1.1.2. Riesgo:

Medida de la probabilidad y magnitud de efectos adversos, incluyendo heridas, enfermedades o pérdidas económicas.

1.1.3. Proceso:

Conjunto de las fases sucesivas de un fenómeno natural o artificial.

1.1.4. Fenómeno

Toda apariencia o manifestación, tanto del orden material o espiritual.

1.1.5. Presión crítica

La presión de vapor de una sustancia a su temperatura crítica.

1.1.6. Temperatura crítica

Para un componente puro, la máxima temperatura a la cual el componente puede existir como líquido.

1.1.7. Punto flash

La temperatura más baja a la cual los vapores de un hidrocarburo líquido ignitará. Ver ASTM D-56.

1.1.8. Procesamiento de Gas

Separación de componentes del gas natural con el propósito de disponer de productos y también para tratar los residuos de gas que reúnan las especificaciones requeridas.

1.1.9. Planta de procesamiento de gas

Una planta con la cual se procesa gas natural para recuperar líquidos de gas natural y alguna otra sustancia como azufre.

1.1.10. Planta criogénica

Una planta de procesamiento la cual es capaz de producir productos de los líquidos de gas natural, incluyendo etano, a temperaturas muy bajas de operación, usualmente debajo de $-50\text{ }^{\circ}\text{F}$.

1.1.11. Calor de Combustión

La cantidad de calor obtenido por la combustión completa de una cantidad de material.

El valor del calor bruto, es la cantidad máxima de calor obtenido cuando el agua producida en la combustión es condensada.

El valor del calor neto, es la cantidad mínima de calor obtenido cuando el agua producida en la combustión no es condensada.

1.1.12. Gas Natural

Forma gaseosa del petróleo. Consiste predominantemente de mezcla de hidrocarburos gaseosos. El componente más común es metano.

1.1.13. Líquidos del Gas Natural (LGN)

Los líquidos del Gas Natural son esos hidrocarburos licuados en la superficie de las instalaciones del campo o en plantas de procesamientos de gas. Los líquidos del Gas Natural incluyen etano, propano, butano, y gasolina natural.

En ingles las siglas son NGL.

1.1.14. Gas Natural Licuado o Licuefactado (GNL)

Fluido en estado líquido criogénico que esta compuesto predominantemente de metano que puede contener menor cantidad de etano, propano o nitrógeno.

En ingles las siglas son LNG.

1.1.15. Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Predominantemente propano o butano, separado o mezclado, el cual es mantenido en estado líquido bajo presión y confinado en un recipiente.

En ingles las siglas son LPG.

1.1.16. Gasolina Natural

Mezcla de hidrocarburos, mayormente pentano y más pesados, extraído del gas natural, el cual tiene presión de vapor, punto final, y otras especificaciones para la gasolina natural adoptadas por la GPA. ¹

1.1.17. Fluido peligroso

Un líquido o gas que es inflamable, tóxico o corrosivo.

1.1.18. Área de contención

Un área definida a través del uso de diques o sitio topográfico con el propósito de contener algún derrame accidental de GNL o refrigerantes inflamables.

1.1.19. Dique

Una estructura usada para establecer un área de contención o contenimiento.

¹ Gas Processors Association (Asociación de Procesadores de Gas)

1.1.20. Modelo

Una caracterización matemática propuesta para predecir un fenómeno físico.

1.1.21. Container

Un recipiente para almacenar GNL

1.1.22. Planta de GNL

Una instalación cuyos componentes pueden ser usados para almacenar, condicionar, licuar, o vaporizar el gas natural.

1.1.23. Componentes

Una parte o sistema de partes que funcionan como una unidad en una planta de GNL y puede incluir, pero no es limitado, tuberías, equipos de procesamiento, containers, accesorios de control, sistemas de contención, sistemas eléctricos, accesorios de seguridad, equipos de control contra incendio, y equipos de comunicación.

1.1.24. Área de transferencia

Porción de un planta de GNL conteniendo un sistema de tuberías donde el GNL, líquidos inflamables, o refrigerantes inflamables son introducidos o removidos desde la planta o donde las conexiones de tuberías son conectadas o desconectadas rutinariamente.

1.1.25. Material incombustible

Un material que, en la forma en que es usado y bajo condiciones anticipadas, no se ignitará, quemará, soportará combustión, o liberará vapores inflamables cuando esta sujeto a fuego o calor.

1.1.26. Líquido criogénico

Un gas líquido refrigerado que tiene un punto de ebullición debajo de -130°F (-90°C) a la presión atmosférica.

1.1.27. Emisiones fugitivas

Liberación de vapor inflamable que ocurre continuamente o intermitente de los equipos de procesos durante operaciones normales. Estos incluyen fugas desde el sello de las bombas, empaquetaduras de válvulas, junta de las bridas, sellos de compresores, drenajes de procesos, etc.

1.1.28. Presión de diseño

La presión usada en el diseño de equipo, un recipiente o un recipiente de presión para el propósito de determinar el mínimo espesor permitible o características físicas de sus partes.

1.1.29. Evaporación

Es el paso de una sustancia desde el estado líquido al gaseoso. Este cambio de estado ocurre normalmente a la temperatura ambiente, y sin necesidad de aplicar calor. Bajo esas condiciones, sólo las partículas de la superficie del líquido pasarán al estado gaseoso, mientras que aquellas que están más abajo seguirán en el estado inicial.

1.2 Componentes del Gas Natural

Con el fin de considerar si el Gas Natural representa o no un riesgo, debemos comprender sus propiedades y las condiciones que deben existir para evitar o reducir la ocurrencia de daños específicos.

La composición del gas incluye diferentes hidrocarburos gaseosos con predominio del metano. El resto es fundamentalmente etano, con proporciones menores de propano, butano y nitrógeno.

1.2.1 Metano (CH₄)

Se trata de un componente no corrosivo, por lo que los cuidados en la selección de los materiales a emplear en su manejo y almacenamiento deberán contemplar básicamente las condiciones de presión y temperatura a la que será manipulado. Las condiciones más severas en su manejo se encuentran cuando el gas está licuado, dadas las condiciones de presión y temperatura necesarias.

1.3 Propiedades de GNL y Riesgos Potenciales

1.3.1 Propiedades de GNL

El proceso de licuefacción de gas natural requiere de un tratamiento previo para remover sus impurezas como el agua, nitrógeno, anhídrido carbónico, sulfhídrico y otros compuestos de azufre. Al remover dichas impurezas, se evita la formación de sólidos cuando se refrigera el gas.

El gas natural previamente tratado se licua a una temperatura de aproximadamente - 256°F (-160°C) y queda listo para ser almacenado en los containers y luego ser transportados.

El GNL solo ocupa 1/600 parte del volumen que se requiere para una cantidad comparable de gas natural a temperatura ambiente y presión atmosférica normal. Dado que el GNL es un líquido extremadamente frío resultado de la refrigeración, no se almacena bajo presión, sino a presión atmosférica. La percepción equivocada que se tiene es que el GNL es una sustancia bajo presión, y esto ha contribuido a la creencia de que es una sustancia peligrosa.

Bajo condiciones de presión atmosférica normal y temperatura -163°C, el GNL es *un líquido criogénico claro, no corrosivo y no tóxico*. Es inodoro, de hecho para poder detectar derrames de gas natural provenientes de los calentadores de agua y otros equipos de gas natural, se le deben añadir odorizantes al metano (GNL) antes de que sea entregado a los distribuidores de gas.

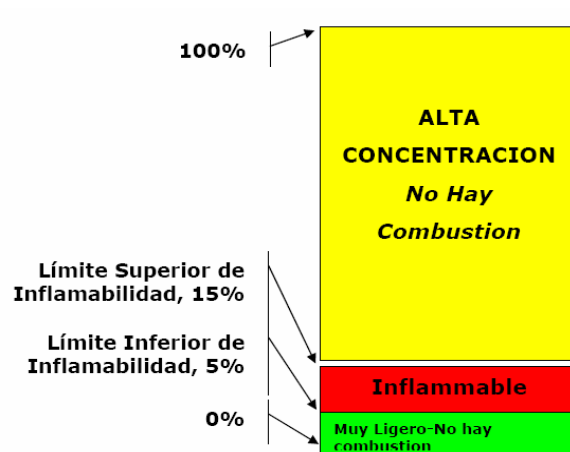
- **El gas natural (metano) no es tóxico**, sin embargo, al igual que cualquier otro material gaseoso que no sea el aire o el oxígeno, los vapores del GNL pueden causar asfixia debido a la falta de oxígeno cuando se extiende en forma concentrada en áreas cerradas y sin ventilación.
- La **densidad** de GNL es de aproximadamente 3.9 libras por galón, comparado con la densidad del agua, que es de aproximadamente 8.3 libras por galón. Por tanto, debido a que es más liviano que el agua, al derramarse sobre el agua, éste flota y se vaporiza rápidamente.

De no manejarse adecuadamente conforme a los sistemas de seguridad, al regresar a su fase de gas, los vapores emitidos por el GNL pueden ser inflamables y explosivos. Sin embargo, las medidas de seguridad y protección previstas en los diseños de ingeniería, las tecnologías y los procedimientos operativos de las instalaciones de GNL reducen significativamente estos riesgos.

- El **nivel de inflamabilidad** es el rango entre las concentraciones mínimas y máximas de vapor (porcentaje por volumen) en el cual el aire y los vapores de GNL forman una mezcla inflamable que puede alcanzar el punto de ignición.

La Figura 1.1, muestra que los *límites superiores e inferiores de inflamabilidad* del metano, el componente dominante del vapor de GNL, esta entre el 5 y 15 por ciento por volumen respectivamente. Cuando la concentración del fluido excede su límite superior de inflamabilidad (UFL: Upper Flammability Limit), no podrá quemarse debido a que no hay suficiente oxígeno. Esta condición puede existir, por ejemplo, en un tanque de almacenamiento cerrado y seguro en donde la concentración del vapor contiene aproximadamente 100 por ciento de metano. Cuando la concentración del fluido es menor que el límite inferior de inflamabilidad (LFL: Lower Flammability Limit), no podrá quemarse debido a que no hay suficiente metano. Un ejemplo es el derrame de pequeñas cantidades de GNL en un área bien ventilada. En esta situación, el vapor de GNL se mezcla rápidamente con el aire y se disipa en una concentración menor al 5 por ciento.

FIGURA 1.1: RANGO DE INFLAMABILIDAD DEL METANO



Una comparación de las propiedades de GNL con otros combustibles líquidos como lo muestra la Tabla 1, también indica que el Límite Inferior de Inflamabilidad de GNL es generalmente más alto que el de otros líquidos, o sea que para que hubiera ignición se necesitarían más vapores de GNL (en un área específica), comparado con el GLP o la gasolina.

Tabla 1.1. Comparación de las Propiedades de los Combustibles Líquidos

Propiedades	GNL	Gas Licuado del Petróleo (GLP)	Gasolina	"fuel oil"
Tóxico	No	No	Si	Si
Carcinógeno	No	No	Si	Si
Vapor Inflamable	Si	Si	Si	Si
Forma Nubes de Vapor	Si	Si	Si	No
Asfixia	Si, pero dentro de una nube de vapor	Igual que el GNL	Si	Si
Temperatura Extremadamente Fría	Si	Si, cuando se refrigera	No	No
Otros Riesgos a la Salud	Ninguno	Ninguno	Irritación a los ojos, narcosis, nausea, otros	Igual que la gasolina
Punto de Destello ⁴ (°F)	-306	-156	-50	140
Punto de Ebullición (°F)	-256	-44	90	400
Rango de Inflamabilidad en el aire, %	5-15	2.1-9.5	1.3-6	N/A
Presión almacenada	Atmosférica	Bajo presión (atmosférica si se refrigera)	Atmosférica	Atmosférica
Comportamiento en casos de derrame	Se evapora formando "nubes" visibles. Partes de las nubes pueden ser inflamables o explosivas bajo ciertas condiciones.	Se evapora formando nubes de vapor que pueden ser inflamables o explosivas bajo ciertas condiciones.	Se evapora formando charcos inflamables; tendrá que limpiarse.	Igual que la gasolina.

Fuente: Se basa en: Lewis, William W., James P. Lewis y Patricia Outtrim, PTL, "LNG Facilities – The Real Risk," American Institute of Chemical Engineers, New Orleans, April 2003, modificado por fuentes de la industria.

El gas metano alcanza el punto de ignición únicamente cuando la proporción o mezcla del vapor de gas en el aire queda dentro del rango limitado de inflamabilidad.

Un riesgo frecuentemente esperado es la ignición a causa de flamas o chispas y por tanto, las instalaciones de GNL se diseñan y operan bajo normas y procedimientos que reduce este riesgo y de llegar a existir flamas o chispas, cuentan con suficientes sistemas de detección y protección contra incendios.

- **La temperatura de auto ignición** es la temperatura más baja en la que el vapor de gas inflamable puede arder de forma espontánea sin necesidad de una fuente de ignición después de varios minutos de exposición a una fuente de calor. Una temperatura mayor a la temperatura de auto ignición causará la ignición después de

un período de exposición menor. Con respecto a las temperaturas muy altas dentro del rango de inflamabilidad, la ignición puede ser virtualmente instantánea.

La temperatura de auto ignición queda por arriba de los 1000°F (540°C). Esta temperatura extremadamente alta requiere una fuente importante de radiación térmica, calor o una superficie caliente. Si un derrame de GNL en tierra o agua que produzca vapores inflamables no encuentra una fuente de ignición (flama, chispa o fuente de calor de por lo menos 1000°F [540°C]), entonces el vapor generalmente se dispersará en la atmósfera y no ocurrirá un incendio.

Cuando se compara con otros combustibles líquidos, el vapor de GNL (el metano) necesita una temperatura muy alta para que ocurra la auto ignición, como lo muestra la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Temperatura de Auto Ignición de Combustibles Líquidos

Combustible	Temperatura de Auto Ignición, °C (°F)
GNL (principalmente metano)	540 (1004)
GLP	454.4-510 (850-950)
Etanol	422.7 (793)
Metanol	463.9 (867)
Gasolina	257.2 (495)
Combustible Diesel	315.6 (Aprox. 600)

Fuente: New York Energy Planning Board, Report on Issues Regarding the Existing New York Liquefied Natural Gas Moratorium, November 1998

Las inquietudes relacionadas con la seguridad de GNL frecuentemente muestran la confusión que existe entre el GNL y otros combustibles y materiales.

El GNL presenta pocos peligros siempre que se contenga en tanques de almacenamiento, ductos y equipos diseñados para soportar la condición criogénica de GNL.

1.3.2 Tipos de Riesgos Asociados con el GNL

Los riesgos potenciales que más preocupan a los operadores de instalaciones de GNL y a las comunidades vecinas surgen de las propiedades básicas del gas natural.

La contención primaria, la contención secundaria, los sistemas de seguridad y la distancia de separación proporcionan múltiples capas de protección. Estas medidas ofrecen protección contra los peligros asociados con el GNL.

1.3.2.1. Explosión. Puede ocurrir una explosión cuando una sustancia cambia de estado químico rápidamente, es decir, cuando se prende fuego o cuando en su estado presurizado haya derrames que no se puedan controlar, y para que ocurra un derrame incontrolable debe existir una falla estructural, por ejemplo, una perforación en el contenedor o una rotura dentro del contenedor. Los tanques de GNL almacenan el líquido a temperaturas muy bajas de aproximadamente -256°F (-160°C) y por tanto, no requiere presión para mantener su condición líquida. Los sistemas sofisticados de contención no permiten que el líquido entre en contacto con fuentes de ignición. Debido a que el GNL se almacena a presión atmosférica, o sea sin presión, no podría ocurrir una explosión inmediata si se llegara a perforar el contenedor.

1.3.2.2. Líquido Congelante. De llegar a liberarse el GNL, el contacto humano directo con el líquido criogénico congelaría el punto de contacto. Por tanto, los sistemas de contención que rodean los tanques de almacenamiento de GNL son diseñados para contener hasta el 110 por ciento del contenido del tanque y para separar al tanque de otros equipos. Asimismo, antes de entrar en áreas de riesgo potencial, todo el personal de la instalación debe utilizar guantes, máscaras y demás ropa de seguridad para protegerse del líquido criogénico. Como resultado, cualquier riesgo potencial quedaría restringido dentro de los límites de la instalación y no afectaría a las comunidades vecinas.

1.3.2.3. Rollover. Cuando múltiples suministros de diferentes densidades de GNL se cargan a un tanque, inicialmente no se mezclan, por lo contrario se acomodan en capas o estratos inestables dentro del tanque. Después de un tiempo estos estratos podrían cambiar de posición espontáneamente para tratar de estabilizar el líquido en el tanque. Cuando la capa inferior de GNL se calienta como consecuencia del calentamiento normal cambia de densidad hasta hacerse más liviana que la primera capa. En ese momento ocurre el fenómeno de “rollover”. El volumen del líquido y la regasificación repentina de GNL podrían ser tan grandes como

para no poder liberarse a través de las válvulas de escape de un tanque normal. El exceso de presión podría resultar en roturas u otras fallas estructurales del tanque. Para prevenir la estratificación, los operadores que descargan un buque tanque de GNL deben medir la densidad de la carga y de ser necesario, deben ajustar los procedimientos de descarga. Los tanques de GNL cuentan con sistemas de protección en contra del “rollover”, los cuales incluyen sensores de distribución de temperatura y sistemas de bombas.

1.3.2.4. Fase de Transición Acelerada (RPT: Rapid Phase Transition por sus siglas en inglés). Debido a que el GNL es menos denso que el agua y al ser liberado sobre este, el GNL flota y se vaporiza. Si se liberan grandes volúmenes de GNL sobre el agua podría vaporizarse muy rápidamente, causando así una fase de transición acelerada. La temperatura del agua y la presencia de una sustancia que no sea el metano también podrían causar un posible RPT, lo mismo que ocurre únicamente cuando se mezcla el GNL con el agua. **Los RPT varían en intensidad, desde un pequeño “pop” hasta ráfagas importantes con potencial para dañar estructuras ligeras.**

1.3.2.5. Nubes de Vapor. Al dejar el GNL el container, dentro del cual se encuentra a temperatura controlada, este comienza a calentarse y luego retorna a su estado gaseoso.

Inicialmente, el gas es más frío y más pesado que el aire que lo rodea, y esto crea una **neblina o nube de vapor sobre el líquido liberado**. Conforme se calienta el gas, se mezcla con el aire y comienza a dispersarse. La nube de vapor prenderá fuego únicamente si se encuentra con una fuente de ignición mientras guarda su concentración dentro del rango de inflamabilidad. Los sistemas de seguridad y procedimientos operativos existen para minimizar la probabilidad de que esto no ocurra.

1.3.3 Características de la Dispersión de Gases

Una de las características principales que condiciona la evolución de un gas/vapor en la atmósfera es su densidad, distinguiéndose tres posibilidades:

- Gases ligeros.
- Gases pasivos o neutros.
- Gases pesados.

1.3.3.1 Gases ligeros.

Son aquellos cuya densidad es inferior a la del aire.

1.3.3.2 Gases Pasivos o neutros

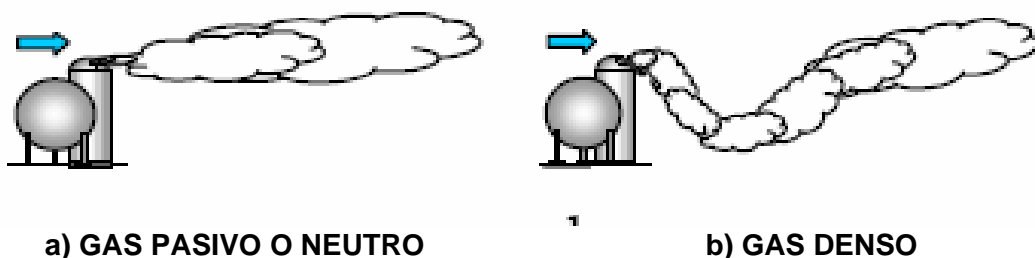
Las características de la sustancia liberada a la atmósfera (densidad, temperatura, presencia de gotas, etc.) determina el comportamiento de la nube formada. Los gases que tienen características de densidad similares a la del aire son denominados "*neutros*" y para predecir su dispersión se utiliza un *modelo gaussiano*.

En este modelo, el viento y la turbulencia atmosférica son las fuerzas que mueven las moléculas del gas a través del aire. Así, la nube es arrastrada en la dirección del viento formando una *pluma* como la esquematizada en la Fig. 1.2a. A causa del mezclado turbulento se difunde en la dirección transversal generando una curva con forma de campana para la concentración.

1.3.3.3 Gases pesados

Cuando se derrama un gas "*denso*", es decir un gas cuya densidad es mayor que el aire o un gas que se encuentra a muy baja temperatura, el comportamiento inicial difiere sustancialmente de un gas neutro. En un primer momento el gas cae debido a que es más pesado que el aire que lo rodea. La nube se desplaza en la dirección del viento, diluyéndose más adelante, donde su densidad se aproxima a la del aire, originando que se comporte como un gas neutro (Fig. 1.2.b)

FIG.1.2: DISPERSION DE GASES



Otra característica es la duración del escape, que puede dar lugar a:

Pérdidas Continuas y Discontinuas

Si el orificio por donde se produce la pérdida es relativamente pequeño o la masa contenida en el recipiente es muy grande, el tiempo de duración del derrame será grande. En estas condiciones los gases se dispersarán en la atmósfera formando una pluma que alcanzará su máxima extensión y se mantendrá durante todo el tiempo que dure el derrame. Este escenario se conoce como pérdida continua (Fig. 1.3 a).

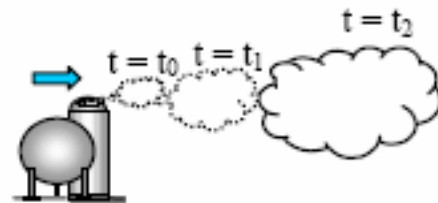
Cuando la rotura es muy grande o catastrófica o la masa contenida en el recipiente es pequeña, la liberación de prácticamente toda la masa se realiza en forma muy rápida, formándose una nube denominada "puff" (bocanada) que no este unido a la fuente del derrame y se aleja en la dirección del viento modificando su tamaño y posición a medida que el tiempo transcurre como se grafica en la Fig. 1.3 b. Este escenario es considerado como una pérdida discontinua.

FIG. 1.3: DISPERSION DE GASES

a) PERDIDA CONTINÚA



b) PERDIDA DISCONTINUA



CAPITULO II

Un derrame de GNL trae como resultado la formación de una nube de vapor que puede terminar dispersándose sobre grandes áreas. Siendo más denso que el aire, cuando es primero liberado, esta nube se mueve a lo largo de la superficie del terreno, de tal modo que representa un peligro potencial para la gente y sus propiedades (sobre las cuales pueden llegar a existir construcciones).

La vaporización y extensión del GNL de una liberación accidental sobre tierra y/o mar es materia de preocupación para la industria del GNL, el público y el cuerpo regulatorio.

Este estudio tiene como objetivo desarrollar una mejor comprensión de los mecanismos que se encuentran involucrados luego de un derrame accidental de GNL sobre la superficie del terreno. Asimismo, nos permitirá predecir la máxima distancia de exclusión con el propósito de tomar medidas preventivas para tratar tal liberación accidental de GNL, así como determinar su riesgo.

Para empezar a comprender el presente capítulo, se pasará a describir la dispersión de gases y los parámetros de afectación, para luego continuar con el desarrollo de los modelos aplicativos.

2.1 DISPERSIÓN DE GASES

Las consecuencias por la liberación de un material tóxico o inflamable se determinan a través de la dispersión de gases. Típicamente, los cálculos proveen una estimación del área afectada y el promedio de la concentración del vapor esperado. Para realizar esta determinación, se debe conocer la tasa de liberación de gas (o la cantidad total liberada) y las condiciones atmosféricas (velocidad del viento, tiempo de día, cobertura de la nube).

Parámetros de afectación de la dispersión de gases

Una amplia variedad de parámetros afectan la dispersión de gases. Estos incluyen:

1. Velocidad del viento
2. Estabilidad atmosférica
3. Características del terreno local
4. Altura de la liberación sobre el terreno
5. Geometría de la liberación, por ejemplo desde un punto, línea, u origen del área
6. Momentum de la liberación del material
7. Flotabilidad del material liberado

Mientras la **velocidad del viento** se incrementa, el material es llevado rápidamente viento abajo, pero también es diluido más rápidamente por una mayor cantidad de aire.

La estabilidad atmosférica depende de la velocidad del viento, del tiempo en el día y del ingreso de la energía solar.

Durante el día, la temperatura del aire es la máxima sobre la superficie del terreno como resultado del calentamiento del sol por radiación. En la noche, ocurre el enfriamiento de la superficie del terreno irradiado, afectando en la temperatura del aire la cual es baja a nivel de la superficie, incrementándose con la altura hasta que alcanza un máximo y decrece con mayor altura.

