

Estudio de la dispersión e incendio de nubes inflamables de gas (GNL y GLP)

Diana Villafaña Santander

Memoria presentada para obtener el título de
Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya.

Dirigida por:
Dr. Joaquim Casal Fàbrega
Dr. Juan Antonio Vílchez

Departament d'Enginyeria Química
Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, 2013



Agradecimientos

Quiero expresar en primer lugar mi más profundo agradecimiento al Prof. Joaquim Casal, quien sin conocerme me dio la oportunidad de realizar la tesis doctoral en el CERTEC. Su apoyo, guía y ánimo durante la realización de este trabajo fueron sin duda imprescindibles para alcanzar su culminación.

También quiero agradecer especialmente al Prof. Juan Antonio Vilchez quien además de ser codirector de esta tesis, contribuyo enormemente en su desarrollo, su experiencia y conocimientos en Degadis fueron fundamentales.

Le agradezco también de manera muy especial a Rosa Mari Darbra, por su ánimo y ayuda invaluable durante la primera etapa de esta tesis.

Quiero darles las gracias a los profesores Josep Arnaldos, Eulàlia Planas, Elsa Pastor y Miguel Muñoz, así como a todos los que forman y han formado parte del CERTEC en algún momento, los cuales incluyen a profesores, doctorandos, proyectistas y demás colaboradores muchos de los cuales ya no se encuentran aquí pero a quienes sin duda fue un placer llegar a conocer.

También le agradezco al personal de la biblioteca del ETSEIB por su colaboración y al personal administrativo del departamento de Ingeniería Química en especial a Irene Pérez por su apoyo. Finalmente le agradezco también al Ministerio de Ciencia e Innovación el concederme la beca que hizo posible mi estancia aquí.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 El riesgo asociado a los gases inflamables	1
1.2 Accidentes graves.....	4
1.2.1 Tipos de accidentes	4
1.2.2 Fenómenos de tipo térmico.....	5
1.2.3 Fenómenos de tipo mecánico (explosiones).....	9
1.3 Análisis del riesgo de la fuga y dispersión de nubes de vapor inflamables	9
1.4 Descripción de los incendios de nubes de vapor inflamables (llamarada o flash fire)	11
1.5 Objetivos.....	14
Capítulo 2. Análisis histórico de los accidentes ocurridos con nubes inflamables	17
2.1 Introducción	17
2.2 Fuentes de información	18
2.3 Metodología	25
2.3.1 Selección de los accidentes	25
2.3.2 Base de datos Access.....	26
2.3.3 Limitaciones del análisis.....	28
2.4 Resultados y discusión.....	28
2.4.1 Origen de los accidentes	28
2.4.2 Material involucrado	32
2.4.3 Causas generales y específicas de los accidentes	33
2.4.4 Población afectada por los accidentes.....	36
2.4.5 Probabilidad de escenarios accidentales.....	39
Capítulo 3. Experimentos a gran escala.....	43
3.1 Introducción	43
3.2 Pruebas de China Lake (1979).....	46
3.3 Pruebas de Maplin Sands (1980)	51

3.4	Pruebas en China Lake (USA): series Avocet, Burro y Coyote.....	57
3.4.1	Avocet y Burro	57
3.4.2	Coyote.....	64
3.5	Pruebas realizadas con GNL por Gaz de France en Saint Etienne....	81
3.6	Pruebas realizadas en Buxton (UK) por HSL	86

Capítulo 4. Dispersión atmosférica desde vertidos de gases licuados.....93

4.1	Introducción	93
4.2	Características de la dispersión de gases.....	96
4.2.1	Parámetros que afectan a la dispersión	97
4.3	Dispersión de vapores a la atmósfera desde vertidos de gases licuados....	100
4.4	Modelos para gases neutros (modelos gaussianos)	104
4.5	Modelos para gases pesados.....	106
4.6	Tipos de modelos de dispersión	107
4.7	Modelo de dispersión DEGADIS.....	110

Capítulo 5. Factor de seguridad para la dispersión atmosférica de vertidos de GNL.....119

5.1	Introducción	119
5.2	Gases criogénicos/refrigerados: GNL.....	119
5.2.1	Distribución del GNL.....	120
5.2.2	Riesgos del GNL.....	124
5.3	Contorno visible de la nube y zona de inflamabilidad.....	126
5.4	Factor de seguridad de dispersión (DSF) para nubes de GNL	126
5.4.1	Datos experimentales	129
5.4.2	Resultados y discusión.....	130
5.4.3	Influencia de las diversas variables sobre el factor de seguridad de dispersión (DSF).....	136
5.4.4	Predicción del factor de seguridad de dispersión (DSF).....	141

Capítulo 6. El factor de seguridad para la dispersión atmosférica de vertidos de propano145

6.1	Introducción	145
6.2	Producción y distribución del GLP	145
6.3	Características del GLP	149

6.4	Riesgos del GLP	150
6.5	Escenarios a estudiar	152
6.6	Factor de seguridad de dispersión (DSF) para nubes de GLP	153
6.7	Datos experimentales relevantes.....	154
6.8	Resultados y discusión.....	155
6.9	Influencia de las diversas variables sobre el factor de seguridad para la dispersión atmosférica (DSF)	161
6.10	Predicción del factor de seguridad para la dispersión atmosférica (DSF)	166
6.11	Factor de seguridad (DSF) para una fuga bifásica de GLP a temperatura ambiente	169
Capítulo 7. Características del incendio de una nube de gas o vapor inflamable.....		
177		
7.1	Introducción	177
7.2	Velocidad de propagación de la llama	178
7.3	Radiación térmica	182
7.3.1	Modelo de la fuente puntual.....	183
7.3.2	Modelo del cuerpo sólido.....	184
7.3.3	Potencia emisiva	185
7.3.4	Factor de vista	185
7.3.5	Transmisividad atmosférica.....	187
7.4	Modelos de incendio de una nube de vapor inflamable	188
7.4.1	Einsenberget al. (1975) y Fay y Lewis (1976).....	188
7.4.2	Raj y Emmons (1975), CCPS (2010).....	189
7.4.3	Cracknell y Carsley (1997)	193
7.4.4	Kumar et al. (2001).....	194
7.5	Altura de la llama y radiación térmica en los incendios de llamarada.....	195
7.6	Calculo de la altura de la llama en el incendio de una nube de gas (GNL).....	199
7.7	Cálculo aproximado de la radiación térmica en el incendio de una nube de gas (GNL).....	205
Conclusiones.....		213
Nomenclatura.....		217
Bibliografía		223

Capítulo 1. Introducción

1.1 El riesgo asociado a los gases inflamables

En muchas instalaciones y actividades industriales existe la posibilidad de que ocurran determinados accidentes graves. Estos accidentes suelen ir asociados a la manipulación, producción almacenamiento y transporte de materiales peligrosos. Dada la posibilidad de que sus efectos puedan afectar a áreas relativamente extensas, pueden tener consecuencias sobre las instalaciones, sobre las personas y sobre el entorno.

En las últimas décadas se ha incrementado de manera importante la atención a los riesgos derivados de estos accidentes, debido a que en un momento determinado hubo la percepción de que la frecuencia de desastres reportados como accidentes graves iba en aumento. Las consecuencias de estos accidentes sobre las personas y el entorno han sido ampliamente estudiadas [CCPS, 2000; Mannan, 2005; Casal, 2008]. No obstante, a pesar de los esfuerzos realizados para mitigar los riesgos e incrementar el conocimiento de los mismos, su evaluación y la reducción de su impacto continúa siendo un reto científico, ya que es una disciplina en la que existen todavía numerosas lagunas.

El presente estudio se ha centrado en el gas natural licuado (GNL) y el gas licuado de petróleo (GLP, propano y butano), materiales combustibles de suma importancia por su uso en diversos sectores como el transporte, la industria, la agricultura, la calefacción doméstica, entre muchos más.

La utilización de gases licuados, bien sea a presión atmosférica o a presión y temperatura ambiente, ha aumentado considerablemente y se espera que siga esta tendencia en los próximos años [Annual Energy Outlook 2009; Kavalov et al., 2009]. Las instalaciones de almacenamiento de estas sustancias han

proliferado y, con ellas, el transporte de las mismas por diversos medios (carretera, ferrocarril, barco, etc). De hecho, el sector del transporte de materiales peligrosos ha sido objeto de numerosos estudios debido a la cantidad de accidentes graves producidos tras el escape de sustancias peligrosas durante las últimas décadas [Vílchez et al., 1995; Oggero et al., 2006; Ronza, 2007; Ellis, 2011].

En España, el transporte de Gas Natural Licuado tiene lugar frecuentemente por carretera; en los últimos 15 años se ha observado un incremento en el número de camiones cisterna destinados a transportar GNL. El cambio en la configuración de las vías de circulación (mayor número de rotondas) y, sobre todo, el citado aumento del número de camiones, han provocado que la cantidad de accidentes, concretamente vuelcos, haya aumentado, implicando en algunos casos accidentes de graves consecuencias como el ocurrido en Tivissa (Tarragona) en 2002 [Vílchez et al., 2013].

En marzo de 1972, en Lynchburg, Virginia (EUA), ocurrió un accidente durante el transporte de GLP; en este caso el camión cisterna volcó y la fractura del tanque permitió la fuga del propano, vertiéndose aproximadamente 15 m³ de propano líquido. En el momento de la ignición, la nube visible se estaba expandiendo pero no alcanzó a los automovilistas que se encontraban a una distancia de 135 m del camión; sin embargo, sí que alcanzó las casas situadas a unos 60 m. El incendio de la nube de vapor resultante fue descrito como una bola de fuego con un diámetro de al menos 120 m. El conductor del camión, que salió huyendo, fue alcanzado por las llamas a una distancia de unos 80 m y murió inmediatamente. Dos automovilistas y un pasajero de los vehículos que se detuvieron resultaron quemados severamente cuando la nube de vapor se incendió. En total fallecieron dos personas y cinco resultaron heridas. Algunas casas, edificaciones y alrededor de 12 hectáreas de bosques fueron destruidas en el incendio posterior [CCPS, 1994].

Más recientemente, el 29 de junio de 2009, se produjo un grave accidente en la

estación de tren en Viareggio (Italia), cuando uno de los 14 vagones cisterna que trasportaban GLP descarriló provocando la fuga y dispersión del gas licuado. La nube de gas se dispersó desde el tanque principalmente a través de la vía del tren, debido a las condiciones climáticas estables. Las explosiones siguientes y los incendios produjeron un elevado número de víctimas (treinta y un muertos y más de treinta heridos) y daños severos en la infraestructura por valor de unos 32 M€ [Manca et al., 2010]. La figura 1.1 muestra una fotografía aérea tomada en la zona de la estación de tren de Viareggio después del accidente.



Fig. 1.1 Vista aérea de la estación de tren de Viareggio (Italia), tras el accidente ocurrido en Junio de 2009 (Associated Press).

Estos ejemplos muestran que, a pesar de los grandes esfuerzos para prevenirlos y controlarlos, este tipo de accidentes sigue ocurriendo.

Dado que un vertido de estos gases licuados puede originar una nube inflamable, no puede ignorarse el riesgo asociado a este tipo de eventos. En el Capítulo 2 se presenta un análisis histórico de los incendios de nubes de vapor inflamables (incendios de llamarada).

1.2 Accidentes graves

Un accidente grave puede ser definido como un evento tal como una fuga o vertido, incendio o explosión, resultante de un proceso no controlado durante el funcionamiento de cualquier establecimiento, implicando una o más sustancias peligrosas, y cuyas consecuencias representan un peligro para las personas, el medio ambiente o los bienes [Directiva 96/82/EC SEVESO II].

Los accidentes graves generalmente se relacionan con los siguientes tipos de fenómenos:

De tipo térmico: radiación térmica.

De tipo mecánico: ondas de presión y proyección de fragmentos.

De tipo químico: emisión a la atmosfera o vertido de sustancias.

1.2.1 Tipos de accidentes

La mayoría de los incendios en los procesos industriales resultan de la fuga de un fluido combustible, como ponen de manifiesto diversos análisis históricos de accidentes que evidencian que la pérdida de contención (fuga o escape) es el accidente más frecuente, seguido de los incendios, explosiones y formación de nubes de gas [Muñoz, 2005; Darbra y Casal, 2004; Planas et al., 1997; Vélchez et al., 1995]. Las características del incendio resultante dependerán de las condiciones de la fuga, pudiendo resultar en varios escenarios accidentales, incluyendo llamaradas, bolas de fuego, dardos de fuego, incendios de balsa e inclusive explosiones. Las diversas posibilidades de eventos que pueden ocurrir tras el escape de una sustancia peligrosa se esquematizan de forma simplificada en la Figura 1.2. Si bien es cierto que el incendio o explosión en sí suele tener efectos inmediatos o directos sobre las instalaciones, equipos o personas, también pueden provocar otros accidentes adicionales en dichos equipos, implicando nuevas pérdidas de contención a través del denominado “efecto dominó”, aumentando así considerablemente las consecuencias finales.

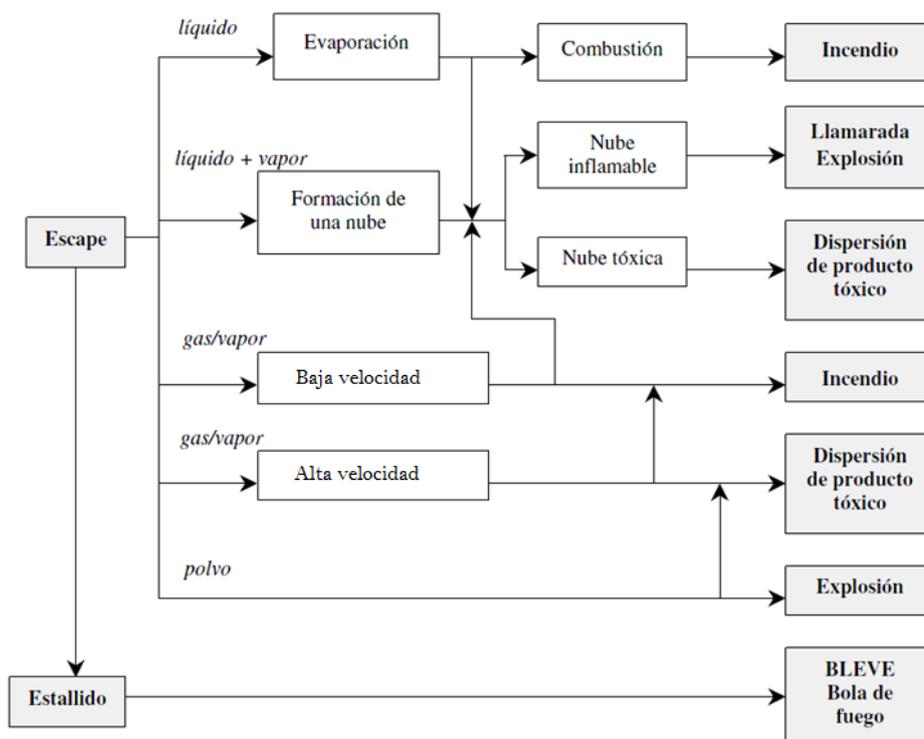


Fig 1.2 Diagrama simplificado de los posibles eventos producto del escape accidental de un material tóxico o inflamable [Casal et al., 1999].

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los escenarios accidentales relacionados con fenómenos de tipo térmico y mecánico, que podrían presentarse en el caso de la ignición de una nube de vapor o gas inflamable, objeto principal de la presente tesis.

1.2.2 Fenómenos de tipo térmico

Llamarada ("flash fire"). Un incendio de llamarada es la combustión de una nube de vapor o gas resultado del escape de un material inflamable, al aire libre, la cual tras mezclarse con el aire llega a incendiarse (Fig.1.3). Si la ignición no ocurre inmediatamente después del inicio del escape, hay la posibilidad de que se forme una nube de vapor inflamable de tamaño considerable; el crecimiento y evolución de la nube aumenta la posibilidad de

que la misma encuentre un punto de ignición a cierta distancia del origen de la fuga; esta ignición retardada provocará la llamarada y, eventualmente, una explosión con efectos mecánicos (sobrepresión). El incendio de llamarada presenta llamas de premezcla, de velocidad variable. Los efectos de la presión se pueden considerar despreciables si la nube es relativamente pequeña y, sobre todo, si no hay confinamiento de la misma. Después de la ignición, la llama puede retroceder a través de la nube hasta la fuente de la fuga resultando en un pool fire o en otros fenómenos como pueden ser un jet fire o incluso un BLEVE.

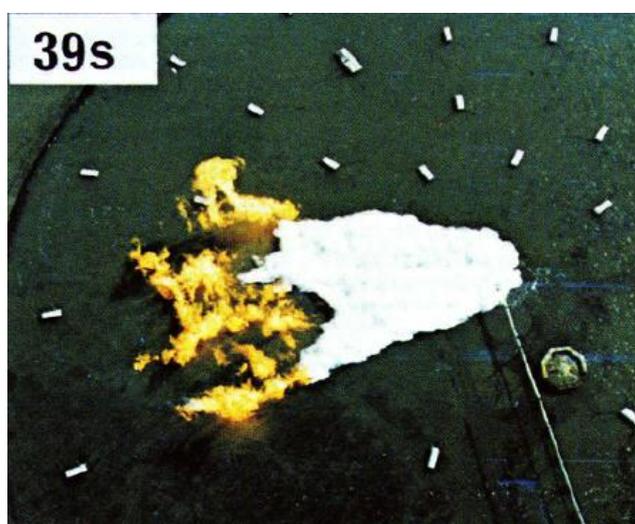


Fig. 1.3 Desarrollo del incendio de la nube de vapor de GNL durante la prueba 38 de la serie de Maplin Sands (Blackmore et al., 1982).

Incendio de balsa (“pool fire”). Puede ocurrir cuando existe la ignición de un derrame líquido vertido sobre una superficie horizontal. Se presenta una combustión con llama de difusión turbulenta sobre el charco de combustible, el cual se evapora debido a la aportación calorífica del propio incendio. Entre los accidentes de este tipo que se presentan en la industria de procesos, los incendios de balsa al aire libre y sobre el mar son los que demandan la mayor atención por la frecuencia con que ocurren y por sus consecuencias sobre las

instalaciones [Muñoz, 2005].



Fig. 1.4 Fotografía de un incendio de charco realizado durante la serie de pruebas en China Lake.

Dardo de fuego (“jet fire”). Llama estacionaria y alargada que puede resultar de la ignición de un chorro de gas que escapa a alta velocidad. Generalmente ocurren como resultado de una pequeña fisura u orificio que origina un chorro a presión en algún equipo de una planta de proceso o en un tanque de almacenamiento; si el chorro de gas o vapor encuentra un punto de ignición (que puede ser una chispa de electricidad estática provocada por el propio vertido) se inflamará, originando un dardo de fuego [Gómez-Mares, 2009].



Figura 1.5 Incendio de chorro bifásico (propano).

Bola de fuego. Una bola de fuego (“fireball”) se forma cuando una nube de composición bifásica (vapor y gotas de líquido inflamable) es incendiada, presentando una forma aproximadamente esférica. En función del tipo de combustible involucrado, la combustión puede ser bastante buena, liberando una gran cantidad de energía radiante. Este fenómeno puede ocurrir con propano o butano, siendo por el contrario poco común con GNL.



Fig. 1.6 Bola de fuego debido a la ignición de la nube de GNL en la prueba 5 de la serie Falcon (1987).

1.2.3 Fenómenos de tipo mecánico (explosiones)

Para que ocurra la explosión de una nube de vapor deben cumplirse varias condiciones. El material liberado a la atmósfera deberá evidentemente ser combustible. La ignición no deberá ser inmediata y, una vez formada la nube, la mezcla aire-combustible deberá estar dentro de los límites de inflamabilidad. En general se considera que, para explosiones no confinadas, la cantidad de gas o vapor inflamable tiene que ser como mínimo del orden de 1000 kg, si bien este valor está actualmente sometido a discusión [Casal, 2008].

En general, la *explosión de una nube de vapor inflamable no confinada* (UVCE, según sus siglas en inglés comúnmente utilizadas) está asociada al escape masivo de gases licuados refrigerados y líquidos inflamables muy volátiles, que pueden generar una gran cantidad de vapores combustibles en un breve período de tiempo.

El caso de una *explosión confinada de vapor* (CVE, siglas en inglés) implica la explosión del material combustible en condiciones de confinamiento; este tipo de explosión ocurre en recintos cerrados como por ejemplo naves industriales, edificios, etc. Una situación intermedia frecuente es la de *semiconfinamiento*, originado por la presencia de instalaciones relativamente congestionadas.

Finalmente, otro tipo de explosión es el denominado BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Producido por el estallido súbito, usualmente por calentamiento externo (provocado por un incendio o un chorro de fuego), de un recipiente que contiene un líquido inflamable a presión.

1.3 Análisis del riesgo de la fuga y dispersión de nubes de vapor inflamables

Entre las principales etapas a considerar en la metodología del análisis de consecuencias para el escenario de la fuga de una sustancia o material peligroso se encuentran:

- **La descripción del escenario accidental.** El tipo de vertido o escape del material combustible (término fuente) es un fenómeno que depende de las propiedades del material, las condiciones de almacenamiento o proceso, la forma en que ocurre el escape y la interacción con el medio ambiente, entre otros factores. Puede por tanto resultar difícil realizar una caracterización precisa de la pérdida de contención, por lo que se han tipificado una serie de escenarios los cuales son ampliamente usados en el análisis de consecuencias [Mannan, 2005]. En el capítulo 4 se ilustran los escenarios más comunes presentes en las situaciones de fugas accidentales.
- **La dispersión atmosférica.** Esta etapa consiste en predecir el transporte y dispersión de la nube de vapor inflamable en la atmósfera. Pueden aplicarse diferentes modelos matemáticos para predecir de manera relativamente precisa la dispersión; en el capítulo 4 se describen los más comunes para la dispersión de gases. Modelar la dispersión es fundamental para obtener los perfiles de concentración y, si hay ignición, estimar los daños y consecuencias. Con el fin de aumentar el conocimiento del fenómeno de dispersión y, en particular, de las fugas instantáneas o muy rápidas de grandes cantidades de materiales combustibles a la atmósfera, se realizaron una serie de pruebas experimentales a gran escala durante las décadas de 1970 y 1980 [Ermak et al., 1983; Blackmore et al., 1982; Goldwire et al., 1983; Puttock et al., 1983] y algunas más recientes realizadas a finales de 1999 y 2000 [Daish et al., 2001]. En el capítulo 3 de esta tesis se recopilan los resultados obtenidos de estas pruebas, así como sus principales características.
- **Estimación de efectos y consecuencias.** El objetivo de esta etapa es cuantificar los efectos y daños causados, que variarán con la distancia. Los modelos pretenden estimar el flujo del calor irradiado

hacia un determinado objetivo. Uno de los más utilizados es el modelo del cuerpo sólido.