Las Características del terreno afectan la mezcla mecánica del aire como los flujos sobre el terreno. Así, la dispersión sobre un lago es diferente de la dispersión sobre un bosque o una ciudad de edificios altos.

La figura 2.1 muestra el efecto sobre la concentración por la propagación de los gases liberados en la dirección del viento. Mientras la liberación se va extendiendo, la concentración sobre el terreno en dirección del viento decrece debido a que la pluma resultante tiene más distancia para mezclarse con aire fresco, antes de contactarse con el terreno.

La geometría de la liberación también afecta el resultado de la consecuencia. Una liberación ideal ocurrirá en una **fuentes puntual**. Las liberaciones reales son más probables a ocurrir tanto en una **fuentes lineal** (desde un escape tipo Jet del material) como en una **fuentes superficial** (ebullición de un líquido en un depósito).

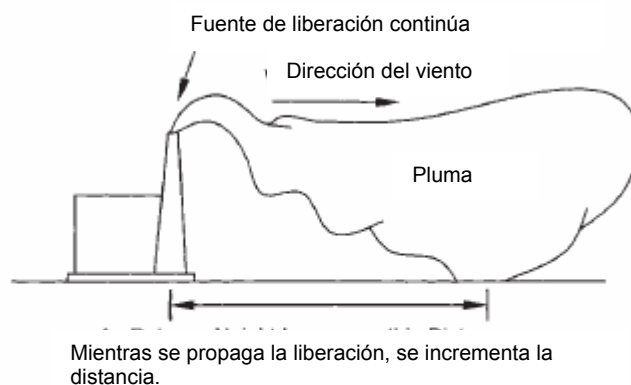


Fig. 2.1 Efecto de la concentración por la propagación de los gases liberados en la dirección del viento.

Aceleración inicial y dilución

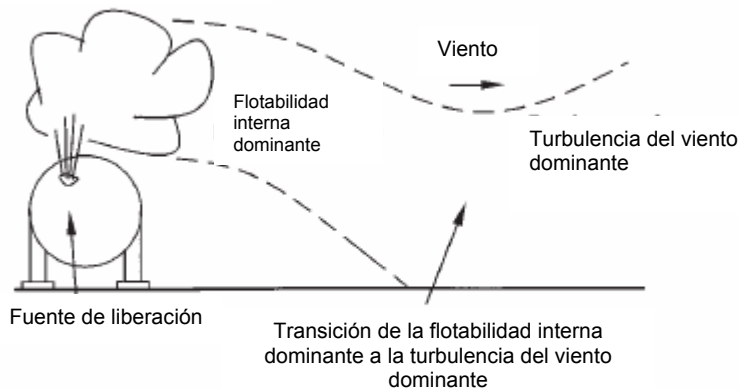


Fig. 2.2 efectos de la aceleración inicial y flotabilidad en la liberación de gases

La figura 2.2 muestra el efecto de un momento inicial y la flotabilidad de la liberación. Si el material es liberado como un jet, entonces la altura efectiva es incrementada. Posteriormente, si el material liberado es más pesado que el aire la pluma inicialmente se asienta al terreno hasta la posterior dilución por el aire resultando una nube flotante neutra.

En el esfuerzo de predecir las concentraciones de contaminantes en un punto y alejadas del foco, muchas técnicas de modelos matemáticos para estimar la calidad de aire se han desarrollado. Entre estos se incluyen:

2.1.1. Dispersión Gaussiana

La dispersión gaussiana es el método más común para estimar la dispersión por liberación de vapor. **El método solo aplica a nubes flotantes neutras y proporciona una estimación promedio de las concentraciones del vapor viento abajo.** Puesto que las concentraciones predichas son promedios en el tiempo, se debe considerar que las concentraciones locales sean mayores que su promedio; este resultado es importante cuando la dispersión estimada de materiales altamente tóxicos, donde existan concentraciones con fluctuaciones locales, tenga un impacto significativo en las consecuencias.

El modelo gaussiano (Ver Figura 2.3) fue la técnica mayoritariamente empleada para la estimación de contaminantes no reactivos. Este modelo se encuentra lejos de ser exacto ya que algunas suposiciones del mismo comprometen a la exactitud. Entre estas suposiciones se incluyen:

1. No existe variación ni en la velocidad ni en la dirección del viento entre la fuente y el receptor.

2. Todo lo vertido permanece en la atmósfera de manera que no reacciona ni se deposita en forma de lluvia o partículas. Cualquier penacho que impacta en el terreno rebota en su totalidad.
3. La dispersión no ocurre en la dirección descendente del viento. Únicamente tiene lugar en las direcciones verticales y horizontales del viento. La dispersión es estocástica y describe exactamente una distribución de Gauss.

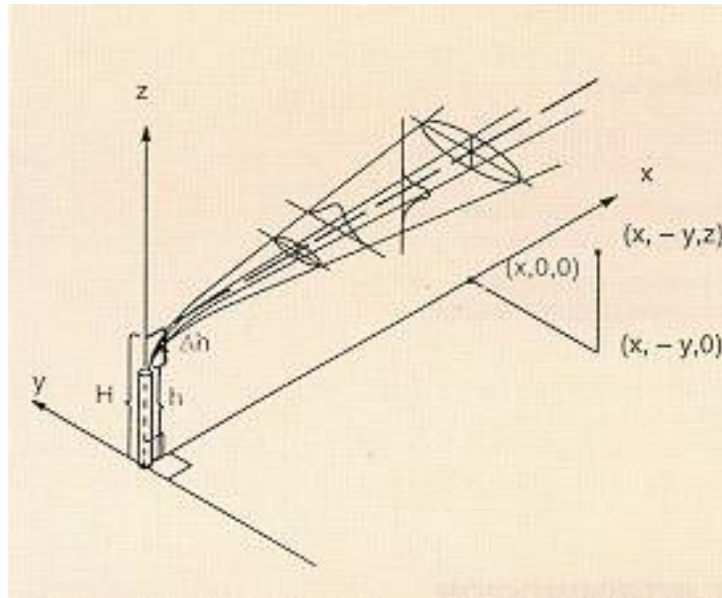


Fig. 2.3 Sistema de coordenadas y geometría básica de la ecuación gaussiana del penacho

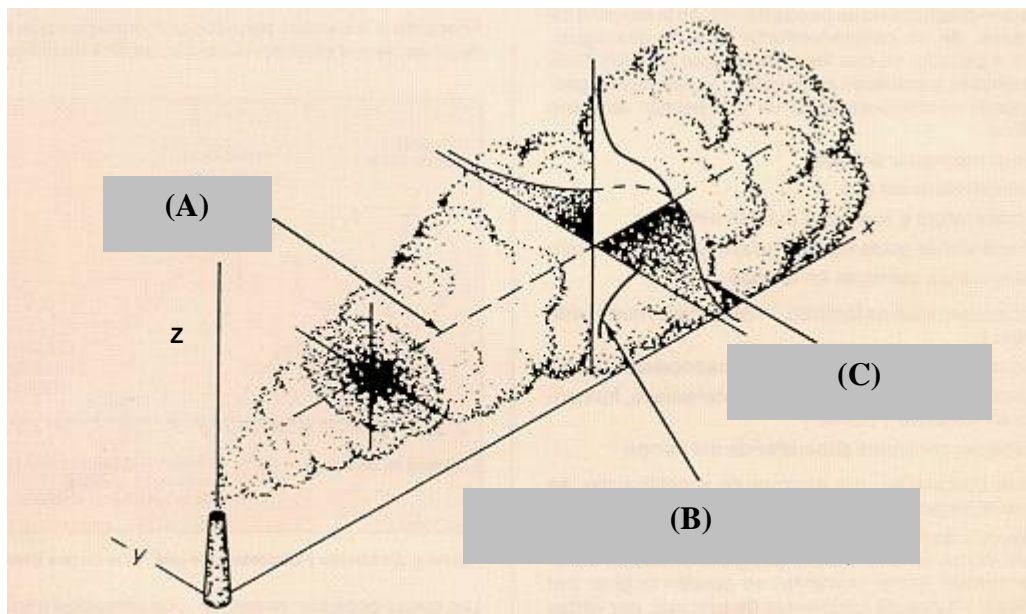


Fig 2.4: Los tres términos de la ecuación gaussiana del penacho: concentración en el eje central (A) y términos vertical (B) y lateral (C)

Aplicación del Modelo Gaussiano

Una zona de exclusión por la dispersión de vapor definida por la predicción de modelos matemáticos, debido al recorrido del vapor inflamable, es requerida para instalaciones de almacenaje de GNL nuevas o modificadas significativamente.

El método que se utilizó para predecir la distancia máxima a la concentración promedio de metano del 2.5%, viento abajo, por la liberación (especificado) del GNL, fue el modelo Gaussiano de Fuente Lineal (GLS¹).

Con el método de GLS, las mezclas de aire y metano son representadas como gas ideal, y las concentraciones máximas (línea central de la nube a nivel del terreno, ver figura 2.4(A)) son predichas como sigue:

$$C(x,0,0) = \left[\frac{E}{uL} \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \right] \exp\left(-\frac{x^2}{2\sqrt{2\pi}\sigma_y} \right) \left[\frac{RT_a}{PM_c} \right] \quad (1.1)$$

donde:

c: es la fracción del metano

x,y,z: son distancias corriente abajo(horizontal), corriente cruzado(lateral) y vertical.

E: es la tasa de evolución del vapor de GNL, Kg/s

L: es el ancho de la fuente del vapor (viento cruzado), m

u: es la velocidad del viento

σ_y : es el coeficiente de dispersión horizontal, m

σ_z : es el coeficiente de dispersión vertical, m

R: es la constante del gas ideal, 0.08205 m³ atm/kmol °K

Ta: es la temperatura ambiente, °K

P: es la presión ambiente, atm

Mc: es el peso molecular del metano, Kg/kmol

La aplicación de la ecuación (1.1) para una prescripción de la tasa de evolución del vapor (E) requiere la especificación de:

Longitud lineal de la fuente L,

Velocidad del viento u, y

Coefficientes de dispersión σ_y y σ_z .

¹ Gaussiano Lineal Source

La utilización de esta fórmula está limitada a distancias entre 100 m y 10 Km y es aplicable para cortos períodos de tiempo, hasta unos diez minutos, que es el tiempo promediado o tiempo de muestreo normalizado. Para períodos de tiempo superiores a diez minutos, la concentración viento abajo de la fuente de emisión es en cierta manera inferior, debido a la alteración de la dirección del viento.

Los modelos gaussianos fueron desarrollados para predecir los procesos de dispersión atmosférica pasiva (flotabilidad neutra), por ejemplo cuando el material liberado (presente en pequeñas concentraciones) no afecta el flujo atmosférico. Ello es referido al Gaussiano porque la distribución de la concentración a una posición dada corriente abajo es representada con el Gaussiano o la curva de probabilidad normal (Pasquill 1974). En la ecuación (1.1) los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z representan las escalas de longitud horizontal y vertical, respectivamente, para la dispersión por mezcla atmosférica turbulenta; estos coeficientes han sido determinados a través de experimentos de campos reflejando dispersión pasiva de trazas de materiales liberados dentro del flujo atmosférico.

Deficiencias del modelo Gaussiano para el uso de dispersión de vapores de GNL

La dispersión atmosférica de vapores de GNL puede involucrar tres regímenes de flujo de fluidos:

1. Flotabilidad dominante
2. Estabilidad estratificada
3. Dispersión pasiva

En el régimen de flotabilidad dominante, el asentamiento es inducido por la gravedad y por la expansión lateral resultando que la energía cinética del flujo flotante conducido sea disipada. El flujo resultante, que puede afectar el arrastre del aire y la dilución del gas, puede ser un determinante importante en la forma y extensión de la nube de gas inflamable. Mientras la energía cinética del flujo flotante conducido se disipa, el proceso de dispersión siguiente puede ser descrito como una pluma de estabilidad estratificada o nube incrustada en el flujo principal de viento (nube encajada en el flujo contrario del viento). El acompañamiento de la densidad estratificada puede ser mucho más fuerte que lo ocurrido naturalmente en el flujo de aire atmosférico, y humedece su turbulencia y reduce el arrastre del aire y la disolución del gas. La estratificación estable de la densidad decrece con el proceso de dispersión, y se aproxima a una condición que puede ser representada como una pluma de flotabilidad neutra o nube en el flujo de

viento principal (dispersión pasiva). Los tres regímenes (los cuales podrían ser representados en diferentes grados de dependencia sobre la tasa y dimensiones de la liberación y las características del flujo atmosférico) deberían ser considerados para el modelo de aplicación general del modelo de dispersión de vapor de GNL.

El modelo gaussiano no es una apropiada aplicación general para la predicción del vapor de GNL porque:

- **No es aplicable a flotabilidad dominante o régimen de dispersión de estabilidad estratificada** que podría caracterizar la liberación accidental de GNL. A través de la máxima distancia corriente abajo para concentraciones con límite inferior de inflamabilidad (LFL) asociadas con la dispersión atmosférica del vapor de GNL liberado a tasas bajas y a condiciones de viento fuerte que podrían ser adecuadamente predecido con la teoría de dispersión Gaussiana; la alta tasa de liberación de GNL, particularmente en bajas condiciones de viento, involucra la conducción por gravedad y la reducción de la mezcla vertical debido a la estratificación estable de la densidad que son determinantes importantes de la extensión del peligro corriente abajo.
- **No prevé los efectos de transferencia de calor superficie-nube.** La transferencia de calor puede ser muy importante en las fases tempranas de una liberación de GNL, desde la nube de vapor que es extremadamente fría (~-160 °C en el punto de liberación) hasta el calentamiento que resulta afectando en gran importancia su mezcla vertical.
- **No prevé los efectos de la energía para los cambios de fase asociada con la humedad en el aire.** En condiciones de alta humedad (particularmente a altas temperaturas), la condensación/congelamiento del vapor de agua en el aire puede resultar en el calentamiento de la nube con efectos importantes sobre la mezcla vertical.
- **No prevé la representación de la dispersión de vapor de GNL desde una fuente superficial.** Esta es una limitación importante debido a que las nubes de vapor de GNL siempre será formado de la ebullición de las piscinas de líquido, que solo raras veces puede ser adecuadamente representada como fuente lineal.

- **No especifica ninguna elevación para determinar la velocidad del viento o un método para asignar una velocidad de viento “efectiva” para calcular la variación de la velocidad del viento con la elevación.** Esta es una limitación importante porque a baja elevación las nubes de vapor de GNL (profundidad del orden de metros) se trasladará corriente abajo con la velocidad que es cercano a cero sobre la superficie del terreno o del agua y refleja la aceptación del perfil logarítmico del viento sobre la superficie. Esta suerte de consideración de la variación de la velocidad del viento con la elevación tiene un importante efecto sobre la predicción de la tasa de dilución así como predicciones de los tiempos de llegada de la nube.

2.1.2. Dispersión de gases densos

Un gas denso es definido como cualquier gas cuya densidad sea mayor que la densidad del aire del ambiente a través del cual se está dispersando. Este resultado puede ser debido a un gas con un peso molecular mayor que la del aire, o a un gas con una baja temperatura debido a la autorefrigeración durante la liberación, u otros procesos.

Los gases densos se comportan considerablemente diferentes de los gases neutrales flotantes. Cuando se liberan inicialmente, estos gases caen sobre la superficie del terreno y se mueven viento arriba y viento abajo. Además, los mecanismos para mezclarse con aire son totalmente diferentes de la liberación neutral flotante. (Ver figura 1.2a).

Mientras que las nubes densas se desplazan viento abajo, van diluyéndose con el aire hasta que llegan a ser eventualmente flotantes neutrales. Los modelos gaussianos son aplicables para la liberación de nubes densas a distancias lejanas corriente abajo desde la liberación, es decir, cuando muestran un comportamiento de nube flotante neutral.

Modelo DEGADIS

El modelo DEGADIS, que viene a ser un método matemático, fue desarrollado principalmente para la simulación de la dispersión de gases criogénicos inflamables, particularmente GNL, **para los cuales las consideraciones de transferencia de calor y los efectos de energía termodinámicas son esenciales.** Esto ha sido demostrado, para proporcionar consistencia a las predicciones, con un amplio rango de datos de laboratorio y datos de prueba de campo que involucra el GNL, propano, freón, amonio, tetróxido de nitrógeno, y fluoruro de hidrógeno liberado en terreno plano y llano.

Si la tasa del gas liberado no excede la tasa atmosférica, el gas es removido directamente por el flujo atmosférico y dispersado viento abajo.

Si la tasa del gas liberado excede la tasa atmosférica, se forma sobre la fuente principal una capa mas densa que el aire "fuente secundaria", y es cercano, al régimen de flotabilidad dominante que es modelado usando el Modelo de la Caja Negra, también denominada Lumped Parameter Model (las variaciones espaciales son ignoradas y el sistema es descrito por parámetros ajustables), que incorpora el arrastre del aire frente a la separación por gravedad usando una velocidad de arrastre frontal (Figura 2.1). Corriente abajo la dispersión es modelada con la ley de distribución de la concentración en la dirección vertical y un perfil gaussiano modificado en la dirección horizontal con una especificación de la ley de energía para el perfil del viento. La dispersión corriente abajo modela el promedio del conjunto de las concentraciones del gas.

2.1.2.1. Formación de la capa secundaria de la fuente

Una nube o capa más densa que el aire "fuente secundaria" puede formarse sobre la piscina líquida que se evapora (u otras fuentes específicas de emisión a nivel del suelo) o por liberación instantánea de un volumen de gas. El modelo de la caja negra para la capa es ilustrada en la figura 2.5.

La capa de gas es representada como un volumen de gas cilíndrico que se extiende lateralmente como un flujo denso conducido por arrastre desde el tope de la capa de la fuente por el esfuerzo cortante del viento y el arrastre del aire interno que avanza al frente del borde. La capa se extiende lateralmente hasta la tasa atmosférica aceptable desde el tope que es marcado por la tasa de arrastre del aire del lugar y, si es aplicable, por la adición de la tasa del gas debajo de la capa. El centro de la capa se asume estacionario sobre la fuente.

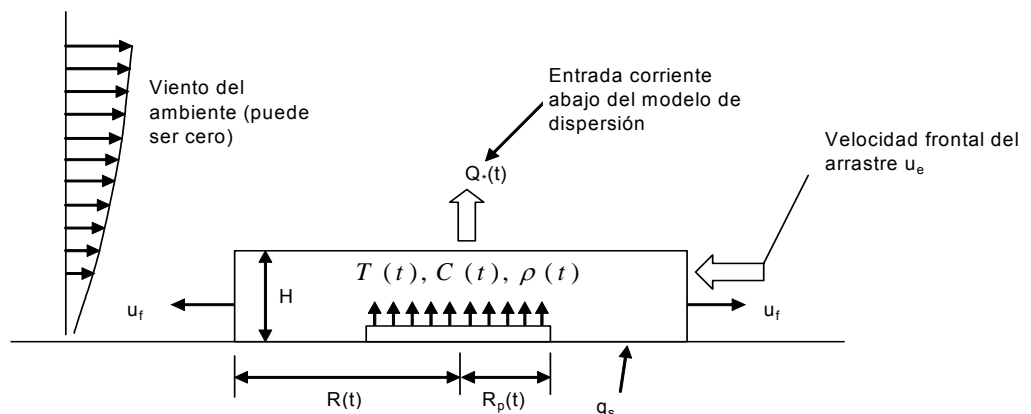


Figura 2.5: Formación de la fuente Secundaria

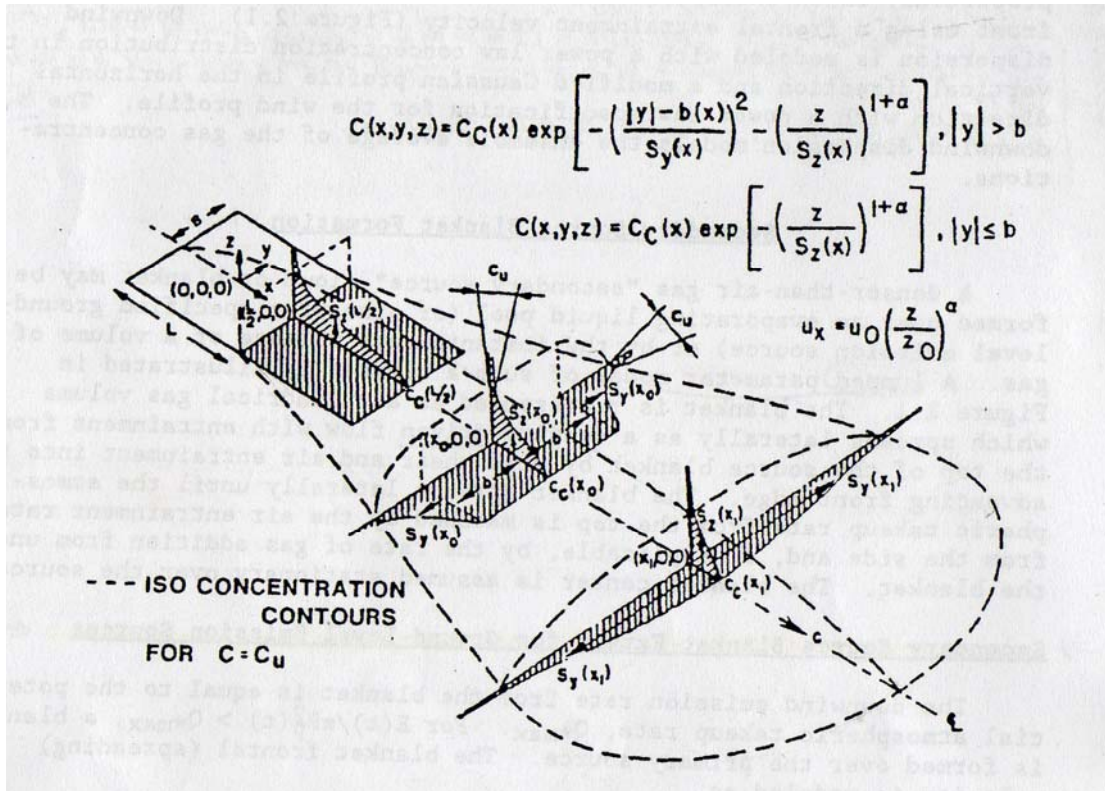


Figura 2.6: Diagrama esquemático del modelo de Dispersión de Gas Denso DEGADIS

2.1.2.2. Alcance de las Capas "fuentes secundarias" desde fuentes de emisión a nivel del suelo

La tasa de emisión de la capa corriente abajo es igual a la tasa del potencial atmosférico, Q_{*max} . Para $E(t) / \pi R_p^2(t) > Q_{*max}$, una capa es formada sobre la fuente primaria. La velocidad frontal de la capa (separación) es modelada como:

$$u_f = C_E \left[g \left(\frac{\rho - \rho_a}{\rho_a} \right) H^2 \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

donde:

- ρ es la densidad promedio para la capa por ($\rho > \rho_a$).
- $C_E = 1.5$, Constante en la relación de la intrusión de la densidad, de acuerdo con medidas del laboratorio de la velocidad de extensión de la nube.
- H es el espesor característico de la liberación.
- $E(t)$, Tasa de la fuente primaria del contaminante (Kg contaminante/s).
- Q_{*max} : Flujo atmosférico (Kg/ms₂).

– ρ_a , Densidad del aire.

El radio R de la capa es determinada por integración $dR/dt = u_f$. Cuando la masa total de la capa se reduce con el tiempo (por ejemplo, la tasa resultante atmosférica excede la tasa de entrada de la fuente primaria más la tasa de arrastre del aire), el radio es modelado como $(dR/dt)/R = (dH/dt)/H$, con el radio de la capa contraída para ser mayor o igual que el radio de la fuente primaria R_p .

2.1.2.3. Extensión de la capa secundaria de la fuente por liberación instantánea del gas.

El modelo que involucra la gravedad (ecuación 2.1) predice las velocidades iniciales para liberaciones instantáneas sobre el terreno de un gas más denso que el aire desde la fase inicial de la aceleración que no es modelado.

Para liberaciones instantáneas de gas, la nube radialmente simétrica se considera compuesta de una sección de cola con la altura H_t y radio R_h y una sección de cabeza con altura H_h (figura 2.7). El balance del momentum es utilizado para explicar la aceleración del resto de la nube; el efecto del momentum del ambiente (aire) es ignorado.

Aunque las siguientes ecuaciones son derivadas asumiendo la ausencia de la fuente primaria, las ecuaciones resultantes son asumidas para modelar la fuente secundaria de la nube desarrollada cuando la tasa de la fuente primaria es diferente de cero. Cuando la velocidad frontal del balance del momentum es la misma que la ecuación (2.1), el balance del momentum no es aplicado y la velocidad frontal es dada por la ecuación (2.1).

Hay tres fuerzas principales que actúan sobre la nube: una fuerza de presión estática (F_p), una fuerza de arrastre dinámica (F_d), y una fuerza que contabiliza la reacción de aceleración del fluido del ambiente, representado como una tasa del momentum virtual del cambio con respecto al tiempo ($-dP_v/dt$). Denotando el momentum de la cabeza y la cola como P_h y P_t , respectivamente, el momentum del balance es:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt}(P_h + P_t) = F_p + F_d - \frac{dP_v}{dt} \quad (2.2)$$

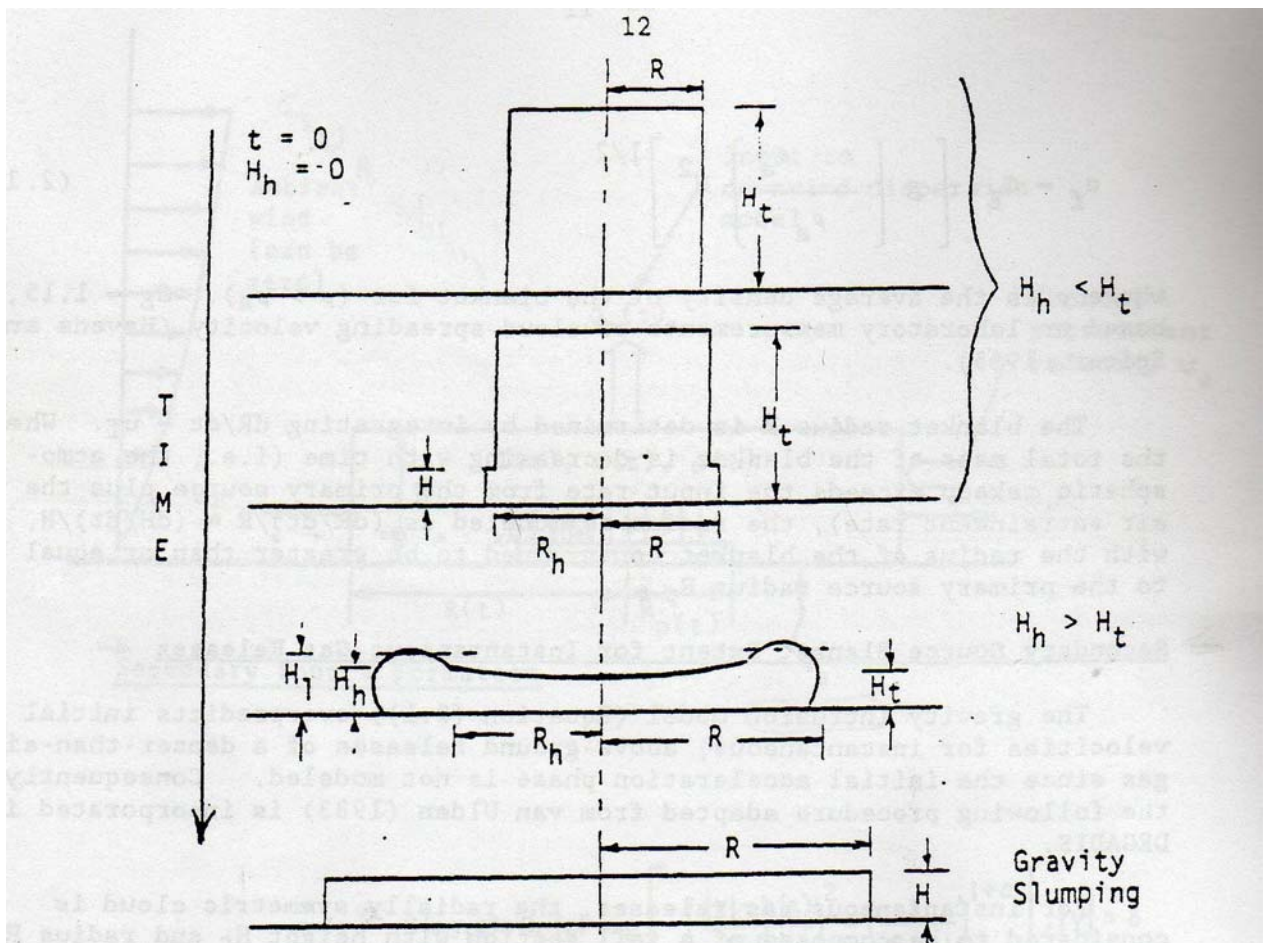
o

$$\frac{d}{dt}(P_h + P_i + P_v) = F_p + F_d \quad (2.3)$$

Los términos en el balance del momentum son evaluados para periodos diferentes de tiempo antes del desarrollo de la cabeza de la corriente por gravedad ($H_h < H_t$) y después que la cabeza se ha desarrollado pero la nube esta aún acelerando (Figura 2.7)

Los modelos de las ecuaciones que describen los periodos de tiempo después del desarrollo de la cabeza de la corriente por gravedad ($H_h \geq H_t$) son primero derivadas. Las ecuaciones modelos descritas en el periodo de tiempo mas temprano ($H_h < H_t$) utilizan simplificaciones de las ecuaciones aplicables para $H_h \geq H_t$.

Figura 2.7 Diagrama esquemático de la extensión radial de la nube.



Corriente inestable de la gravedad

Cuando $H_h \geq H_t$ (Figura 2.7, 2.8), la velocidad frontal es determinado del balance del momentum (ecuación (2.2)) como sigue.

La fuerza de la presión estática, obtenido por integración de la presión estática sobre el límite de la corriente es,

$$F_p = \left[\frac{1}{2} g \Delta \rho H_t \right] [2\pi R H_t] = \pi g \Delta \rho R H_t^2 \quad (2.4)$$

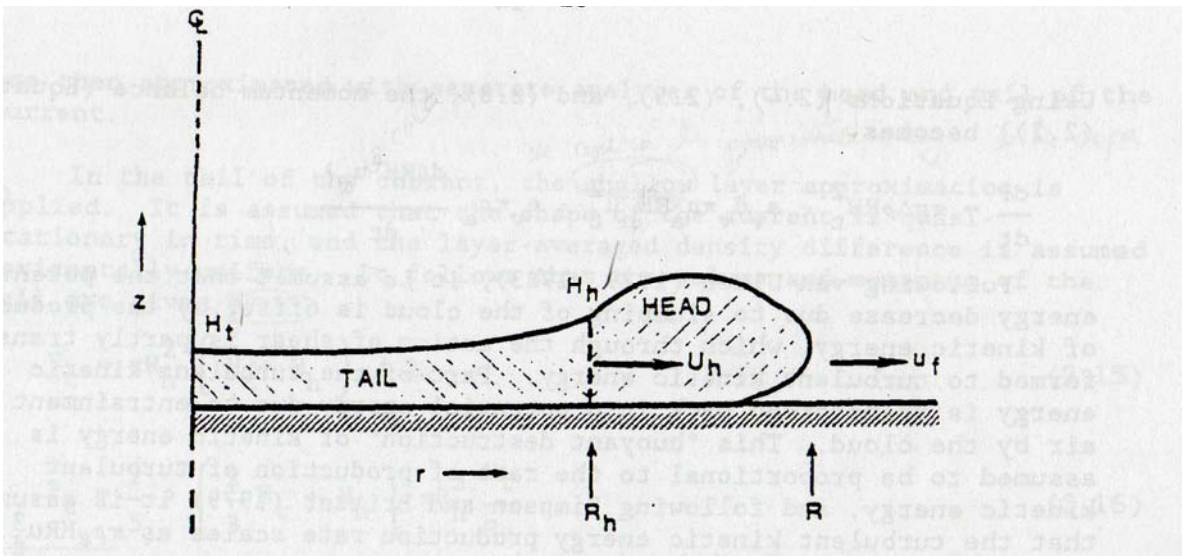


Figura 2.3 Corriente inestable de la gravedad

Despreciando el esfuerzo cortante del fondo, la fuerza dinámica sobre la corriente es la suma de la fuerza de arrastre sobre la cabeza de la corriente y la fuerza de levantamiento (lift) que se incrementa debido a la asimetría del flujo del ambiente alrededor de la cabeza. La fuerza de arrastre es representada por:

$$F_D = -\frac{d_v}{2} \rho_a u_f^2 [2\pi R_h a_v H_h] = -a_v d_v R H_h \rho_a u_f^2 \quad (2.5)$$

donde:

d_v , es un coeficiente de arrastre efectivo y la constante a_v es un ratio empírico del promedio de la profundidad de la cabeza H_1 a H_h ($a_v = H_1 / H_h$).

R: Radio de la Fuente de gas

H_t : Altura de la cola en el flujo de la densidad conducida

R_h : Radio interno de la cabeza en el flujo de la densidad conducida

H_h : Altura de la cabeza en el flujo de la densidad conducida

La aceleración de la reacción horizontal ($-dP_v/dt$) es aproximado por la reacción para un cilindro elíptico acelerando con un ratio H/R:

$$-\frac{dP_v}{dt} = -\frac{d}{dt}[k_1 \rho_a \pi R H^2 u_f] \quad (2.6)$$

y la reacción de la aceleración vertical es representado como:

$$-\left[\frac{dP_v}{dt}\right]_z = -\frac{d}{dt}[k_2 \rho_a \pi R H^2 u_f] \quad (2.7)$$

donde k_1 y k_2 son coeficientes de orden uno. Usando una constante simple, las ecuaciones 2.6 y 2.7 dan:

$$-\frac{dP_v}{dt} = -e_v \pi \rho_a \frac{d(RH^2 u_f)}{dt} \quad (2.8)$$

usando las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.8 , el balance del momentum de la ecuación 2.2 será:

$$\frac{dP}{dt} = \pi g \Delta \rho R H_t^2 - a_v d_v \pi \rho_a R H_h u_f^2 - e \pi \rho_a \frac{d(RH^2 u_f)}{dt} \quad (2.9)$$

se asume que la energía potencial decrece debido al asentamiento de la nube que es compensada por la producción de la energía cinética que por la acción del esfuerzo cortante es transformada parcialmente a energía cinética turbulenta. Parte de la energía cinética turbulenta es transformada retornando a energía potencial debido al arrastre del aire por la nube. Esta “destrucción flotante” de la energía cinética es asumido para ser proporcional a la tasa de producción de energía cinética turbulenta, y se asume que la escala de la tasa de producción de la energía cinética turbulenta es $\pi \rho_a H R u_f^3$.

Luego:

$$\frac{1}{2} g \Delta \rho H \frac{dV}{dt} = \pi \rho_a H R u_f^3 \quad (2.10)$$

que puede ser reescrito:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{2(\in \pi \rho_a RH)u_f}{\frac{g\Delta\rho H}{\rho_a u_f^2}} = \frac{\in (2\pi RH)u_f}{Ri_f} \quad (2.11)$$

donde \in es un coeficiente empírico. Notar que dV/dt representa la tasa de arrastre del aire,

$$\frac{\overset{o}{M}_a}{\rho_a} = \frac{\in (2\pi RH)u_f}{\left[\frac{g\Delta\rho H}{\rho_a u_f^2} \right]} \quad (2.12)$$

donde $\overset{o}{M}_a$ representa la tasa de arrastre de la masa del aire.

El volumen integral es:

$$V = 2\pi \int_0^R h(r,t) r dr \quad (2.13)$$

Donde $h(r,t)$ es para ser expresado en términos de H_h y H_t , y el momentum integral:

$$P = 2\pi \int_0^R \rho u(r,t) h(r,t) r dr = P_t + P_h \quad (2.14)$$

Luego son aproximados con un análisis separado de la corriente de la cabeza y la cola.

En la cola de la corriente, la aproximación de la capa poco profunda es aplicada. Se asume que la forma de la corriente es cuasi-estacionario en el tiempo, y la diferencia de la densidad promedio de la capa es asumida horizontalmente uniforme. Esto sigue que el volumen de cola y del momentum son dados por:

$$V = \pi R_h^2 [H_t + H_h] / 2 \quad (2.15)$$

$$P_t = \frac{2}{5} \rho \left[\frac{2}{3} H_t + H_h \right] \pi R_h^3 \frac{u_f}{R} \quad (2.16)$$

Un balance del momentum para la región de la cabeza, figura 2.9, asumiendo un estado cuasi-estable, indica que las fuerzas de presión estática y dinámica sobre la cabeza deberá ser balanceado por el flujo neto del momentum debido al flujo interno y externo de la cabeza. Las fuerzas de la presión estática y de arrastre son, respectivamente:

$$F_p = \left[\frac{1}{2} g \Delta \rho H_h \right] [2\pi R_h H_h] = \pi g \Delta \rho R_h H_h^2 \quad (2.17)$$

$$F_D = -d_v \left[\frac{1}{2} \rho_a u_f^2 \right] [2\pi R_h (a_v H_h)] = -a_v d_v \rho_a u_f^2 R_h H_h \quad (2.18)$$

Cerca de la superficie, el flujo interno (u_4 en la figura 2.9) transporta el momentum interior de la cabeza, mientras que el flujo que retorna (u_3 en figura 2.9) transporta el momentum al exterior de la cabeza. Asumiendo que $u_3 = u_4$, $H_4 = 1/2 H_h$, y $u_4 = \delta_v u_f$, el flujo interno del momentum de la cabeza se aproxima:

$$Q_h \approx \delta_v^2 \rho_a u_f^2 [2\pi R_h H_h] \quad (2.19)$$

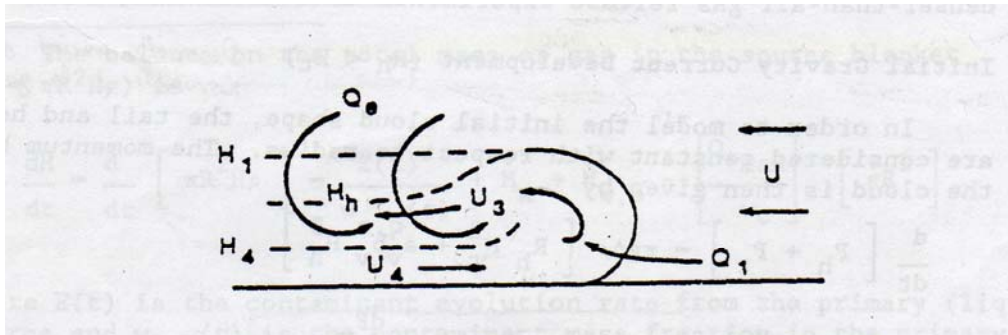


Figura 2.9 La cabeza de una corriente estable (Simpson and Britte, 1979; van Ulden 1983)

Reacomodando, el balance del momentum sobre la cabeza da:

$$\frac{\rho_a u_f}{g \Delta \rho H_h} = \frac{1}{[a_v d_v - 2\delta_v^2]} = C_E^2 \quad (2.20)$$

Donde $\delta_v = 0.2$ y $d_v = 0.64$; la ecuación 2.20 luego especifica la condición límite de la velocidad de la cabeza. El volumen de la cabeza es determinado por asunción de la escala de la longitud de la cabeza con H_1 . sigue que:

$$R - R_h = b_v H_1 \quad (2.21)$$

donde b_v es una constante empírica, y el volumen de la cabeza llega a ser:

$$V_h = \pi a_v^2 b_v (R + R_h) H_h^2 \quad (2.22)$$

Si la velocidad promedio de la capa es asumido para incrementar linealmente con r , sigue que:

$$u_h = u_f \left[\frac{R_h}{r} \right] \quad (2.23)$$

y

$$P_h = \frac{2\pi}{3} \rho a_v \frac{u_f H_h}{R} [R^3 - R_h^3] \quad (2.24)$$

junto con la definición de u_f ,

$$\frac{dR}{dt} = u_f, \quad (2.25)$$

las ecuaciones 2.9, 2.11, 2.20, 2.21, 2.23, y 2.25 son resueltas para determinar ρ, H_t, H_h, V, P_h y P_t cuando $H_h > H_t$.

Las constantes empíricas a_v, b_v, d_v, e_v y E tienen valores asignados de 1.3, 1.2, 0.64, 20 y 0.59, respectivamente, basado en el análisis de los experimentos de liberación de gases mas densos que el aire.

Desarrollo inicial de la corriente por gravedad

En orden al modelo inicial de la forma de la nube, la altura de la cola y la cabeza son considerados constantes con respecto del radio. El balance del momentum sobre la nube esta luego dado por:

$$\frac{d}{dt} [P_h + P_t] = \pi g \Delta \rho [R_h H_t^2 + a_v b_v H_h^3] - \pi a_v d_v \rho_a R H_h u_f^2 - \frac{dP_v}{dt} \quad (2.26)$$

Donde el primer término en la mano derecha representa la fuerza de la presión estática sobre la cabeza y el segundo término representa la fuerza de arrastre

sobre el fondo de la superficie de la nube. La tercera fuerza es la reacción de la aceleración por el ambiente del fluido, representado por la ecuación 2.8:

Las dimensiones de la cabeza son otra vez dadas por:

$$R_h = R - a_v b_v H_h \quad (2.27)$$

y

$$H_h = \left[\frac{u_f}{C_E} \right]^2 / [g \Delta \rho / \rho_a] \quad (2.28)$$

Cuando la altura de la cola H_t se asume uniforme con respecto al radio, sigue que:

$$H_t = \left[\frac{M}{\rho} - \pi a_v^2 b_v (R + R_h) H_h^2 \right] / (\pi R_h^2) \quad (2.29)$$

donde M es la masa total de la nube. El momentum de la cabeza P_h y de la cola P_t son luego:

$$P_h = \frac{2}{3} \pi a_v \frac{\rho H_h (R^3 - R_h^3)}{R} u_f \quad (2.30)$$

y

$$P_t = \frac{2}{3} \pi \frac{\rho H_t (R_h^3)}{R} u_f \quad (2.31)$$

las ecuaciones del 2.26 hasta 2.31 determinan el momentum de la capa como función del tiempo, y así la velocidad frontal u_f . La nube acelera del resto porque $H_h = 0$ inicialmente.

2.1.2.4. Balance de energía y materia

El balance de la masa total del gas en la capa de la fuente ($M = \pi R^2 H \rho$) es:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} [\pi R^2 H \rho] = \frac{E(t)}{w_{c,p}(t)} + \overset{o}{M}_a + \overset{o}{M}_{w,s} - \left[\frac{Q_{*max}}{w_c} \right] [\pi R^2] \quad (2.32)$$

Donde $E(t)$ es la tasa de evolución del contaminante de la fuente primaria y $w_{c,p}(t)$ es la fracción en masa del contaminante en la fuente principal. Para derrames sobre agua el término de arrastre del agua es incluido en la descripción de la capa de la

fuente y es calculado de la ecuación 2.46 y la tasa de arrastre del aire (ecuación 2.12) es dado por:

$$\dot{M}_a = \frac{2\pi R H (\varepsilon u_f) \rho_a}{\left[\frac{g \Delta \rho H}{(\rho_a u_f^2)} \right]} \quad (2.33)$$

El balance de masa del contaminante en la capa de la fuente ($M_c = w_c \pi R^2 H \rho$) es:

$$\frac{dM_c}{dt} = \frac{d}{dt} [w_c \pi R^2 H \rho] = E(t) - Q_{*max} (\pi R^2) \quad (2.34)$$

y el balance del aire en la capa de la fuente $M_a = w_a \pi R^2 H \rho$ es:

$$\frac{dM_a}{dt} = \frac{d}{dt} [w_a \pi R^2 H \rho] = \frac{E(t)}{w_{c,p}(t)} \left[\frac{1 - w_{c,p}(t)}{1 + H_a} \right] + \frac{\dot{M}}{1 + H_a} - \left[\frac{Q_{*max}}{w_c} \right] w_a (\pi R^2) \quad (2.35)$$

Donde la humedad del ambiente es H_a y la fracción de la masa del contaminante y del aire son $w_c = \frac{M_c}{M}$ y $w_a = \frac{M_a}{M}$, respectivamente. Observar que cualquier dilución de la fuente primaria con aire está asumida para estar en la humedad ambiente.

El balance de la energía de la capa de la fuente da:

$$\frac{d}{dt} [h \pi R^2 H \rho] = \frac{h_p E(t)}{w_{c,p}(t)} + h_a \dot{M}_a + h_w \dot{M}_{w,s} - h \left[\frac{Q_{*max}}{w_c} \right] (\pi R^2) + \dot{Q}_s \quad (2.36)$$

Donde h_p es la entalpía de la fuente primaria del gas, h_a es la entalpía de aire húmedo del ambiente, y h_w es la entalpía de algún arrastre de vapor de agua por la capa (si es sobre el agua). Hay tres submodelos alternativos para la transferencia del calor (Q_s) desde la superficie a la nube.

El método mas simple para calcular la transferencia de calor entre el substrato y la nube de gas es especificar una constante del coeficiente de transferencia de calor para la relación de la transferencia de calor.

$$\dot{Q}_s = q_s [\pi [R^2 - R_p^2]] = h_o \Delta T [\pi [R^2 - R_p^2]] \quad (2.37)$$

donde \dot{Q}_s es la tasa de transferencia de calor a la nube, q_s es el flujo de calor, y ΔT es la diferencia de la temperatura entre la nube y la superficie. Para el cálculo de la transferencia de calor sobre la fuente, la diferencia de temperatura esta basado en la temperatura promedio de la capa.

En la evaluación de la serie de los experimentos del Burro y Coyote, se propuso el siguiente coeficiente empírico de transferencia de calor relacionando la transferencia de calor entre una nube de vapor fría y el terreno:

$$h_o = V_H \rho C_p \quad (2.38)$$

donde el valor de V_H fue estimado para ser 0.0125 m/s. (la constante V_H puede ser especificada en este modelo), y C_p es la capacidad calorífica.

De las descripciones el coeficiente de transferencia de calor para la transferencia de calor desde una placa plana, las siguientes relaciones pueden ser aplicadas. Para convección natural, el coeficiente de transferencia de calor es estimado usando los números de Nusselt (Nu), Grashoff (Gr), y Schmidt (Sc) de:

$$Nu = 0.14(GrSc)^{1/3} \quad (2.39)$$

o

$$h_n = 0.14 \left[\frac{g \rho^2 C_p^3 \mu}{T Pr^2} \Delta T \right]^{1/3} \quad (2.40)$$

donde h_n es el coeficiente de transferencia de calor por convección natural y Pr es el numero de Prandtl. Para simplificar los cálculos, el grupo de parámetros:

$$\left[Pr^{-2} (C_p MW)^3 \left(\frac{\mu}{MWT} \right) \right]^{1/3} \quad (2.41)$$

es estimado para ser 60 en unidades mks (valores actuales para el aire, metano y propano son 47.25, 58.5 y 73.4, respectivamente). La ecuación 2.40 se convierte:

$$h_n = 18 \left[\left(\frac{\rho}{MW} \right)^2 \Delta T \right]^{1/3} \quad (2.42)$$

Donde la densidad ρ , peso molecular MW, y la diferencia de temperatura ΔT están basados en la composición promedio de la capa de gas.

Para la convección forzada, se aplicó análogamente para una placa plana usando el número de Stanton para la transferencia de calor St_H y el número de Prandtl como:

$$St_H Pr^{2/3} = \frac{c_f}{2} = \left[\frac{u_*}{\bar{u}} \right]^2 \quad (2.43)$$

o

$$h_f = (\bar{u} \rho C_p) Pr^{-2/3} \left[\frac{u_*}{\bar{u}} \right]^2 \quad (2.44)$$

Donde h_f es el coeficiente de transferencia de calor forzado, u_* es la velocidad de la fricción y \bar{u} es la velocidad promedio característico. Si la velocidad es evaluada a $z=H/2$ y Pr es especificado a 0.741,

$$h_f = \left[1.22 \frac{u_*^2}{u_0} \left(\frac{2z_0}{H} \right)^\alpha \right] \rho C_p \quad (2.45)$$

u_0 : Velocidad del viento medido a $z=z_0$ (m/s)

z_0 : Altura referencial del perfil de velocidad del viento (m)

H: Profundidad característica de la fuga o profundidad de la intrusión de la densidad.

Si $H/2 < z_R$, luego la velocidad es evaluada en $z=z_R$

Donde:

z_R : Rugosidad de la superficie

El coeficiente de transferencia de calor global es luego el máximo de los coeficientes de convección natural y forzada, por ejemplo $h_0 = \max (h_f, h_n)$. El flujo de calor y la tasa de transferencia son luego estimadas por la ecuación 2.37.