Para cuantificar las consecuencias (quemaduras, letalidad) provocadas por la radiación térmica sobre las persona se utiliza usualmente la función probit, que relaciona el porcentaje de gente afectada en una zona determinada con la intensidad de la radiación mediante una función de distribución normal.

1.4 Descripción de los incendios de nubes de vapor inflamables (llamarada o flash fire)

Un incendio de llamarada puede ocurrir si hay un derrame o evaporación de un líquido inflamable, tras lo cual, si la ignición no ocurre inmediatamente, existe la posibilidad de que se forme una nube de vapor inflamable seguida de su ignición; ésta tendrá lugar dentro de la región inflamable de la nube de gas, a alguna distancia del origen de la fuga. Cuanto mayor sea el retraso en la ignición, mayor será el tamaño de la nube (dependiendo, evidentemente, de las condiciones atmosféricas) y de la zona de la misma que se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad. Asimismo, a medida que crece la nube aumenta la probabilidad de que ésta encuentre un punto de ignición.

Cuando se incendia una nube de vapor combustible, pueden ocurrir dos tipos de fenómeno en función de si se genera o no una onda de sobrepresión. La primera posibilidad implica una explosión, la cual ocurre cuando en la nube de vapor se desarrolla una combustión sumamente turbulenta y bajo ciertas condiciones como la presencia de obstáculos o confinamiento. Por otra parte, cuando estas condiciones no están presentes, no ocurre ningún efecto de sobrepresión y la nube de vapor arde simplemente como un incendio de llamarada también conocido como “flash fire” o “vapour cloud fire” (VCF).

Cuando la ignición no ocurre inmediatamente, es probable que se forme una nube de vapor inflamable de mayor tamaño; si hay viento, la nube de gas se desplazará mezclándose con el aire, tras lo cual es muy posible que llegue a

incendiarse. Dos condiciones deben presentarse para que se produzca la combustión de la nube de vapor: en primer lugar, debe existir una fuente de ignición localizada a alguna distancia del punto de la fuga; en segundo lugar, la concentración dentro de la nube de vapor debe de estar comprendida entre los límites de inflamabilidad del material.

La concentración dentro de la nube de gas variará, encontrándose regiones por debajo del límite de inflamabilidad, mientras que regiones cercanas al centro pueden estar por encima del límite superior de inflamabilidad.

Generalmente se asume que la zona limitada por el límite inferior de inflamabilidad (LFL) producirá una letalidad del 100 %, mientras que la exterior al 50% del LFL corresponde a una zona segura. Ésta es la zona que se toma como zona de intervención para la población, mientras que la establecida por el 10% del LFL se adopta como zona de alerta. Para los grupos de intervención, se toma como zona peligrosa la establecida por el valor del LFL y como zona menos peligrosa la establecida por el valor del 50% del LFL.

Con respecto a la velocidad de propagación de la llama, existe una parte de las llamas que se dispersan a través del aire con una velocidad relativamente baja; esto puede ser debido a una baja concentración del gas o vapor inflamable o bien a que la combustión tiene lugar en una región estrecha donde el aire se difunde dentro de la nube y se reduce la concentración por debajo del límite superior de inflamabilidad (UFL). Sin embargo, la velocidad del frente de llama puede acelerarse para nubes grandes alcanzando velocidades elevadas.

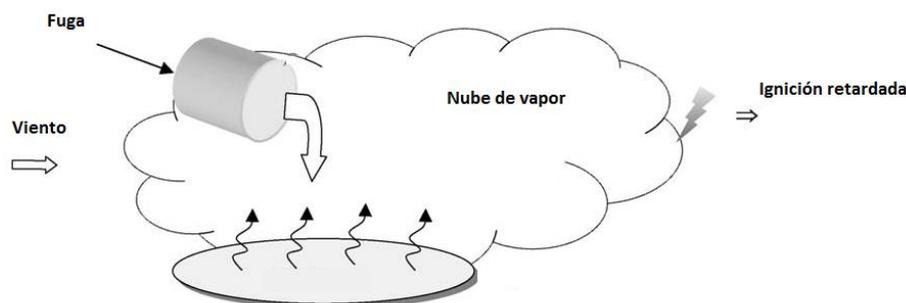


Fig. 1.7 Esquema de la evolución e ignición de una nube de vapor (incendio de llamarada) [Modificado de Luketa et al., 2006].

Otro requerimiento importante para que ocurra únicamente una llamarada tiene relación con la localización de la fuente de ignición; no puede haber ninguna barrera o confinamiento que provoque la aceleración del frente de llama, porque esto podría resultar en una explosión con efectos mecánicos. Evidentemente, existe la posibilidad de que se den simultáneamente la explosión de la nube y el incendio: efectos mecánicos y térmicos simultáneamente.

Los estudios experimentales realizados a gran escala muestran que las velocidades de la llama medidas durante la combustión (para aquellos casos en los que no hubo efectos mecánicos) fueron relativamente bajas y muy alejadas del valor de 150 m/s frecuentemente citado como necesario para la generación de una sobrepresión considerable. Mizner y Eyre (1983) reportan que la velocidad de propagación de la llama con respecto al suelo en el caso de derrames de GLP varía de 4 a 5 m/s.

De los estudios experimentales realizados con derrames de GNL reportados por Mudan (1988) y por Raj et al. (1979), se pueden obtener características de las diversas etapas del desarrollo de los incendios de llamarada. Primero, la llama turbulenta se extiende a través de la nube, propagándose en ambos sentidos con respecto a la dirección del viento. La combustión de una nube de vapor

implica primero la combustión de la parte premezclada, seguida de la combustión difusiva de la parte rica en combustible. Por tanto, la nube arde de regreso a la fuente como una llama de difusión y una llama premezclada simultáneamente. En los estudios citados, las nubes de vapor fueron visibles por el vapor de agua asociado al fenómeno. La segunda etapa es la propagación de la llama hacia la balsa de líquido, la cual parece ser una llama de difusión estacionaria. La última etapa resulta en una balsa de fuego (pool fire) en el lugar del derrame.

Los incendios de llamarada son capaces de producir altos niveles de radiación, aunque tienen una duración muy corta. Además, como suele ocurrir con otros tipos de incendio y con las explosiones, en algunos casos pueden producir una cadena de eventos en los cuales las consecuencias de un accidente previo son incrementadas y llevan a que ocurra otro accidente mayor; esta escalada en las consecuencias se conoce como “efecto dómimo”. Sin embargo, la incidencia de este tipo de incendios como agente iniciador del efecto dominó es claramente menor que la de otros tipos de incendio (de balsa, de chorro).

A pesar de su importancia, los estudios experimentales y de modelado de los incendios de llamarada son escasos y presentan notables incertidumbres, por lo que surgen cuestionamientos respecto al comportamiento de este tipo de fenómeno. Estos incendios han sido mucho menos estudiados que los de balsa, de chorro o de bola de fuego, por lo que son bastante mal conocidos. De esta constatación surgió la motivación de realizar un estudio sobre la dispersión de las nubes de vapor inflamables y las características principales del incendio de las mismas, con el ánimo de contribuir a un mejor conocimiento de este tipo de accidentes.

1.5 Objetivos

El principal objetivo de la presente tesis doctoral ha sido el estudio de la dispersión e incendio de nubes de vapor o gas inflamables resultado de vertidos de GNL y GLP.

Los objetivos específicos han sido los siguientes:

- Realizar un análisis histórico de los incendios de nubes de vapor inflamables que han ocurrido.
- Revisar los programas experimentales llevados a cabo, para recopilar información sobre la dispersión y combustión de las nubes de gas. En especial, se han buscado datos sobre las dimensiones de la nube de gas y las características de las llamas, así como sobre otros parámetros de interés.
- Realizar una revisión de los modelos de dispersión más comunes y, en particular, del programa de dispersión de gases DEGADIS.
- Estudiar la relación entre la región inflamable de una nube de gas combustible y el contorno visible de dicha nube.
- Analizar los incendios de nubes de gas o vapor inflamables (llamarada), los modelos existentes y sus principales características.

Capítulo 2. Análisis histórico de los accidentes ocurridos con nubes inflamables

2.1 Introducción

Para diversos propósitos, como los análisis de riesgos, los estudios de seguridad o el establecimiento de determinados criterios asociados al diseño de planes de emergencia, se requiere una descripción razonablemente correcta de las causas y consecuencias asociadas a los denominados accidentes graves, entre los que puede incluirse la ignición de una nube de vapor o gas inflamable. Este accidente va asociado a los denominados “incendios de llamarada” y a las explosiones de nubes de vapor (VCE). Para ello es muy importante disponer de datos experimentales obtenidos a escala real, dado que las características de este tipo de accidentes se conocen tan sólo de forma parcial. La predicción de su comportamiento y de sus efectos y consecuencias a partir de únicamente razonamientos teóricos implica por tanto una elevada incertidumbre.

Sin embargo, el número de pruebas experimentales de calidad realizadas a escala real en relación con los accidentes citados (incendio de llamarada y explosión de una nube de vapor) es muy limitado; esto es esencialmente debido a lo costoso y complejo que puede resultar este tipo de experimentación. Es por esto que una revisión de los accidentes ocurridos puede ser de gran utilidad para contribuir a cubrir esta laguna, tanto en lo que atañe a la frecuencia con la que tienen lugar como para el establecimiento de algunas de sus características más importantes.

El análisis histórico es una de las herramientas utilizadas en el análisis de riesgos. Consiste en estudiar accidentes ocurridos en el pasado, relativos al tipo de fenómeno estudiado, en las instalaciones o situaciones de interés (plantas de

proceso, almacenamiento o transporte). Entre las ventajas que presenta este tipo de análisis juega un papel muy importante la que representa el hecho de basarse en accidentes reales. El análisis histórico permite obtener información valiosa sobre las causas y consecuencias de los accidentes ocurridos, así como sobre los materiales más frecuentemente involucrados. Además, si se dispone de un número suficiente de datos, es posible construir un árbol de eventos y con ello determinar la secuencia de eventos más probable y la frecuencia con la que es previsible que ocurra.

No obstante, el análisis histórico tiene sus limitaciones, de las cuales la principal es el acceso a la información, que a menudo es escasa o incompleta.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el análisis histórico de los incendios de llamarada, incluyendo, en determinados casos, la eventual explosión acompañada de sus efectos mecánicos. Su objetivo principal ha sido el de contribuir a un mejor conocimiento de los mismos: origen y causas, materiales más frecuentemente involucrados, características físicas, efectos y consecuencias, etc.

2.2 Fuentes de información

Para realizar un análisis histórico se requiere la utilización de bases de datos. Éstas resultan ser una valiosa herramienta que permite obtener de manera rápida la información de los principales accidentes ocurridos en el pasado. En el presente estudio se ha utilizado principalmente la información contenida en la base de datos MHIDAS.

También se ha recurrido a otras fuentes de información. Entre ellas puede citarse la base de datos ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents), la del Chemical Safety Board (CSB), que es una agencia federal independiente con sede en Washington, DC, encargada de la investigación industrial de accidentes químicos, etc. (véase la Tabla 2.1). Asimismo, se han consultado fuentes bibliográficas como por ejemplo el apéndice de accidentes históricos publicado por Mannan (2005), descripciones de accidentes tomadas de artículos, informes, etc.

Bases de datos

El uso de bases de datos permite desarrollar otras aplicaciones para el manejo y análisis de la información de manera más eficiente. Obviamente, cada base de datos presenta una estructura particular de la información de los accidentes; algunas prestan más atención a ciertos aspectos concretos como puede ser el tipo de accidente, tipo de industria implicada etc., mientras que otras enfatizan otros aspectos como por ejemplo las consecuencias y pérdidas provocadas por el accidente, etc. En general, sin embargo, se caracterizan por el hecho de dar habitualmente sólo una información parcial, no completa, sobre la mayoría de los casos; esta falta de información deberá paliarse, en lo posible, con la búsqueda de datos adicionales sobre cada accidente por otras vías.

Un aspecto no científico pero si de carácter práctico es la distinta accesibilidad a las bases de datos. Algunas de ellas son de libre acceso, pero otras requieren el pago de una suscripción anual para acceder a la información o bien pagar por un bloque concreto de información sobre un determinado tema.

En la tabla 2.1 se muestra una breve descripción de las principales bases de datos existentes que recopilan información sobre accidentes relacionados con la industria en diversas partes del mundo. Todas las bases de datos contienen información que podría ser útil; no obstante, entre las características principales que debe de tener una base de datos fiable se encuentran las siguientes:

- Información de alta calidad. Ésta es necesaria para desarrollar un análisis significativo y veraz. Por lo tanto, se requiere que los datos provengan de entidades reconocidas, que garanticen la validez, objetividad y fiabilidad de la información que contienen (es decir, debe tenerse en cuenta el principio GIGO: “garbage in, garbage out”).
- Actualización. Las bases de datos deben incluir tantos accidentes como sea posible, del pasado y de los últimos años, por ello deben ser actualizadas permanentemente. La inclusión de accidentes del pasado

permite estudiar la evolución de los mismos en función del tiempo. No obstante, hay que tomar en cuenta los posibles cambios ocurridos en procedimientos y legislaciones, así como en la propia industria.

- Cantidad de información. Es evidente que una base de datos con un mayor número de registros permite obtener un tratamiento estadístico de mayor calidad y más significativo y, por tanto, mejores conclusiones.
- Numero de campos. Las bases de datos con un mayor número de campos permiten tener una descripción más exacta y ampliar el tratamiento de la información.
- Transferencia de datos. Cuando el objetivo del estudio es el análisis estadístico, es muy conveniente que la base de datos permita una fácil exportación de los datos. Esto resulta posible cuando la estructura de la base de datos se organiza con campos que permiten un tratamiento lógico de los datos, lo cual es esencial cuando se han de analizar un gran número de accidentes

Tabla 2.1 Descripción de las principales bases de datos

Base de datos	Descripción
<i>FACTS (Failure and Accidents Technical Information System)</i>	<p>Desarrollada por TNO Division of Technology for Society.</p> <p>Contiene aproximadamente 15.000 registros.</p> <p>Recoge tanto accidentes menores como severos.</p> <p>Reporta principalmente accidentes industriales con sustancias peligrosas.</p> <p>Inicio de recopilación de accidentes: 1980.</p>
<i>MHIDAS (Major Hazard Incidents Data Service)</i>	<p>Desarrollada por AEA Technology, administrada por Health & Safety Executive del Reino Unido.</p>

	<p>Contiene más de 12.000 accidentes ocurridos en diversos países.</p> <p>Recoge los accidentes relacionados con sustancias peligrosas.</p> <p>La recopilación de accidentes se inicia en 1980, aunque contiene muchos sucedidos antes de esta fecha.</p>
<p><i>MARS (Major Accident Reporting System)</i></p>	<p>Desarrollada por el Institute for Systems Engineering and Informatics (ISEI).</p> <p>Contiene más de 450 de los principales accidentes ocurridos en la Unión Europea.</p> <p>Recoge accidentes industriales severos.</p> <p>La recopilación de los accidentes se inició en 1985.</p>
<p>ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents)</p>	<p>Operada por el ministerio francés de ecología y desarrollo sostenible.</p> <p>Contiene eventos que han dañado la salud, la seguridad pública y el entorno.</p> <p>La recopilación de accidentes empezó en 1992 con accidentes ocurridos en Francia y en otros países. Recoge más de 30.800 accidentes ocurridos antes de 2006 en la última versión.</p>

Base de datos MHIDAS

Contiene información de accidentes ocurridos durante el transporte, proceso o almacenamiento de materiales peligrosos. Se accede a la información mediante suscripción anual (el CERTEC ha dispuesto de dicha suscripción hasta 2008 fecha en la que el servicio fue interrumpido).

MHIDAS inició su actividad en 1980, no obstante, contiene información de accidentes ocurridos desde principios del siglo veinte. A partir de la década de los 60 es cuando se observa un crecimiento notable en el número de registros, atribuible al aumento de información disponible y de los medios para su recopilación. Recoge incidentes ocurridos en más de 95 países, si bien una gran parte de los registros corresponden a E.U.A. y al Reino Unido. Esta situación se debe a que en ambos países existe una mayor disponibilidad de información

publicada sobre accidentes en los que han intervenido sustancias peligrosas, así como a una cuestión cultural. Existe también un número importante de registros pertenecientes a Canadá, Alemania, Francia y la India.

La base de datos es distribuida en CD-ROM junto con el software WINSPIRS, un administrador de bases de datos que permite la búsqueda y filtro de datos de manera fácil. Ha sido actualizada periódicamente hasta la última versión disponible, noviembre de 2007, en la cual se incluyen 14.169 accidentes. Su actualización se ha interrumpido.

La selección de MHIDAS como principal fuente de información del estudio obedece a varias razones:

- Acceso a la información: los registros de MHIDAS pueden ser obtenidos desde CD-ROM.
- Relación de la información: la descripción de cada registro puede ser exportada hacia otro software como puede ser una hoja de Microsoft Access, lo que facilita el análisis de la información.
- Interpretación de la información: algunas bases de datos contienen más registros e información pero, a diferencia de MHIDAS, ésta no está organizada por campos lo cual puede complicar considerablemente su interpretación.
- Numeración de los accidentes: los accidentes más recientes han sido agregados a la base de datos con un número creciente, por lo que los registros anteriores conservan siempre el mismo número, lo que resulta útil para actualizar búsquedas.

Cada accidente de la base de datos MHIDAS es codificado en un formato estándar que incluye detalles tales como el material involucrado en el accidente y el número de heridos, muertos y evacuados. También contiene una breve descripción del accidente, que aporta detalles adicionales sobre las circunstancias del mismo. En cuanto a la estructura de la información, en la Tabla 2.2 se pueden ver los campos de los que consta cada registro.

Tabla 2.2 Descripción de los campos de la base de datos MHIDAS

Código	Nombre del campo	Descripción
AN	Número de registro MHIDAS	No. de registro en la Base de Datos MHIDAS.
CR	Fuente del registro	Fuente de información del accidente: Material suministrado por ICHEME, SRD o WORKSAFE.
DA	Fecha del incidente	Fecha del incidente en forma DD/MM/YY o por aproximación a una fecha anterior o posterior.
PD	Densidad de población	Indica la densidad de la población del área afectada: rural o urbana.
LO	Localización del incidente	Indica el lugar del incidente mediante tres valores: ciudad /región/país.
MT	Tipo de material	Campo utilizado para clasificar el tipo general de material/sustancia, así como su estado en el momento del incidente, como por ejemplo DUST (polvo explosivo).
MH	Riesgos del material	Asocia el riesgo más probable para cada material o situación, independientemente de que esta ocurra o no, por ejemplo TO(toxico), FI(combustible),etc.
MN	Nombre del material	Nombre del material involucrado en el accidente.
MC	Código del material	Código utilizado para referenciar el material del campo anterior.
IT	Tipo de Incidente	Campo de hasta dos códigos, asociados a los incidentes reales ocurridos, con evolución histórica en caso de que haya más de uno (p.e. incendio/explosión).

OG	Origen general y específico	Campo de hasta dos códigos, describiendo el área y circunstancias del accidente, como por ejemplo PROCESS (en caso de que el incidente haya ocurrido en elementos de proceso de la instalación).
GC	Causas generales	Causa general del incidente, como por ejemplo MECHANICAL (en caso de fallo mecánico).
SC	Causas específicas	Causa específica del incidente, como por ejemplo OVERHEAT (en caso de sobrecalentamiento).
QY	Cantidad de material	Estimación en toneladas de la cantidad de material involucrado en el accidente.
DG	Daño	Estimación en millones de dólares del daño material provocado por el incidente.
NP (KR,IR,ER)	Número de personas afectadas. (muertos, heridos, evacuados)	Estimación del número total de personas muertas, heridas y/o evacuadas a consecuencia del incidente. Muertos/ heridos: en el campo Resumen se indica, si es posible, la diferenciación entre los ocurridos dentro y fuera de la instalación. Evacuados: número total de personas fuera de la instalación evacuadas de sus casas o lugares de trabajo como consecuencia del incidente.
IS	Fuente de ignición	Campo de hasta dos códigos asociados a las fuentes de ignición que, en su caso, activó el incendio/explosión, como por ejemplo ELECTRIC INSTRUMENT, etc.
IG	Tiempo de ignición	Indicación del tiempo en segundos, entre el comienzo de la fuga y la ignición, como forma de estimación de la distancia a la fuente de ignición.
KW	Palabras clave	Indicación, a través de una serie de códigos, de si existe información adicional disponible sobre algunos

		aspectos adicionales.
AB	Resumen	Breve resumen del incidente, con información más o menos detallada.
RA	Referencias disponibles	Número de artículos disponibles sobre el incidente para su consulta.

2.3 Metodología

Una vez seleccionada la base de datos MIDHAS como principal fuente de información, se establecieron una serie de pasos a seguir para realizar el análisis histórico. Entre ellos fue necesario un proceso de selección de los accidentes correspondientes a llamarada/VCE de entre el total de los contenidos en la base de datos.

Con el propósito de seleccionar los accidentes de la base de datos se realizó una primera selección a través de una palabra clave en el campo “búsqueda” de la base de datos. De los resultados obtenidos en esta primera lista, fueron encontradas otras palabras clave o combinación de palabras que aparecían regularmente en la descripción del accidente y con las cuales se realizaron otras búsquedas.

2.3.1 Selección de los accidentes

Los accidentes se han localizado en las bases de datos mediante la utilización en primer lugar de la palabra clave “flash fire”, obteniéndose 134 registros. De ellos, 11 registros aparecieron en más de una ocasión; esto ocurre por ejemplo en el caso en que interviene más de una sustancia en el mismo incidente, por lo que se encuentran dos o más registros.

También se efectuó la búsqueda simultánea con las palabras “vapour”, “cloud” y “fire”, obteniéndose 142 registros. Los accidentes fueron analizados según su descripción, clasificados y seleccionados. Como parte del criterio usado para seleccionar los accidentes, primero tenía que quedar claro que había ocurrido una

fuga de un líquido o vapor y después que la ignición tuvo lugar después de la fuga. Por lo tanto, al analizar de manera individual cada accidente y en base a los conocimientos de lo que involucra un incendio de llamarada, los accidentes que carecían de información que evidenciara que había ocurrido un incendio de este tipo fueron descartados.

Finalmente, pues, se ha obtenido una muestra con un total de 176 accidentes que involucraron un flash fire. Se han incluido dentro de esta lista final diversos accidentes encontrados en fuentes de información adicionales como la bibliografía, otras bases de datos, Internet, etc. Esta lista final de 176 accidentes seleccionados es la que se ha utilizado en el análisis histórico.

2.3.2 Base de datos Access

La lista de accidentes seleccionada ha sido exportada a Access, con lo cual se ha creado una nueva base de datos que contiene la misma información original pero que además ofrece otras características, especialmente en lo referente al tratamiento estadístico de dicha información.

Como se ha mencionado, una limitación que tiene MHIDAS es que un accidente puede tener más de un registro. Esto ocurre debido a la presencia de diferentes causas o tipos de accidentes, o bien de varias sustancias involucradas, sin que pueda ser solucionado con WinSPIRS, el software suministrado con la base de datos. Otra limitación es que MHIDAS no permite un análisis estadístico, ya que su función primordial es almacenar datos y permitir el acceso por parte del usuario a los registros de manera sencilla pero sin herramientas estadísticas.

Por lo tanto, ha sido necesario el uso de un nuevo filtro de accidentes basado en Microsoft ACCESS. Éste ha sido programado de tal forma que permite importar los datos de todos los registros de accidentes contenidos en MHIDAS y tiene una relación de estructura que permite conservar la codificación de MHIDAS y hacer consultas en las cuales se agrupan y filtran los accidentes usando cada uno de los campos o códigos de MHIDAS.

Así, por ejemplo, es posible realizar la búsqueda de un campo específico y pedirle a ACCESS que agrupe los datos obtenidos en orden ascendente o descendente. Además, es posible pedirle que devuelva la cuenta (número de accidentes correspondientes a cierto código del campo seleccionado), suma, promedio, etc., facilitando en definitiva el tratamiento estadístico de la información. La Figura 2.1 muestra una pantalla del diseño de búsqueda creado en Microsoft ACCESS.

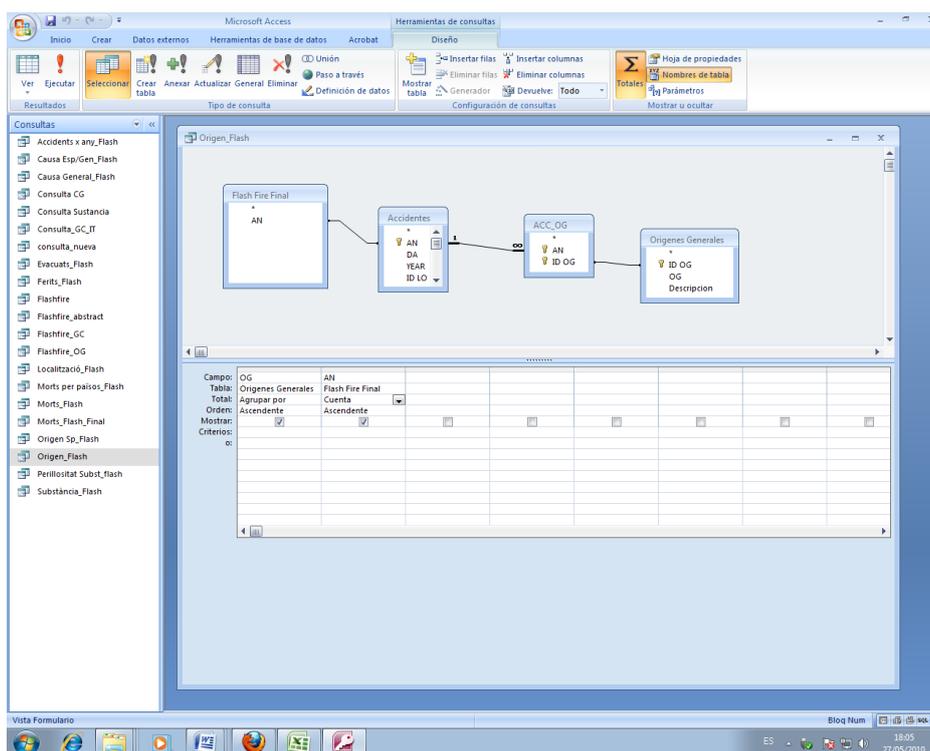


Fig. 2.1 Diseño de la búsqueda “origen general” de incendios de llamarada en ACCESS.

Adicionalmente se puede mencionar que ACCESS tiene una gran flexibilidad en la importación de datos y en la creación de grupos de datos a partir de combinación de fuentes específicas, escenarios y variables específicas.

Evidentemente, los accidentes que no estaban incluidos en MHIDAS (provenientes de otras fuentes) pueden ser introducidos asimismo en ACCESS.

2.3.3 Limitaciones del análisis

El análisis de los accidentes donde hubo una ignición de una nube de vapor se ha basado en la información recogida en las diversas fuentes ya mencionadas. Es evidente que no todos los informes de accidentes presentan información de forma detallada y completa, lo que origina una serie de limitaciones a la hora de realizar un tratamiento estadístico. Esto es especialmente cierto en el caso de fugas de cantidades relativamente pequeñas de materiales combustibles (es decir, accidentes de tamaño y consecuencias relativamente moderados, con poca repercusión mediática) o en los casos en que la magnitud de los daños es ínfima.

2.4 Resultados y discusión

Se han encontrado en total 176 accidentes involucrando incendios de llamarada. Si bien la información no siempre es completa, la información disponible en las bases de datos se ha complementado en algunos casos con la posterior búsqueda de información específica sobre determinados accidentes concretos en la bibliografía; esto ha suministrado datos suficientes como para poder efectuar un tratamiento estadístico de la muestra seleccionada.

2.4.1 Origen de los accidentes

En la base de datos MHIDAS se consideran siete categorías al analizar el origen de los accidentes: *proceso, transporte, almacenamiento, transferencia (carga y descarga), doméstico/comercial, residuos y almacén de productos*.

Se ha podido establecer el origen en el 99.4 % de los 176 accidentes. En la Figura 2.2 se puede apreciar la distribución de los diversos orígenes de los accidentes. Se puede apreciar que el mayor porcentaje es el originado en unidades o áreas de plantas de proceso (35.8%), seguido por los ocurridos durante el transporte con un 26.1 %, almacenamiento de materiales con un 19.3 % y los debidos a las operaciones de carga y descarga, con un 14.2 %. Esta distribución es parecida a la obtenida en otros análisis históricos realizados con todos los accidentes (Vílchez et

al, 1995; Darbra y Casal, 2004). En conjunto, pues, el 92% de los accidentes involucrando incendios de llamarada han ocurrido en instalaciones industriales típicas.

Es interesante resaltar el porcentaje correspondiente a la operación de carga/descarga, 14.2%. Valores parecidos han sido obtenidos en otros análisis históricos de tipo general (por ejemplo, Vílchez et al, 1995: 8%). Este dato pone de manifiesto una vez más el riesgo asociado a la operación de llenado o vaciado de cisternas, bien conocido pero no suficientemente controlado.

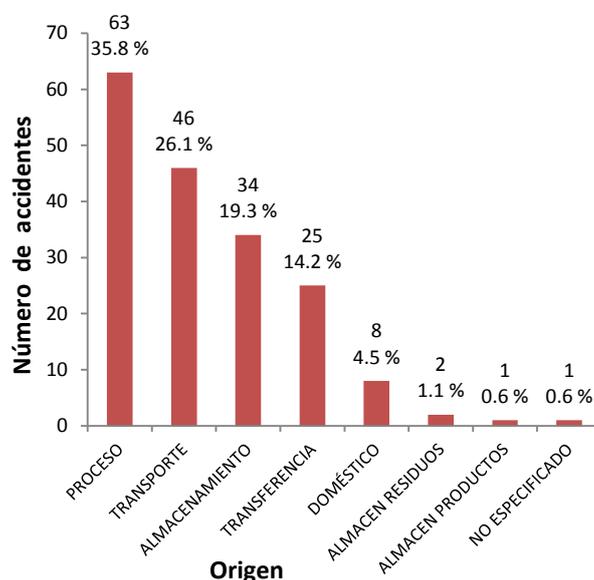


Figura 2.2 Origen de los incendios de llamarada.

Con respecto al origen específico de los accidentes se realizó un análisis para los seis orígenes generales más importantes: plantas de proceso, transporte, almacenamiento de materiales, transferencia, doméstico/comercial y almacenamiento de productos. Los porcentajes para cada origen específico se han resumido en la Tabla 2.3.

Si bien en algunos casos el número de registros no es significativo (por ejemplo, en

“Proceso”, intercambiadores de calor, con un solo accidente), en general el número de accidentes es suficientemente elevado como para poder obtener algunas conclusiones.

El análisis de estos datos muestra que en las plantas de proceso la mayoría de los accidentes ocurren en los recipientes, con un 36.7% de los casos; estos recipientes incluyen unidades tales como reactores, columnas de destilación o de absorción, depósitos pulmón, etc. El segundo lugar es ocupado por accidentes originados en tuberías (22%). Es importante notar el considerable trazado de tuberías existente en la mayoría de plantas de proceso, con una serie de elementos –bridas, conexiones diversas– especialmente sensibles o proclives a un potencial escape.

En tercer lugar aparecen los reactores, unidades que, por las severas condiciones de operación a las que frecuentemente trabajan (presión, temperatura, fenómenos exotérmicos localizados) son especialmente delicados en relación con la posibilidad de accidentes. Si bien se ha encontrado esta referencia específica al equipo “reactores”, parece evidente que estas mismas unidades probablemente están también incluidas en el apartado “recipientes de proceso”; esto indicaría por tanto que los reactores químicos son las unidades (recipientes) que más frecuentemente aparecen en el origen de estos accidentes.

En el apartado “transporte”, nuevamente las tuberías (conductos o pipe-lines en este caso) son el equipo que con más frecuencia aparece (47%).

Tabla 2.3 Origen específico de accidentes que involucran incendios de llamarada

Origen Específico	No. de accidentes	% de categoría	% del total
Proceso			
Depósitos de proceso	22	36.7	12.5
Tuberías	13	21.7	7.4
Reactores	10	16.7	5.7
No especificado	9	15.0	5.1
Bombas	4	6.7	2.3
Intercambiadores de calor	1	1.7	0.6

Contenedores	1	1.7	0.6
Transporte			
Tuberías	22	46.8	12.5
Cisternas para carretera	17	36.2	9.7
Cisternas para ferrocarril	4	8.5	2.3
Barco	3	6.4	1.7
Tanque contenedor	1	2.1	0.6
Almacenamiento			
Depósito de almacenamiento a presión atmosférica	15	42.9	8.5
Depósito de almacenamiento presurizado	12	34.3	6.8
Tuberías	4	11.4	2.3
No especificado	2	5.7	1.1
Depósito de proceso	1	2.9	0.6
Cisterna para ferrocarril	1	2.9	0.6
Carga/Descarga			
Mangueras	8	32	4.5
Depósito de almacenamiento presurizado	4	16	2.3
Cisternas para ferrocarril	3	12	1.7
Tuberías	3	12	1.7
Barco	2	8	1.1
Depósito de almacenamiento a presión atmosférica	1	4	0.6
Barcaza	1	4	0.6
Contenedores	1	4	0.6
Tuberías	1	4	0.6
Tanque contenedor	1	4	0.6
Almacén de residuos			
Tuberías	1	50	0.6
No especificado	1	50	0.6
Doméstico/Comercial			

Tuberías	2	28.6	1.1
No especificado	2	28.6	1.1
Depósito de almacenamiento presurizado	1	14.3	0.6
Depósito de almacenamiento a presión atmosférica	1	14.3	0.6
Contenedores	1	14.3	0.6

El transporte por carretera (36%) y por vía férrea (8%) tienen también una contribución importante. La contribución de cada una de estas modalidades es discutible; si bien aquí el transporte por carretera tiene claramente un mayor porcentaje de accidentes, otros estudios han obtenido contribuciones mucho más paritarias. Es típico aquí el caso del accidente de circulación involucrando un camión cisterna o el descarrilamiento involucrando uno o más vagones cisterna, seguido del impacto con rotura de válvulas o tuberías y el consiguiente escape; la posterior formación de una nube inflamable viene seguida de la ignición de la misma.

En cuanto a los accidentes en áreas de almacenamiento, la mayor frecuencia ocurre en los depósitos de almacenamiento a presión atmosférica –los más comunes– con el 43% en esta categoría; los depósitos presurizados siguen a continuación con el 34%, seguidos nuevamente por las tuberías (11%).

Finalmente, en las actividades de carga y descarga de materiales es significativo que el 32% de los accidentes ocurrieron con mangueras flexibles. Si bien éstas son muy prácticas y ampliamente utilizadas, es bien sabido que son más endebles y delicadas que las tuberías fijas, siendo ésta la causa de que constituyan el origen de muchos de los accidentes que ocurren en zonas y actividades de carga y descarga.

2.4.2 Material involucrado

El tipo de material involucrado en los accidentes ha sido clasificado como se muestra en la Tabla 2.4. Debido a que en algunos accidentes estuvo involucrada

más de una sustancia, la suma del porcentaje es mayor que 100. Aquí se hace evidente una de las dificultades encontradas en este tipo de análisis históricos, al introducirse una forma y criterios distintos al tipo de material en las bases de datos. Por ejemplo, en el caso del gas licuado de petróleo éste aparece como “LPG” y al mismo tiempo como “propano” y “butano”; puede que esté involucrado asimismo en alguno de los casos registrados como “hidrocarburos”.

Tabla 2.4 Sustancias más frecuentemente involucradas en incendios de llamarada

Sustancia	Número de accidentes	%
GLP	72	40.9
Crudo de petróleo	11	6.3
Gasolina	11	6.3
Gas natural	12	6.8
Cloruro de vinilo	7	4.0
Hidrocarburos	54	30.7
Otros compuestos orgánicos	24	13.6
Otros	14	8.0

Como se observa en la tabla, el GLP es la sustancia que aparece más frecuentemente en los accidentes con un 40.9 (una parte importante de los mismos, ocurridos durante el transporte). El segundo puesto (con el 30.7%) corresponde al apartado genérico de diversos hidrocarburos.

2.4.3 Causas generales y específicas de los accidentes

La base de datos MHIDAS toma en consideración ocho causas generales de accidentes: fallo mecánico, fallo humano, fallo por impacto, fallo de instrumentación, fallo de servicio, reacción violenta, eventos externos y condiciones de proceso.

Como se puede apreciar en la figura 2.3, las causas generales más frecuentes de los accidentes son las debidas a fallos mecánicos, con un 44 % de los casos,

seguidas del 37% de accidentes debidos a errores humanos. Se ha de mencionar que se desconocen las causas de un 17% de los accidentes. Cabe agregar que como los accidentes pueden tener más de una causa, la suma de los porcentajes es nuevamente superior a 100. Esto se igualmente aplicable a las causas específicas.

También se puede mencionar que el 14.8 % corresponde a fallos por impacto, seguido del 12.5 % por eventos externos, reacciones violentas el 3.4 % y debido a otras causas un 6.3 %.

Una vez más se observa cierta imprecisión: por ejemplo, el impacto (mecánico) se considera aparte del origen mecánico; asimismo, es perfectamente posible que algunos accidentes atribuidos a la causa general “fallo mecánico” sean debidos en última instancia a un error humano. Es probable, por tanto, que la incidencia del factor humano sea en realidad superior a la mostrada en la Figura 2.3.

La distribución de las causas específicas puede verse en la Tabla 2.5, detalladas para las principales causas generales: errores humanos, fallos mecánicos, fallos por impacto y eventos externos.

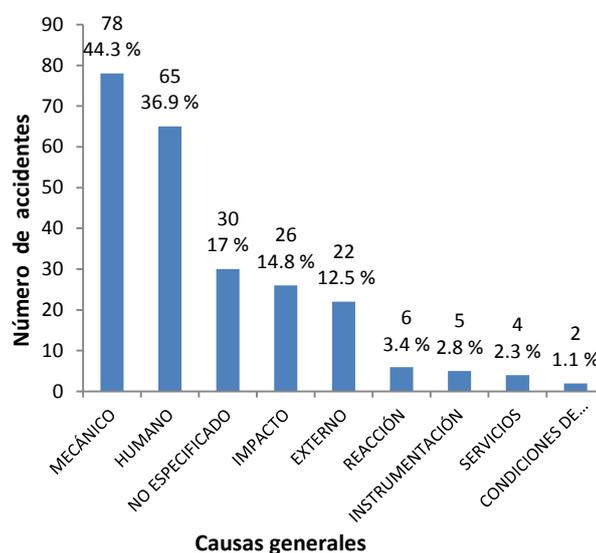


Figura 2.3 Causas generales de los incendios de llamarada.

Entre los accidentes debidos a errores humanos, la causa específica más frecuente es la relativa al mantenimiento general (19 %), seguida por operaciones generales (14.5%). Un caso interesante es el sobrellenado de depósitos y equipos (13 %), una contingencia fácil de prever y evitar con medios comunes (por ejemplo, control de alto nivel) y que, sin embargo, continua ocurriendo con notable frecuencia.

Tabla 2.5 Causas específicas de accidentes que involucran llamaradas

Causa específica	No. de accidentes	% de categoría	% del total
Errores humanos			
Mantenimiento	13	18.8	6.3
Operaciones generales	10	14.5	4.8
Procedimientos	9	13.0	4.3
Sobrellenado	9	13.0	4.3
Error de diseño	5	7.2	2.4
No especificado	3	4.3	1.4
Otros	20	29.0	9.7
Fallo mecánico			
No especificado	21	22.8	10.1
Válvula	11	12.0	5.3
Fuga por acoplamiento	11	12.0	5.3
Por sobrepresión	12	13.0	5.8
Corrosión	8	8.7	3.9
Fallo en manguera	7	7.6	3.4
Otros fallos metalúrgicos	7	7.6	3.4
Otros	15	16.3	7.2
Fallo por impacto			
Por accidente sin involucrar otros vehículos	8	30.8	3.9
Otro vehículo	6	23.1	2.9
Objeto pesado	5	19.2	2.4
Otros	7	26.9	3.4
Causas externas			

Incendio	7	35.0	3.4
Explosión	5	25.0	2.4
Terremoto	2	10.0	1.0
No especificado	2	10.0	1.0
Otros	4	20.0	1.9

En la categoría de fallos mecánicos se desconoce la causa específica del 23 % de los registros. De las conocidas, la más frecuente es el fallo por sobrepresión, con un 13%, seguido con prácticamente el mismo porcentaje (12%) por válvulas y fugas en bridas. En cuanto a los fallos por impacto, la principal causa es el accidente en carretera en el que no se ven involucrados otros vehículos, con un 30.8%, seguido por los accidentes en los que participa otro vehículo, con un 23.1%. Finalmente, considerando los eventos externos, los más importantes son los incendios, con un 35% del total de esta categoría, y las explosiones (25%).

2.4.4 Población afectada por los accidentes

Con respecto a la población afectada por los accidentes, sus consecuencias se cuantifican esencialmente en base a: número de muertos, número de heridos y número de personas evacuadas.

Número de muertos

En relación con el número de muertos, se han establecido arbitrariamente las siguientes categorías: 0, 1-10, 11-100, etc. La distribución de los accidentes en las mismas se ha representado en la Figura 2.4. De los 176 accidentes registrados en el estudio, en un 30% no se encontró información disponible para determinar si ocurrieron muertes. Para el 70.5 % de los accidentes de los que se tiene información disponible, se obtuvo que en el 63.5% de éstos acaecieron de 1 a 10 muertos, en el 31% de los casos no hubo víctimas fatales y solamente en el 1.6% de los casos se registraron de 101 a 1000 muertes; el accidente que más víctimas mortales registró fue el ocurrido en San Juan Ixhuatepec, México, el 19 de noviembre de 1984 (si bien hay que considerar que en el mismo la mayor contribución fue la debida a las bolas de fuego).

El valor obtenido de los registros seleccionados, así como sus probabilidades acumuladas, se han representado gráficamente en la Figura 2.5, en la que N es el número de muertos y P (x ≥ N) es la probabilidad de que en un accidente determinado el número de muertos sea ≥ N.

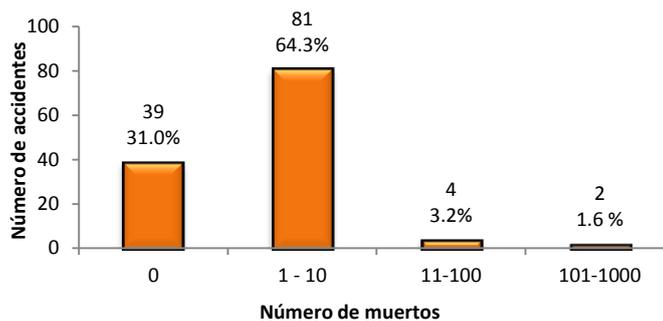


Figura 2.4 Clasificación de los accidentes en función del número de muertos.

La gráfica sigue aproximadamente una línea recta con una pendiente de -0.77; esto indica que la probabilidad de un accidente con 10 o más muertos es 6 veces mayor que la de uno con 100 o más muertos.

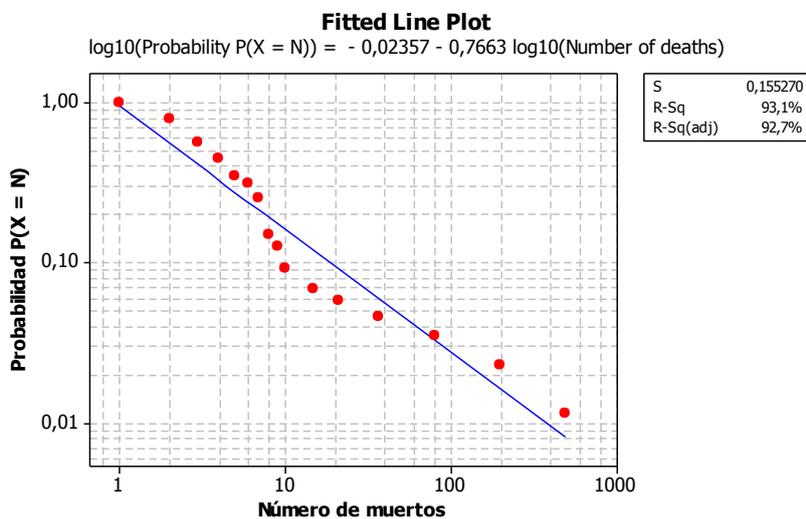


Figura 2.5 Probabilidad acumulada en los accidentes con N muertos.