Si la capa de gas es formada sobre el agua, el agua puede transferirse de la superficie a la capa de gas. La tasa de la transferencia de masa de agua es modelado como:

$$\dot{M}_{w,s} = \frac{F_0}{p} [p_{w,s}^* - p_{w,c}] [\pi(R^2 - R_p^2)] \quad (2.46)$$

donde F_0 es el coeficiente de transferencia de masa global y p es la presión atmosférica. La fuerza conductora de la presión parcial es la diferencia de la presión de vapor del agua a la temperatura de la superficie $p_{w,s}^*$ y la presión parcial del agua en la nube, $p_{w,c}$. El coeficiente de convección natural esta basada en el coeficiente de transferencia de calor y la analogía entre el número de Sherwood (Sh) y el número de Nusselt por Bird.

$$Sh = Nu = 0.14(GrSc)^{1/3} = \frac{F_n L}{D'} \left[\frac{MW}{\rho} \right] \quad (2.47)$$

Si el número de Schmidt es tomado como 0.6, y $\left[\frac{\mu}{TMW} \right]$ es estimado para ser 2.2×10^{-9} en unidades mks,

$$F_n = 9.9 \times 10^{-3} \left[\left(\frac{\rho}{MW} \right)^2 \Delta T \right]^{1/3} \quad (2.48)$$

para convección forzada, el Treybal Sugiere que el número de Stanton para la transferencia de masa St_M y el número de Stanton para la transferencia de calor esta relacionado por:

$$St_M = St_H \left[\frac{Pr}{Sc} \right]^{2/3} = 1.15 St_H \quad (2.49)$$

o

$$F_f = \frac{20.7 h_0}{MWC_p} \quad (2.50)$$

El coeficiente de transferencia de masa global F_0 es mayor que el coeficiente de convección forzada.

Para el caso cuando la fuente de emisión de la fuente primaria es mayor que el flujo atmosférico, las ecuaciones 2.32, 2.34, 2.35 y 2.36 son integradas para la masa, concentración, y entalpía de la capa de gas junto con una ecuación apropiada de estado (Por ejemplo la relación entre entalpía y temperatura y entre temperatura y densidad).

Cuando la tasa de emisión no es suficiente para formar la capa de gas, el flujo del contaminante no es determinado por la tasa máxima atmosférica. Considerar que la capa límite formado por la emisión del gas al interior de la atmósfera de la fuente primaria. Si la fuente es modelada para tener un ancho uniforme $2b$ y sin arrastre de aire a los lados de las capas, el balance total de materia $(\rho_L u_L H_L)$ en una diferencial de la capa es:

$$\frac{d}{dx} [\rho_L u_L H_L] = \rho_a w_e + \left[\frac{Q_*}{w_c} \right]_p \quad (2.51)$$

donde w_e es la tasa vertical del arrastre del aire al interior de la capa dada por la ecuación (2.83), ρ_L es la densidad promedio de la porción, y es $(Q_* / w_c)_p$ el flujo total del gas desde la fuente primaria. El caudal del contaminante en el balance de materia $(w_c \rho_L u_L H_L)$ para algún $(x - x_{up})$ es:

$$c_{c,L} u_L H_L = Q_* (x - x_{up}) \quad (2.52)$$

con una ecuación de estado a relacionarse $c_{c,L}$, y ρ_L , la ecuación 2.51 es integrada desde el borde de la fuente corriente arriba $(x = x_{up})$ al borde corriente abajo $(x = L + x_{up})$.

Para generar las condiciones iniciales para los cálculos de dispersión corriente abajo, la concentración c_c y los parámetros de dispersión vertical S_z son necesarios. Puesto que las ecuaciones 2.51 y 2.52 se escriben para una capa promediada verticalmente, considerando el promedio vertical de la distribución de la velocidad. La altura de la capa H_L es la altura para un cierto nivel de concentración, es decir 10% del máximo.

Aunque estrictamente una función de α , este valor es modelado como

$$H_L = \delta_L H_{EFF} \quad (2.53)$$

Donde H_{EFF} es la altura efectiva definida por la ecuación 2.79 y $\delta_L = 2.15$. La concentración promedio verticalmente $c_{c,L}$ es definida por:

$$c_{c,L} H_L = \int_0^{\infty} c dz \quad (2.54)$$

Similarmente, la velocidad de transporte efectivo u_L es definido por:

$$c_{c,L} u_L H_L = \int_0^{\infty} c u_x dz \quad (2.55)$$

Con la ecuación 2.53 y definiendo relaciones para H_L y u_L (ecuaciones 2.79 y 2.93, respectivamente), esto sigue:

$$c_c = \delta_L c_{c,L} \quad (2.56)$$

$$u_L H_L = \delta_L \left[\frac{u_0 z_0}{1 + \alpha} \right] \left[\frac{S_z}{z_0} \right]^{1+\alpha} \quad (2.57)$$

y

$$\delta_L w_e' = w_e \quad (2.58)$$

Donde w_e' esta dado por la ecuación 2.83.

2.1.2.5. Tasa máxima atmosférica

Es determinada como la mayor tasa que satisface las ecuaciones 2.51 y 2.52, y la concentración máxima del contaminante al borde de la fuente corriente abajo que es la concentración del contaminante de la fuente. Combinando las ecuaciones y asumiendo una mezcla adiabática de gases ideales con igual capacidad calorífica molal y la máxima emisión del flujo es modelado como:

$$Q_{*max} = (c_c)_s \frac{ku_*(1+\alpha)}{\hat{\phi}} \left[\frac{\delta_L}{\delta_L - 1} \right] \quad (2.59)$$

donde:

$$\frac{1}{\hat{\phi}} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{dx}{\phi(Ri_*)} \quad (2.60)$$

y $\phi(Ri_*)$ es definido (para $\rho \geq \rho_a$) por la ecuación 2.76.

El límite superior para el flujo atmosférico puede ser asociado con la condición donde la fuente empieza a extenderse como una intrusión de la gravedad contra el flujo aproximado. En experimentos de canales de agua, se midió la extensión corriente arriba y lateral de una pluma de estado estable desde una fuente circular como una función de Ri^* . Una significativa extensión corriente arriba fue obtenido para $Ri^* > 32$, y la extensión lateral en el centro de la fuente fue insignificante para $Ri^* < 8$. la presencia de alguna extensión lateral significativa representa un bajo límite en las condiciones de máximo flujo aceptado.

La integral de la ecuación 2.60 se evalúa el número local de Richard

$$Ri_*(x) = \zeta(x - x_{up})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2.61)$$

Donde:

$$\zeta = g \left[\frac{\rho - \rho_a}{\rho_a} \right] \frac{z_0}{u_*^2} \frac{\Gamma \left[\frac{1}{1+\alpha} \right]}{1+\alpha} \left[\frac{ku_*(1+\alpha)}{\phi_c} \left[\frac{1+\alpha}{u_0 z_0} \left[\frac{\delta_L}{\delta_L - 1} \right] \right] \right]^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2.62)$$

Y ϕ_c es 3.1 (correspondiendo a $Ri^* = 20$ ($8 < Ri^* < 32$)). La ecuación 2.60 luego llega a ser:

$$\frac{1}{\hat{\phi}} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{dx}{0.88 + 0.099 \xi^{1.04} x^{\frac{1.04}{1+\alpha}}} \quad (2.63)$$

la ecuación 2.63 puede ser resuelta analíticamente. Con ϕ determinado, Q_{*max} puede ser hallado con la ecuación 2.59.

2.1.2.6. Estado estable de la dispersión corriente abajo

Los modelos tratan el arrastre de la dispersión del gas en el campo del viento desde una fuente ideal de forma rectangular con ancho $2b$ y largo L .

La nube de fuente circular es representada como un equivalente al área rectangular ($\pi R^2 = 2bL$) con un equivalente ($L \approx 2R$). Forma similar para los perfiles de concentración que representa la pluma como una sección central homogénea horizontalmente con perfil de concentración de bordes gaussiano:

$$c(x, y, z) = c_c(x) \exp \left[- \left(\frac{|y| - b(x)}{S_y(x)} \right)^2 - \left(\frac{z}{S_z(x)} \right)^{1+\alpha} \right] \text{ para } |y| > b$$

$$c(x, y, z) = c_c(x) \exp \left[- \left(\frac{z}{S_z(x)} \right)^{1+\alpha} \right] \text{ para } |y| \leq b \quad (2.71)$$

Un perfil de velocidad de viento es asumido:

$$u_x = u_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (2.72)$$

Donde el valor de α es determinado por una forma de ajuste de cuadrados del perfil logarítmico

$$u_x = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z + z_R}{z_R} \right) - \psi \left(\frac{z}{\lambda} \right) \right] \quad (2.73)$$

La forma funcional para Ψ y valores típicos de α son dados en la tabla 2.1 para las diferentes categorías de estabilidad de Pasquill. Con estos perfiles, los parámetros de la ecuación 2.71 son desarrollados por ecuaciones diferenciales ordinarias.

Tabla 2.1. Estabilidad de la capa límite atmosférica y correlaciones con el perfil del viento			
Categoría de Estabilidad de Pasquill	Longitud de Monin-Obukhov(λ) como una función de la rugosidad de la superficie z_R (m) ¹	Típico valor de exponente α en la ecuación 2.72	Correcciones para perfiles logarítmicos Ψ en la ecuación 2.73
A	$-11.4 z_R^{0.10}$	0.108	$\Psi = 2Ln\left[\frac{1+a}{2}\right] + Ln\left[\frac{1+a^2}{2}\right] - 2 \tan^{-1}(a) + \pi/2$ <p style="text-align: center;">con</p> $a = (1 - 15(z/\lambda))^{1/4}$
B	$-26.04 z_R^{0.17}$	0.112	
C	$-123 z_R^{0.30}$	0.120	
D	∞	0.142	$\Psi = 0$
E	$-123 z_R^{0.30}$	0.203	$\Psi = -4.7(z/\lambda)$
F	$-26.04 z_R^{0.17}$	0.253	

1: ajuste de la curva de datos del pasquill

Dispersión vertical

El parámetro S_z de la dispersión vertical es determinado por requerimiento para satisfacer la difusión de la ecuación:

$$u_x = \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} K_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2.74)$$

Con la difusividad turbulenta vertical dada por:

$$K_z = \frac{ku_* z}{\phi(Ri_*)} \quad (2.75)$$

La función $\phi(Ri_*)$ de los datos del laboratorio tiene una forma de curva para una mezcla vertical en caudal estable de densidad estratificada ($Ri_* > 0$). Para $Ri_* < 0$, la función $\phi(Ri_*)$ fue modificada para límites pasivos a 2 funciones como sigue:

$$\phi(Ri_*) = 0.88 + 0.099 Ri_*^{1.04} \quad Ri_* \geq 0 \quad (2.76)$$

$$\phi(Ri_*) = 0.88 / 0.65 |Ri_*|^{0.6} \quad Ri_* < 0$$

La fricción de la velocidad es calculada usando la ecuación 2.73 desde una velocidad conocida u_0 a una altura específica z_0 . Combinando similarmente la forma asumida de la concentración y velocidad, las ecuaciones 2.71 y 2.72, 2.74 y 2.75 dan:

$$\frac{d}{dx} \left[\left(\frac{u_0 z_0}{1 + \alpha} \right) \left(\frac{S_z}{z_0} \right)^{1 + \alpha} \right] = \frac{ku_* (1 + \alpha)}{\phi(Ri_*)} \quad (2.77)$$

Donde el número de Richardson Ri_* es computado como

$$Ri_* = g \left(\frac{\rho - \rho_a}{\rho_a} \right) \frac{H_{EFF}}{u_*^2} \quad (2.78)$$

Y el espesor efectivo de la nube esta definido como

$$H_{EFF} = \frac{1}{c_c} \int_0^\infty cz dz = \Gamma \left(\frac{1}{1 + \alpha} \right) \frac{S_z}{1 + \alpha} \quad (2.79)$$

La ecuación 2.77 puede ser visto como un balance volumétrico sobre un elemento diferencial corriente abajo de la fuente. Un balance de masa global de los mismos elementos dan:

$$\frac{d}{dx} (\rho_L u_L H_L) = \rho_a w_e \quad (2.80)$$

¿Cuál es la ecuación 2.51 sin el término de la fuente? Con las ecuaciones 2.57 y 2.58, esto llega a ser:

$$\frac{d}{dx} (\rho_L u_{EFF} H_{EFF}) = \rho_a w_e \quad (2.81)$$

Asumiendo una mezcla adiabática de gases ideales con igual capacidad calorífica molal (Por ejemplo $((\rho - \rho_a) / c_c = \text{constante})$ y usando un balance de masa para el contaminante, el balance de masa es:

$$\frac{d}{dx} (u_{EFF} H_{EFF}) = w_e \quad (2.82)$$

lo cual conduce a:

$$w_e = \frac{w_e}{\delta_L} = \frac{ku_* (1 + \alpha)}{\phi(Ri_*)} \quad (2.83)$$

Las ecuaciones 2.81 y 2.83 se combinan para dar:

$$\frac{d}{dx}(\rho_L u_{EFF} H_{EFF}) = \rho_a w'_e \quad (2.84)$$

Generalizando, la ecuación 2.84 es asumida cuando la aplicación $(\rho - \rho_a)/c_c$ no es una constante.

Cuando la transferencia de calor desde la superficie se presenta, la mezcla vertical será realizado por la conveccion turbulenta debido a la transferencia de calor.

La velocidad turbulenta vertical resultante será:

$$\frac{w}{u_*} = \left[1 + \frac{1}{4} \left[\frac{w}{u_*} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (2.85)$$

Donde w_* es la velocidad convectiva escalar descrita como:

$$\left[\frac{w_*}{u_*} \right]^2 = \left[\frac{gh (T_s - T_{c,L})}{u_* \bar{u} T_{c,L}} \right]^{2/3} \quad (2.86)$$

Si \bar{u} es evaluada en H_{EFF} ,

$$\frac{w}{u_*} = \left[1 + \frac{1}{4} Ri_T^{2/3} \right]^{1/2} \quad (2.87)$$

Donde

$$Ri_T = g \left[\frac{T_s - T_{c,L}}{T_{c,L}} \right] \frac{H_{EFF}}{u_* u_0} \left(\frac{z_0}{H_{EFF}} \right)^\alpha \quad (2.88)$$

y $T_{c,L}$ es la temperatura obtenida de la ecuaciones de balance de energía 2.103 y 2.104. la ecuación 2.84 es modificada para calcular:

$$\frac{d}{dx}(\rho_L u_{EFF} H_{EFF}) = \frac{\rho_a k w (1 + \alpha)}{\phi(Ri'_*)} \quad (2.89)$$

donde: $Ri'_* = Ri_* g \left(\frac{u_*}{w} \right)^2$

aunque está derivado para la dispersión de dos dimensiones, la ecuación 2.89 se extiende para la aplicación de la pluma de gas mas denso que el aire que se dispersará lateralmente:

$$\frac{d}{dx}(\rho_L u_{EFF} H_{EFF} B_{EFF}) = \rho_a k_w \frac{(1+\alpha)}{\phi(Ri_*')} B_{EFF} \quad (2.90)$$

donde la mitad del ancho de la pluma efectiva esta definida por:

$$B_{EFF} = b + \frac{\sqrt{\pi}}{2} S_y \quad (2.91)$$

y resolviendo usando la ecuación que involucra la gravedad

$$\frac{dB_{EFF}}{dt} = C_E \left[g \left(\frac{\rho - \rho_a}{\rho_a} \right) H_{EFF} \right]^{1/2} \quad (2.92)$$

la velocidad promedio de transporte en la pluma esta definido por:

$$u_{EFF} = \frac{\int_0^\infty cu_x dz}{\int_0^\infty c dz} = \frac{u_0 \left(\frac{S_z}{z_0} \right)^\alpha}{\Gamma \left(\frac{1}{1+\alpha} \right)} \quad (2.93)$$

y la extensión de la nube es modelada como:

$$\begin{aligned} \frac{dB_{EFF}}{dx} &= \frac{1}{u_{EFF}} \frac{dB_{EFF}}{dt} \\ &= C_E \left[\frac{gz_0 \Gamma^3 \left(\frac{1}{1+\alpha} \right)}{u_0^2 (1+\alpha)} \right]^{1/2} \left(\frac{\rho - \rho_a}{\rho_a} \right)^{1/2} \left(\frac{S_z}{z_0} \right)^{\left(\frac{1}{2} - \alpha \right)} \end{aligned} \quad (2.94)$$

Dispersión horizontal

El parámetro similar del viento cruzado también es determinado como requerimiento para satisfacer a la ecuación de la difusión:

$$u_x = \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial c}{\partial y} \quad (2.95)$$

con difusividad turbulenta horizontal dada por:

$$K_y = K_0 u_x B_{EFF}^{\gamma_1} \quad (2.96)$$

para una pluma pasiva donde el parámetro similar está correlacionado por Pasquill en la forma donde son funciones de la categoría de estabilidad de Pasquill y el tiempo promedio. Sin embargo las ecuaciones 2.95 y 2.96 requieren que:

$$\sigma_{y,a} \frac{d\sigma_{y,a}}{dx} = K_0 u_x B_{EFF}^{\gamma_1} \quad (2.97)$$

$$S_y \frac{dS_y}{dx} = \frac{4\beta_y}{\pi} B_{EFF}^2 \left[\frac{\delta_y \sqrt{\pi/2}}{B_{EFF}} \right]^{1/\beta_y} \quad (2.98)$$

donde la ecuación 2.98 también se asume aplicable para determinar cuando b no es cero.

A la distancia corriente abajo x_t donde $b=0$, el perfil de concentración de viento cruzado se asume gaussiano dado por:

$$S_y = \sqrt{2} \delta (x + x_v)^\beta \quad (2.99)$$

Donde x_v es la distancia virtual de la fuente determinada como

$$S_y(x_t) = \sqrt{2} \delta (x + x_v)^\beta \quad (2.100)$$

El cálculo de extensión por gravedad es terminado por $x > x_t$

Tiempo promedio

La dispersión observada de una pluma de gas es una función del tiempo observado (promedio). Aquí nosotros hemos asumido:

- La influencia más importante del tiempo promedio en las propiedades de la pluma observada está asociada con la pluma formada.
- Para liberación a nivel del terreno, la pluma vertical formada es más pequeña que la pluma horizontal.

Se demostró que el ratio de las concentraciones medidas máximas basadas en diferentes promedios de tiempo estuvo dada por:

$$\frac{c_c(t_p)}{c_c(t_a)} = \left(\frac{t_a}{t_p} \right)^{0.2}$$

Para t_a/t_p hasta cerca de 200, cuando la fuente y receptor estuvo en el mismo nivel.

$$\frac{\sigma_{y,a}(t_a)}{\sigma_{y,a}(t_{a,i})} \cong \left[\frac{t_a}{t_{a,i}} \right]^{0.2}$$

donde $t_{a,i}$ fue sugerido para ser un tiempo promedio instantáneo representado por el tiempo mas pequeño asociado con la pluma. (Prácticamente, $t_{a,i}$ representa un tiempo promedio diferente de cero asociado con el coeficiente de dispersión $\sigma_{y,a}(t_{a,i})$)

$$\sigma_{y,a}(x;t_a) = 0.423 \left(\frac{t_a^*}{600s} \right)^{0.2} x^{0.9} \quad \text{A} \quad (2.101.a)$$

$$\sigma_{y,a}(x;t_a) = 0.313 \left(\frac{t_a^*}{600s} \right)^{0.2} x^{0.9} \quad \text{B} \quad (2.101.b)$$

$$\sigma_{y,a}(x;t_a) = 0.210 \left(\frac{t_a^*}{600s} \right)^{0.2} x^{0.9} \quad \text{C} \quad (2.101.c)$$

$$\sigma_{y,a}(x;t_a) = 0.136 \left(\frac{t_a^*}{600s} \right)^{0.2} x^{0.9} \quad \text{D} \quad (2.101.d)$$

$$\sigma_{y,a}(x;t_a) = 0.102 \left(\frac{t_a^*}{600s} \right)^{0.2} x^{0.9} \quad \text{E} \quad (2.101.e)$$

$$\sigma_{y,a}(x;t_a) = 0.0674 \left(\frac{t_a^*}{600s} \right)^{0.2} x^{0.9} \quad \text{F} \quad (2.101.f)$$

donde $t_a^* = \max(t_a, t_{a,i})$ y t_a es el tiempo promedio deseado. Los valores de $t_{a,i}$ son mostrados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores de $t_{a,i}$ para utilizar en la ecuación 2.101

Estabilidad de Pasquill	$t_{a,i}$ (s)
A	18,4
B	18,4
C	18,4
D	18,3
E	11,4
F	4,6

Categorías de estabilidad atmosférica definidas por Pasquill	
Categoría	Estabilidad
A	Extremadamente inestable
B	Moderadamente inestable
C	Levemente inestable
D	Neutra
E	Levemente estable
F	Moderadamente estable

Las categorías de estabilidad de Pasquill, considera un gran número de correlaciones de parámetros atmosféricos y son una solución cuando no se dispone de sistemas de medida que proporcionen información más concreta sobre estos parámetros (por ejemplo, la turbulencia atmosférica).

Balance de energía térmica

Para algunas simulaciones de liberaciones de gases criogénicos, la transferencia de calor a la pluma en el cálculo de dispersión corriente arriba puede ser importante, particularmente en condiciones bajas de viento. El cálculo de la fuente determina una condición inicial de la mezcla gas/aire para el problema de dispersión viento abajo. El aire arrastrado en la pluma se asume para una mezcla adiabática.

La transferencia de calor a la pluma corriente debajo de la fuente añade calor adicional. Este calor añadido por unidad de masa D_h es determinado por un balance de energía sobre una sección transversal uniforme:

$$\frac{d}{dx}(D_h \rho_L u_{EFF} H_{EFF}) = \frac{q_s}{\delta_L} \quad (2.102)$$

Donde q_s es determinado por la ecuación 2.37 con el método deseado de cálculo h_0 . La ecuación 2.102 es aplicado cuando $b=0$ y es generalizado para:

$$\frac{d}{dx}(D_h \rho_L u_{EFF} H_{EFF} B_{EFF}) = \frac{q_s B_{EFF}}{\delta_L} \quad (2.103)$$

Cuando $b>0$. Puesto que la densidad media de la capa ρ_L no puede ser determinada hasta que se conozca la temperatura, un procedimiento de prueba y de error es requerido.

Terminación (Closure)

Para una pluma estable, la línea central de la concentración c_c es determinada por balance de materia:

$$E = \int_0^\infty \int_0^\infty c u_x d_y d_z = 2c_c \left(\frac{u_0 z_0}{1 + \alpha} \right) \left(\frac{S_z}{z_0} \right)^{1+\alpha} B_{EFF} \quad (2.104)$$

Donde E es la fuerza de la pluma de la fuente.

Corrección para grandes dispersiones de viento

Un ajuste para c_c es aplicado para calcular la dispersión paralela a la dirección del viento.

$$c'_c(x; x_{p_i}) = \frac{c_c(x_{p_i}) \Delta x}{\sqrt{2\pi} \sigma_{x,a}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - x_{p_i}}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (2.105)$$

El coeficiente de dispersión en dirección x es asumido para ser una función de la distancia desde el borde corriente arriba de la fuente de gas y de la estabilidad atmosférica dada por:

$$\begin{aligned}
\sigma_{x,a}(x) &= 0.02X^{1.22} && \text{Inestable, } x \geq 130m \\
\sigma_{x,a}(x) &= 0.04X^{1.14} && \text{Neutral, } x \geq 100m \\
\sigma_{x,a}(x) &= 0.17X^{0.97} && \text{Estable, } x \geq 50m
\end{aligned}
\tag{2.106}$$

donde $(X = x - x_0)$ y $\sigma_{x,a}$, están en metros. La concentración en x es luego determinada por superposición, por ejemplo, la contribución para c_c para un x dado de puffs vecinos es agregado en una dirección x para proporcionar un valor corregido de c'_c . Para N observadores tendremos:

$$c'_c(x) = \sum_{i=1}^N \frac{c(x_{p_i})}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x,a}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_{p_i}}{\sigma_{x,a}}\right)^2\right] \Delta x_i$$

para N grande,

$$c'_c(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x,a}} \int_0^\infty \frac{c_c(\xi)}{\sigma_{x,a}(\xi - \xi_0)} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\xi}{\sigma_{x,a}(\xi - \xi_0)}\right)^2\right] d\xi$$

la concentración corregida c'_c de la línea central se utiliza en los perfiles asumidos en lugar del c_c , en conjunto con los parámetros de distribución de S_y , S_z y b .

2.2 APLICACIÓN DEL MODELO DEGADIS

El DEGADIS fue diseñado para modelar una dispersión atmosférica a nivel del terreno, de área-fuente de nubes de gases densos liberadas con momentum cero (inicial) en una capa límite atmosférica sobre nivel de terreno plano; describe los procesos de dispersión que acompaña el flujo conducido por la gravedad y el arrastre del gas al interior de la capa límite atmosférica.

Las liberaciones de gases criogénicos consideradas en el CFR 193 están relacionadas con la dispersión de vapor de GNL como resultado de la evaporación de las piscinas líquidas de GNL (por derrames) que requerirán ser modeladas a través del DEGADIS.

Las siguientes guías y limitaciones deben tenerse en cuenta cuando se emplee este modelo:

- Usar el DEGADIS para el planeamiento de la facilidad y la respuesta del peligro que requiere interpretación cuidadosa del problema.
- El DEGADIS solo modela dispersión de vapores, para lo cual es necesario especificar la tasa de evaporación del líquido derramado (como GNL).
- El DEGADIS asume un campo atmosférico sin obstáculo para el flujo, es decir que no modela directamente la influencia que podría tener la forma del terreno o las estructuras que podrían causar interrupción al vapor.