Número de heridos

Respecto al número de heridos, se han agrupado también los registros en las mismas categorías: 0,1-10,11-100, etc. (Figura 2.6). El accidente con mayor número de heridos resulta ser el mismo de la sección previa, ocurrido en México en 1984 (idéntica consideración que en el caso anterior). En este caso, de los 176 accidentes registrados en el estudio el 25% no tenían información disponible para determinar si hubo heridos. Para el 75 % de los accidentes de los que sí se ha tenido información disponible, en el 63% se registraron de 1 a 10 heridos, en el 20% de los casos no hubo heridos, y solamente en el 4% de los casos se registraron de 101 a 1000 heridos.

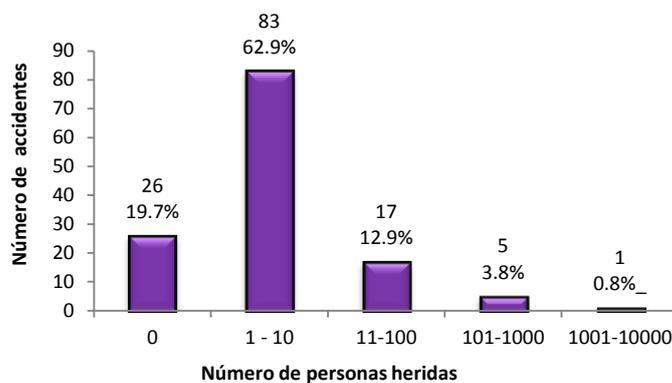


Figura 2.6 Distribución de los accidentes según el número de personas heridas.

Número de evacuados

En este caso solamente el 19.3% de los accidentes registrados en el estudio cuentan con información disponible del número de personas evacuadas (el menor dramatismo y gravedad de la evacuación en comparación con la muerte o la existencia de heridos graves justifica esta falta de información). La distribución se muestra en la Figura 2.7. En la mayoría de los accidentes no se evacuó a nadie, mientras que en el 17.6% de los casos se evacuaron entre 101 a 1000. El accidente con mayor número de evacuados es nuevamente el ocurrido en México en 1984, con más de 200000.

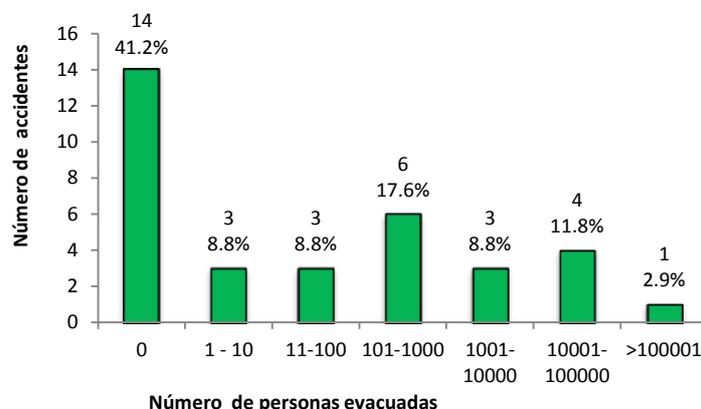


Figura 2.7 Distribución de los accidentes en función del número de personas evacuadas.

2.4.5 Probabilidad de escenarios accidentales

Con el fin de presentar de manera esquematizada la probabilidad de ocurrencia de una serie de accidentes en los que se ven envueltos incendios de llamarada, se ha elaborado el árbol de eventos que se muestra en la Figura 2.8. El número de accidentes y la probabilidad relativa de ocurrencia son representados en cada rama. Esta probabilidad es obtenida de la relación entre el número de accidentes de un nivel y el número de accidentes del nivel previo.

De los accidentes estudiados, el mayor porcentaje (96%) empieza con una fuga de líquido o vapor inflamable como evento iniciador, seguido de un 2.7% que empiezan por una explosión y finalmente un 1.1 % que empiezan por un accidente distinto. El escenario más frecuente, con un 63.6 % de los casos, sucede cuando tras la fuga inicial del material inflamable se forma una nube de vapor que posteriormente se incendia; se origina así un incendio de llamarada, el cual va acompañado generalmente de posteriores incendios que pueden ir de menor a mayor escala. En la mayoría de estos casos el accidente es contenido en un tiempo relativamente corto sin permitir que el mismo genere otro accidente mayor.

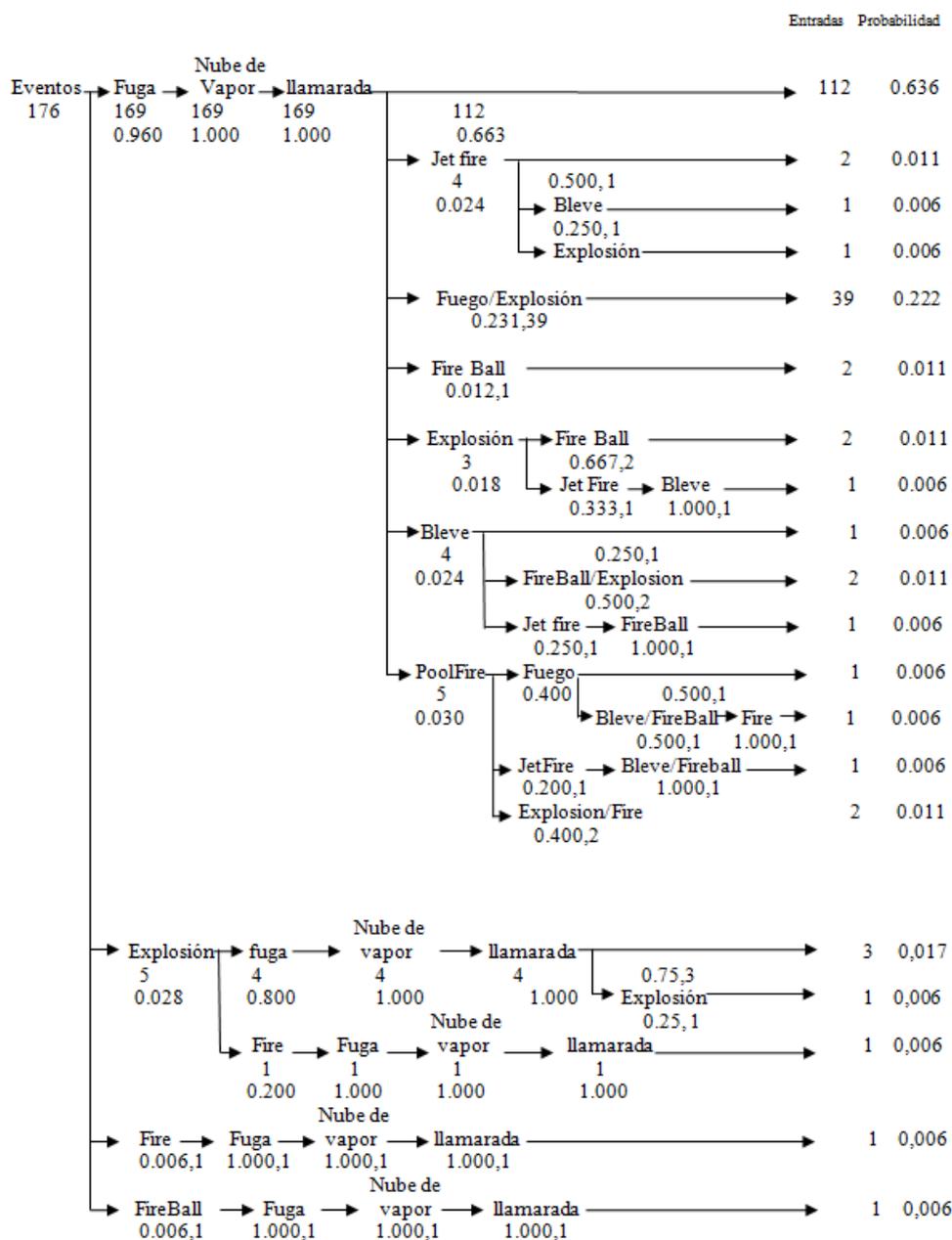


Fig. 2.8 Árbol de eventos con las probabilidades relativas.

No obstante, en una tercera parte de los accidentes registrados sí se presenta una escalada en las consecuencias tras ocurrir un flash fire. La sucesión de eventos más frecuente, con un 24.3%, corresponde a los casos donde tras el flash fire ocurren una o varias explosiones. Por ejemplo, en Texas en 1968, el fuego llegó a extenderse hasta afectar unas 65 hectáreas, envolviendo diversos tanques de una unidad de proceso y originando así una serie de explosiones.

Entre las fuentes de ignición más comunes se encuentran las chispas de aparatos eléctricos, así como las superficies calientes presentes en una planta, tales como maquinas extrusoras, líneas de vapor calientes, etc. También son frecuentes las llamas abiertas, por ejemplo en los hornos y calentadores.

En el 2.84 % de los casos, tras el flash fire ocurrió un pool fire y a éste le siguieron otros accidentes graves como incendios, jet fires, explosiones o incluso BLEVEs. Esto ocurrió, por ejemplo, en una refinería en Texas en 1978, donde el efecto dómينو se extendió en una cascada de accidentes: flash fire → pool fire → BLEVE/fireball e incendio, repitiéndose la secuencia de BLEVE/fireball e incendio en otras unidades de proceso.

Otra secuencia de eventos encontrada, con el 2.27% de incidentes, es la correspondientes a un flash fire seguido de un BLEVE. Un caso que siguió este patrón fue el ocurrido en la refinería de Feyzin (Francia) en 1966, donde tras el flash fire ocurrieron una serie de explosiones BLEVE.

Tras el incendio de llamarada también ocurrieron incendios de chorro (jet fires) en un 2.27% de los casos, los cuales a su vez provocaron otro accidente grave en la mitad de los casos. Por otra parte, también se observó que en el 4% de los casos el evento iniciador no fue la fuga sino algún otro accidente como una explosión (2.7%), un incendio o un fireball (1.3).

De acuerdo con los datos del árbol de eventos, si ocurre un flash fire la probabilidad de que suceda a continuación otro accidente grave es de 0.33, y la probabilidad de que el accidente que siga sea una explosión/incendio es de 0.24. En cambio, la probabilidad de que un flash fire sea el último evento en una

secuencia de accidentes es de tan sólo 0.03.

Capítulo 3. Experimentos a gran escala

3.1 Introducción

Existen muy pocos datos experimentales a escala real sobre la propagación de la llama dentro de la nube de gas inflamable (de la cual, únicamente una parte se encuentra entre los límites de inflamabilidad) y la radiación resultante. Esto se debe a lo difícil y costoso que resulta llevar a cabo este tipo de experimentación: aparte de la complejidad y el coste económico de la instalación, es necesario disponer de una zona adecuada, alejada de toda población o edificaciones, así como de los permisos necesarios; finalmente, la dependencia de la meteorología representa una dificultad más. Sin embargo, existen en la bibliografía algunos valores experimentales obtenidos a gran escala. En la siguiente tabla se resumen los experimentos de *flash fires* más significativos que se han realizado de los cuales se han encontrado en la bibliografía datos disponibles, así como el objetivo principal de cada uno de ellos.

Todas las pruebas implicaban derrames de gases licuados (GNL o GLP) sobre tierra o agua, los cuales producían nubes de gas de densidad superior a la del aire (dispersión de gases pesados). En el caso de derrames no confinados sobre agua, la nube se desplazaba aproximadamente a la velocidad del viento antes de llegar a flotar y dispersarse. Inicialmente, la temperatura de los gases resultaba cercana a la temperatura de la balsa, por lo que la nube de gas era más densa que el aire circundante, incluso en el caso de GNL. En el caso de los derrames de GNL la temperatura de escape fue de $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que para el caso de derrames con GLP la temperatura fue de $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 3.1 Pruebas experimentales a gran escala de incendios de llamarada (nubes no confinadas)

Programa experimental	Combustible	Tasa de derrame	Objetivo principal de la prueba
Maplin Sands Shell, 1980	GNL (gas natural licuado)	20-40 kg/s (continuo) 3500-5000 kg (instantáneo)	Propagación de la llama, radiación térmica y sobrepresión.
	GLP (gas licuado de petróleo, propano)	20-55 kg/s (continuo) 4500 kg (instantáneo)	
China Lake LLNL, 1979	GNL	25-35 kg/s (hasta un máximo de 2500 kg)	Propagación de la llama y radiación térmica.
Coyote, China Lake LLNL, 1980	GNL (gas natural licuado)	100-121 kg/s (hasta un máximo de 12000 kg)	Propagación del fuego y RPT (transición de fase rápida)
Burro, China Lake LLNL, 1981	GNL (gas natural licuado)	87-130 kg/s	Propagación de la llama y radiación térmica.

La siguiente figura muestra la forma general de una nube de gas procedente de la evaporación de GNL que se desplaza bajo la acción del viento. La longitud de la nube usualmente será mucho mayor que su anchura debido al efecto de elongación provocado por el viento, aunque para velocidades de viento bajas, de alrededor de 1-2 m/s, la longitud (L_c) y la anchura (W_c) pueden resultar más o menos similares. La relación L_c/W_c normalmente será de alrededor de 5 para velocidades del viento superiores. Estas nubes suelen tener una altura (h_c) muy baja en relación con su longitud y su anchura. La relación entre la longitud y la altura (L_c/h_c) es del orden de 100, según las observaciones realizadas por diversos autores [Luketa, 2006]. Las mayores concentraciones se sitúan lógicamente cerca de la fuente del derrame, disminuyendo a medida que aumenta la distancia desde la misma hasta alcanzar el límite inferior de inflamabilidad (LFL) en las regiones periféricas de la nube.

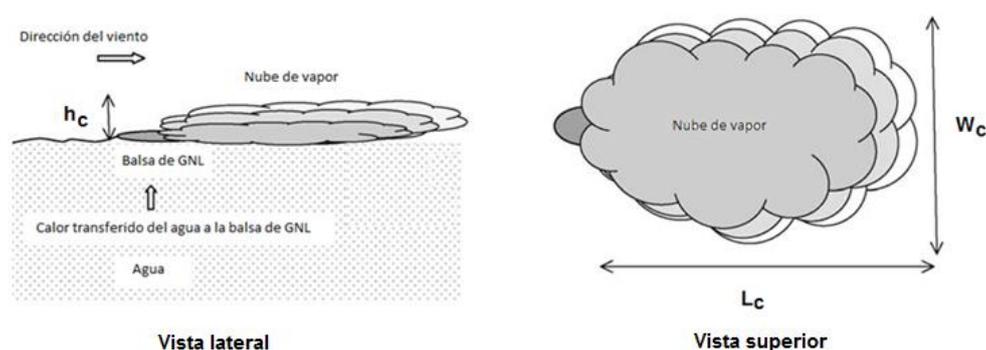


Fig. 3.1 Forma típica de una nube de gas sometida a la acción del viento para un derrame de GNL sobre agua (modificada de Luketa, 2006).

A continuación se presenta una descripción de las pruebas realizadas a escala real de nubes de gas inflamables de GNL y GLP; las mismas incluyen dos series experimentales a mediana escala realizadas más recientemente. Esta recopilación se basa en información obtenida de informes y algunos artículos; abarca pruebas realizadas entre 1977 y 1981, de las que se ha extraído información sobre la dispersión e incendio de las nubes. Como era de esperar, algunas pruebas experimentales suministraron suficiente información

relevante para el presente estudio, mientras que en otras resultó ser escasa y parcial.

3.2 Pruebas de China Lake (1979)

Estas primeras pruebas fueron realizadas con el objetivo de caracterizar el comportamiento de la llamarada y de la radiación térmica generada en los incendios de nubes de gas de GNL, para ampliar el escaso conocimiento sobre este tipo de incendios y mejorar la evaluación de los riesgos asociados a este tipo de incendios.

En estas primeras pruebas se identificaron tres etapas en el desarrollo de un incendio de llamarada. La primera etapa, denominada “desarrollo transitorio” de la llama, ocurre durante los primeros segundos después de la ignición: las llamas se propagan a través de la nube sobre la superficie, mientras aumenta su tamaño. Posteriormente, durante la denominada “etapa estacionaria”, las llamas se propagan hacia la balsa de líquido con una anchura y una longitud casi constantes, durante un período de 25 a 40 segundos. Después de alcanzar el estado estacionario, durante aproximadamente la mitad de la duración del incendio, las llamas se mueven hacia el punto del derrame. Durante las pruebas 9, 16 y 17 esto ocurrió aproximadamente al acercarse el fin del derrame, mientras que en el caso de la prueba número 10 esto ocurrió mucho después. Esta última etapa duró –en estas pruebas experimentales– la fracción de un minuto, hasta que todo el GNL era consumido. Al final de la prueba, la última etapa resultó en una balsa de fuego (pool fire) en el lugar del derrame.

Condiciones de las pruebas

Se llevaron a cabo seis experimentos, en un campo de pruebas ubicado en China Lake. Las cantidades empleadas (comprendidas entre 4,4 m³ y 5.5 m³), la composición del GNL utilizado, el tiempo de duración de cada prueba (de 65 s a 85 s), y la meteorología en el lugar del derrame son descritas detalladamente en el Tabla 3.2. Estas pruebas fueron repetidas varias veces

hasta alcanzar un conjunto de seis experimentos con resultados satisfactorios. Los instrumentos de medición consistieron básicamente en cámaras de filmación, radiómetros y sensores para la medición de la concentración del combustible.

Tabla 3.2 Condiciones de las pruebas de incendios de llamarada en China Lake (1979)

Parámetro	9	10	11	16	17
Tipo de prueba	Llamarada	Llamarada	RPT*	Llamarada	RPT
Material	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG
Composición					
Metano	95.1%	93.8%	93.8%	95.6%	94.1%
Etano	1.8%	5.3%	5.3%	3.43%	5.1%
Propano	1.7%	0.8%	0.8%	0.7%	0.7%
Fecha	01/07/1977	12/07/1977	13/07/1977	12/06/1978	13/06/1978
Volumen del derrame	5.3 m ³	4.9 m ³	5.2 m ³	4.4 m ³	5.5 m ³
Duración del derrame	78 s	74 s	65 s	70 s	78 s
Tasa de derrame	0.068 m ³ /s	0.066 m ³ /s	0.08 m ³ /s	0.063 m ³ /s	0.071 m ³ /s
Tiempo de ignición					
después del derrame	50 s	64 s	60 s	33 s	25 s
Velocidad del viento	7.2 m/s	4.1 m/s	4.1 m/s	7.2 m/	7.2 m/s
Temperatura del aire	22 °C	24 °C	25 °C	33 °C	24 °C
Humedad relativa	22%	24%	25%	33%	24%
Estabilidad atmosférica	C	B	B	D	C

*Transición rápida de fase

Descripción de los resultados

Tras la liberación de GNL sobre la superficie del agua, se formó una “balsa” sobrenadante, la cual alcanzo rápidamente un diámetro constante de hasta 35 m para alguna de las pruebas. A continuación, el GNL evaporado debido a la transferencia de calor desde el agua fue dispersado sobre el agua por el viento, siendo arrastrado hasta alcanzar la orilla y siguiendo después la dispersión sobre tierra. Las bengalas se ubicaron a unos 70 m del punto de derrame y se encendieron entre 22 y 64 segundos después de iniciado el derrame, dependiendo de cada prueba. El retraso de la ignición fue suficiente para permitir que la nube de gas alcanzara la bengala antes de la misma.

Es de notar que la nube inflamable alcanzó el punto de ignición antes de que la nube visible llegara al mismo. Esto indica que la región inflamable se extendía más allá de la nube visible, variando este fenómeno en función del porcentaje de humedad relativa registrado en las pruebas, el cual estuvo comprendido entre el 22% y el 33%.

Entre los datos de mayor interés obtenidos de estos experimentos se encuentran los relacionados con las dimensiones de la nube visible y de la llama para las cuatro principales pruebas. Estos datos, que se han resumido en la tabla 3.3, han sido obtenidos de una serie de figuras publicadas en el informe elaborado por Mudan et al. (1979). De estos valores (véase la Figura 3.2) se puede obtener información relativa al contorno de la llama, así como de la anchura y altura alcanzada por las llamas durante su propagación. También resulta de gran interés la información sobre la altura de la nube de gas antes de la ignición.

La velocidad de las llamas se encontró en una gama comprendida entre 8 m/s y 17 m/s, incrementándose al aumentar la velocidad del viento. Además, se observó que el fuego se propagaba cerca de la superficie en forma de un penacho; durante estas pruebas no se presento ningún “fireball”.