Los datos de entrada para el modelo se consideran convenientemente en dos categorías:

2.2.1 Descripción meteorológica

El perfil del viento se asume para ser logarítmico y requiere la especificación de la velocidad u_0 a una altura específica z_0 , la rugosidad de la superficie z_R , y la clase de estabilidad de Pasquill (o la longitud de Monin-Obukhov λ , que es usado para calcular la velocidad de fricción u_* en el perfil de viento logarítmico).

Los valores superficiales típicos de la rugosidad para las cubiertas de tierra típicas se demuestran en Tabla 2.3.

TABLA 2.3. RUGOSIDADES SUPERFICIALES PARA LAS CUBIERTAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS DE LA TIERRA		
Superficie	Rugosidad (m)	Altura de suelo cubierto (m)
Hielo o fango liso plano	0.00001	
Nieve	0.00005-0.0001	
Arena	0.0003	
Suelos	0.001-0.01	
Grass corto	0.003-0.01	
Grass segado ²	0.002-0.007	0.015-0.03
Grass largo	0.04-0.1	0.25 a 1.0
Cosechas agrícolas	0.04-0.2	0.40 a 2.0

² Grass cortado

Las Clases de estabilidad de Pasquill son requeridas para estimar valores de los coeficientes lateral, vertical, y a lo largo del viento. La longitud del Monin-Obhukhov es opcional, su ingreso no es requerido para la predicción de vapor de GNL³.

La temperatura ambiental T_a , presión p , y humedad H_a deben ser especificados. La temperatura de la superficie del terreno T_s es requerido si el modelo suele incluir la transferencia de calor entre la superficie y la nube.

2.2.2 Descripción de la liberación

El DEGADIS provee para tratar 2 tipos de liberación:

- Jet elevado
- A nivel de la superficie (bajo momentum)

La liberación que se evalúa en este caso trata de la evaporación de una piscina de líquido (derrame), por lo que no se requerirá utilizar el modelo de jet.

Para cada tipo de liberación se debe especificar lo siguiente:

1. Si la liberación es isotérmica o no

Si el material liberado puede ser considerado a la misma temperatura del aire, entonces es isotérmica; el vapor de GNL no es isotérmica.

2. Si la transferencia de calor se modelara

Como el modelamiento es normal solo para liberaciones que tienen temperaturas diferentes de la temperatura ambiental tal como el vapor de GNL.

Si la transferencia de calor es deseado, se debe ingresar la temperatura del terreno en grado °K. Para la predicción de vapor de GNL se utiliza la correlación incorporada para el coeficiente de transferencia de calor que es recomendado.

El DEGADIS contiene información de las propiedades para los gases: metano, propano, amonio, cloro, tetróxido de nitrógeno y fluoruro de hidrógeno, que serán proporcionados inmediatamente se requieran:

- Peso molecular,
- Temperatura de almacenamiento, °K
- Densidad a la temperatura de almacenamiento, Kg/m^3 ,
- Constantes para correlacionar la capacidad calorífica con la temperatura,

³ Si la longitud del Monin-Obhukhov no se especifica, el DEGADIS lo estima usando las clases de estabilidad de Pasquill y la rugosidad de la superficie específica (Havens and Spicer, 1985)

- Límite de inflamabilidad superior (u otro nivel de concentración), en fracción molar,
- Límite de inflamabilidad inferior (u otro nivel de concentración), en fracción molar,
- Elevación vertical para determinación de los contornos de isoconcentraciones de los límites superior e inferior de inflamabilidad.

Para liberaciones a nivel de la superficie del suelo de bajo momentum el DEGADIS requiere que el usuario especifique si la liberación esta en estado estacionario o transitorio y requiere que se ingrese los siguientes datos describiendo la liberación:

- La tasa de la masa en Kilogramos por segundo (puro o especificar su dilución con el aire). Para liberación en estado transitorio, la tasa de la masa debe estar especificada como una función del tiempo.
- El radio de la liberación en metros. Para liberación en estado transitorio, donde el área de la liberación cambia, el radio debe ser especificado como función del tiempo.

Una liberación esta en **estado estacionario** si la tasa de la liberación es constante y persiste por un tiempo suficiente para el viaje de la nube corriente abajo para alcanzar distancias significativas de locaciones de más interés. Por ejemplo, una liberación de vapor de GNL a una tasa constante de 100 Kg/s por 10 minutos a una velocidad de viento de 3 m/s podría ser simulado como estado estacionario porque la distancia de viaje por la nube en 10 minutos podría estar aproximadamente a 1800 metros, que es significativamente mas extenso de la concentración mas baja del límite de la inflamabilidad.

Una liberación debería ser modelada como **estado transitorio** si la tasa de liberación varía con el tiempo o si la tasa de liberación es constante pero para un tiempo limitado. Por ejemplo, una liberación de vapor de GNL a una tasa constante de 100 Kg/s por 1 minuto a una velocidad de viento de 3 m/s podría ser simulado transitorio porque la distancia de viaje por la nube en 1 minuto podría ser aproximadamente 180 metros, que es perceptiblemente más corto que la extensión de lo previsto de la concentración más baja del límite de la inflamabilidad.

Notación para el capítulo II

α	Constante en la ley de energía del perfil del viento
b	Medio espesor de la sección central horizontalmente homogénea de la pluma de gas (m)
b_v	Constante empírica
B_{EFF}	Ancho efectivo de la pluma de gas (m)
C_E	Constante en la relación de la intrusión de la densidad
C_p	Capacidad calorífica (J/ Kg °K)
C_{p_a}	Capacidad calorífica del contaminante (J/ Kg °K)
C_{p_w}	Capacidad calorífica del agua (J/ Kg °K)
c	concentración local (Kg/m ³)
c_c	concentración en la línea central (Kg/m ³)
c'_c	concentración corregida a nivel del terreno para la dispersión en dirección x de la línea central (Kg/m ³)
C_f	coeficiente de fricción
$C_{c,L}$	Concentración promedio de la capa vertical (Kg/m ³)
D	Diámetro de la fuente (m)
D'	Difusividad (m ² /s)
D_h	Entalpía adicionada (J/Kg)
E	Fuerza de la pluma (Kg-f/s)
$E_{(t)}$	Tasa de la fuente primaria del contaminante (Kg contaminante/s).
h	Entalpía de la capa de la fuente (J/Kg)
h_a	Entalpía de la fuente primaria del gas (J/Kg)
h_f	Coeficiente de transferencia de calor debido a la convección forzada (J/m ² s°K)
h_L	Entalpía promedio de la capa vertical (J/Kg)
h_n	Coeficiente de transferencia de calor debido a la convección natural (J/m ² s°K)
h_p	Entalpía de la fuente primaria del gas (J/Kg)
h_w	Entalpía asociada con el flujo de agua de la superficie (J/Kg)
H	Altura o espesor característico del gas liberado (m)
H_t	Altura de la cola en el flujo de la densidad conducida (m)
H_h	Altura de la cabeza en el flujo de la densidad conducida (m)
H_1	Profundidad promedio de la cabeza de la corriente (m)
H_L	Profundidad total de la capa (m)
H_{EFF}	Espesor efectivo de la nube
Ha	Humedad absoluta (Kg agua/Kg de aire seco)
k	Constante de Von Karman's, 0.35
K_y	Difusividad turbulenta horizontal (m ² /s)
K_z	Difusividad turbulenta vertical (m ² /s)
K_0	Constante
L	Longitud de la fuente (m)
λ	Longitud Monin-Obukhov (m)
M	Masa total de la nube (Kg)
M_a	Masa total del contaminante en la nube (Kg)
M_c	Masa total del aire en la nube (Kg)
M_a°	Tasa de la masa total del aire arrastrado en la nube (Kg/s)
$M_{w,s}$	Tasa de la masa de agua transferida a la nube de la superficie de agua hacia la nube (Kg/s)
μ	Viscosidad (Kg/ m s)
P	Momentum de la nube (Kg-f/s)
q_s	Flujo de calor de la superficie (J/m ² s)
Q_s	Transferencia del calor
Q_{max}^*	Flujo atmosférico (Kg/m ² s).
Ri_T	Número de Richardson asociado con la diferencia de las temperaturas
Ri_*	Número de Richardson asociado con la diferencia de las densidades
Ri_f	Número de Richardson asociado con la velocidad frontal

R	Radio de la fuente de gas (m)
R_h	Radio interno de la cabeza en el flujo de la densidad conducida (m)
R_p	Radio de la fuente primaria (m)
ρ	Densidad de mezcla de aire-gas (Kg/m^3)
ρ_a	Densidad del aire (Kg/m^3)
ρ_e	Densidad del gas liberado (Kg/m^3)
S_y	Parámetro horizontal del escalamiento de la concentración (m)
S_z	Parámetro vertical del escalamiento de la concentración (m)
δ_L	Constante empírica
$\sigma_{x,a}$	Coefficiente de dispersión Pasquill-Gifford en dirección x
$\sigma_{y,a}$	Coefficiente de dispersión Pasquill-Gifford en dirección y
$\sigma_{z,a}$	Coefficiente de dispersión Pasquill-Gifford en dirección z
t_a	Tiempo promedio (s)
$t_{a,i}$	Tiempo promedio asociado con los coeficientes de dispersión (s)
T	Temperatura asociada con la entalpía de la capa de la fuente ($^{\circ}\text{K}$)
$T_{c,L}$	Temperatura asociada con la entalpía de la capa promedio ($^{\circ}\text{K}$)
T_s	Temperatura de la superficie ($^{\circ}\text{K}$)
u_{EFF}	Velocidad advectiva de la nube (m/s)
u_f	Velocidad frontal de la nube (m/s)
u_*	Velocidad de fricción (m/s)
u_x	Velocidad del viento a lo largo del eje x (m/s)
V_H	Velocidad de la transferencia de calor (0.0125 m/s) en la ec. (2.38) (m/s)
w_*	Velocidad convectiva escalar
w_e	Velocidad vertical del arrastre asociado con H_L (m/s)
w'_e	Velocidad de arrastre asociado con H_{EFF} (m/s)
$w_{c,p}(t)$	fracción en masa del contaminante en la fuente principal.
ϵ	Coefficiente empírico
x,y,z	Coordenadas cartesianas (m)

CAPITULO III

Los requerimientos mínimos para el diseño y operación de una planta de licuefacción se encuentran establecidos en el NFPA 59A, lo cual refleja la experiencia acumulativa de la industria de GNL.

La ubicación de la planta debe considerar varios factores como precauciones para establecer la distancia mínima entre recipientes de GNL, tanques de almacenamiento de refrigerantes inflamables, estructuras y equipos de planta, ya sea con respecto al límite de propiedad y entre ellos.

La preparación del lugar deberá incluir todas aquellas medidas de prevención para retener derrames de GNL, refrigerantes inflamables y líquidos inflamables dentro del límite de propiedad y de cursos de agua de drenaje superficial.

Se deben tomar precauciones para minimizar la posibilidad de que descargas accidentales de GNL pongan en peligro la propiedad o equipos de procesos y estructuras importantes o que alcancen cursos de agua, de acuerdo con uno de los siguientes métodos¹:

- Un área estanca alrededor del(de los) recipiente(s) formado(s) por una barrera natural, un dique, paredes estancas o una combinación de ellas.
- Un área estanca formada por una barrera natural, un dique, excavación, pared estanca o una combinación de ellas, más un sistema de drenaje natural o artificial que rodee al recipiente.
- Si el recipiente es construido debajo o parcialmente debajo del nivel del terreno, un área estanca formada por una excavación.

Las áreas de procesos; de vaporización; de transferencia de GNL, refrigerantes inflamables y líquidos inflamables, y las áreas que rodean los tanques de almacenamiento de refrigerantes inflamables y líquidos inflamables deben ser provistas con contenciones de tal manera que minimice la posibilidad de derrames accidentales o fugas que pongan en peligro las estructuras o equipos importantes, o propiedades adyacentes o que puedan alcanzar cursos de agua.

El área estanca que sirve a los recipientes de GNL², al área de procesos, al área de vaporización o de transferencia de GNL, deberán tener una capacidad volumétrica igual al

¹ Artículos 2.2.1.2 del NFPA 59A

mayor volumen de GNL, que pueda ser descargado dentro del área durante un periodo de 10 minutos producido por una sola fuga, o durante un periodo de tiempo mas corto basado en una vigilancia demostrada y un sistema de paro automático aceptable.

El espaciamiento del área estanca de un tanque de almacenamiento de GNL al límite de propiedad debe ser tal que, en el caso de un derrame de GNL especificado en Derrames de Diseños, la concentración promedio de metano en el aire de 50% del límite de inflamabilidad inferior no sobrepase el límite de propiedad de la planta.

Con el fin de minimizar la posibilidad de que una mezcla de vapores inflamables de un derrame de GNL alcance el límite de una propiedad, la distancia de la dispersión de la mezcla inflamable debe ser determinada.

Para proporcionar una mejor proyección de las magnitudes de las distancias que podrían establecerse, se tomará como ejemplo el área de almacenamiento de GNL del proyecto de exportación de gas natural que se construye en el País, debido a que es el punto más crítico de la instalación por contar con un mayor volumen de líquido inflamable.

3.1 Descripción General de la Planta de GNL

La Planta de Licuefacción de Gas Natural se localizará en un predio de 521 hectáreas de terreno costero árido denominado Pampa Melchorita, la cual esta ubicada al sur de Lima entre los kilómetros 167 y 170 de la carretera Panamericana Sur.

El gas natural licuado en la planta de proceso será enviado para su almacenamiento a la temperatura criogénica de -162.7°C y presión ligeramente sobre la atmosférica de 80 milibares manométricos (1.093 Bara, ya que la presión atmosférica a nivel del mar es de 1.013 Bara) a los containers de GNL.

El proyecto comprende lo siguiente:

- Instalaciones de Procesos (área de recepción de planta, remoción de gas ácido, áreas de deshidratación y de remoción de mercurio, área de licuefacción y refrigeración).
- Instalaciones de almacenamiento de GNL y de transferencia de carga.
- Instalaciones de facilidades auxiliares (almacenamiento de refrigerantes, generación de energía, sistema de gas combustible, sistema de suministro de agua de mar).
- Sistemas de antorcha de campo, sistema de agua dulce, sistema de agua potable y sistema de agua desmineralizada.

² Se trata de recipientes con llenado por el tope sin penetraciones debajo del nivel del líquido. Ver tabla 2.2.3.5 del NFPA 59A

- Instalaciones marítimas (Atracadero de GNL, acceso sobre caballetes, rompeolas, atracadero de remolcadores, muelle de servicios)
- Edificios y viviendas localizadas dentro del área del proyecto (edificios vinculados al proceso, edificios de apoyo administrativo, edificio de la comunidad permanente)

3.2 Componentes del área de Almacenamiento de GNL

2 containers de contenimiento simple que almacenará GNL, con una capacidad de 130000m^3 (817.8Kbbls) cada uno, se encontraran distanciadas aproximadamente 139 metros de los contenedores interiores o de 137 metros entre cubiertas exteriores. Ver Figuras 3.1 y 3.2.

Cada tanque de almacenamiento será provisto de cuatro electrobombas centrifugas sumergidas de carga o embarque de GNL, sumergida al fondo de las columnas a 1.5m del fondo y soportadas por su tubería de descarga desde el nivel de la plataforma. Tendrán una capacidad de $1610\text{ m}^3/\text{hr}$ y una presión de descarga de 3.87 Barg (82 m) con potencia de 325 HP c/u.

Asimismo, contará con un área de confinamiento conformada por un dique de contención más un sistema de drenaje que rodeará a cada contenedor de GNL³, dicho drenaje será abierto (como canales) y direccionado al dique de contención.

El área aislada permite el uso de tanques de contenimiento simple (contenimiento primario) y de una poza de contención (contenimiento secundario) en la parte baja del acantilado lo que brindará gran protección al personal y a los equipos.

Cualquier derrame de GNL desde los tanques de almacenamiento será drenado fuera del área de almacenamiento hacia una poza de contenimiento remota, sin posibilidad de ingreso a los sistemas de drenaje pluvial de ninguna población y lejos de los límites de propiedad e instalaciones de propiedades de terceros. El volumen de la poza de contención remota es de 150000 m^3 .

El derrame de diseño se ha considerado para solo 10 minutos a caudal de bombeo pleno, lo cual representa para las 4 bombas de despachos sumergidas de $1610\text{ m}^3/\text{h}$ c/u en cada tanque de GNL, lo cual hace un caudal pleno de $6440\text{ m}^3/\text{h}$ y un derrame máximo en 10 minutos de 1073.4 m^3 (menor al 1% de la capacidad de $130\ 000\text{ m}^3$)

³ Según Artículo 2.2.2.3 del NFPA 59A.

CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTENEDORES DE GNL DEL PROYECTO	
Tipo de contenedor: Containment Simple, Fondo plano, servicio de baja temperatura (LTS)	Vertical
Diámetro interno del cilindro interior de acero al 9 % Ni	76 m
Diámetro interno del cilindro exterior de acero al carbono	78 m
Diámetro losa de concreto sobre pedestales: soporte de ambos cilindros	81 m
Espacio anular de perlita y manta resiliente de fibra de vidrio.	1 m aprox.
Altura del cilindro interior	32 m
Altura del cilindro exterior	37 m
Altura de Diseño de Líquido GNL (DLL)	30.3 m
Espacio entre DLL y techo aislante suspendido (Freeboard)	1.7 m
Espesor anillo de concreto bajo cilindros y aislamiento de espuma celulosa de vidrio bajo plancha de fondo	1.3 m
Espesor de la losa de concreto soportada sobre pedestales de cimentación	1.0 m
Altura de pedestales con aisladores sísmicos pendulares de fricción sobre cimentación de losa de base (Mat foundation)	2.0 m
Número de cojinetes de fricción pendulares antisísmicos	Diseño detallado
Capacidad Neta Nominal de GNL m ³	130,000
Techo auto soportado en cilindro exterior: Tipo y Material	Sombrilla A/C
Radio de curvatura del techo sombrilla de acero:	63 m
Aislamiento de mantas de Fibra de vidrio: Tipo	Suspendido
Presión de Diseño del tanque	163 mbarg
Densidad de líquido de diseño Kg/m ³	470
Temperatura de Almacenamiento	-163 °C
Temperatura de Diseño de Tanque	-170 °C
Temperatura Ambiental externa	+32 °C
Diámetro Operativo criogénico Dc	75.863 m
Fondos no bombeables (Pump Heel)	1.5 m
Cubierta libre superior – Freeboard	1.7 m
Altura operativa neta = 32 – 1.5 – 1.7	28.8 m
Volumen neto de GNL Contenido = $\pi/4 \times 75.863^2 \times 28.8$	179 m ³
Tasa de Desprendimiento de gas de Diseño (Design BOR)	0.05%Vol /día
Número de Electrobombas Sumergidas y columnas de bombas por contenedor	4
Diámetro Interno de Columnas con válvula check de cada Bomba Sumergida	905 mm
Número de válvulas de alivio por presión interior	3 + 1 reserva
Válvulas de alivio de vacío	Si
Penetraciones de líneas e instrumentación: Por el techo soportadas en techo sobriba de acero, atraviesan el aislamiento colgado del techo si es necesario	Por el techo sobre nivel DLL

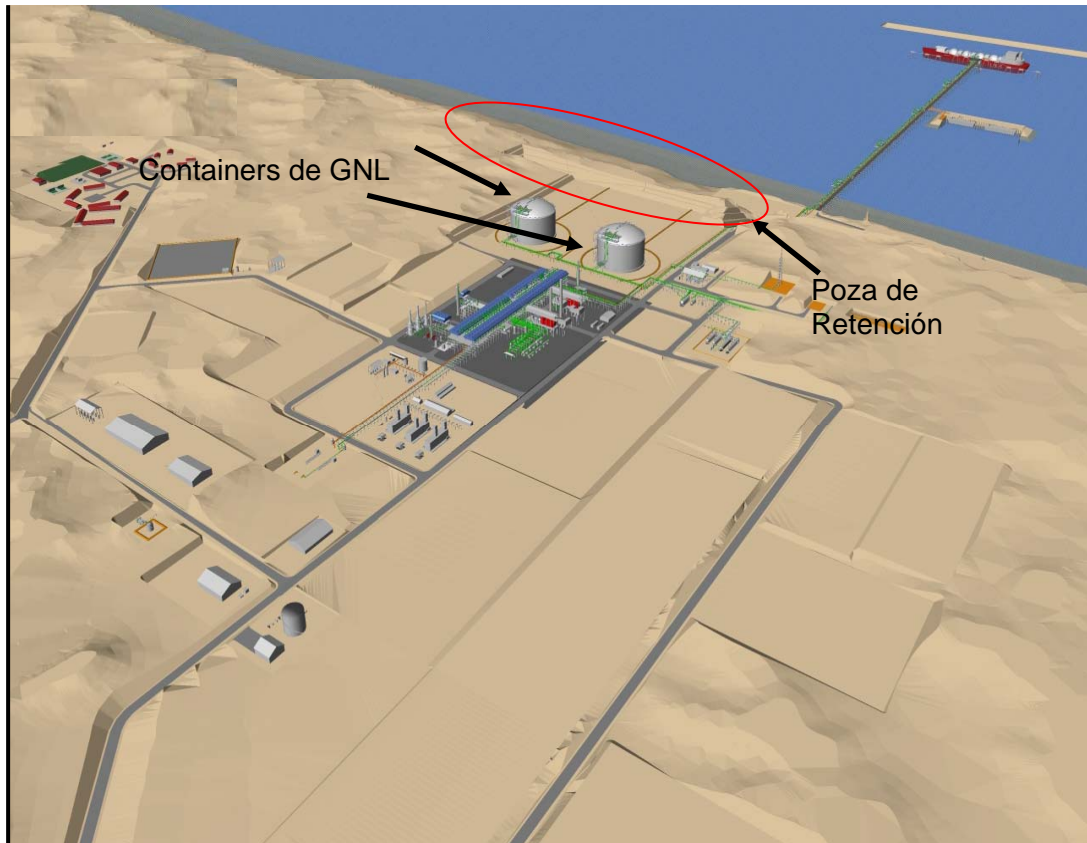


FIG. 3.1. VISTA DE LA FUTURA PLANTA DE LICUEFACCIÓN



FIG. 3.2. VISTA DE LOS CONTAINERS DE GNL

3.3 Comportamiento de un derrame de GNL

Inicialmente la nube de vapores de GNL será más pesada que el aire y permanecerá próxima al suelo o mar. La nube se desplazará en la dirección en que este soplando el viento y el mismo causará que la nube se mezcle con una mayor cantidad de aire.

A medida que se entremezcla con el aire, el gas natural se calienta y cerca de $-160\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-106\text{ }^{\circ}\text{C}$) comenzará a tornarse más ligero que el aire. Cuando la nube de gas se vuelve más ligera se elevará⁴ y dispersará más rápidamente en la atmósfera. Ver Figuras 3.3, 3.4 y 3.5.

El gas natural y el aire no se mezclan de forma uniforme en la nube de manera tal que la proporción de la mezcla de aire y gas variará en diferentes porciones de la nube.

El gas frío de GNL más pesado que el aire puede viajar en superficie por cierta distancia hasta alcanzar un punto de ignición y producir una retroflama⁵ hacia la poza o derrame líquido de origen. El incendio en la fuente de los vapores consumirá el derrame y detendrá la formación de la nube.

A medida que la nube de GNL se calienta se eleva en forma de pluma en la dirección del viento por una distancia considerable hasta que el derrame líquido de GNL se agota.

La nube es potencialmente combustible hasta que la dilución con aire finalmente reduce su concentración por debajo de su LFL (5 % vol. en aire). Por seguridad se emplea el criterio de 50% del LFL, o sea 2.5 % vol, como límite de la envolvente segura.

Un derrame de GNL en contacto con estructuras de acero al carbono convencional puede causar fallas por fragilidad del metal debido a su temperatura criogénica. Este riesgo puede ser controlado mediante sensores y alarmas de baja temperatura.

El GNL sujeto a una ganancia súbita de calor puede experimentar una fase de transición acelerada produciendo una explosión por expansión física sin combustión que puede dañar el recipiente contenedor como son los tanques o compartimentos Tanqueros. Este riesgo es teóricamente posible cuando se da el contacto del GNL con grandes cantidades de agua, bajo condiciones que favorezcan una rápida transferencia de calor.