Tabla 3.3 Principales características de los incendios de llamarada, China Lake (1979)

No. del experimento	5	10	16	17
Primera etapa: desarrollo transitorio de la llama				
Duración después de la ignición (s)	6	9	11	10
Segunda etapa: estado estacionario				
Duración después de la 1ª etapa (s)	25	25	40	35
Longitud promedio de la llama (m)	19	20	21	19
Anchura promedio de la llama (m)	33	34	38	27
Altura de la llama (m)	10	11	11	9
Poder emisorio promedio (kW/m ²)	260	-	148	270

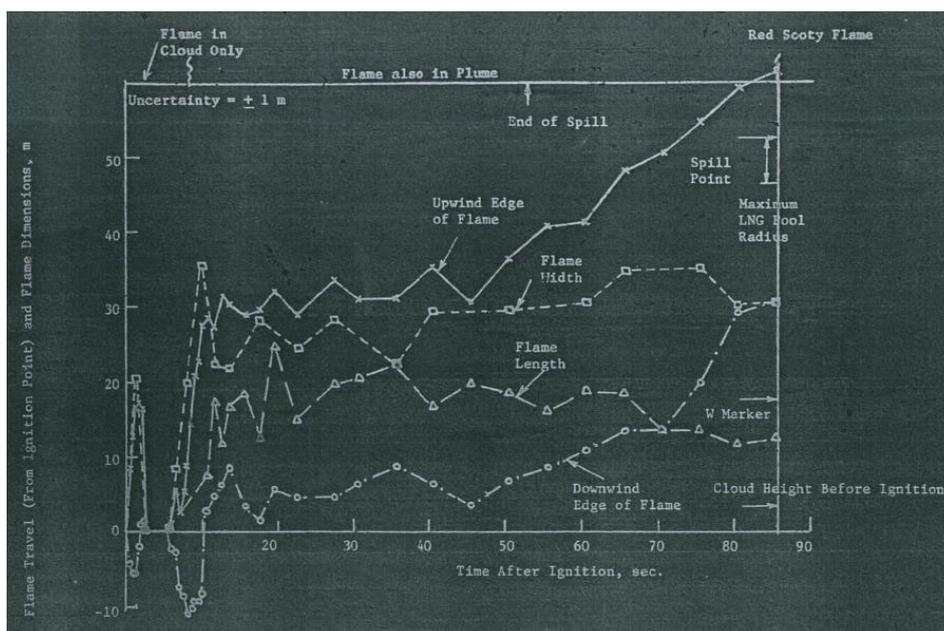


Fig. 3.2 Desarrollo de la nube de gas en la prueba 17 de China Lake: 5.5 m³ fugados en 78 s; velocidad del viento: 7.2 m/s (Mudan et al., 1979).

3.3 Pruebas de Maplin Sands (1980)

Las pruebas fueron realizadas en Maplin Sands, Inglaterra, por el Instituto Marítimo Nacional, y fueron patrocinadas por Shell. Estas pruebas se desarrollaron para obtener datos de radiación térmica y dispersión de 20 fugas de GNL y 14 fugas de propano sobre agua para los casos de fugas instantáneas y continuas. Las condiciones experimentales, así como la meteorología en el lugar de las pruebas, son descritas detalladamente en las Tablas 3.4 a y b.

Tabla 3.4 a Resumen de las pruebas experimentales de Maplin Sands con GNL

Parámetro	27	29	39	56
Fecha	09/09/1980	09/09/1980	24/09/1980	17/10/1980
Material	LNG	LNG	LNG	LNG
Composición	CH ₄ 93.2 %	CH ₄ 98.5 %	CH ₄ 95.2 %	CH ₄ 93.3 %
	C ₂ H ₆ 5.4 %	C ₂ H ₆ 1.4 %	C ₂ H ₆ 1.7 %	C ₂ H ₆ 4.3 %
	C ₃ H ₈ 1.1 %	C ₃ H ₈ 0.1 %	C ₃ H ₈ 0.6 %	C ₃ H ₈ 1.5 %
Masa de derrame (kg)	3600	6500	2000	1400
Tasa de derrame (kg/s)	22.6	29.0	33.2	17.7
Duración (s)	160	225	60	80
Velocidad del viento (m/s)	5.5	7.4	4.1	5.1
Estabilidad				
atmosférica	C-D	D	D	D
Humedad relativa (%)	57	52	63	83
Temperatura (K)	287.73	289.95	290	284.75
Rugosidad (m)	0.000058	0.000058	0.000058	0.000058
Longitud de Monin-Obukhov	-22.3 m	685 m	31.5 m	-1770 m

Como parte de las instalaciones experimentales para desarrollar las pruebas, se construyó un dique para mantener un estanque de poca profundidad y de

300 m de diámetro alrededor del punto de vertido.

En la Figura 3.3 se muestra el lugar usado para las pruebas. Los gases licuados fueron transportados al punto de derrame sobre el agua mediante una tubería y las mediciones se realizaron con instrumentos desplegados sobre 71 plataformas flotantes, colocados en arcos concéntricos a una distancia comprendida entre 40 m y 650 m desde el punto de derrame.

De las pruebas de Maplind Sands se encontró que el tipo de combustible y el modo de la fuga afectan al comportamiento de la dispersión de las nubes de gas. La combustión del GLP producía llamas humeantes, mientras que el GNL tendía a presentar una combustión más limpia. Para las fugas continuas, la ignición resultó en una combustión premezclada con una llama azulada débilmente luminosa. Ésta fue seguida por una combustión difusiva en la región rica de combustible de la nube, con una llama amarilla inicialmente baja que aumentaba en altura conforme se propagaba retrocediendo hacia el punto de vertido.

En un cierto número de pruebas, el frente difusivo de la llama parecía ser estacionario y no se propagó de regreso a la fuente. Se observó que el área cubierta por la llamarada (flash fire) era aproximadamente la misma que la contenida dentro de la región inflamable de la nube antes de la ignición. Aunque se observaron llamas cuya altura fue mayor que la de la nube dentro del límite inferior de inflamabilidad, esto se atribuyó a la expansión térmica que ocurría en dirección vertical.

De los informes se observó que la máxima velocidad de propagación de la llama fue de 28 m/s en el caso de derrames de GLP y de 10 m/s para GNL, mientras que la velocidad de propagación promedio de las llamas de premezcla fue de 12 m/s y 5 m/s, respectivamente. La propagación de las llamas de difusión tuvo lugar a una velocidad de 4.5 m/s a 6.0 m/s. La llama generó una sobrepresión inferior a los 4 kPa.

Tabla 3.4 b Resumen de las pruebas experimentales de Maplin Sands con GLP

Parámetro	43	46	47	49	54
Fecha	28/09/1980	01/10/1980	01/10/1980	06/10/1980	15/10/1980
Material	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP
Composición	-	CH ₄ 0.01 %	CH ₄ 0.01 %	-	-
	C ₂ H ₆ 1.22%	C ₂ H ₆ 1.05%	C ₂ H ₆ 1.78%	C ₂ H ₆ 2.48%	C ₂ H ₆ 1.1%
	C ₃ H ₈ 96.9%	C ₃ H ₈ 97.32%	C ₃ H ₈ 96.86%	C ₃ H ₈ 96.45%	C ₃ H ₈ 97.4%
Masa de derrame (kg)	6300	8300	6800	1500	2300
Tasa de derrame (kg/s)	19.2	23.3	32.5	16.7	19.2
Duración (s)	330	355	210	90	120
Velocidad del viento	5.5 ms ⁻¹	8.1 ms ⁻¹	5.6 ms ⁻¹	6.2 ms ⁻¹	3.8 ms ⁻¹
Estabilidad					
atmosférica	D	D	D	D	D
Humedad relativa (%)	70	71	78	88	85
Temperatura (K)	290	291.81	290.25	286.6	281.58
Rugosidad (m)	0.000058	0.000058	0.000058	0.000058	0.000058
Longitud de					
Monin-Obukhov (m)	17.9	653	180	55.1	56.9

La relación entre la altura y la anchura de la llama se situó entre 0.2 y 0.4. En la nube de gas inflamable, el poder emisivo promedio medido en la superficie fue de 174 kWm⁻², con una gama de valores comprendidos entre 137 y 225 kWm⁻².

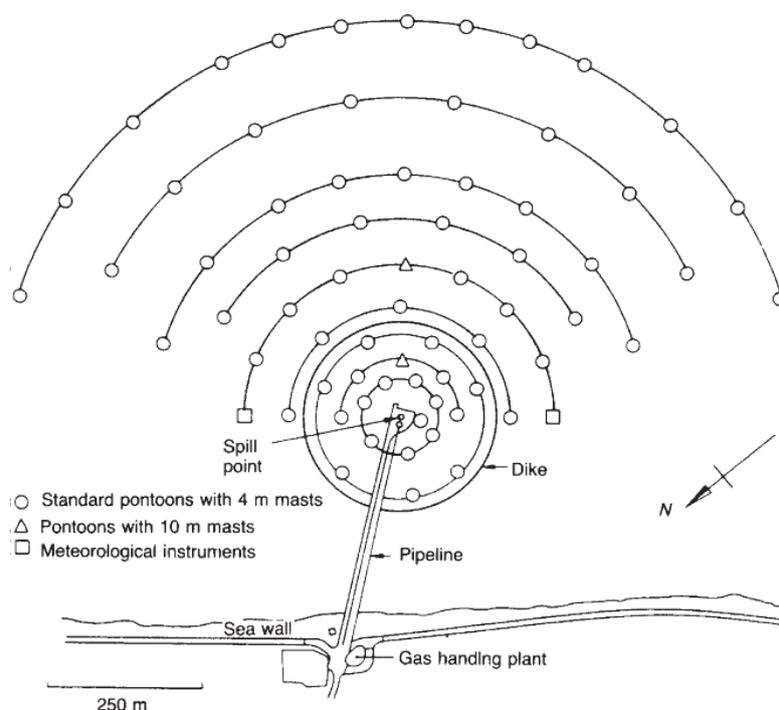


Fig. 3.3 Pruebas de Maplin Sands para la dispersión de un gas pesado; diseño de la zona experimental (Puttock, Blackmore y Colenbrander, 1982).

Dos de estas pruebas son descritas con detalle por Hirst y Eyre (1983). En el caso de la prueba no. 27, se trata de una fuga continua con GNL; en la misma, la nube visible se extendió fuera de un radio de 300 m al tiempo de la ignición, la cual ocurrió a una distancia de 90 m en el perímetro de la nube; las llamas se propagaron en la dirección del viento hasta un radio de 130 m antes de extinguirse. Las llamas en dirección contraria al viento se propagaron a lo largo de un lado de la pluma hacia el punto de vertido únicamente en un radio de 60 m, mientras que la combustión a través de la nube ocurrió del otro lado de la pluma en un radio de 110 m. La parte restante de la nube que no se quemó se bifurcó claramente con llamas de color amarillo formando una V, indicando que la concentración en la región central de la pluma fue menor que en el borde. En esta prueba realizada con GNL bajo las condiciones de temperatura y humedad

que prevalecieron en Maplin, la nube siempre abarcó las llamas y delineó su perímetro. La velocidad máxima de propagación de las llamas alcanzada en esta prueba fue de 10 m/s, observada con referencia al nivel del suelo, y la velocidad del viento promedio fue de 4 m/s. La Figura 3.4 muestra la dispersión de la nube en esta prueba justo antes de la ignición.



Fig. 3.4 Prueba n° 27 de Maplin Sands (derrame de GNL). Dispersión de la nube justo antes de la ignición.

En la prueba no. 51 de Maplin se derramó propano licuado (GLP), con una velocidad inicial de 7 m/s. Se generó así una nube de baja altitud que fue visible fuera de un radio de 190 m en el momento de la ignición; ésta ocurrió a una distancia de 130 m en el perímetro de la nube. Las llamas se propagaron en la dirección del viento en un radio de 260 m, donde se extinguieron. Esta distancia concuerda muy bien con el valor del LFL obtenido de las mediciones de concentración de gas en esta región.

Las fotografías tomadas muestran la evolución de la nube inflamable y la transición de una llama premezclada a una de difusión en forma de herradura ardiendo de regreso hacia el punto de vertido, lo que indica una alta concentración de combustible en el núcleo de la nube. La propagación de las

llamas alcanzo una velocidad de 20 m/s, mientras que la velocidad promedio fue de 6 m/s. La sobrepresión generada fue de unos 0.3 mbar.

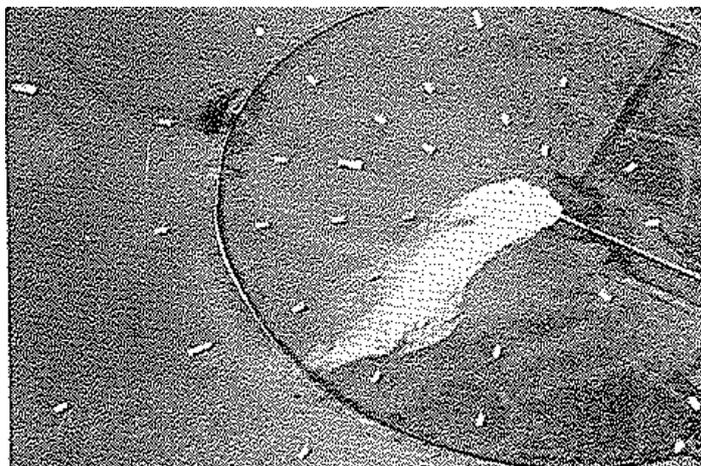


Fig. 3.5 Prueba n° 51 de Maplin Sands; derrame de GLP.

El informe elaborado por Blackmore et al. (1982) presenta una serie de observaciones cualitativas y cuantitativas de la serie de pruebas desarrolladas en Maplin Sands. En el caso de derrames continuos de GNL y propano se observó que la balsa sobrenadante del vertido presentaba una forma casi circular y de dimensiones aproximadamente constantes. Las nubes resultaron tener mayor anchura cerca de la fuente, reduciéndose su magnitud al aumentar la velocidad del viento mientras que, en contraste, se incrementaba su altura. En la figura 3.6 se puede apreciar un ejemplo de este tipo de derrame.

Y un aspecto que resulta de gran interés y en el que está basado el análisis realizado en los capítulos siguientes del presente estudio, tiene que ver con las observaciones realizadas con respecto al borde visible de las nubes de gas y el alcance de la isopleta correspondiente al límite inferior de inflamabilidad. Una primera observación indica que en el caso de nubes de GNL el contorno de la nube visible se extendió más allá de la concentración correspondiente al límite

inferior de inflamabilidad en la dirección del viento. Por el contrario, se encontró que en las nubes de propano, de las pruebas desarrolladas en Maplin Sands, el borde de la nube visible se encontraba dentro de la región inflamable.



Fig. 3.6 Pruebas realizadas en Maplin Sands con GNL: pruebas 39 y 56, respectivamente (Blackmore et al., 1982).

En el caso de fugas instantáneas se observó que la evaporación ocurrió desde balsas de líquido casi circulares, que dejaron tras de sí un anillo de hielo.

La propagación de las nubes de gas mostró una forma más o menos circular o alargada. En la fase inicial, las nubes se propagaron a nivel de suelo, para luego aumentar en altura en la dirección del viento a medida que la dispersión progresaba. Un ejemplo de este tipo de derrame se aprecia en la Figura 3.7.



Fig. 3.7 Prueba 63 realizada en Maplin Sands con GLP (Blackmore et al., 1982).

3.4 Pruebas en China Lake: series Avocet, Burro y Coyote

3.4.1 Avocet y Burro

En 1978 se realizó la serie Avocet, la cual constaba de un conjunto de cuatro pruebas que involucraban derrames en el agua de 4.5 m^3 de GNL por minuto. El propósito principal de estas pruebas, descritas por Koopman et al. (1978), fue el de profundizar en las mediciones necesarias para pruebas con derrames más grandes.

Posteriormente, en 1980, se desarrolló otra serie de pruebas por el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) en el centro Naval de China Lake, California. Este conjunto de pruebas, denominadas Burro, consistía de un total de 8 fugas de GNL sobre agua con volúmenes de derrame comprendidos entre 24 m^3 y 39 m^3 , con una velocidad de fuga de $11.3 - 18.4 \text{ m}^3/\text{min}$, velocidad de viento de 1.8 a 9.1 m/s y condiciones de estabilidad atmosférica variando de inestable a ligeramente estable.

Descripción experimental

El centro de pruebas en China Lake, California, fue construido en 1980; en el mismo se podían desarrollar pruebas experimentales con hasta 40 m³ de combustibles líquidos, con el fin de estudiar el incendio y explosión de las nubes originadas desde los vertidos de combustibles. Esta instalación fue utilizada para la prueba de derrames de gas natural licuado (GNL), gas licuado de petróleo (GLP), gasolina, nitrógeno líquido y amoníaco licuado. La Figura 3.8 muestra la disposición de las instalaciones experimentales. En el plano se observa el tanque de derrame de 40 m³; se trata de un tanque aislado térmicamente de 10.7 m de largo por 3.5 m de diámetro, con un volumen total de 52 m³ y presión de operación de 2.4 bars. El tanque se cargaba de un camión cisterna que se encontraba a 15 m de distancia a través de una línea de carga de acero inoxidable de 10 cm de diámetro.

El combustible líquido era forzado a salir del tanque a través de una tubería de 20 cm de diámetro, de acero inoxidable, sumergida verticalmente, siendo el tanque presurizado con nitrógeno gaseoso. Una línea de acero inoxidable con aislamiento de 25 cm de diámetro se extendía desde el tanque hasta una conexión con un tanque de 5,7 m³. Una línea de 25 cm de diámetro continuaba desde este punto hasta el centro de la laguna de prueba, mientras que otra línea de acero inoxidable, con aislamiento, de 15 cm de diámetro se extendía desde este mismo punto hasta el borde de una laguna seca de 15 m³.

Una placa contenedora situada debajo de la salida del tubo de derrame limitaba la penetración del GNL en el agua, protegiendo la instalación de daños causados por la presión debida a la transición de fase rápida (Rapid Phase Transition, RPT) que se produce si hay mezcla entre el GNL y el agua. La placa fue colocada en general a poca profundidad durante las pruebas de dispersión y combustión de las nubes de gas, pero se colocó a mayor profundidad durante las pruebas de transición de fase rápida. La laguna de prueba tenía un diámetro medio de 58 m, con un nivel promedio de agua de 1,5 m por debajo del nivel del

suelo circundante. La profundidad media del agua era de aproximadamente 1 m.

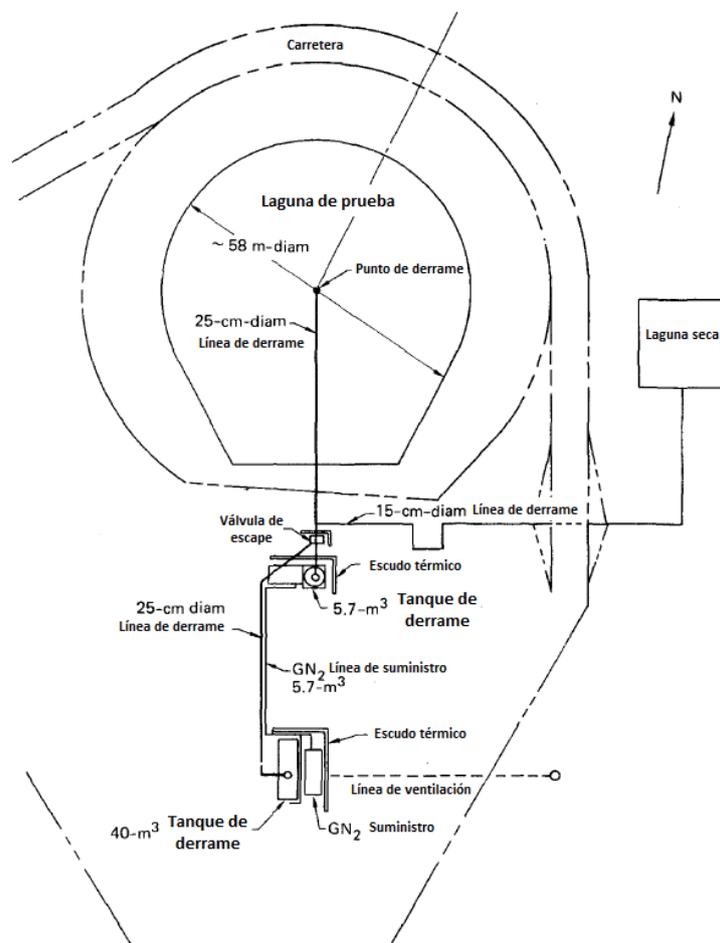


Figura 3.8 Plano de las instalaciones para derrames de combustibles de China Lake, (Modificado de Koopman et al., 1982).

Los tanques de derrame fueron protegidos de la radiación térmica mediante grandes estructuras aislantes, mientras que un escudo térmico más pequeño protegía las válvulas de flujo y enfriamiento.

La operación de los sistemas de control, que incluían las válvulas de flujo y enfriamiento, se realizó de manera remota desde una estación de control,

situada a 250 m al noroeste del depósito. Además, la monitorización del nivel de líquido del tanque, la temperatura en la línea de derrame, la presión interna del mismo y la presión de suministro de nitrógeno se realizaba también desde dicha estación. Antes de realizar las pruebas, todo el personal era evacuado del área del derrame y la prueba era controlada de forma remota.

La instrumentación utilizada para realizar estas pruebas es descrita con amplio detalle en los informes publicados por Koopman y colaboradores (1982).

Entre los instrumentos utilizados se colocaron tres niveles de sensores de concentración, en total 90 sensores. Se instalaron ocho sensores para medir la humedad relativa, así como sensores para medir el flujo de calor. La medición de la velocidad de viento fue realizada con anemómetros localizados en 20 estaciones diferentes a 2 m sobre el nivel del suelo.

Para determinar la ubicación del frente de llama en función del tiempo, se utilizó una cámara suspendida entre dos torres de 60 metros a una altura de unos 35 m y dirigida a favor del viento de la laguna de derrame.

Las mediciones de dirección y velocidad de viento, concentración del gas, temperatura, humedad y flujo de calor del suelo se realizaron a varias distancias del derrame y diferentes elevaciones.

Resumen de las pruebas de Burro

En la Tabla 3.5 se encuentra un resumen de las ocho pruebas realizadas, así como de las condiciones meteorológicas. Los datos de las concentraciones de nubes de GNL se utilizaron para generar gráficos de contorno bidimensionales a intervalos de 10 s durante los experimentos. Los gráficos incluyen superficies horizontales a una altura de 1 y 3 m sobre el nivel del suelo, y superficies verticales en cada fila de la matriz de sensores.

Tabla 3.5 Resumen de las pruebas experimentales de Burro

Parámetro	Burro 2	Burro 3	Burro 4	Burro 5
Fecha	06/18/80	07/02/1980	07/09/1980	07/16/80
Material	LNG	LNG	LNG	LNG
Composición	CH ₄ 91.3 %	CH ₄ 92.5 %	CH ₄ 93.3 %	CH ₄ 93.6 %
	C ₂ H ₆ 7.2 %	C ₂ H ₆ 6.2 %	C ₂ H ₆ 5.1 %	C ₂ H ₆ 5.3 %
	C ₃ H ₈ 1.5 %	C ₃ H ₈ 1.3 %	C ₃ H ₈ 1.1 %	C ₃ H ₈ 1.1 %
Volumen (m ³)	34.3	34	35.3	35.8
Tasa de derrame (m ³ /min)	11.9	12.2	12.1	11.3
Velocidad del viento (m/s)	5.4	5.4	9.0	7.4
Duración (min)	2.9	2.8	2.9	3.2
Estabilidad atmosférica	Inestable	Inestable	Poco inestable	Poco inestable
Humedad (%)	7	5	2	6
Temperatura (°C)	37.6	33.8	35.3	40.5
Temperatura de inicio (°C)	-0.57	-0.65	-0.65	-0.6
Flujo de calor sensible (W/m ²)	-122	-154	-159	-131
Rugosidad (m)	0.000205	0.000205	0.000205	0.000205
No. de Richardson	-0.178	-0.221	-0.054	-0.074
Longitud de Monin-Obukhov	-11.2 m	-9.06 m	-37.1 m	-25.5 m

Tabla 3.5 continuación

Parámetro	Burro 7	Burro 8	Burro 9
Fecha	08/27/80	09/03/1980	09/17/80
Material	LNG	LNG	LNG
Composición	CH ₄ 87 %	CH ₄ 87.4 %	CH ₄ 83.1 %
	C ₂ H ₆ 10.4 %	C ₂ H ₆ 10.3 %	C ₂ H ₆ 13.9 %
	C ₃ H ₈ 2.6 %	C ₃ H ₈ 2.3 %	C ₃ H ₈ 3.0 %
Volumen (m ³)	39.4	28.4	24.2
Tasa de derrame (m ³ /min)	13.6	16	18.4
Velocidad del viento (m/s)	8.4	1.8	5.7
Duración (min)	2.9	1.8	1.3
Estabilidad atmosférica	Neutro a poco inestable	Poco estable	Neutro
Humedad (%)	7	5	12
Temperatura (°C)	33.7	33.1	35.4
Temperatura de inicio (°C)	-0.23	0.145	-0.1
Flujo de calor sensible (W/m ²)	-41	2.2	-10
Rugosidad (m)	0.000205	0.000205	0.000205
No. de Richardson	-0.018	0.121	-0.014
Longitud de Monin-Obukhov	-114	16.5	-140

La nube de la prueba 3 de Burro permaneció dentro de la matriz de sensores, excepto en el arco situado a unos 57 m de distancia, donde se extendió más allá de ambos lados de la matriz entre los 150 s y 200 s. Entre los 60 y 120 segundos de haberse iniciado el derrame, la distancia máxima alcanzada por el límite inferior de inflamabilidad osciló entre 215 m y 255 m.

La tasa de escape y duración de la prueba 7 fueron muy similares a las de la prueba 3, con la diferencia de una velocidad del viento un 60% mayor. La nube

de gas generada en la prueba 7 de Burro se extendió más allá de uno de los bordes de la matriz de sensores, pero la línea central de la nube parecía moverse dentro y fuera de la matriz en varias ocasiones durante el derrame. La ubicación del límite inferior de inflamabilidad osciló entre cerca de 100 m y 200 m, alcanzando un valor máximo a los 200 m. La mayor parte de esta variación fue causada por el movimiento serpenteante de la nube con respecto al borde de la matriz.

La prueba 8 de esta serie resulta interesante debido a las condiciones en las que se desarrolló: bajo viento (1.8 m/s) y condiciones atmosféricas estables. Esto originó una nube de baja altura y muy ancha comparada con otras pruebas desarrolladas con un viento mucho mayor, como la prueba 6 de Burro realizada con un viento de 9 m/s (véase la Figura 3.9).

En el experimento 8 de la serie Burro, las fotografías aéreas muestran que la mayor parte de la anchura de la nube está contenida dentro de un arco de 140 m, que es donde los sensores de gases habían sido colocados. Sin embargo, el límite inferior de inflamabilidad en esta prueba se encontró a una distancia máxima de 400 m.



Fig. 3.9. (a) Prueba Burro 8 con GNL, 30 s después del inicio de la fuga; (b) Prueba 6 de Burro después de alcanzar un estado casi estacionario (Ermak et al., 1982).

En las pruebas se originó una presión debida a la transición rápida de fase, originándose una sobrepresión de 5 kPa medida a una distancia de 30 m del

punto de la fuga. Esta sobrepresión fue suficientemente fuerte como para causar daños en la tubería de vertido de apoyo y la placa de derrame. El análisis de estas pruebas fue reportado por Ermak y Koopman (1982). A esta serie de pruebas le siguieron las de la serie Coyote en 1981.

3.4.2 Coyote

Las pruebas de Coyote fueron desarrolladas por LLNL y el centro naval en China Lake, California, y patrocinadas por la U.S. DOE y el Instituto de Investigación del Gas. Estas pruebas se desarrollaron en el mismo sitio experimental que las pruebas de Burro que las precedieron, descrito anteriormente. Se estudió la combustión de las nubes de gas de fugas de GNL en agua, para determinar la propagación de la llama y el flujo de calor. Estas pruebas fueron llevadas a cabo con metano como combustible principal, mezclado con cantidades menores de propano y etano.

Las pruebas se desarrollaron con velocidades de viento de entre 4.6 m/s y 9.7 m/s y condiciones de estabilidad atmosférica variando de inestable a neutra. El punto de ignición fue localizado cerca del centro de la nube, a unos 60 m-90 m a sotavento de la fuente del derrame y la ignición tuvo lugar entre 100 s -150 s después de iniciada la fuga. Se observó que las llamas se iniciaron cerca del centro de la nube y se propagaron radialmente hacia el exterior, en ambos sentidos de la dirección del viento. Se observaron tanto llamas luminosas amarillas como llamas transparentes.

La relación entre la altura de la llama y la altura de la nube variaba de 5 a 10. Las nubes alcanzaron alturas comprendidas entre 3 m y 8 m. Las mayores velocidades de la llama registradas fueron de 30 m/s, observados cerca de la fuente de ignición en el caso de fuentes de ignición débiles; en el caso de fuentes de ignición fuertes, las mayores velocidades estuvieron comprendidas entre 40 m/s y 50 m/s. También se observó que la velocidad decrecía en función de la distancia desde la fuente y no había aceleración de la llama. La sobrepresión medida fue solamente de unos pocos milibares.

El flujo de calor registrado dentro de la nube de gas inflamable estaba comprendido en el rango de 150-340 kW/m². Los valores de flujo externo de radiación para la porción brillante de la llama registrados se encontraban en el rango de 220-280 kW/m².

Descripción de la combustión de las nubes de gas

De los experimentos de Burro realizados anteriormente se observó que para velocidades de viento de 4 a 10 m/s y velocidades de fuga de 13 a 19 m³/min, la duración del derrame fue por lo menos de 60 s a 90 s para obtener la máxima región posible a favor del viento de la región inflamable. Se consideró importante el hecho de que la duración del derrame antes de la ignición fuera suficientemente larga para permitir las observaciones de varios picos sucesivos, asegurando así que la región inflamable era la máxima posible que se podía alcanzar.

En estas pruebas se determinó la configuración de la zona inflamable al tiempo de la ignición, así como poco antes y después de la misma, con el fin de determinar si la zona inflamable fue más pequeña que la máxima y había aumentado o disminuido después de la ignición, en ausencia de la combustión. Dado que los contornos pueden cambiar significativamente durante la combustión, estas observaciones eran necesarias para separar los efectos de las fluctuaciones atmosféricas de los efectos de la combustión en sí. Las condiciones en cada experimento son descritas detalladamente en los informes publicados por Rodean y colaboradores (1984).

Las llamas visibles se elevaron a alturas comprendidas entre 8 m y 40 m durante las diferentes pruebas. Además, se observaron remolinos de polvo dentro de las zonas incendiadas durante las pruebas Coyote 3 y 7. La prueba de Coyote 3 se llevó a cabo bajo las condiciones atmosféricas más inestables de la serie (véase la Tabla 3.6).

Tabla 3.6 Resumen de las pruebas experimentales de Coyote (Goldwire et al., 1983)

Parámetro	Coyote 3	Coyote 5	Coyote 6	Coyote 7
Tipo de prueba	Llamarada	Llamarada	Llamarada	RPT
Material	LNG	LNG	LNG	LNG
Composición	Metano 79.4%	Metano 81.8%	Metano 81.8%	Metano 99.5%
	Etano 16.4 %	Etano 14.6%	Etano 14.6%	Etano 0.5%
	Propano 4.2%	Propano 3.6%	Propano 3.6 %	
Fecha	03-sept- 1981	07-oct-81	27-oct-81	12-nov-81
Válvula abierta (tiempo cero)	15:38:26	12:08:50	16:43:23	15:24:41
Inicio de cierre de la válvula	15:39:28	12:10:37	16:44:39	15:26:38
Válvula cerrada	15:39:30	12:10:39	16:44:40	15:26:40
Tasa de derrame	13.5 m ³ /min	17.1 m ³ /min	16.6 m ³ /min	14.0 m ³ /min
Volumen del derrame	14.6 m ³	28.0 m ³	22.8 m ³	26.0 m ³ /min
Duración del derrame	65 s	98 s	82 s	111 s
Altura de descarga	1.5 m	1.5 m	1.5 m	1.5 m
Tiempo de ignición				
Después de abrir la válvula	99.7 s	132.7 s	108 s	146.1 s
Después de cerrar la válvula	37.3 s	25.4 s	32.5 s	29.0 s
Localización de la ignición				
Coordenada X	61 m	79 m	79 m	85 m
Coordenada Y	20 m	0 m	0 m	20 m
Velocidad promedio del viento	6.0 m/s	9.7 m/s	4.6 m/s	6.0 m/s
Desviación estándar promedio	0.9 m/s	1.3 m/s	0.6 m/s	0.7 m/s
Porcentaje de cielo cubierto por nubes	15%	44%	60%	75%
Temperatura a 2 m	37.91 °C	27.90 °C	24.37 °C	25.54 °C
Temperatura a 1 m	38.30 °C	28.34 °C	24.11 °C	25.34 °C
Temperatura a 4 m	37.23 °C	27.14 °C	24.31 °C	25.39 °C

Temperatura de inicio	-1.02	-0.95	0.11°C	0.02 °C
Presión barométrica	936 milibares	939 milibares	942 milibares	944 milibares
Humedad	11.30%	22.10%	22.80%	19.20%
Altura del anemómetro	2 m	2 m	2 m	2 m
Rugosidad (m)	0.000205	0.000205	0.000205	0.000205
No. de Richardson (2 m)	-0.317	-0.076	0.027	0.006
Longitud de Monin-Obukhov	-6.32 m	-26.5 m	73.6 m	345.2 m

Prueba 3 de Coyote

La prueba 3 de la serie de Coyote fue la primera en la que se realizaron todo tipo de mediciones, excepto mediciones de infrarrojo. La velocidad del viento fue moderada (6 m/s) y su dirección se desvió considerablemente de la línea central del conjunto de sensores; en consecuencia, la nube no se muestra de manera uniforme a través del conjunto de sensores.

Las condiciones atmosféricas fueron más inestables que en cualquier otro derrame de la serie de Burro y Coyote. La parte visible de la nube (niebla) tenía unos 2 metros de altura, aunque algunas partes alcanzaron los 6 ó 7 m, y se extendía hasta 120 m en la dirección del viento antes de disiparse.

Las Figuras 3.10 a-b muestran las concentraciones de gas en la nube en función del tiempo de apertura de la válvula del derrame, tomadas a intervalos de tiempo de 2 s en promedio. Se observan picos de concentración de gas alrededor de los 50, 70 y 90 s en la fila de sensores situada a 140 m (Fig. 3.10 a) y alrededor de los 60, 80 y 100 s en la fila situada a 200 m (Fig. 3.10 b), con una velocidad de viento de 6 m/s. Los datos indican una nube turbulenta, en la que los grandes picos y valles en los gráficos de concentración de gas pueden ser interpretados como bocanadas de gas a la deriva moviéndose a la velocidad del viento.

La ignición se produjo en una región libre de niebla 99,7 s después de empezar el derrame. Las llamas visibles, de color naranja, se extendieron lateralmente en todas direcciones y al parecer se originaron en lugares dispersos por delante

de la fuente de llama principal. Los efectos de flotabilidad también fueron evidentes en los movimientos de elevación de las llamas visibles a una altura de hasta 33 m. Las llamas en la dirección del viento fueron inicialmente de color naranja y luego se volvieron amarillas antes de que desaparecieran.

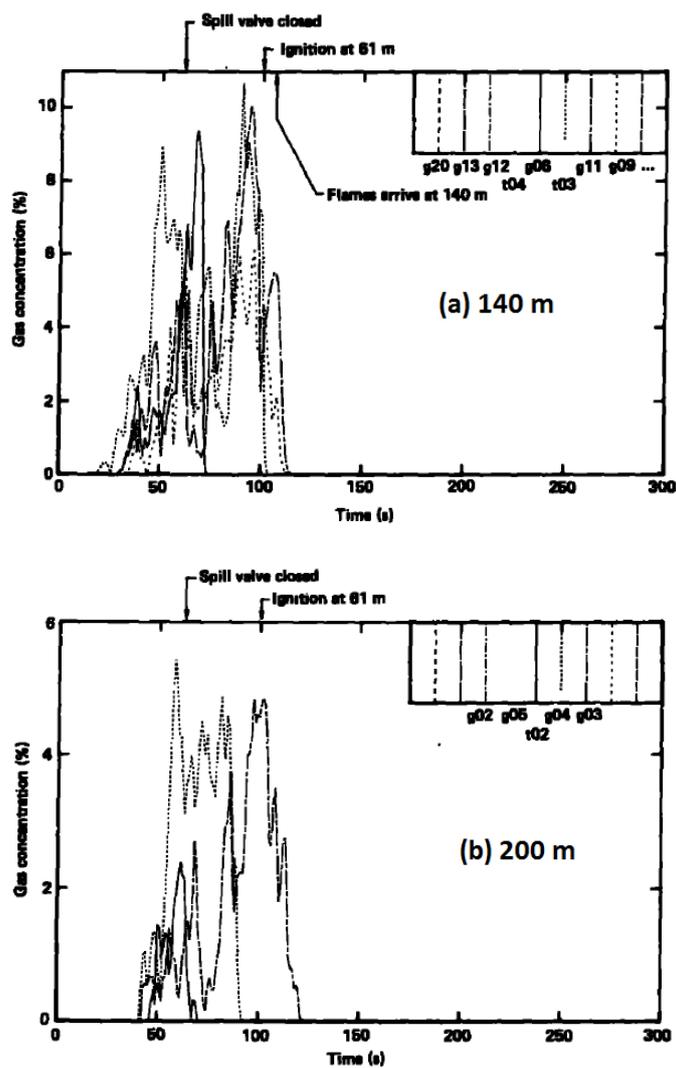


Fig.3.10 a-b Concentraciones de gas en la nube en función del tiempo para la prueba 3 de Coyote: (a) a 140 m de la fila de sensores y (b) a 200 m (Rodean et al., 1984).

Prueba 5 de Coyote

La velocidad del viento en la prueba 5 de la serie de Coyote (10 m/s) fue la más alta que se presentó durante las pruebas de Burro y la serie de Coyote. La dirección del viento casi coincidió con la línea central del conjunto de sensores. Las condiciones atmosféricas eran ligeramente inestables. El volumen del derrame fue el más grande de la serie (28 m³) y su duración fue de 98 s, dando una tasa de flujo promedio de 17,1 m³/min. La nube visible, correspondiente a concentraciones de gas superiores al 11% en volumen, alcanzó 2 metros de altura aproximadamente y se extendió a unos 150 metros a favor del viento.

La alta velocidad del viento parecía dominar el fuego así como la propagación del frente de la llama en la dirección del viento. Las llamas alcanzaron alturas de 8 a 10 m detrás del frente de propagación y se elevaron a una altura de hasta 40 m aproximadamente de acuerdo con lo observado por las cámaras ópticas. Las llamas en la dirección contraria al viento fueron menos visibles hasta que alcanzaron la balsa del derrame y comenzó a producirse un humo muy negro.

Prueba 6 de Coyote

En esta prueba la nube se encendió a los 108 segundos, a 79 m del punto de vertido en la dirección del viento, cuando todavía había niebla considerable. Se observó un frente de llama continuo de color azul detrás del cual aparecieron llamas de color naranja en lugares dispersos. Las primeras llamas de color naranja pálido tenían unos 17 metros de altura, y se propagaron a favor del viento a través de la niebla. Las llamas que se propagaron en dirección contraria al viento eran más amarillas y alcanzaron unos 25 m de altura, deteniéndose en la orilla de la laguna sin generar humo negro hasta que llegaron al centro del estanque. La combustión se extendió en dirección contraria al viento más allá del punto del derrame.

La velocidad del viento en esta prueba (inferior a los 5 m/s) fue la más baja que se presentó durante toda la serie de Coyote. La nube visible, que correspondía a

concentraciones de gas superiores al 11%, se extendió a unos 160 metros a favor del viento con una humedad relativa de 22.8%. La nube en esta prueba tuvo una anchura mayor que en las dos pruebas anteriores, lo cual es reflejo de la baja velocidad del viento y las condiciones atmosféricas más estables presentes durante la prueba.

Prueba 7 de Coyote

Durante esta prueba las condiciones de estabilidad atmosférica fueron casi neutras, con una velocidad de viento moderada (6 m/s). La ignición tuvo lugar 146.1 s después de iniciado el derrame. A diferencia de las pruebas anteriores, el frente de la llama en dirección contraria al viento no produjo humo negro después de alcanzar la balsa del vertido; esto es consistente con el hecho de que en esta prueba la combustión fue de metano puro. Aunque de esta prueba se obtuvieron pocos datos de concentración del gas, se describe que como resultado de la combustión se observaron llamas visibles que se elevaron 16 m en la dirección a favor del viento del frente de llama y de hasta 32 m en dirección contraria al viento.

Combustión de las nubes de gas en la serie de pruebas de Coyote

El daño potencial de la combustión de una cantidad considerable de mezcla aire/combustible puede ser estimado mediante la determinación de la superficie quemada, las características del fuego, la sobrepresión generada y los efectos térmicos. La extensión de la mezcla de pre-ignición inflamable es frecuentemente identificada como el área potencial del incendio; para esta serie de pruebas, el área de pre-ignición inflamable fue presentada en gráficas de contorno medidas en un tiempo promedio de 2 s, siendo comparadas con el área real grabada para validarlas.



Figura 3.11 Incendio de una nube de GNL (Coyote, China Lake ,1981).

La concentración de gas se midió ampliamente, con un total de 89 sensores colocados en 29 torres a una altura de 1, 3 y 8 m de altura. Además, la concentración se midió en tres lugares cerca del centro de la laguna, a unos 40 cm por encima de la superficie del agua. Durante la prueba los datos de estos sensores se tomaron a intervalos de 0,3 a 1 s. Para el análisis de la dispersión, los datos se evaluaron en promedio durante un período de 10 s, haciendo interpolaciones entre las diferentes estaciones vecinas para la construcción de las gráficas de contorno de la concentración de gas en los planos horizontal y vertical (figura 3.12).

Un ejemplo de estos mapas de contorno de concentración se muestra en la Figura 3.12 (a-b), que representa el plano de concentración de la prueba 3 de Coyote 2 s antes de la ignición. Las curvas de nivel horizontal se trazaron a 1 m por encima del suelo, que era el nivel más bajo de los sensores. Los contornos verticales de la Figura. 3.12 (a) son para la fila de sensores situada a 200 m (cerca del LFL, en este caso). La altura corresponde a la distancia sobre el nivel del suelo. Por otra parte, los contornos verticales no están situados en un plano sino que siguen el arco de una fila de sensores. El gas era esencialmente

metano, por lo que la región teórica inflamable (despreciando las fluctuaciones) está delimitada por los contornos correspondientes a las isopletas de 5% y 15%. También se muestran como puntos los sensores relevantes para la construcción de cada mapa de contorno.

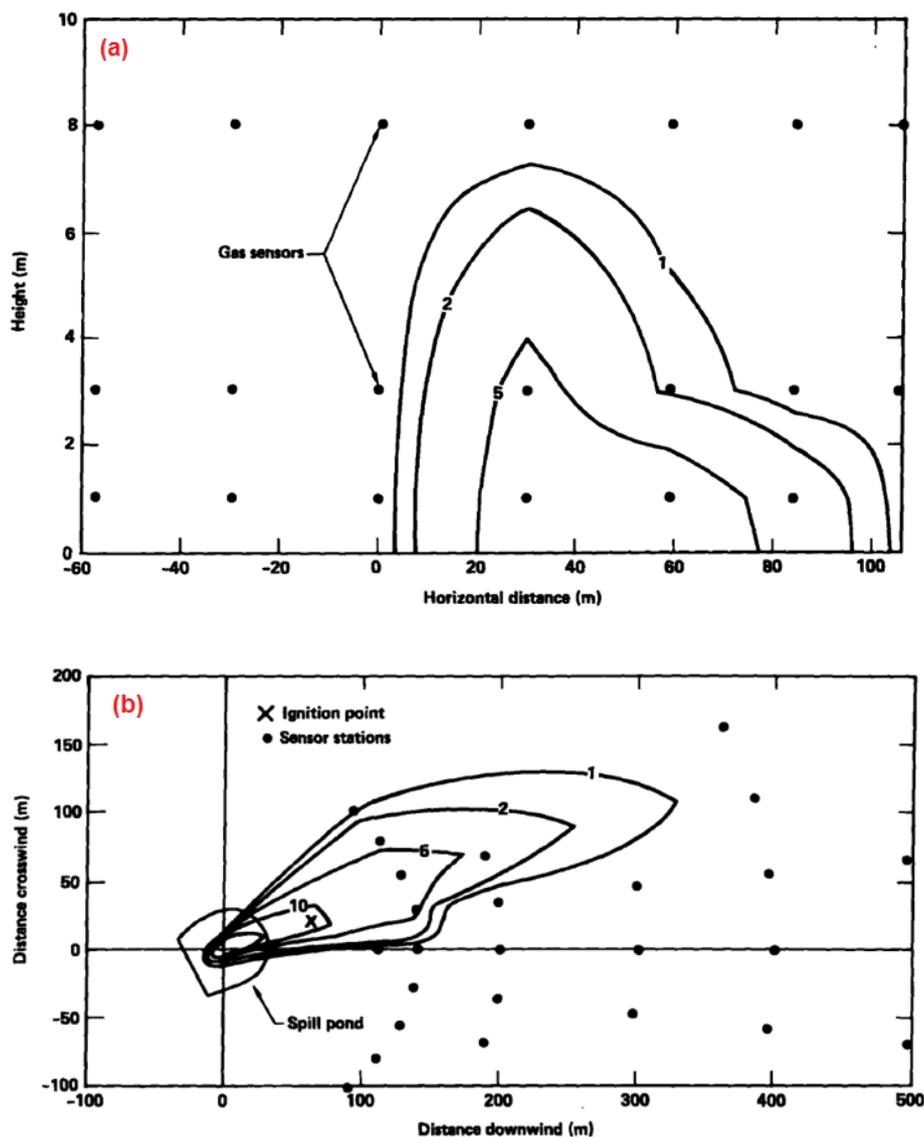


Fig.3.12 (a-b) Plano de concentración vertical (a) y horizontal (b) de la prueba 3 de Coyote antes de la ignición (Rodean et al., 1984).