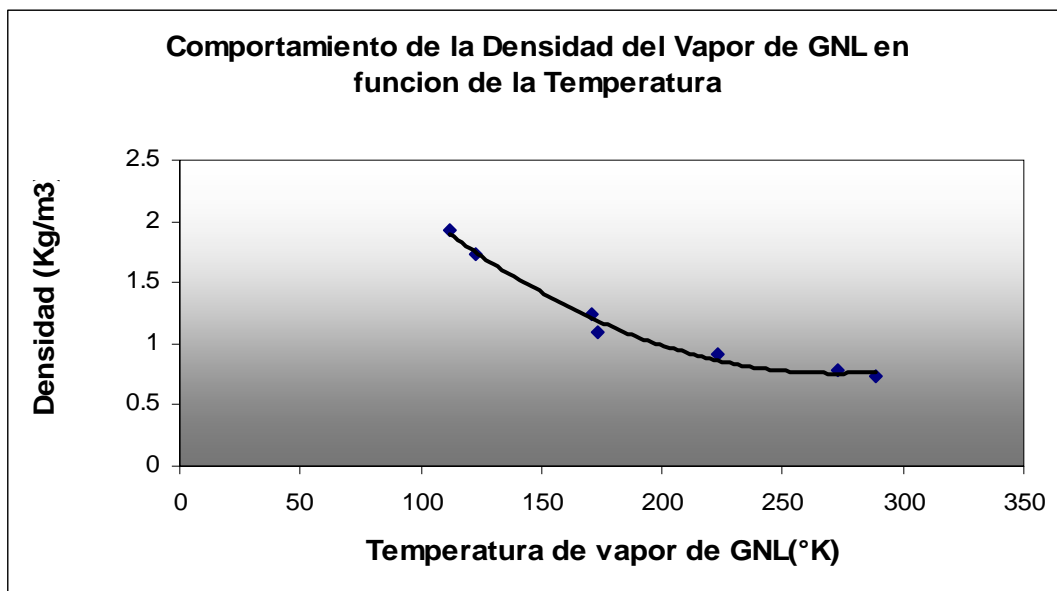
El GNL al vaporizarse condensa la humedad del aire formando una nube blanquecina visible. La nube real de vapores de GNL es, sin embargo, mayor que la porción visible.

⁴ El GNL se elevará en forma de pluma

⁵ combustión con movimiento lento de llama

Los vapores fríos de GNL son inicialmente más pesados que el aire, pero, a medida que se calientan por contacto con el aire atmosférico (Densidad del aire es de 1.224 Kg/m³ a 15.56 °C), se hacen más ligeros tal como se puede observar en la siguiente tabla:

Temperatura vapor de GNL, °C	Densidad Vapor de GNL, Kg/m ³	Densidad del Aire a 15.56°C, Kg/m ³	Densidad Relativa de vapor de GNL Aire = 1
- 161	1.92	1.224	1.56
- 150	1.74	1.224	1.42
- 102	1.25	1.224	1.02
- 100	1.09	1.224	0.89
- 50	0.92	1.224	0.75
0	0.78	1.224	0.64
+ 15.56	0.74	1.224	0.60



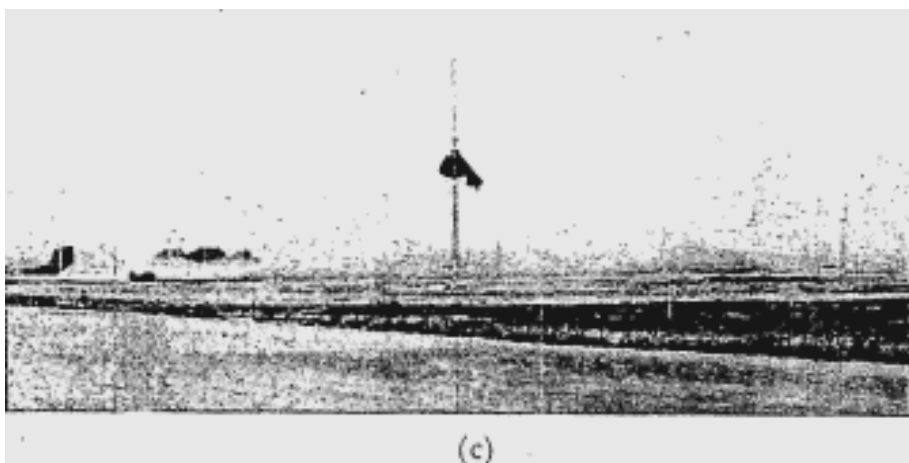
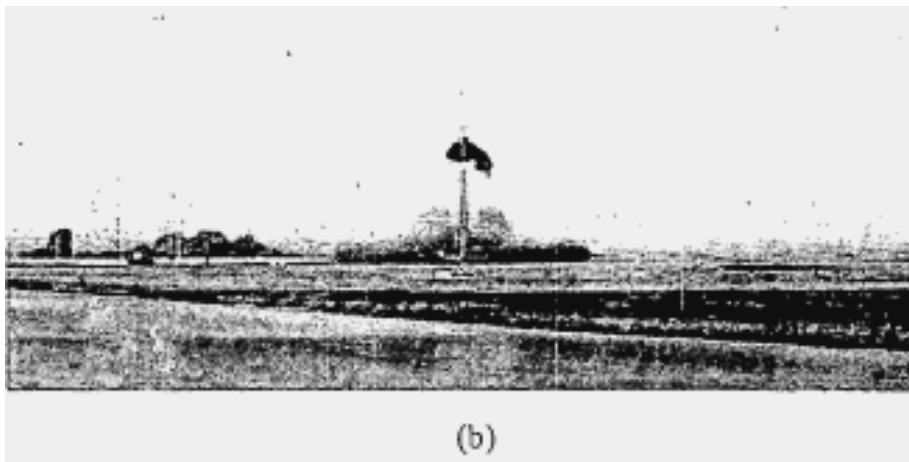
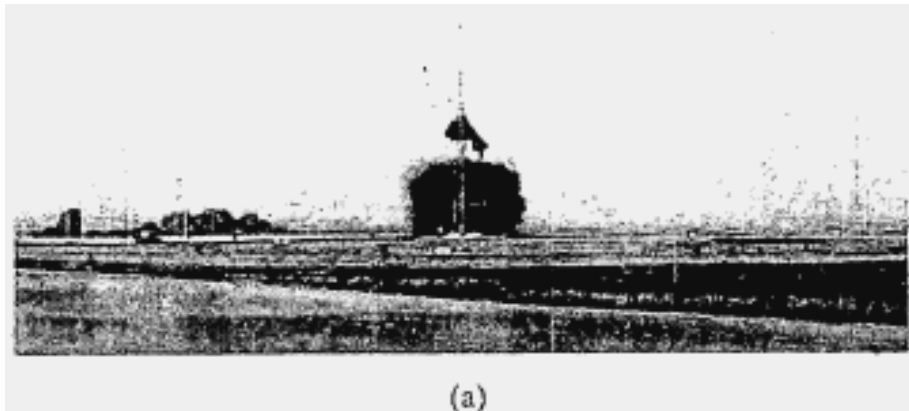
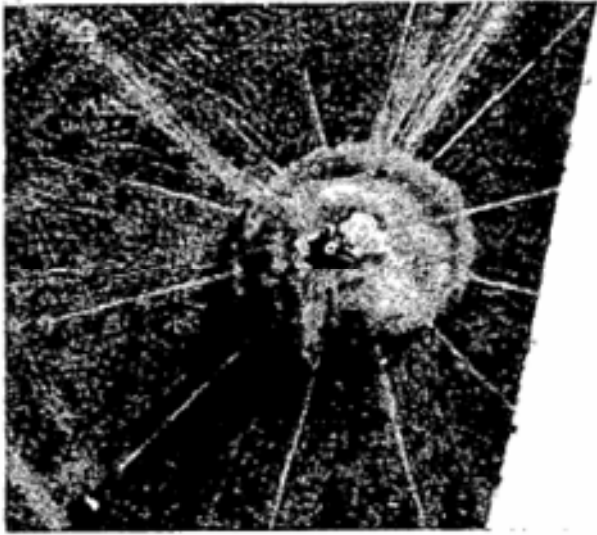


Figura 3.3: vistas laterales del comportamiento de la nube de GNL en la Isla de Thorney (ensayo # 8) instante de la liberación a), después de 3 segundos b), y después de 24 segundos c)



(a)

Figura 3.4: Vistas desde arriba de la nube de GNL en la Isla de Thorney (ensayo #8), alrededor de 3 segundos de ser liberado a), después de 5.5 segundos b), y después de 15.5 segundos c).



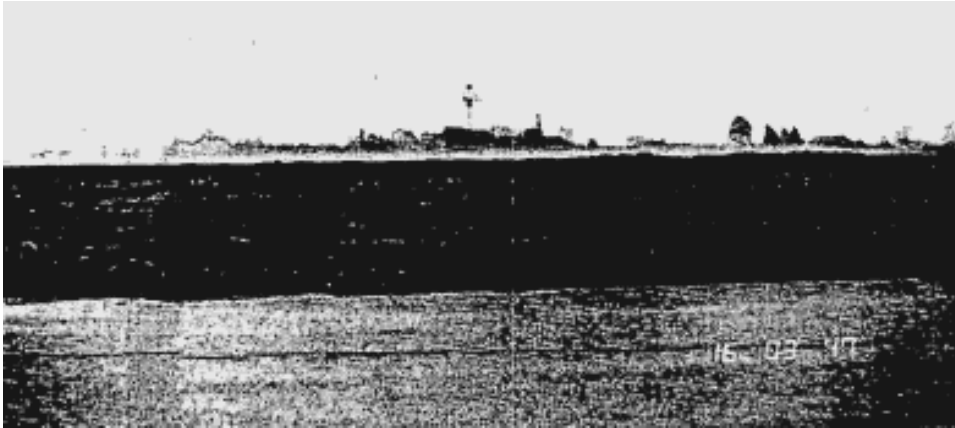


Figura 3.5: vista lateral de la nube de GNL en la Isla de Thorney (prueba 34), cerca de 100 segundos después de liberado.

3.3.1 Lllamarada - Retroflama

Equivalente a un incendio o ignición de nube de vapor, es una llama de difusión progresiva o de premezcla con una velocidad lenta del frente de llama y típica aunque no exclusiva de las mezclas próximas a su punto de inflamabilidad alto.

No produce presión de choque, sobrepresión o detonación. Es el resultado de la ignición tardía de una nube de vapor parcialmente dispersada. Es capaz de producir incendios secundarios y severas quemaduras al personal en su recorrido.

Una vez iniciado este incidente no puede ser detenido hasta el agotamiento del líquido criogénico, fuente de los vapores inflamables.

La persistencia de un derrame de hidrocarburos con una modalidad de dispersión lenta de sus vapores puede causar este tipo de ocurrencia.

Las medidas de prevención para minimizar este riesgo son similares a las indicadas para controlar una UVCE⁶.

3.4 INFORMACIÓN DE CONDICIONES CLIMATICAS DE LA ZONA

Humedad Relativa

La humedad relativa media mensual registrada en la Estación de Cañete, varía de 82 a 88 por ciento, con los valores máximos registrados entre Junio y Setiembre y los valores mínimos registrados entre Febrero y Marzo.

⁶ UVCE: Explosiones de nubes de vapor no confinadas (Unconfined Vapour Cloud Explosion)

Velocidad de los vientos

Los datos de viento de la zona se obtuvieron de los Aeropuertos de Pisco y Lima. Dichos aeropuertos se localizan aproximadamente a 63 Km. al sur y 167 Km. al norte del sitio del Proyecto. Según los datos evaluados, se registró una velocidad media del viento de 3.48 m/s en la Estación de Lima con una dirección de viento predominante del sur. En Pisco la velocidad media del viento registrada fue de 4.25 m/seg con una dirección del viento predominante del sur.

Temperatura

La temperatura media mensual del área del Proyecto (Basada en datos de la Estación Meteorológica de Cañete), es aproximadamente 19.6 °C con temperaturas medias mensuales que varían de un mínimo de 16.5 °C a un máximo de 23.7 °C.

Con respecto a la dispersión de vapores inflamables de un derrame de GNL sin incendio, en el siguiente capítulo se demostrará a través de las corridas para cada caso propuesto, las cuales se encuentran dentro de lo imaginable, las distancias que podrían alcanzar por la dispersión de vapor GNL como también los contornos de las concentraciones.

CAPITULO IV

Como se ha visto en los capítulos anteriores, la dispersión atmosférica de la nube se produce como resultado de la evaporación del GNL, cuando éste entra en contacto con el agua o la tierra.

Con el DEGADIS se pretende simular el comportamiento de la dispersión de los vapores de GNL, de ocurrido el derrame sobre tierra.

Para la determinación de la dispersión debe, como mínimo, tomarse en cuenta:

1. El diámetro de la piscina de evaporación.
2. La tasa de evaporación, que es un parámetro calculado a través de otro programa.
3. Propiedades del vapor, que se encuentra incluido en el programa.
4. La naturaleza del terreno (rugosidad, conductividad térmica, calor específico, densidad, etc)
5. La temperatura del terreno o el agua.
6. Las condiciones atmosféricas (temperatura ambiental, humedad, velocidad de viento)
7. Estabilidad atmosférica o gradiente de temperatura.
8. Ubicación topográfica.
9. Si el modelo es solo para sistemas de estado estacionario, la tasa de flujo de gas desde la fuente de gas debe ser asumido igual a la máxima tasa dada por el modelo de evaporación.

La simulación de la dispersión atmosférica debe estar basada en las condiciones atmosféricas que da como resultado la distancia más lejana para el límite de inflamabilidad mas bajo. Si no hubiese información disponible las siguientes consideraciones atmosféricas deben considerarse:

- Estabilidad atmosférica F (PASQUILL) o equivalente gradiente de temperatura, para una velocidad de viento de 2 m/s y humedad relativa del 50%.

La modelación de este programa permitirá la determinación de:

- Los contornos de concentración
- La distancia al límite de inflamabilidad más bajo.

En el estudio de difusión, es convencional utilizar la velocidad promedio sobre los 10 minutos y además tomar como altura referencial 10 m sobre la superficie del terreno.

La rugosidad de la superficie afecta la velocidad media y turbulenta del flujo del ambiente en la cual el gas denso es liberado. La influencia de la superficie rugosa, es relevante a la dispersión de gases densos.

El efecto total de la rugosidad de la superficie produce retardo en la extensión de la pluma o nube horizontal, flotabilidad inducida entre la pluma y el ambiente como resultado de la turbulencia de la nube y el ambiente. La combinación de estos efectos es probablemente, pero necesario, para reducir la distancia corriente abajo a una concentración dada y reducir la dimensión corriente cruzada también para una concentración dada.

4.1 ESCENARIOS A SIMULAR

Los cálculos que determinan la dispersión de vapor de GNL, indicará el grado de los límites máximos de la dispersión y mostrará que el grado del peligro de la nube de vapor de GNL esta contenido en los límites de propiedad de la instalación de la planta de licuefacción de gas natural.

Se tratará de simular la ocurrencia de los escenarios 2 y 3 que podrían suscitarse en una planta de licuefacción de gas natural, asumiendo los sucesos en estado estacionario.

Para el escenario 1, la evaluación se realizó en estado transitorio por la variación de la tasa de evaporación del GNL determinado.

Es importante señalar que las circunstancias exactas de una liberación inesperada (tamaño del agujero, condiciones atmosféricas, altura y orientación de la liberación, etc.) no se conocen antes de que sucedan, por lo tanto, los tres escenarios identificados se desarrollarán para asistir en la estimación de las zonas de peligro en la instalación.

Escenario 1: Dispersión de Vapor desde la zona estanca remota de los tanques

A. Descripción del Problema:

Se asume la fuga de un líquido de uno de los tanques de almacenamiento de GNL debido a una falla de la tubería de la descarga del tanque. El flujo de descarga de las 4 bombas es de 5,500 m³/h. La fuga ocurrió por diez minutos. Se asume que la fuga está orientado horizontalmente para ser drenado en el sumidero de contención. Los tanques de GNL son de contención simple con 4 bombas en el interior del tanque y descargan por el techo de los tanques.

B. Modelamiento de los parámetros:

Presión: 1.09 bar absoluta

Temperatura: -162°C.

Diámetro de tubería: 30 pulgadas

Diámetro de la Poza: 160 m

Tasa de evaporación de GNL: 15.45 Kg/s

C. Condiciones Atmosféricas:

Las condiciones atmosféricas siguientes fueron asumidas para un análisis realista, dentro de lo conservador:

Temperatura del aire ambiental: 25°C

Humedad relativa: 90%

Clase de estabilidad Pasquill-Gifford: F

Velocidad del viento: 2 m/s

D. Otras consideraciones:

Tipo de fuga: transitorio

Altura de interés: 0.5 m

Radio de la fuente: 15 pulgadas

50% LFL y LFL

Se tuvo interés en 50% LFL para calcular la posible concentración de la nube principal que podría resultar en ignición y flashback desde una distancia mayor que la predecida al LFL.

E. Resultados:

La corrida se muestra en la página siguiente.

- Distancia a 50% LFL: 320.35 metros

- Ver en esquema de la planta las distancias de seguridad de la poza de contención.

***** 16-DEC-2004 9: 0:36.30 *****

Data input on 16-DEC-2004 9: 0: 8.45
 Source program run on 16-DEC-2004 9: 0:36.30

0 TITLE BLOCK

Peru LNG
 Vapor Dispersion - Sump (40m x 429m) modeled as 40m x 160m sections
 5500 m3/hr flow rate
 Weather data from Camisea LNG

Wind velocity at reference height 2.01 m/s
 Reference height 10.00 m
 0 Surface roughness length 3.000E-02 m
 0 Pasquill Stability class F
 0 Monin-Obukhov length 14.3 m
 Gaussian distribution constants
 Specified averaging time .00 s
 Deltay .02544
 Betay .90000
 0 Wind velocity power law constant Alpha .38616
 Friction velocity .07725 m/s
 0 Ambient Temperature 298.15 K
 0 Surface Temperature 298.15 K
 Ambient Pressure 1.000 atm
 Ambient Absolute Humidity 1.934E-02 kg/kg BDA
 Ambient Relative Humidity 90.00 %

Adiabatic Mixing:	Mole fraction	CONCENTRATION OF C kg/m**3	GAS DENSITY kg/m**3	Enthalpy J/kg	Temperature K
	.00000	.00000	1.17102	.00000	298.15
	.00889	.00587	1.17394	-1937.9	296.32
	.02648	.01758	1.17206	-5813.8	295.08
	.05234	.03509	1.16959	-11628.	293.15
	.08592	.05835	1.16700	-19379.	290.41
	.12649	.08738	1.16505	-29069.	286.66
	.16558	.11647	1.16474	-38759.	282.51
	.21065	.15170	1.16699	-50386.	276.93
	.27475	.20491	1.17093	-67928.	268.30
	.31532	.24071	1.17419	-79456.	262.46
	.36061	.28517	1.18822	-93021.	253.65
	.40385	.33165	1.20600	-1.06587E+05	244.38
	.45094	.38725	1.22937	-1.22090E+05	233.72
	.49571	.44541	1.25468	-1.37594E+05	223.36
	.54351	.51381	1.28451	-1.55035E+05	212.25
	.59370	.59349	1.31887	-1.74415E+05	200.67
	.64106	.67718	1.35436	-1.93794E+05	189.85
	.69016	.77408	1.39474	-2.15111E+05	178.76
	.73639	.87636	1.43665	-2.36429E+05	168.43
	.78383	.99446	1.48427	-2.59684E+05	157.95
	.82844	1.11988	1.53408	-2.82939E+05	148.21
	.87383	1.26466	1.59077	-3.08132E+05	138.40
	.91646	1.41953	1.65062	-3.33326E+05	129.29
	.95657	1.58544	1.71399	-3.58519E+05	120.80
	1.00000	1.79200	1.79200	-3.87588E+05	111.70

0 Specified Gas Properties:

Molecular weight: 16.040
 Release temperature: 111.70 K
 Density at release temperature and ambient pressure: 1.7920 kg/m**3
 Mean heat capacity constant: 5.60000E-08
 Mean heat capacity power: 5.0000
 Upper mole fraction contour: .15000
 Lower mole fraction contour: 2.50000E-02

160sfr.lis
 Height for isopleths: .50000 m

Source input data points

Initial (pure contaminant) mass in cloud: .00000 kg

Time s	Contaminant Mass Rate kg/s	Source Radius m	Contaminant Mass Fraction kg contam/kg mix	Temperature K	Enthalpy J/kg
.00000	15.450	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
116.00	15.550	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
232.00	15.640	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
372.00	15.750	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
512.00	15.860	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
653.00	15.970	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
793.00	16.070	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
933.00	16.180	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
1074.0	16.280	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
1214.0	16.380	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
1354.0	16.470	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
1495.0	16.570	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
1635.0	16.670	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
1775.0	16.760	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
1916.0	16.860	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
2056.0	16.950	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
2196.0	17.030	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
2337.0	17.120	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
2477.0	17.210	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
2617.0	17.300	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
2758.0	17.390	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
2898.0	17.470	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
3038.0	17.550	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
3179.0	17.630	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
3319.0	17.710	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
3459.0	17.790	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
3600.0	17.870	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
3740.0	17.950	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
3880.0	18.030	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
4021.0	18.110	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
4161.0	18.190	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
4301.0	18.270	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
4442.0	18.350	80.000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
4443.0	.00000	.00000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
4444.0	.00000	.00000	1.0000	111.70	-3.87588E+05

0 Calculation procedure for ALPHA: 1
 0 Entrainment prescription for PHI: 3
 0 Layer thickness ratio used for average depth: 2.1500
 0 Air entrainment coefficient used: .590
 0 Gravity slumping velocity coefficient used: 1.150
 0 NON Isothermal calculation
 0 Heat transfer calculated with correlation: 1
 0 Water transfer not included

***** CALCULATED SOURCE PARAMETERS *****

Time sec	Gas Radius m	Height m	Qstar kg/m**2/s	SZ(x=L/2.) m	Mole frac C	Density kg/m**3	Temperature K	Rich No.
44.4200	80.0000	.000000	7.703245E-04	5.02755	3.312523E-02	1.17143	294.592	.000000
3109.40	80.0000	.000000	8.748802E-04	5.30218	3.492455E-02	1.17126	294.458	.000000
4442.00	80.0000	.000000	9.126541E-04	5.40334	3.548316E-02	1.17120	294.416	.000000

0 Sorted values for each specified time.
 0 X-Direction correction was applied.
 Coefficient: .17000
 Power: .97000
 Minimum Distance: 50.000 m

Time after beginning of spill sec	Mole Fraction	Concentration (kg/m**3)	Density (kg/m**3)	Gamma	Temperature (K)	Half Width (m)	Sz (m)	Sy (m)	Width at z= .50 m to: 2.50 mole% 15.0 (m)
122.	2.753E-02	1.831E-02	1.1716	3.126E-02	295.	58.3	5.61	9.16	60.6
357.	1.187E-02	7.833E-03	1.1726	.206	296.	93.0	7.04	26.9	
635.	5.390E-03	3.544E-03	1.1715	.134	297.	129.	9.37	43.3	
948.	1.140E-03	7.476E-04	1.1711	5.913E-02	298.	118.	15.1	57.0	

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: 259.26 kg.

The mass of contaminant above the LLC is: 259.26 kg. 160mfr.lis

0 Distance	Time after beginning of spill	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= 2.50	.50 m to: 15.0
mole%	(m)		(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
165.	1.220E-02	8.049E-03	1.1715	6.512E-02	295.	62.1	6.17	13.3			
409.	1.038E-02	6.846E-03	1.1723	.190	297.	102.	7.32	30.1			
695.	4.933E-03	3.243E-03	1.1714	.127	297.	134.	10.0	46.5			
1.014E+03	2.619E-03	1.719E-03	1.1712	9.118E-02	298.	152.	13.9	62.2			
1.362E+03	1.579E-03	1.036E-03	1.1711	6.795E-02	298.	162.	18.3	77.2			
1.735E+03	9.436E-04	6.190E-04	1.1710	5.230E-02	298.	167.	22.9	91.5			
2.130E+03	3.370E-04	2.210E-04	1.1710	1.441E-02	298.	117.	30.8	97.3			

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: .00000 kg.
The mass of contaminant above the LLC is: .00000 kg.

0 Distance	Time after beginning of spill	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= 2.50	.50 m to: 15.0
mole%	(m)		(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
210.	1.001E-02	6.593E-03	1.1717	9.637E-02	296.	67.1	6.62	16.8			
464.	9.058E-03	5.968E-03	1.1721	.175	297.	111.	7.66	33.5			
756.	4.392E-03	2.886E-03	1.1714	.121	298.	140.	10.6	49.8			
1.082E+03	2.394E-03	1.572E-03	1.1712	8.873E-02	298.	157.	14.6	65.5			
1.435E+03	1.484E-03	9.734E-04	1.1711	6.544E-02	298.	165.	19.1	80.2			
1.812E+03	1.010E-03	6.625E-04	1.1711	5.071E-02	298.	169.	23.8	94.5			
2.212E+03	7.350E-04	4.821E-04	1.1710	3.939E-02	298.	170.	28.6	108.			
2.632E+03	5.465E-04	3.584E-04	1.1710	3.010E-02	298.	169.	33.4	121.			
3.072E+03	3.641E-04	2.388E-04	1.1710	2.301E-02	298.	167.	38.4	134.			
3.529E+03	1.695E-04	1.111E-04	1.1710	-5.860E-03	298.	93.5	48.4	132.			