Forma y tamaño del fuego en la serie Coyote

La prueba 3 de Coyote tuvo lugar en un ambiente muy turbulento y con una fuente fluctuante. Las Figuras 3.12 (a-b) muestran los perfiles de concentración horizontal y vertical 2 s antes de la ignición. La nube acaba de pasar por uno de sus máximos y el contorno del 5% (límite inferior de inflamabilidad) se extiende hasta unos 180 m a favor del viento.

La nube (concentración superior al 5%) es de unos 58 m de ancho y 3 m de altura a 140 metros de distancia. El contorno correspondiente al 10% incluye el punto de ignición a 61 m (marcado con una X). Durante el período del incendio, la nube estaba al parecer en un ciclo de contracción por lo que se esperaría que el área quemada fuera menor que el área máxima.

Las Figuras 3.13 (a-d) muestran una secuencia de gráficas de contorno señalando la región inflamable para cada instante. Los datos de los gráficos de contorno corresponden a un promedio de 2 s. Después de la ignición, el fuego se propaga en todas direcciones hasta que llega a todo el ancho de la zona inflamable, y luego se rompe en dos secciones: barlovento y sotavento. En estas figuras, el frente de llama visible está representado por una curva de contorno continuo, para distinguirla de las llamas no visibles.

En la prueba 3 se realizó una observación, relacionada con la velocidad de propagación de la llama, la cual alcanzó una velocidad de 20 m/s, mientras que la velocidad del viento registrada fue de 6 m/s. En el informe se menciona que es difícil entender el mecanismo físico implicado para explicar tal comportamiento. Una de las posibles explicaciones es la atribuida al método utilizado para generar los contornos, en el que según describen Goldwire et al. (1983), los valores de concentración de gas entre los sensores se determinaron por interpolación (logarítmicamente en la dirección del viento), por lo que podía ocurrir que en una porción de la nube, los gradientes de concentración en el borde pudieran causar un cambio repentino en un contorno específico al pasar la nube por el sensor.

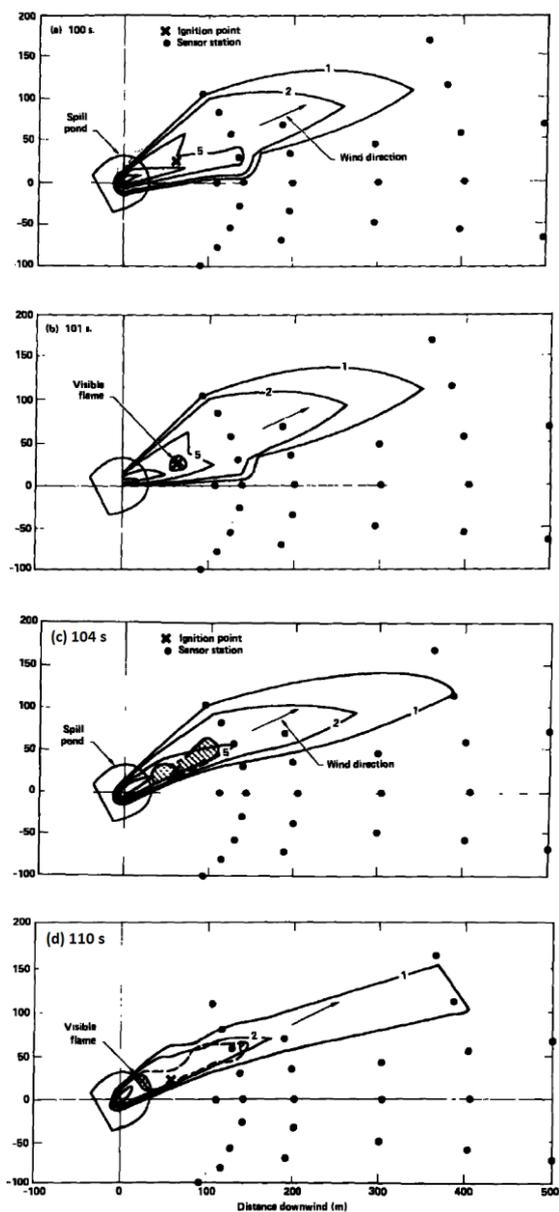


Fig. 3.13 (a-d) Secuencia de la concentración de la prueba 3 de Coyote durante la combustión (Rodean et al., 1984).

Agregan también estos autores que posiblemente una bocanada de gas

inflamable alcanzara a situarse entre la llama y la fila de sensores ubicados a 140 m a los 103 s y que alcanzara un sensor situado a 140 m justo antes de la llama. Esto también explicaría por qué la llama a 104 s parece ser más amplia que el contorno del 5%; sin embargo, tampoco descartan la posibilidad de que el fuego empujara el gas inflamable delante de él. Sobre la base de las concentraciones mayores de gas registradas en cada fila, se llega a la conclusión de que la ubicación máxima a favor del viento del LFL para la prueba 3 de la serie de Coyote fue de 195 m, mientras que la distancia observada que alcanzó la combustión fue de 160 m, es decir el 82% de este valor.

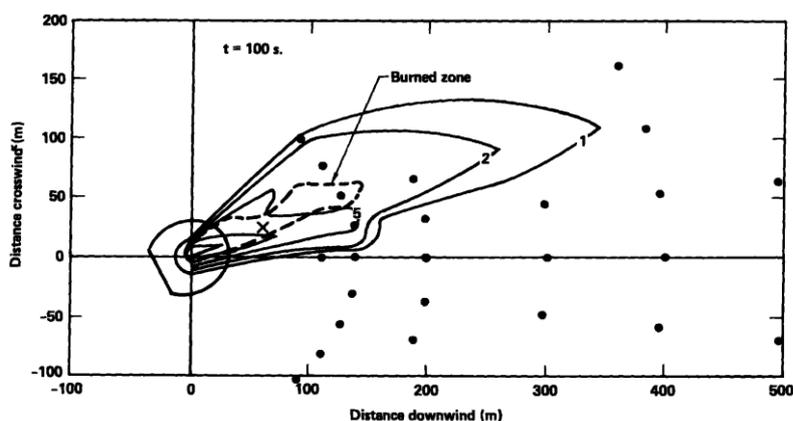


Fig. 3.14 Comparación del contorno de preignición del 5% y el área total quemada para la prueba 3 de Coyote, a los 100 s (Rodean et al., 1984).

En la Figura 3.14 se aprecia la extensión máxima alcanzada por la combustión durante la prueba 3 de Coyote. Si se compara con el contorno de preignición del 5%, se puede observar que no resulta ser un buen pronóstico de la zona de combustión, aunque la distancia máxima a favor del viento es aproximadamente la misma. Por otra parte, si se compara la zona total quemada de la Figura 3.14 con el contorno de preignición del 5% dos segundos antes de la ignición, se observa que la anchura del fuego es aproximadamente la mitad de la anchura aparente de la zona dentro del contorno del 5% en ese instante (véase la Figura 3.15).

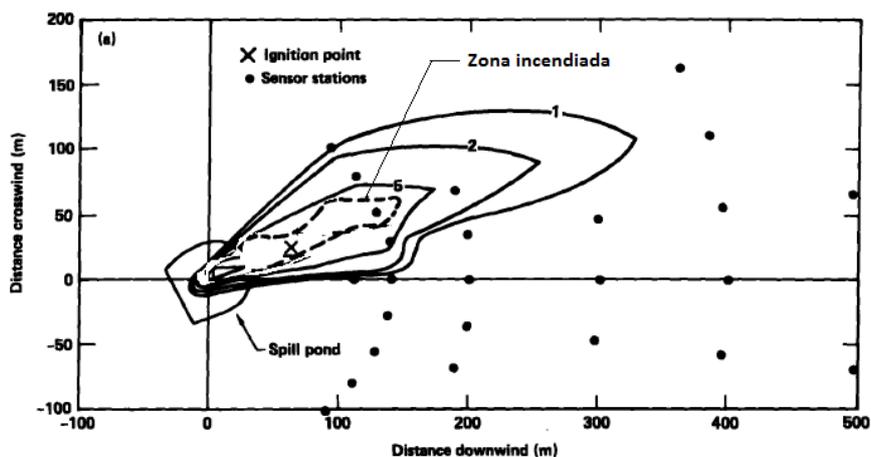


Fig. 3.15 Comparación del contorno de preignición del 5% y el área total quemada para la prueba 3 de Coyote, a los 98 s (modificada de Rodean et al., 1984).

El área total quemada fue de 3200 m², casi la mitad de lo esperado teniendo en cuenta la extensión máxima alcanzada por el contorno del 5% dos segundos antes de la ignición.

Una característica de la prueba 5 de Coyote, fue la aparición al final del derrame de un fenómeno denominado "transición rápida de fase" (RPT). El mismo tuvo un efecto importante en la configuración de las nubes en el momento de la ignición y en el incremento de la zona inflamable.

La transición de fase rápida es un fenómeno que puede ocurrir tras el derrame del GNL y consiste en la vaporización muy rápida (casi espontánea) del GNL, el cual se vaporiza por el calor obtenido de la superficie del derrame o agua con la que está en contacto. Debido al extraordinario (y rapidísimo) incremento de volumen, puede ocurrir una explosión física. El riesgo de las transiciones de fase rápida suele ser grave, pero muy localizado dentro o en la proximidad inmediata de la zona de vertido.

El contorno del LFL se extendió hasta cerca de 170 m en la dirección del viento, registrando la nube inflamable una anchura de 45 m y 1.5 m de altura en la fila de sensores situada a 140 m, antes de presentarse la RPT. Por su parte, la

distancia máxima del LFL estimada de 205 m antes de la ignición. Después de ocurrir la RPT se generaron múltiples bocanadas de gas ricas en hidrocarburos en comparación con el resto de la nube, tras lo cual el LFL estimado se extendió hasta los 310 m de longitud y 60 m de anchura. El efecto de estas bocanadas se aprecia en los perfiles de concentración vertical medidos por la fila de sensores situada a 140 m, en donde se registran casi 8 m de altura en la nube (Figura 3.16). También es apreciable este efecto cuando se compara el contorno de concentración entre los 133 s y 135 s (véase Figura 3.17); a los 133 s se aprecia una nube plana de 50 m de ancho y solamente 2 m de altura. La evidencia de otra bocanada de gas producto de la RPT alcanza la fila de sensores a los 135 s, lo cual se aprecia en la Figura 3.17 (b).

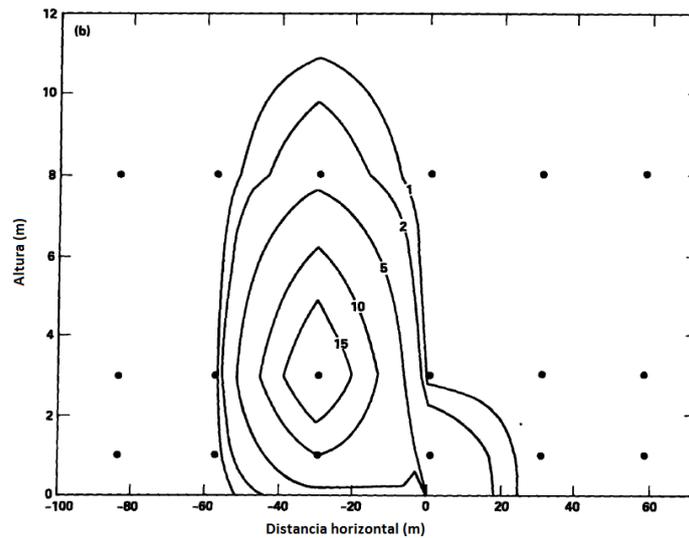


Fig. 3.16 Perfil de concentración vertical a 140 m de la prueba 5 de Coyote, $t = 128$ s.

El área total quemada fue de alrededor de 12.000 m², lo cual es tres veces el área de incendio estimada sin la presencia de la RPT; el fuego se extendió un 65% más rápido en la dirección del viento en comparación a cuando no se produjo RPT.

Otro de los fenómenos observado durante esta prueba uno o dos segundos después de la ignición, consistió en la división de las llamas en dos

componentes: a favor del viento y contra el viento. Las llamas a favor del viento fueron completamente transparentes hasta que alcanzaron el perímetro de la balsa.

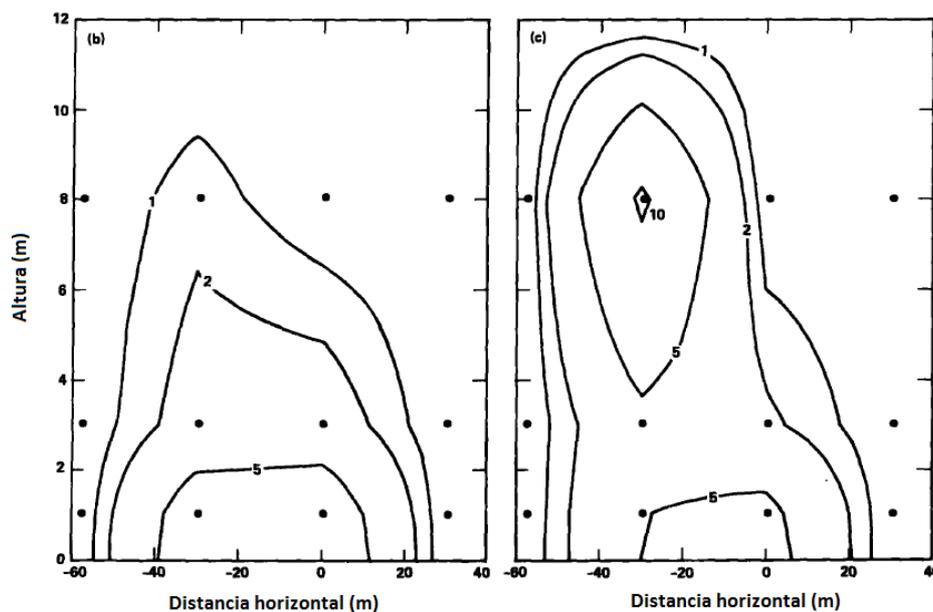


Fig.3.17 Contornos de concentraciones verticales a 140 m de la prueba 5 de coyote: (a) 133 s, (b) 135 s.

Propagación de las llamas horizontales

Puede deducirse del análisis realizado anteriormente que las pruebas con más viento resultaron más inestables (Coyote 3 y 5) y el área inflamable tenía la tendencia a ser larga y estrecha, mientras que en las pruebas con menos viento resultaron más estables (Coyote 6 y 7) y el área inflamable era mucho más amplia. Esta correlación es razonable, pero fue probablemente acentuada por la pendiente ascendente que existía inmediatamente a sotavento de la balsa de derrame.

La Tabla 3.7 resume los datos de propagación de la llama horizontal. Se muestran tres medidas de la combustión horizontal: la distancia al límite inferior de inflamabilidad, la anchura máxima del contorno del límite inferior

de inflamabilidad y el área de la región inflamable. Los cálculos realizados con FEM3 usan datos atmosféricos y la velocidad de escape como datos de entrada en la simulación de la dispersión de gases, utilizando la posición de la isopleta correspondiente al 5% para estimar las dimensiones de la combustión.

Tabla 3.7 Datos de la propagación horizontal de las llamas en la serie experimental de Coyote (Rodean et al., 1984)

Parámetro	Coyote 3	Coyote 5	Coyote 6	Coyote 7
Distancia al LFL (m):				
Calculado con FEM3	-	260	240	-
Dato experimental:				
Pico de concentración	195	310	250	-
Contorno de preignición	145	218	200	-
Combustión	160	280	210	175
Ancho máximo del LFL (m):				
Calculado con FEM3	-	50	93	-
Dato experimental				
Contorno de preignición	50	45	88	-
Combustión	28	60	130	105
Área inflamable (m ²):				
Calculado con FEM3	-	8.900	14.900	-
Dato experimental				
Contornos de preignición	4.300	6.300	10.100	-
Combustión	3.200	12.000	16.200	12.500

En lo que respecta al tamaño y forma de las llamas en el plano vertical, existen pocos datos que permitan determinar el perfil vertical de la combustión. Los únicos instrumentos que proporcionan alguna información fueron las vistas laterales del IR y la cámara óptica.

En cada prueba, las primeras llamas se elevaron y se mantuvieron a una altura bastante estable conforme el fuego crecía radialmente. Después de que el incendio se dividió en dos secciones a barlovento y sotavento, cada componente alcanzó diferentes alturas. La sección en la dirección del viento en general se mantuvo a la misma altura durante el crecimiento radial, pero la correspondiente a la dirección contraria al viento generalmente incrementó su altura. En la tabla 3.8 se presentan datos de altura de la llama disponibles para estas pruebas.

Tabla 3.8 Dimensiones de la llama en la serie experimental de Coyote (Rodean et al., 1984)

Parámetro	Coyote 3	Coyote 5	Coyote 6	Coyote 7
Altura contorno de 5% (m)	3	> 8	1.5-2	Aprox. 2
Anchura contorno de 5% (m)	50	45	75	-
Anchura máxima en la combustión temprana	15	20	130	100
Altura de la llama visible:				
temprana (< 4 s):	33	40	17	16
tardía (> 4 s):	33	40	25	32

Se puede observar de la tabla que las pruebas 3 y 5 de Coyote tuvieron las llamas visibles más altas. Otra observación de sumo interés es la aparente relación entre la altura de la nube y la altura de la llama, siendo la altura de la llama de 5 a 10 veces la altura de la nube.

3.5 Pruebas realizadas con GNL por Gaz de France en Saint Etienne

Este programa experimental de pruebas a media escala fue llevado a cabo por Gaz de France en Saint Etienne, cerca de Nantes (Francia) y consistió en diez experimentos.

Una de las características de esta serie fue que en cada prueba el objetivo era generar nubes con una concentración por encima del límite superior de inflamabilidad (UFL). En cada experimento se vertió una cantidad de GNL a una velocidad de descarga de alrededor de 4 kg/s durante períodos de entre 30 y 100 s, formándose nubes de gas que fueron incendiadas en diferentes puntos. Los sensores se dispusieron en un patrón de arcos circulares de radios de hasta 70 m, midiéndose las concentraciones, las temperaturas y la radiación térmica.

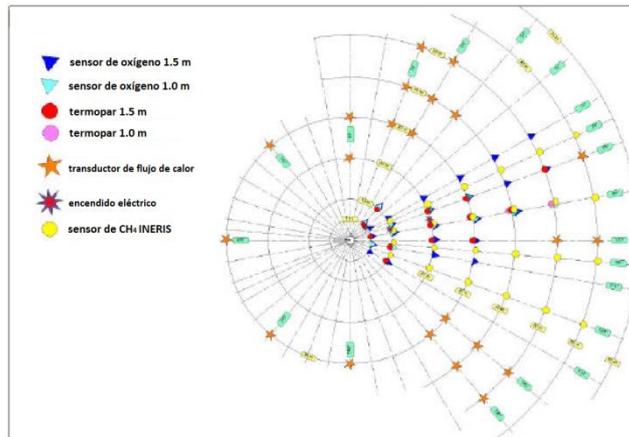


Fig. 3.18 Disposición de los sensores para las pruebas experimentales de Gaz de France (Daish et al., 2001).



Fig. 3.19 Sitio de prueba para la serie experimental de Gaz de France (Daish et al., 2001).

Resultados de la pruebas

En las Tablas 3.9 a y b se muestran los resultados obtenidos de las nubes de gas generadas para cada fuga, así como los obtenidos de los sensores de concentración. Éstos muestran que la ignición tuvo lugar en la mayoría de los casos en una variedad de lugares en los que la concentración estaba comprendida entre los dos límites de inflamabilidad, así como justo en el límite superior de inflamabilidad (prueba 1). La longitud de la zona de inflamabilidad variaba entre 7.5 m y 30 m. El ángulo del sector ocupado por el fuego también varió entre 30° y 80°, mientras que la masa de combustible estuvo comprendida entre 4 kg y 19.2 kg.

Un hecho significativo es que en esta serie de pruebas se identificaron bolas de fuego (fireballs) en al menos 6 de los 10 ensayos. En la Figura 3.20 se muestra la imagen de una bola de fuego ocurrida durante la prueba 6 de esta serie. Los fireballs fueron pequeños debido al tamaño limitado de las fugas y quizá también al hecho de que la nube de LNG llegó a ser rápidamente flotante, limitando la formación de una nube concentrada de mayor tamaño.