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: .00000 kg.
The mass of contaminant above the LLC is: .00000 kg.

0 Distance	Time after beginning of spill	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= 2.50	.50 m to: 15.0
mole%	(m)		(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
257.	8.519E-03	5.610E-03	1.1717	.130	296.	74.4	6.87	20.2			
519.	7.936E-03	5.226E-03	1.1719	.162	297.	118.	8.11	36.7			
819.	3.954E-03	2.598E-03	1.1713	.113	298.	145.	11.4	53.0			
1.150E+03	2.206E-03	1.448E-03	1.1711	8.274E-02	298.	159.	15.5	68.4			
1.508E+03	1.390E-03	9.119E-04	1.1711	6.426E-02	298.	169.	19.9	83.4			
1.890E+03	9.585E-04	6.287E-04	1.1710	5.031E-02	298.	173.	24.6	97.7			
2.294E+03	7.057E-04	4.629E-04	1.1710	3.967E-02	298.	174.	29.3	111.			
2.718E+03	5.450E-04	3.575E-04	1.1710	2.933E-02	298.	171.	34.3	124.			
3.161E+03	4.339E-04	2.846E-04	1.1710	2.252E-02	298.	169.	39.2	137.			
3.622E+03	3.420E-04	2.243E-04	1.1710	1.655E-02	298.	164.	44.2	149.			
4.099E+03	2.441E-04	1.600E-04	1.1710	1.107E-02	298.	159.	49.3	161.			
4.592E+03	1.336E-04	8.759E-05	1.1710	6.748E-03	298.	153.	54.4	173.			

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: .00000 kg.
The mass of contaminant above the LLC is: .00000 kg.

0 Distance	Time after beginning of spill	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= 2.50	.50 m to: 15.0
mole%	(m)		(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
80.9	4.281E-02	2.869E-02	1.1703	-2.426E-02	294.	61.7	4.48	1.27		62.6	
306.	1.478E-02	9.770E-03	1.1726	.164	296.	82.3	7.09	23.4			

Distance (m)	Mole Fraction	Concentration (kg/m ³)	Density (kg/m ³)	Gamma	Temperature (K)	Half Width (m)	Sz (m)	Sy (m)	Width at z = .50 m to 15.0 mole% (m)
576.	6.991E-03	4.601E-03	1.1717	.152	297.	125.	8.64	40.0	
883.	3.565E-03	2.342E-03	1.1713	.108	298.	149.	12.1	56.1	
1.219E+03	2.040E-03	1.339E-03	1.1711	8.035E-02	298.	163.	16.2	71.6	
1.582E+03	1.310E-03	8.594E-04	1.1711	6.179E-02	298.	171.	20.7	86.4	
1.969E+03	9.155E-04	6.005E-04	1.1710	4.718E-02	298.	174.	25.5	100.	
2.377E+03	6.805E-04	4.463E-04	1.1710	3.673E-02	298.	174.	30.3	114.	
2.805E+03	5.275E-04	3.459E-04	1.1710	2.968E-02	298.	174.	35.1	128.	
3.252E+03	4.232E-04	2.776E-04	1.1710	2.310E-02	298.	172.	40.0	140.	
3.716E+03	3.460E-04	2.269E-04	1.1710	1.746E-02	298.	168.	44.9	153.	
4.196E+03	2.769E-04	1.816E-04	1.1710	1.093E-02	298.	160.	50.2	164.	
4.692E+03	2.000E-04	1.312E-04	1.1710	6.650E-03	298.	154.	55.3	176.	
5.203E+03	1.140E-04	7.475E-05	1.1710	2.709E-03	298.	147.	60.5	187.	

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: 939.29 kg.
 The mass of contaminant above the LLC is: 939.29 kg.

Distance (m)	Mole Fraction	Concentration (kg/m ³)	Density (kg/m ³)	Gamma	Temperature (K)	Half Width (m)	Sz (m)	Sy (m)	Width at z = .50 m to 15.0 mole% (m)
121.	2.871E-02	1.910E-02	1.1715	2.637E-02	295.	57.7	5.88	9.08	60.7
356.	1.273E-02	8.406E-03	1.1727	.199	296.	91.3	7.27	26.7	
635.	6.184E-03	4.068E-03	1.1716	.143	297.	131.	9.20	43.2	
947.	3.218E-03	2.113E-03	1.1712	.103	298.	154.	12.8	59.3	
1.290E+03	1.890E-03	1.241E-03	1.1711	7.667E-02	298.	166.	17.0	74.7	
1.658E+03	1.237E-03	8.112E-04	1.1711	5.902E-02	298.	173.	21.6	89.4	
2.049E+03	8.744E-04	5.735E-04	1.1710	4.620E-02	298.	176.	26.3	104.	
2.461E+03	6.553E-04	4.298E-04	1.1710	3.661E-02	298.	177.	31.1	117.	
2.893E+03	5.123E-04	3.360E-04	1.1710	2.872E-02	298.	176.	35.9	130.	
3.343E+03	4.137E-04	2.713E-04	1.1710	2.112E-02	298.	172.	41.0	143.	
3.810E+03	3.392E-04	2.224E-04	1.1710	1.537E-02	298.	167.	46.0	155.	
4.294E+03	2.709E-04	1.777E-04	1.1710	1.161E-02	298.	163.	50.9	168.	
4.793E+03	1.955E-04	1.282E-04	1.1710	7.536E-03	298.	158.	56.0	179.	
5.306E+03	1.120E-04	7.343E-05	1.1710	3.830E-03	298.	151.	61.1	191.	

Distancia del borde de la poza paralela al viento

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: 358.80 kg.
 The mass of contaminant above the LLC is: 358.80 kg.

Distance (m)	Mole Fraction	Concentration (kg/m ³)	Density (kg/m ³)	Gamma	Temperature (K)	Half Width (m)	Sz (m)	Sy (m)	Width at z = .50 m to 15.0 mole% (m)
164.	1.277E-02	8.422E-03	1.1715	5.673E-02	295.	60.9	6.49	13.1	
409.	1.122E-02	7.405E-03	1.1725	.205	296.	101.	7.45	29.9	
695.	5.491E-03	3.610E-03	1.1715	.134	297.	137.	9.81	46.4	
1.014E+03	2.924E-03	1.920E-03	1.1712	9.825E-02	298.	158.	13.5	62.5	
1.361E+03	1.759E-03	1.154E-03	1.1711	7.379E-02	298.	169.	17.8	77.7	
1.734E+03	1.171E-03	7.680E-04	1.1711	5.729E-02	298.	176.	22.4	92.4	
2.129E+03	9.372E-04	5.492E-04	1.1710	4.499E-02	298.	178.	27.1	106.	
2.546E+03	6.330E-04	4.151E-04	1.1710	3.527E-02	298.	178.	32.0	120.	
2.981E+03	4.976E-04	3.264E-04	1.1710	2.745E-02	298.	177.	36.8	133.	
3.435E+03	4.037E-04	2.648E-04	1.1710	2.103E-02	298.	174.	41.8	146.	
3.906E+03	3.315E-04	2.174E-04	1.1710	1.583E-02	298.	170.	46.8	158.	
4.392E+03	2.656E-04	1.742E-04	1.1710	1.115E-02	298.	165.	51.8	171.	
4.894E+03	1.924E-04	1.261E-04	1.1710	6.019E-03	298.	156.	57.1	182.	
5.410E+03	1.110E-04	7.280E-05	1.1710	2.131E-03	298.	148.	62.3	193.	

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: .00000 kg.
 The mass of contaminant above the LLC is: .00000 kg.

Distance (m)	Mole Fraction	Concentration (kg/m ³)	Density (kg/m ³)	Gamma	Temperature (K)	Half Width (m)	Sz (m)	Sy (m)	Width at z = .50 m to 15.0 mole% (m)
--------------	---------------	------------------------------------	------------------------------	-------	-----------------	----------------	--------	--------	--------------------------------------

150sfr.doc									
0 Distance	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= .50 m to:
mole%		(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	2.50 mole% 15.0
(m)									(m)
209.	1.056E-02	6.959E-03	1.1716	8.662E-02	296.	66.1	6.88	16.7	
463.	9.850E-03	6.493E-03	1.1722	.184	297.	110.	7.73	33.2	
756.	4.880E-03	3.208E-03	1.1714	.127	297.	143.	10.4	49.7	
1.081E+03	2.664E-03	1.749E-03	1.1712	9.292E-02	298.	162.	14.3	65.6	
1.434E+03	1.639E-03	1.076E-03	1.1711	7.088E-02	298.	172.	18.6	80.8	
1.811E+03	1.109E-03	7.272E-04	1.1711	5.507E-02	298.	178.	23.3	95.4	
2.211E+03	8.027E-04	5.265E-04	1.1710	4.413E-02	298.	181.	27.9	110.	
2.631E+03	6.116E-04	4.012E-04	1.1710	3.441E-02	298.	180.	32.8	123.	
3.070E+03	4.839E-04	3.173E-04	1.1710	2.698E-02	298.	179.	37.7	136.	
3.528E+03	3.943E-04	2.586E-04	1.1710	2.067E-02	298.	175.	42.6	149.	
4.001E+03	3.244E-04	2.127E-04	1.1710	1.515E-02	298.	171.	47.7	161.	
4.491E+03	2.606E-04	1.709E-04	1.1710	1.038E-02	298.	165.	52.7	173.	
4.996E+03	1.888E-04	1.238E-04	1.1710	6.248E-03	298.	159.	57.9	185.	
5.515E+03	1.095E-04	7.180E-05	1.1710	2.820E-03	298.	152.	63.1	196.	

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: .00000 kg.
 The mass of contaminant above the LLC is: .00000 kg.

Time after beginning of spill 4506.000 sec									
0 Distance	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= .50 m to:
mole%		(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	2.50 mole% 15.0
(m)									(m)
42.8	8.188E-03	5.291E-03	1.1717	.131	296.	55.8	4.03	11.4	
256.	1.684E-02	1.114E-02	1.1723	.116	296.	72.8	7.14	20.0	
518.	8.635E-03	5.688E-03	1.1720	.168	297.	118.	8.14	36.5	
818.	4.363E-03	2.867E-03	1.1714	.118	298.	147.	11.2	52.9	
1.149E+03	2.437E-03	1.600E-03	1.1712	8.767E-02	298.	165.	15.1	68.7	
1.507E+03	1.529E-03	1.004E-03	1.1711	6.772E-02	298.	175.	19.5	83.8	
1.889E+03	1.050E-03	6.889E-04	1.1711	5.335E-02	298.	180.	24.1	98.4	
2.293E+03	7.695E-04	5.047E-04	1.1710	4.216E-02	298.	182.	28.8	112.	
2.717E+03	5.913E-04	3.878E-04	1.1710	3.343E-02	298.	182.	33.7	126.	
3.160E+03	4.701E-04	3.083E-04	1.1710	2.601E-02	298.	180.	38.6	139.	
3.621E+03	3.845E-04	2.522E-04	1.1710	2.060E-02	298.	178.	43.5	152.	
4.098E+03	3.176E-04	2.082E-04	1.1710	1.487E-02	298.	172.	48.5	164.	
4.591E+03	2.555E-04	1.676E-04	1.1710	1.033E-02	298.	167.	53.6	176.	
5.098E+03	1.854E-04	1.216E-04	1.1710	6.216E-03	298.	160.	58.7	188.	
5.620E+03	1.082E-04	7.093E-05	1.1710	2.415E-03	298.	152.	64.0	199.	

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: .00000 kg.
 The mass of contaminant above the LLC is: .00000 kg.

Time after beginning of spill 4998.000 sec									
0 Distance	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= .50 m to:
mole%		(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	2.50 mole% 15.0
(m)									(m)
882.	7.649E-04	5.017E-04	1.1710	2.930E-02	298.	89.1	16.9	54.2	
1.218E+03	1.868E-03	1.226E-03	1.1711	8.355E-02	298.	168.	15.9	71.8	
1.581E+03	1.432E-03	9.395E-04	1.1711	6.406E-02	298.	177.	20.4	86.8	
1.968E+03	9.972E-04	6.541E-04	1.1710	4.994E-02	298.	181.	25.0	101.	
2.376E+03	7.366E-04	4.831E-04	1.1710	4.000E-02	298.	183.	29.8	115.	
2.804E+03	5.707E-04	3.743E-04	1.1710	3.211E-02	298.	183.	34.6	129.	
3.251E+03	4.571E-04	2.998E-04	1.1710	2.544E-02	298.	181.	39.4	142.	
3.715E+03	3.759E-04	2.465E-04	1.1710	1.947E-02	298.	178.	44.4	155.	
4.195E+03	3.110E-04	2.040E-04	1.1710	1.446E-02	298.	173.	49.4	167.	
4.691E+03	2.506E-04	1.643E-04	1.1710	9.798E-03	298.	168.	54.5	179.	
5.201E+03	1.820E-04	1.194E-04	1.1710	6.441E-03	298.	162.	59.5	191.	
5.726E+03	1.067E-04	7.000E-05	1.1710	2.387E-03	298.	154.	64.9	202.	

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

Filas utilizadas para el cálculo de zona de exclusión de viento cruzado

160sfr.lis

0	Time after beginning of spill	5490.000		sec									
0	Distance	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= 2.50	15.0 mole%	15.0	to:
	mole%	(m)	(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
	2.048E+03	2.905E-04	1.905E-04	1.1710	-8.397E-03	298.	70.7	34.2	88.4				
	2.460E+03	5.542E-04	3.635E-04	1.1710	3.856E-02	298.	184.	30.6	118.				
	2.892E+03	5.423E-04	3.556E-04	1.1710	3.022E-02	298.	183.	35.5	132.				
	3.342E+03	4.442E-04	2.913E-04	1.1710	2.326E-02	298.	181.	40.5	145.				
	3.809E+03	3.673E-04	2.409E-04	1.1710	1.814E-02	298.	178.	45.4	157.				
	4.293E+03	3.048E-04	1.999E-04	1.1710	1.371E-02	298.	174.	50.3	170.				
	4.791E+03	2.457E-04	1.611E-04	1.1710	9.625E-03	298.	169.	55.4	182.				
	5.305E+03	1.787E-04	1.172E-04	1.1710	5.662E-03	298.	162.	60.5	194.				
	5.832E+03	1.054E-04	6.912E-05	1.1710	2.223E-03	298.	155.	65.8	205.				

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: .00000 kg.
 The mass of contaminant above the LLC is: .00000 kg.

0	Time after beginning of spill	5982.000		sec									
0	Distance	Mole Fraction	Concentration	Density	Gamma	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z= 2.50	15.0 mole%	15.0	to:
	mole%	(m)	(kg/m**3)	(kg/m**3)		(K)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
	3.434E+03	1.580E-04	1.036E-04	1.1710	-2.523E-02	298.	45.2	54.8	117.				
	3.904E+03	2.655E-04	1.741E-04	1.1710	1.743E-02	298.	179.	46.3	160.				
	4.391E+03	2.817E-04	1.847E-04	1.1710	1.240E-02	298.	173.	51.4	172.				
	4.893E+03	2.400E-04	1.574E-04	1.1710	7.939E-03	298.	167.	56.5	184.				
	5.409E+03	1.758E-04	1.153E-04	1.1710	4.690E-03	298.	161.	61.6	196.				
	5.939E+03	1.042E-04	6.832E-05	1.1710	1.739E-03	298.	155.	66.7	208.				

For the ULC of 15.000 mole percent, and the LLC of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the ULC and LLC is: .00000 kg.
 The mass of contaminant above the LLC is: .00000 kg.

Escenario 2: Dispersión de vapor del sumidero del área de Procesos

A. Descripción del problema:

Se asumió la ocurrencia de la liberación de un líquido desde la tubería de descarga de una parte de la unidad de proceso de licuefacción. Esta liberación ocurrió por 10 minutos y fue como resultado de un agujero de 2 in en la parte superior de la tubería. La liberación se asumió para ser orientada verticalmente y derramado en el sumidero del área de procesos.

B. Modelamiento de Parámetros:

- Presión: 50 bar absoluto.
- Diametro de la tubería: 8 pulgadas
- Agujero de 2 pulgadas hacia arriba.
- Diámetro de la poza de proceso: 2.4430 m
- Tasa de evaporación de GNL: 10.0 kg/s

C. Condiciones Atmosféricas:

Las siguientes condiciones fueron asumidas para un análisis conservador y realista:

- Temperatura del aire ambiental: 25°C
- Humedad relativa: 90%
- Clase de estabilidad Pasquill-Gifford: F (la clase de estabilidad de Pasquill-Gifford es una medida de la cantidad de turbulencia en la atmósfera)
- Velocidad del viento: 2 m/s

D. Otras consideraciones:

50% LFL

LFL

Altura de interés: 0.5 m

Se tuvo interés en 50% LFL para calcular la posible concentración de la nube principal que podría resultar en ignición y flashback desde una distancia mayor que la predecida al LFL.

E. Resultados:

- Distancia a 50% LFL: 98 metros
- Distancia a LFL: 46 metros.
- Ver en esquema de la planta las distancias de seguridad de la poza de procesos.

0***** UOA_DEGADIS MODEL OUTPUT -- VERSION 2.1 *****

***** 3-SEP-2006 16:23:18.32 *****

Data input on 3-SEP-2006 16:23: 9.26
Source program run on 3-SEP-2006 16:23:18.32

0 TITLE BLOCK

SIMULACION DE DISPERSION DE VAPORES DE GNL DESDE LA POZA DE DRENAJE DEL μ REA DE

	Wind velocity at reference height	2.00	m/s
	Reference height	10.00	m
0	Surface roughness length	3.000E-02	m
0	Pasquill Stability class	F	
0	Monin-Obukhov length	14.3	m
	Gaussian distribution constants		
	Specified averaging time	.00	s
	Deltay	.02544	
	Betay	.90000	
0	Wind velocity power law constant	Alpha	.38616
	Friction velocity	.07686	m/s
0	Ambient Temperature	298.15	K
0	Surface Temperature	298.15	K
	Ambient Pressure	1.000	atm
	Ambient Absolute Humidity	1.834E-02	kg/kg BDA
	Ambient Relative Humidity	90.00	%

Adiabatic Mixing:	Mole fraction	CONCENTRATION OF C kg/m**3	GAS DENSITY kg/m**3	Enthalpy J/kg	Temperature K
	.00000	.00000	1.17102	.00000	298.15
	.00889	.00587	1.17394	-1937.9	296.32
	.02648	.01758	1.17206	-5813.8	295.08
	.05234	.03509	1.16959	-11628.	293.15
	.08592	.05835	1.16700	-19379.	290.41
	.12649	.08738	1.16505	-29069.	286.66
	.16558	.11647	1.16474	-38759.	282.51
	.21065	.15170	1.16689	-50386.	276.93
	.27475	.20491	1.17093	-67828.	268.30
	.31532	.24071	1.17419	-79456.	262.46
	.36061	.28517	1.18822	-93021.	253.65
	.40385	.33165	1.20600	-1.06587E+05	244.38
	.45094	.38725	1.22937	-1.22090E+05	233.72
	.49571	.44541	1.25468	-1.37594E+05	223.36
	.54351	.51381	1.28451	-1.55035E+05	212.25
	.59370	.59349	1.31887	-1.74415E+05	200.67
	.64106	.67718	1.35436	-1.93794E+05	189.85
	.69016	.77408	1.39474	-2.15111E+05	178.76
	.73639	.87636	1.43665	-2.36429E+05	168.43
	.78383	.99446	1.48427	-2.59684E+05	157.95
	.82844	1.11988	1.53408	-2.82939E+05	148.21
	.87383	1.26466	1.59077	-3.08132E+05	138.40

.91646	1.41953	1.65062	-3.33326E+05	129.29
.95657	1.58544	1.71399	-3.58519E+05	120.80
1.00000	1.79200	1.79200	-3.87588E+05	111.70

0 Specified Gas Properties:

Molecular weight:	16.040	
Release temperature:	111.70	K
Density at release temperature and ambient pressure:	1.7920	kg/m**3
Mean heat capacity constant:	5.60000E-08	
Mean heat capacity power:	5.0000	
Upper mole fraction contour:	.15000	
Lower mole fraction contour:	2.50000E-02	
Height for isopleths:	.50000	m

Source input data points

Initial (pure contaminant) mass in cloud: .00000 kg

Time	Contaminant Mass Rate	Source Radius	Contaminant Mass Fraction	Temperature	Enthalpy
s	kg/s	m	kg contam/kg mix	K	J/kg
.00000	10.000	2.4430	1.0000	111.70	-3.87588E+05
60230.	10.000	2.4430	1.0000	111.70	-3.87588E+05
60231.	.00000	.00000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
60232.	.00000	.00000	1.0000	111.70	-3.87588E+05

0 Calculation procedure for ALPHA: 1
0 Entrainment prescription for PHI: 3

0 Layer thickness ratio used for average depth: 2.1500
 0 Air entrainment coefficient used: .590
 0 Gravity slumping velocity coefficient used: 1.150
 0 NON Isothermal calculation
 0 Heat transfer calculated with correlation: 1
 0 Water transfer not included

CALCULATED SOURCE PARAMETERS

Time sec	Gas Radius m	Height m	Qstar kg/m**2/s	SZ(x=L/2.) m	Mole frac C	Density kg/m**3	Temperature K	Rich No.
.000000	2.44300	1.100000E-05	1.088438E-02	.115265	1.00000	1.79200	111.700	.756144
5.139973E-02	2.45394	1.493735E-02	1.086210E-02	.115888	.998475	1.78785	112.094	.756144
.185932	2.51732	5.279015E-02	1.073790E-02	.119503	.989786	1.76468	114.346	.756144
.400180	2.66941	.107578	1.044474E-02	.127944	.969691	1.71669	119.397	.756144
.614427	2.85593	.154641	1.010348E-02	.137973	.946476	1.66864	125.040	.756144
1.10961	3.34572	.237484	9.369683E-03	.164107	.892235	1.57391	138.030	.756144
1.60479	3.86065	.294263	8.810020E-03	.191902	.844091	1.50381	149.542	.756144
2.80241	5.07265	.374435	8.046477E-03	.260257	.757127	1.39915	170.594	.756144
4.00003	6.18444	.416059	7.774701E-03	.328354	.699889	1.34070	184.813	.756144
6.11992	7.90898	.451022	7.891808E-03	.449351	.638613	1.28287	200.736	.756144
8.23981	9.37245	.462576	8.468916E-03	.574607	.604931	1.25009	210.283	.756144
11.1056	11.0132	.457908	9.871837E-03	.759350	.583150	1.22266	217.829	.756144
13.9715	12.3201	.435565	1.225918E-02	.979940	.578952	1.20438	221.686	.756144
16.2640	13.1397	.404106	1.556343E-02	1.21359	.585981	1.19287	222.884	.756144

18.5565	13.1024	.395420	2.127880E-02	1.48717	.601667	1.18382	222.483	.756144
20.8747	12.6360	.382918	2.771453E-02	1.69461	.624579	1.17888	220.326	.756144
23.1928	11.9747	.363370	3.238518E-02	1.74488	.653453	1.17722	216.740	.756144
26.1117	11.1585	.338322	3.419072E-02	1.62231	.693152	1.17819	211.211	.756144
29.0306	10.5572	.319491	3.403675E-02	1.46967	.729890	1.18040	205.871	.756144
32.0319	10.1527	.306762	3.414044E-02	1.36789	.760878	1.18226	201.385	.756144
35.0333	9.88114	.298303	3.484961E-02	1.31495	.785011	1.18326	197.976	.756144
38.8736	9.63553	.290754	3.607685E-02	1.28170	.808025	1.18380	194.801	.756144
42.7139	9.45578	.285246	3.702954E-02	1.25921	.824491	1.18414	192.537	.756144
46.3180	9.33585	.281546	3.753654E-02	1.24118	.835308	1.18449	191.033	.756144
52.4897	9.21673	.277850	3.794598E-02	1.22067	.846289	1.18493	189.491	.756144
59.3563	9.15708	.275999	3.816740E-02	1.21055	.851964	1.18516	188.695	.756144
67.9376	9.12742	.275079	3.820794E-02	1.20395	.854792	1.18527	188.299	.756144

0Source strength [kg/s] :	10.000	Equivalent Primary source radius [m] :	2.4430
Equivalent Primary source length [m] :	4.8860	Equivalent Primary source half-width [m] :	1.9187
Secondary source concentration [kg/m**3] :	.90937	Secondary source SZ [m] :	1.2039

Contaminant flux rate: 3.82079E-02

Secondary source mass fractions... contaminant:	.767230	air:	.22858
Enthalpy:	-2.13812E+05	Density:	1.1853

Secondary source length [m] :	18.255	Secondary source half-width [m] :	7.1687
-------------------------------	--------	-----------------------------------	--------

0 Distance (m)	Mole Fraction	Concentration (kg/m**3)	Density (kg/m**3)	Gamma	Temperature (K)	Half Width (m)	Sz (m)	Sy (m)	Width at z= 2.50 (m)	.50 m to: mole% (m)	15.0 mole% (m)
9.13	.855	.909	1.1853	1.567E-02	188.	7.17	1.20	1.030E-07	7.17	7.17	
9.59	.830	.865	1.1783	8.479E-03	193.	7.09	1.22	.367	7.79	7.58	
9.93	.810	.828	1.1727	1.982E-03	196.	7.10	1.24	.485	8.02	7.74	
10.7	.719	.681	1.1532	-2.609E-02	212.	6.92	1.43	.694	8.22	7.81	
11.2	.656	.592	1.1416	-4.976E-02	223.	6.85	1.58	.780	8.28	7.81	
11.6	.595	.512	1.1312	-7.768E-02	234.	6.78	1.75	.857	8.33	7.80	
12.1	.527	.432	1.1218	-.114	245.	6.71	1.98	.939	8.36	7.77	
12.6	.465	.366	1.1161	-.150	255.	6.64	2.23	1.01	8.39	7.72	
13.4	.378	.284	1.1173	-.189	267.	6.54	2.69	1.13	8.41	7.62	
14.3	.314	.230	1.1252	-.199	273.	6.44	3.12	1.24	8.42	7.49	
15.5	.253	.181	1.1307	-.223	279.	6.32	3.71	1.38	8.42	7.29	
16.7	.212	.149	1.1360	-.236	283.	6.21	4.28	1.50	8.41	7.05	
18.0	.178	.124	1.1409	-.243	286.	6.09	4.89	1.63	8.39	6.70	
19.4	.154	.106	1.1449	-.246	288.	5.98	5.46	1.76	8.35		
22.7	.117	7.972E-02	1.1514	-.246	290.	5.75	6.71	2.02	8.26		
26.0	9.541E-02	6.447E-02	1.1555	-.241	292.	5.55	7.82	2.25	8.15		
31.2	7.436E-02	4.994E-02	1.1596	-.230	293.	5.26	9.41	2.57	7.94		
36.4	6.162E-02	4.123E-02	1.1621	-.217	294.	5.00	10.8	2.86	7.72		
51.7	4.246E-02	2.825E-02	1.1660	-.179	295.	4.37	14.2	3.57	6.96		
66.9	3.353E-02	2.226E-02	1.1678	-.144	295.	3.85	16.9	4.16	6.09		
98.5	2.480E-02	1.642E-02	1.1696	-8.435E-02	296.	2.95	21.0	5.18			

Cálculo de la zona de exclusión

0

For the UFL of 15.000 mole percent, and the LFL of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the UFL and LFL is: 218.86 kg.

The mass of contaminant above the LFL is: 289.82 kg.

Escenario 3: Dispersión de vapor del sumidero del área de Procesos

A. Descripción del problema:

Se asumió la ocurrencia de la liberación de un líquido desde la tubería de descarga de una parte de la unidad de proceso de licuefacción. Esta liberación ocurrió por 10 minutos y fue como resultado de un agujero de 2 in en la parte inferior de la tubería. La liberación se asumió para ser orientada verticalmente y derramado en el sumidero del área de procesos.

B. Modelamiento de Parámetros:

- Presión: 50 bar absoluto.
- Diametro de la tubería: 8 pulgadas
- Agujero de 2 pulgadas hacia abajo.
- Diámetro de la poza de proceso: 2.4430 m
- Tasa de evaporación de GNL: 8.8 Kg/s

C. Condiciones Atmosféricas:

Las siguientes condiciones fueron asumidas para un análisis conservador y realista:

Temperatura del aire ambiental: 25°C

Humedad relativa: 90%

Clase de estabilidad Pasquill-Gifford: F (la clase de estabilidad de Pasquill-Gifford es una medida de la cantidad de turbulencia en la atmósfera)

Velocidad del viento: 2 m/s

D. Otras consideraciones:

50% LFL

LFL

Se tuvo interés en 50% LFL para calcular la posible concentración

E. Resultados:

- Distancia a 50% LFL: 94 metros
- Distancia a LFL: 43 metros.
- Ver en esquema de la planta las distancias de seguridad de la poza de procesos.

0***** U O A _ D E G A D I S M O D E L O U T P U T - - V E R S I O N 2.1 *****

***** 3-SEP-2006 16:31:56.71 *****

Data input on 3-SEP-2006 16:31:51.49
Source program run on 3-SEP-2006 16:31:56.71

0 TITLE BLOCK

SIMULACION DE DISPERSIÒN DE VAPORES DE GNL DESDE EL SUMIDERO DE PROCESOS

	Wind velocity at reference height	2.00	m/s
	Reference height	10.00	m
0	Surface roughness length	3.000E-02	m
0	Pasquill Stability class	F	
0	Monin-Obukhov length	14.3	m
	Gaussian distribution constants		
	Specified averaging time	.00	s
	Deltay	.02544	
	Betay	.90000	
0	Wind velocity power law constant Alpha	.38616	
	Friction velocity	.07686	m/s
0	Ambient Temperature	298.15	K
0	Surface Temperature	298.15	K
	Ambient Pressure	1.000	atm
	Ambient Absolute Humidity	1.834E-02	kg/kg BDA
	Ambient Relative Humidity	90.00	%

Adiabatic Mixing:	Mole fraction	CONCENTRATION OF C	GAS DENSITY	Enthalpy	Temperature
		kg/m**3	kg/m**3	J/kg	K
	.00000	.00000	1.17102	.00000	298.15
	.00889	.00587	1.17394	-1937.9	296.32
	.02648	.01758	1.17206	-5813.8	295.08
	.05234	.03509	1.16959	-11628.	293.15
	.08592	.05835	1.16700	-19379.	290.41
	.12649	.08738	1.16505	-29069.	286.66
	.16558	.11647	1.16474	-38759.	282.51
	.21065	.15170	1.16689	-50386.	276.93
	.27475	.20491	1.17093	-67828.	268.30
	.31532	.24071	1.17419	-79456.	262.46
	.36061	.28517	1.18822	-93021.	253.65
	.40385	.33165	1.20600	-1.06587E+05	244.38
	.45094	.38725	1.22937	-1.22090E+05	233.72
	.49571	.44541	1.25468	-1.37594E+05	223.36
	.54351	.51381	1.28451	-1.55035E+05	212.25
	.59370	.59349	1.31887	-1.74415E+05	200.67
	.64106	.67718	1.35436	-1.93794E+05	189.85
	.69016	.77408	1.39474	-2.15111E+05	178.76
	.73639	.87636	1.43665	-2.36429E+05	168.43
	.78383	.99446	1.48427	-2.59684E+05	157.95
	.82844	1.11988	1.53408	-2.82939E+05	148.21

.87383	1.26466	1.59077	-3.08132E+05	138.40
.91646	1.41953	1.65062	-3.33326E+05	129.29
.95657	1.58544	1.71399	-3.58519E+05	120.80
1.00000	1.79200	1.79200	-3.87588E+05	111.70

0 Specified Gas Properties:

Molecular weight:	16.040	
Release temperature:	111.70	K
Density at release temperature and ambient pressure:	1.7920	kg/m**3
Mean heat capacity constant:	5.60000E-08	
Mean heat capacity power:	5.0000	
Upper mole fraction contour:	.15000	
Lower mole fraction contour:	2.50000E-02	
Height for isopleths:	.50000	m

Source input data points

Initial (pure contaminant) mass in cloud: .00000 kg

Time	Contaminant Mass Rate	Source Radius	Contaminant Mass Fraction	Temperature	Enthalpy
s	kg/s	m	kg contam/kg mix	K	J/kg
.00000	8.8000	2.4430	1.0000	111.70	-3.87588E+05
60230.	8.8000	2.4430	1.0000	111.70	-3.87588E+05
60231.	.00000	.00000	1.0000	111.70	-3.87588E+05
60232.	.00000	.00000	1.0000	111.70	-3.87588E+05

0 Calculation procedure for ALPHA: 1

0 Entrainment prescription for PHI: 3
 0 Layer thickness ratio used for average depth: 2.1500
 0 Air entrainment coefficient used: .590
 0 Gravity slumping velocity coefficient used: 1.150
 0 NON Isothermal calculation
 0 Heat transfer calculated with correlation: 1
 0 Water transfer not included

CALCULATED SOURCE PARAMETERS

Time sec	Gas Radius m	Height m	Qstar kg/m**2/s	SZ(x=L/2.) m	Mole frac C	Density kg/m**3	Temperature K	Rich No.
.000000	2.44300	1.100000E-05	1.088438E-02	.115265	1.00000	1.79200	111.700	.756144
5.161849E-02	2.45332	1.316857E-02	1.086481E-02	.115870	.998563	1.78793	112.082	.756144
.188422	2.51406	4.702319E-02	1.075402E-02	.119444	.990238	1.76481	114.297	.756144
.408393	2.66182	9.675569E-02	1.049168E-02	.127983	.970680	1.71573	119.373	.756144
.628364	2.84341	.139723	1.017795E-02	.138100	.947978	1.66690	125.027	.756144
1.13988	3.32403	.216342	9.490652E-03	.164649	.894356	1.57051	138.114	.756144
1.65141	3.82956	.269212	8.967473E-03	.192985	.846605	1.49944	149.711	.756144
2.83504	4.96826	.342037	8.296684E-03	.260099	.763298	1.39701	170.153	.756144
4.01867	6.01381	.380808	8.089155E-03	.327599	.707768	1.33889	184.129	.756144
6.29089	7.75855	.415306	8.368648E-03	.459531	.644496	1.27728	200.882	.756144
8.56311	9.21141	.424612	9.233145E-03	.599531	.611917	1.24326	210.544	.756144
11.1369	10.5639	.417455	1.091894E-02	.777886	.595762	1.21881	216.873	.756144
13.7107	11.6385	.394479	1.379171E-02	.998867	.594946	1.20151	220.099	.756144

14.7596	11.9987	.380035	1.558845E-02	1.11279	.598556	1.19555	220.715	.756144
15.8084	12.0487	.378533	1.802517E-02	1.23189	.604257	1.19025	220.936	.756144
18.3098	11.7919	.373061	2.481170E-02	1.48694	.624045	1.18196	219.824	.756144
20.5131	11.3196	.359110	3.034407E-02	1.61030	.648203	1.17865	217.186	.756144
22.7164	10.7547	.341349	3.349501E-02	1.59622	.676479	1.17807	213.480	.756144
25.7968	10.0694	.319144	3.438833E-02	1.46039	.716230	1.17976	207.822	.756144
28.8771	9.60912	.303971	3.424140E-02	1.33827	.750025	1.18202	202.884	.756144
32.0059	9.31570	.294311	3.458422E-02	1.26842	.776373	1.18353	199.091	.756144
35.1346	9.11872	.287915	3.535984E-02	1.23412	.796018	1.18423	196.339	.756144
41.2073	8.86868	.279877	3.672845E-02	1.20035	.821082	1.18484	192.881	.756144
45.3485	8.76532	.276539	3.721302E-02	1.18466	.831251	1.18516	191.467	.756144
53.2887	8.66404	.273246	3.759424E-02	1.16696	.841342	1.18558	190.048	.756144
68.7157	8.61276	.271580	3.776143E-02	1.15725	.846591	1.18580	189.312	.756144
0Source strength [kg/s] :			8.8000	Equivalent Primary source radius [m] :			2.4430	
Equivalent Primary source length [m] :			4.8860	Equivalent Primary source half-width [m] :			1.9187	
Secondary source concentration [kg/m**3] :			.89587	Secondary source SZ [m] :			1.1573	
Contaminant flux rate: 3.77614E-02								

Secondary source mass fractions... contaminant: .755498 air: .24010
 Enthalpy: -2.11201E+05 Density: 1.1858

Secondary source length [m] : 17.226 Secondary source half-width [m] : 6.7644

0 Distance Mole Concentration Density Gamma Temperature Half Sz Sy Width at z= .50 m to:

(m)	Fraction					Width		2.50	mole%	15.0	mole%
	(kg/m**3)	(kg/m**3)	(K)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
8.61	.847	.896	1.1858	1.650E-02	189.	6.76	1.16	4.021E-06	6.76	6.76	
9.06	.822	.851	1.1784	8.638E-03	194.	6.69	1.17	.351	7.36	7.16	
9.36	.803	.817	1.1731	2.601E-03	197.	6.70	1.19	.458	7.57	7.31	
10.1	.722	.687	1.1554	-2.273E-02	211.	6.55	1.35	.649	7.75	7.37	
10.7	.636	.565	1.1391	-5.642E-02	226.	6.44	1.55	.763	7.84	7.37	
11.2	.554	.463	1.1261	-9.691E-02	241.	6.36	1.80	.863	7.89	7.35	
12.1	.441	.343	1.1154	-.162	259.	6.24	2.23	.995	7.94	7.27	
13.0	.355	.265	1.1203	-.192	269.	6.14	2.69	1.11	7.95	7.16	
15.3	.229	.162	1.1339	-.230	282.	5.90	3.84	1.38	7.96	6.76	
17.7	.167	.116	1.1429	-.244	287.	5.70	4.87	1.61	7.91	6.13	
20.3	.130	8.845E-02	1.1493	-.246	289.	5.50	5.91	1.83	7.85		
23.0	.106	7.211E-02	1.1535	-.243	291.	5.33	6.86	2.03	7.76		
26.6	8.647E-02	5.828E-02	1.1573	-.236	292.	5.12	8.00	2.26	7.63		
30.1	7.338E-02	4.926E-02	1.1598	-.228	293.	4.93	9.03	2.48	7.49		
38.1	5.565E-02	3.717E-02	1.1633	-.207	294.	4.55	11.1	2.90	7.14		
46.0	4.559E-02	3.037E-02	1.1654	-.186	295.	4.23	12.8	3.27	6.75		
61.3	3.481E-02	2.311E-02	1.1676	-.149	295.	3.69	15.6	3.88	5.90		
76.6	2.894E-02	1.919E-02	1.1688	-.116	295.	3.22	17.8	4.40	4.87		
96.6	2.441E-02	1.616E-02	1.1697	-8.004E-02	296.	2.68	20.2	5.01			

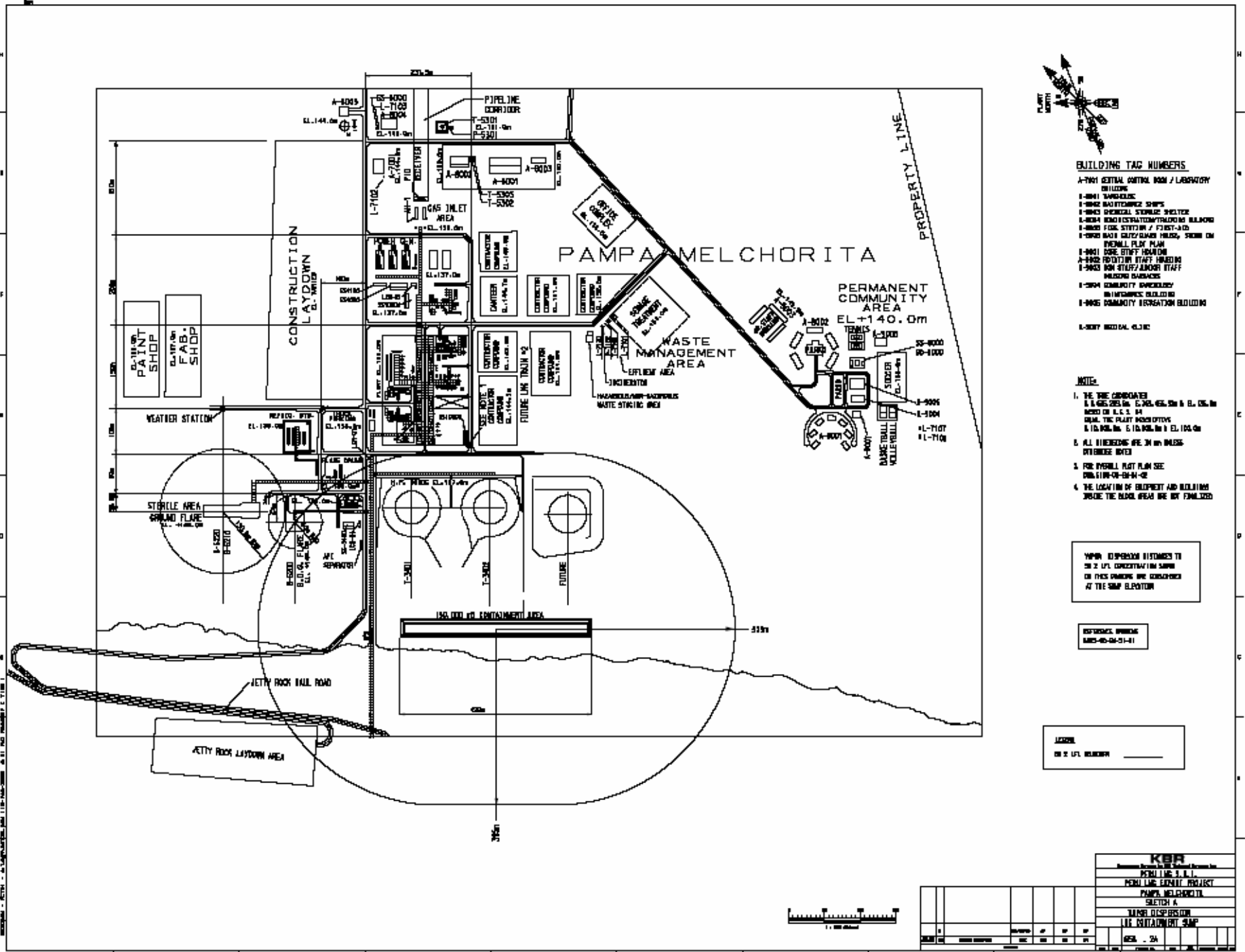
Cálculo de la zona de exclusión

For the UFL of 15.000 mole percent, and the LFL of 2.5000 mole percent:

The mass of contaminant between the UFL and LFL is: 188.65 kg.

The mass of contaminant above the LFL is: 249.10 kg.

Esquema de la planta GNL



- BUILDING TAG NUMBERS**
- A-7001 CENTRAL CONTROL ROOM / LABORATORY BUILDING
 - I-0001 BARRACADE
 - I-0002 MAINTENANCE SHOPS
 - I-0003 GENERAL STERILE SHELTER
 - I-0004 HIGH PRESSURE TEMPERATURE BUILDING
 - I-0005 FOGG SYSTEM / FIGHT-AID
 - I-0006 BACK GULF/GARAGE BUILDING, STORE RM
 - I-0007 GENERAL PLAN
 - I-0008 ROSE STAFF HANGAR
 - A-0002 POSITION STAFF HANGAR
 - I-0003 ROSE STAFF/ROSE STAFF BUILDING GARAGES
 - I-0004 SECURITY SERVICES/INFORMATION BUILDING
 - I-0005 SECURITY INFORMATION BUILDING

- NOTE:**
1. THE TAG NUMBERS I & A ARE: 200m, 150m, 100m, 50m & EL. 100m, 150m, 200m, 250m, 300m, 350m, 400m, 450m, 500m, 550m, 600m, 650m, 700m, 750m, 800m, 850m, 900m, 950m, 1000m.
 2. FOR OVERALL PLANT PLAN SEE DRAWING 110-00-00-01-01
 3. THE LOCATION OF EQUIPMENT AND BUILDINGS INSIDE THE BLOCK AREA ARE NOT FINALIZED

WATER DISPERSION DISTANCES TO 20 X 2 FT. CONCENTRATION SUMP OR THIS DRAWING ARE EXHIBITORS AT THE SUMP ELEVATION

REFERENCE DRAWING: 110-00-00-01-01

LEGEND
20 X 2 FT. CONCENTRATION SUMP

KEIP	
PERU INC. EXHIBIT PROJECT	
PAMPA MELCHORITA	
SKETCH A	
GAS DISPERSION	
LIFE CONTAINMENT SUMP	
REV.	DATE
1	01/01/01
2	02/01/01
3	03/01/01
4	04/01/01
5	05/01/01
6	06/01/01
7	07/01/01
8	08/01/01
9	09/01/01
10	10/01/01
11	11/01/01
12	12/01/01
13	01/01/02
14	02/01/02
15	03/01/02
16	04/01/02
17	05/01/02
18	06/01/02
19	07/01/02
20	08/01/02
21	09/01/02
22	10/01/02
23	11/01/02
24	12/01/02

CAPITULO V

5.1 ANALISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS PLANTEADOS

TABLA 5.1

DISTANCIA DESDE EL BORDE DE LA POZA A 50%LFL (m)	
ESCENARIO 1	320.35

TABLA 5.2

	DISTANCIA DESDE EL BORDE DE LA POZA A 50%LFL (m)	DISTANCIA DESDE EL BORDE DE LA POZA A LFL (m)
ESCENARIO 2	98	46
ESCENARIO 3	94	43

Los resultados obtenidos a través de la corrida del programa DEGADIS, señala las distancias estimadas de seguridad o de exclusión ante la dispersión de vapores por un derrame de GNL contenido en las pozas de contención al nivel de concentración del 50% LFL.

A modo de comparación, también se procedió a determinar la distancia al 100% LFL. Como se puede observar en la tabla 5.2, para los escenarios 2 y 3 se alcanzan distancias que están por debajo de los encontrados al 50% LFL.

Estas distancias que envuelven a las pozas de contenimiento o sumideros, obtenidas para cada escenario, deberán ser especificadas en el diseño de cada área involucrada en el proyecto, lo que como consecuencia podría generar gastos adicionales, siempre y cuando no haya sido considerado en la etapa de diseño, por las medidas preventivas que pueda optar el propietario.

Es importante resaltar que los resultados hallados muestran la distancia que alcanzarían los vapores de GNL a una concentración diluida segura (50% LFL), lo que minimiza la posibilidad que se forme una mezcla inflamable.

CONCLUSIONES

1. DEGADIS permite simular la dispersión de gases criogénicos inflamables, particularmente del GNL, con el fin de estimar las distancias de seguridad o de exclusión por un derrame de GNL.
2. DEGADIS permite simular una dispersión atmosférica a nivel del suelo de nubes de gases densos en la capa límite atmosférica sobre el nivel de suelo plano (sin obstáculos).
3. DEGADIS utiliza en la simulación la transferencia de calor entre el suelo y la nube, como también los efectos termodinámicos esenciales.
4. DEGADIS permite por seguridad considerar el criterio del 50% del LFL para determinar la distancia de dispersión de los vapores.
5. Es necesario especificar la tasa de vaporación en función del tiempo del líquido criogénico, con el fin de determinar el modo de liberación o fuga (estado estable o transitorio).

RECOMENDACIONES

1. DEGADIS puede emplearse para simular dispersiones de vapores de los siguientes líquidos criogénicos combustibles: Propano, Freón, Amonio, Tetróxido de nitrógeno y Fluoruro de hidrógeno y estimar la distancia de seguridad correspondiente para cada caso.
2. DEGADIS no puede ser modelado directamente en terreno con obstáculos, que generan la interrupción del vapor. Desde que el modelo especifica un perfil de viento vertical que depende de la rugosidad de la superficie (escala pequeña), su aplicación debe ser limitada para liberaciones donde la profundidad de capa de dispersión es mayor que la altura de la rugosidad superficial especificada.
3. Determinar la distancia de dispersión de la mezcla inflamable con el fin de minimizar la posibilidad que se forme dicha mezcla inflamable por la ocurrencia de algún derrame del líquido criogénico y alcance el límite de propiedad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gas dispersion. Perry's Chemical Engineers' Handbook. The Mc Graw-Hill Companies, Inc. 1999, Chapter 26, 78-84 p.
2. Ingeniería Ambiental. Gerard Kiely. The Mc Graw-Hill, 1999, Primera Edición.
3. European Standard EN 1473. CEN (European Committee for Standardization), 1999. Versión Ingles.
4. SISTEMAS DE SEGURIDAD Y PROTECCION DE GNL, Institute For energy, Law &Enterprise, University of Houston Law Center, Octubre 2003, pag 12-15.
5. Workbook on the dispersion of dense gases. HSE Contract Research Report N° 17/1998. Research and Laboratory Services Division Health and Safety Executive Sheffield and Department of Engineering –University of Cambridge
6. Liquefied Natural Gas Facilities Safety Standards. Code Federal Regulations, Title 49, Volume 3, Part 193. U.S. Government.
7. Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG).NFPA 59A, Edición 2006.

GLOSARIO

NFPA: National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección Contra incendios)

GPA: Gas Processors Association (Asociación de Procesadores de Gas).

CFR: Code Federal Regulations (Normas Federales de Seguridad).

UFL: Upper Flammability Limit (Límite de inflamabilidad superior).

RPT: Rapid Phase Transition (Fase de Transición Acelerada).

Pop: Estallido.

Puff: Soplido o bocanada.

UVCE: Unconfined Vapour Cloud Explosion (Explosiones de nubes de vapor no confinadas)

Flashback: Retroceso.