Tabla 3.9 (a) Resumen de las pruebas realizadas con GNL por Gaz de France

Parámetro	1	2	3	4	5
Fecha	23/11/99	23/11/99	2/12/99	10/12/99	14/12/99
Masa fugada (kg)	13.3	14.4	12.8	8.2	19.2
Duración del derrame (s)	49	105	50	75	48
Tasa de derrame (kg/s)	4.5	4.6	3.5	5.6	4
Tiempo de ignición					
después del derrame (s)	60	106	53	80	51
Velocidad del viento (m/s)	0.6	1.9	0.5	2.9	1.6
Temperatura del aire (°C)	7.3	12	10	10	4.4
Humedad relativa (%)	60	50	48	48	57
Estabilidad atmosférica	C	C	B	A	C
Distancia al UFL (m)	7.5	6.5	5	5	7.5
Distancia al LFL (m)	15	15	23	25	25
Longitud nube de gas (m)	7.5	8.5	18	20	17.5
Temperatura máxima (°C)	853	844	711	970	803
Dimensiones del fireball:					
Diámetro (m)	-	30	5	14	22
Altura (m)	-	20	17	26	24

Tabla 3.9 (b) Resumen de las pruebas realizadas con GNL por Gaz de France

Parámetro	6	7	8	9	10
Fecha	07/03/00	09/03/00	9/03/00	30/03/00	30/03/00
Masa fugada (kg)	8.6	11.5	11.7	11.2	5.1

Duración del derrame (s)	107	37	33	30	34
Tasa de derrame (kg/s)	2.6	4.8	4.9	5	3.6
Tiempo de ignición					
después del derrame (s)	108	37	25	40	29
Velocidad del viento (m/s)	1.7	0.9	1.5	1.5	3.5
Temperatura del aire (°C)	16.3	16	23	12	27
Humedad relativa (%)	40	58	54	46	43
Estabilidad atmosférica	C	B	B	C	A
Distancia al UFL (m)	5	5	5	5	5
Distancia al LFL (m)	30	27.5	15	30	35
Longitud nube de gas (m)	25	22.5	10	25	30
Temperatura máxima (°C)	655	843	901	898	842
Dimensiones del fireball:					
Diámetro (m)	10	10	-	-	-
Altura (m)	20	26	-	-	-

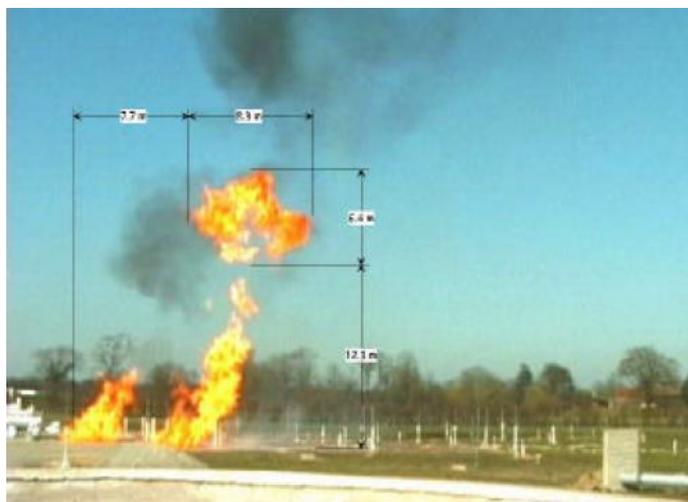


Fig. 3.20 Ejemplo de una bola de fuego durante la prueba 6 de Gaz de France (Daish et al., 2001).

Las condiciones ambientales variaron en las diez pruebas; por ejemplo, la velocidad del viento varió en la gama de 0.5-3.5 m/s. Éstas son velocidades relativamente bajas comparadas con pruebas similares realizadas anteriormente. En la Figura 3.21 se presentan una serie de imágenes que incluyen la dispersión de la nube y el desarrollo de la combustión durante una de las pruebas realizadas.



Fig. 3.21 Dispersión de la nube de GNL y desarrollo de la combustión durante una de las pruebas realizadas por Gaz de France (Daish et al., 2001).

Se probaron diferentes tipos de ignición: en 7 de los 10 ensayos se utilizó un encendedor de chispa eléctrica, mientras que en los 3 restantes se utilizó una

bengala. La ubicación del encendedor responsable de la ignición se modificó entre 10 m y 30 m para los diferentes ensayos.

El fuego producido durante estas pruebas se caracterizó por presentar llamas de una altura y anchura considerables. Los incendios alcanzaron temperaturas de llama superiores a los 900 °C, con un flujo de calor de 5.6 a 50 kW/m² dependiendo de la prueba.

3.6 Pruebas realizadas en Buxton, (UK) por HSL

Este conjunto de pruebas fue desarrollado por el Health and Safety Laboratory (HSL) en un campo de pruebas localizado en Buxton, Derbyshire, UK. Uno de los objetivos fue caracterizar la propagación de las llamas a través de la nube y estudiar la variación del punto de ignición, así como el efecto de obstáculos sobre la propagación de la nube y consecuentemente de las llamas.

Las nubes de gas fueron incendiadas en varias posiciones, observando su comportamiento. Se utilizaron sensores de flujo de calor para evaluar la severidad de los incendios de llamarada producidos. Se realizaron diez pruebas diferentes, de las cuales seis fueron fugas sin ningún tipo de obstáculo y cuatro con la presencia de una valla colocada normal al flujo; la característica principal entre cada caso fue la variación del punto de ignición.

Características de las pruebas

La velocidad de la llama dada en la Tabla 3.10 es un valor medio calculado sobre el tiempo necesario para que la llama se propagase de regreso cerca del punto de fuga. En la mayoría de los casos la distancia involucrada fue de 20 m. La velocidad de la llama se calculó suponiendo que la nube de gas se movía a la velocidad del viento. Más allá de unos metros, el impulso del gas se disipaba debido al contacto con el aire y la nube se movía a la velocidad del aire circundante.

Tabla 3.10 Resultados de la serie de pruebas con GLP realizadas por HSL

No. de prueba	Caudal (kg/s)	Duración fuga (s)	Punto de ignición (m)	Concentración de gas en la ignición (% volumen)	Velocidad de la llama
3	-	-	29	2.0	-
6	4.9	66	20	2.5	9.7
7	3.2	59	20	1.5	12.5
8	2.5	131	30	2.0	7.3
9	2.7	78	5	>3	-
11	3.4	141	15	2.0	12.2
14	3.8	82	14.7	2.0	10.2
15	3	41	15.3	2.5	11.2
16	2.6	116	17.5	2.0	11.2
17	3	160	25	2.5	13.3
18	2.4	143	30	2.0	9.1
20	3.2	148	30	2.5	12.8
23	2.6	51	25	2.5	13.4

Formación de la nube de gas

La nube de gas fue visible como una nube blanca de agua condensada, propagándose desde el punto de fuga. La nube se extendió a ras del suelo, alcanzando en su parte superior una altura máxima de 3 m sobre el suelo. Desplazándose con el viento a una velocidad baja y con una dirección constante, la nube se alejó lentamente del punto de fuga y se propagó hacia los lados, produciéndose una forma de abanico como se puede apreciar en la serie de imágenes obtenidas del informe presentado por Butler et al., 2001, reproducidas en la Fig. 3.22.



Fig. 3.22 Dispersión de la nube de GLP y desarrollo de la combustión durante la prueba 23 realizada por el HSL, desde los 2 s hasta los 43 s (Butler et al., 2001).

El GLP salía del orificio con un cierto impulso, desplazándose la mezcla de líquido/gas desde el punto de fuga. La nube de gas fue muy turbulenta en los primeros metros, siendo la concentración del GLP en la mayoría de los puntos de la nube muy similar. Conforme la nube se movía más allá del punto de fuga

se observaron los siguientes efectos:

- a) El gas pierde impulso y la nube se mueve a la velocidad del aire circundante.
- b) La nube se extiende hacia los lados, con una propagación mayor a mayores distancias.
- c) El gas frío y, por tanto, más denso, desciende provocando así la existencia de mayores concentraciones cerca del suelo.
- d) La concentración de gas dentro de la nube disminuye a medida que ésta se extiende hacia los lados.
- e) El gas presente en la nube se calienta, por lo que ya no condensa agua y por tanto la nube deja de ser visible.

Velocidades de viento más elevadas tenían el efecto de mover la nube de gas a velocidades más rápidas.

Ignición de la nube de gas

La ignición de la nube tenía lugar cuando en el punto en el que estaba situada la fuente de ignición, la nube alcanzaba una concentración dentro de los límites de inflamabilidad. La ignición podía mantenerse o extinguirse. Se mantenía si el gas que rodeaba dicha fuente era suficientemente concentrado y si el gas en la región algo más alejada era suficientemente rico en combustible para quemar y permitir así que la llama se propagase a través de la nube, pudiendo la misma retroceder hasta la boquilla de salida.

La concentración de GLP dentro de la nube variaba. En las pruebas realizadas, no era raro que se repitiera la ignición de bolsas de gas sin que la llama se mantuviera. Esto fue particularmente cierto para las velocidades de vientos fuertes, a las que la concentración de gas en la nube fue en general baja y cercana al límite de ignición.

Es de notar que el informe señala que la ignición de la nube llegó a producirse con concentraciones por debajo del límite inferior de inflamabilidad (2,2% en

vol.) para el propano. La concentración de gas en el punto de ignición fue grabada con un sensor de agotamiento de oxígeno. Sin embargo, dado que la ignición de focos aislados de gas muestra la concentración no uniforme de gas dentro de la nube, era difícil identificar exactamente dicha concentración en el punto de ignición.

En las pruebas donde había más de un cable de encendido en uso, éstos no necesariamente ardían al mismo ritmo en cada caso. La posición donde se produjo la ignición y el cable responsable fueron determinados a partir de las filmaciones de vídeo.

Propagación de las llamas

Las nubes de gas fueron frecuentemente inclinadas hacia el punto donde el gas se incendiaba. Esto resultó en llamas que no eran muy visibles. La presencia de llamas a menudo sólo se detectó como resultado de los siguientes efectos secundarios:

- 1.- A medida que el gas se calentaba aparecían “lagunas” (espacios vacíos) en la nube visible.
- 2.- Se podía ver una “bruma” creada por corrientes térmicas (convección) sobre la nube.
- 3.- La llama incendió el cable de encendido y la hierba.

La propagación del frente de llama se determinó mediante la observación de estos efectos. Dependiendo de la posición del punto de ignición dentro de la nube, era posible que la propagación de la llama pudiera ocurrir en ambas direcciones del viento. Sin embargo, los resultados indican, con una excepción, que la propagación de la llama sólo se observó en la dirección contraria al viento.

Cualquier movimiento de la llama aparentemente a favor del viento fue en realidad una bolsa de gas ardiendo que se movía a la velocidad del viento y no propagación de la llama propiamente dicha a través de la nube. Además, la

concentración de gas a sotavento de la fuente de ignición estaba disminuyendo continuamente debido a la propagación y a los efectos de dilución, lo que reducía la probabilidad de propagación de la llama.

La única excepción que se observó fue en las pruebas en las que la fuente de ignición estaba muy cerca (5 m) de la boquilla de la fuga. En este caso, la ignición resultó en la propagación de la llama hacia adelante y hacia atrás, encendiendo el gas a favor del viento hasta 10 metros de la boquilla, antes de que se formara el dardo de fuego. Esto era debido a una combinación de la propagación de la llama ligeramente a favor del viento y la ignición de bolsas de gas que se movían a favor del viento debido a su impulso y al viento. Resultaba difícil en este caso determinar la velocidad de la llama en la dirección del viento.

Una vez encendida, la propagación de la llama a través de la nube en las pruebas con la valla no fue significativamente diferente de las que no tenían valla. La única diferencia notable fue el gas acumulado al pie de la valla (lado contrario al viento), que fue visto arder después que hubo ardido el de los alrededores.

Observaciones de las pruebas realizadas por HSL

Los resultados de las pruebas demostraron cómo la concentración del gas dentro de la nube de gas variaba con las condiciones atmosféricas. La concentración en la nube de gas formada fue generalmente baja y la llamarada producida fue relativamente pequeña. En algunos casos la nube se incendiaba pero la llama no se propagaba a través de la misma, resultando en la formación de bolsas aisladas de ignición. No se observaron bolas de fuego.

Comentarios sobre la series de pruebas desarrolladas por Gaz de France y HSL

La serie de pruebas con GNL realizada por Gaz de France, junto con la desarrollada con propano en Derbyshire por el HSL, son los más recientes programas experimentales (a media escala) de los que existen datos

disponibles.

Desarrolladas con el objetivo de caracterizar los incendios de llamarada, lamentablemente los reportes no suministran datos sobre las dimensiones de las nubes visibles generadas en sus componentes longitudinal, vertical y transversal. Tampoco proporcionan datos detallados sobre cada uno de los experimentos realizados, en particular respecto a aspectos de sumo interés como la geometría de la llama, limitándose en algunos casos sólo a mencionar las dimensiones del fireball ocurrido en algunas de las pruebas con GNL, mientras que en el caso de las desarrolladas con GLP esta información no consta. Pese a que se ha intentado, ha sido imposible obtener información adicional de las pruebas desarrolladas con GLP. Por otra parte se lograron conseguir vídeos de dos de las pruebas desarrolladas por Gaz de France con GNL, los cuales han sido sumamente útiles para caracterizar la nube de vapor y el posterior incendio.

Capítulo 4. Dispersión atmosférica desde vertidos de gases licuados

4.1 Introducción

En las instalaciones industriales es muy común almacenar gases licuados refrigerados a presión atmosférica. También es muy habitual el uso de cisternas para el transporte de gases licuados criogénicos y otras sustancias peligrosas. Entre los gases licuados refrigerados o también llamados criogénicos, se encuentran el metano y los gases licuados de petróleo: propano y butano, así como también otros tipos de gases muy utilizados en la industria como el cloro, amoníaco u oxígeno entre otros. Y un porcentaje importante de los accidentes graves se inician con la liberación de estos materiales, debido a sus características tóxicas o inflamables. Esta situación puede ser originada por la rotura o fractura del recipiente, de una tubería, por una mala maniobra, etc.

El estudio del fenómeno de la evaporación de un gas licuado, después de un vertido por fuga y derrame accidental, se puede efectuar mediante su modelado matemático. Dicho estudio requiere conocer las características del derrame, es decir, el tipo de líquido derramado, las condiciones, tipo de emisión y área de confinamiento en que se derrama.

El material fugado puede encontrarse en estado gaseoso, líquido o en ambas fases simultáneamente. Una vez fugado y transferido a la fase en la que es más estable termodinámicamente, el siguiente paso a considerar es el transporte de dicha sustancia. Desde el punto de vista de la seguridad, el caso más

importante es el de la dispersión de gases y vapores, bien porque se han vertido como tales o porque han sufrido un proceso de evaporación.

Durante la dispersión, la concentración de la sustancia fugada disminuye con la distancia. La cuantificación de estos efectos, es decir, la obtención de un perfil de concentraciones sobre la zona afectada, es de vital importancia para poder evaluar las probabilidades de que la fuga de un combustible derive en un accidente mayor.

Además de cuantificar sus efectos, se utilizan diferentes herramientas para mitigar las consecuencias de fugas accidentales de materiales tóxicos e inflamables. El uso de cortinas de agua es una técnica relativamente moderna para dispersar una nube de gas pesado; su facilidad, eficiencia y adaptabilidad para diferentes tipos de riesgos (dispersión de gases, absorción, atenuación del incendio) la hacen una herramienta muy útil, habiendo sido investigada en los últimos años por diversos autores [Hald et al., 2005; Bara y Dusserre, 1997].

A pesar de la dificultad presente para caracterizar de manera precisa la fuga de un material peligroso, se tienen tipificados los escenarios utilizados en los estudios de análisis de consecuencias. En la Figura 4.1 se ilustran algunos de los escenarios más comunes presentes en las situaciones de fugas accidentales, divididas en seis diferentes categorías [Mannan, 2005].

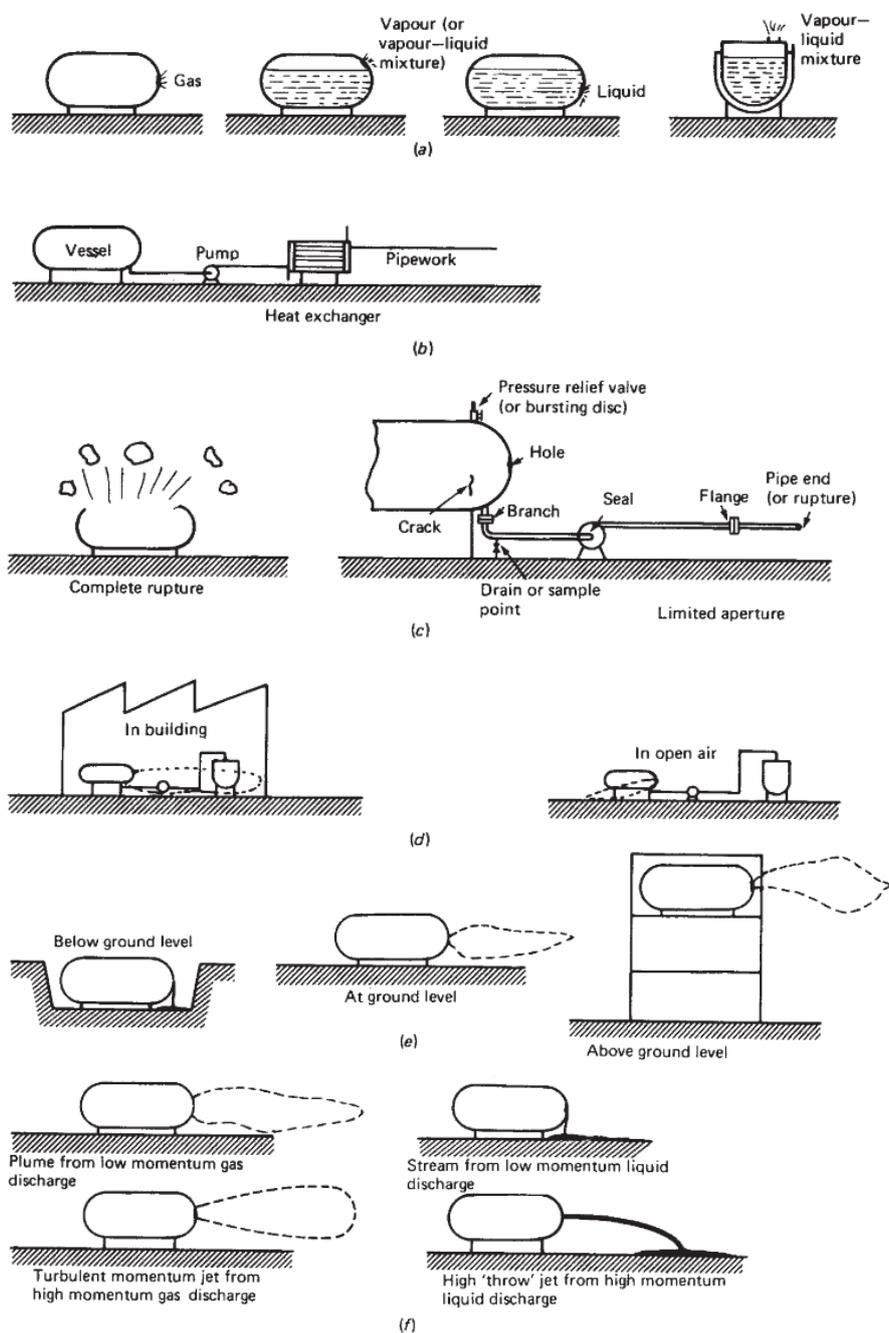


Figura 4.1 Ilustración de algunos mecanismos de fuga de materiales de acuerdo con: (a) condición inicial, (b) recipiente, (c) abertura, (d) recinto, (e) altura, y (f) impulso del fluido [Mannan, 2005].

4.2 Características de la dispersión de gases

Un aspecto importante a considerar en la dispersión atmosférica es la duración del escape; pueden establecerse dos grandes categorías:

- Escapes instantáneos. Suelen definirse como aquellos en los que el tiempo requerido para que la nube llegue a un punto determinado es mayor que el tiempo de fuga del producto. La nube originada es arrastrada por el viento y se dispersa con el tiempo; la forma de la misma es casi esférica. Un escenario común se produce cuando la rotura es muy grande o la masa contenida en el recipiente es pequeña; en este caso, se libera prácticamente todo el inventario muy rápidamente, formándose una nube –conocida con el término inglés “puff”– que no se halla unida a la fuente del derrame ya que se separa rápidamente de la misma bajo la acción del viento, modificándose su posición y tamaño a lo largo del tiempo.
- Escapes continuos. Se consideran continuos aquellos en los que el tiempo de emisión es mayor que el tiempo necesario para que la nube alcance un determinado punto. Se forma una nube de forma alargada (pluma) que alcanza un estado estacionario cuando el gas suministrado al interior de la nube es igual al dispersado en el ambiente. Un escenario para una pérdida continua ocurre cuando el orificio por donde se produce el escape es relativamente pequeño o la masa contenida en el recipiente es muy grande, con lo que el período durante el que se desarrolla el derrame resultará muy extenso. Bajo estas condiciones los gases se dispersarán formando una pluma, cuya máxima extensión se mantendrá durante el tiempo que dure el derrame.

Aunque hay diversos criterios para distinguir entre escapes instantáneos o continuos, en la práctica realizar esta división puede ser algo realmente subjetivo, porque a menudo se presentan situaciones intermedias. Sin embargo, el criterio más frecuentemente aplicado es el antes mencionado, es decir:

- escape continuo: $x^* > 1.8 \cdot u_w \cdot t^*$
- escape discontinuo: $x^* < 1.8 \cdot u_w \cdot t^*$

siendo:

u_w = velocidad del viento (m/s),

t^* = tiempo de duración de la emisión (s),

x^* = distancia desde el punto de emisión (m).

4.2.1 Parámetros que afectan a la dispersión

La dispersión es afectada por las condiciones atmosféricas locales, principalmente la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica, así como por la rugosidad del terreno. Para llevar a cabo los estudios de dispersión es necesario tener datos meteorológicos del lugar en el que ésta transcurre.

Velocidad del viento

La influencia del viento se puede apreciar en la clase de estabilidad atmosférica y obviamente es importante a la hora de determinar el comportamiento de la emisión a la atmósfera. La velocidad del viento varía con la altura, existiendo una capa límite cuyo espesor es función de la rugosidad del terreno. En general, se toma como referencia la velocidad del viento a 10 m de altura. Con respecto a líquidos refrigerados y almacenados a presión atmosférica (LPG, GNL, etc.), se ha observado que cuando la velocidad del viento aumenta también se incrementa la distancia alcanzada por la pluma.

Estabilidad atmosférica

La estabilidad es una medida del grado de turbulencia atmosférica. La atmósfera puede ser estable, neutra, o inestable. Sin embargo, para estimar la dispersión, estos niveles de estabilidad se clasifican en seis clases según las categorías de Pasquill-Gifford, de A a F (Tabla 4.1), que se calculan en función de las variables meteorológicas: temperatura, dirección y velocidad de viento y radiación solar.

Tabla 4.1 Categorías de estabilidad de Pasquill- Gifford

Clase	Definición
A	Muy inestable
B	Inestable
C	Ligeramente inestable
D	Neutra
E	Ligeramente estable
F	Estable

En el caso de las clases de estabilidad A - C y E - F, los perfiles verticales de velocidad del viento y de temperatura se establecen definiendo primero dos longitudes de escala adicionales: u_* y T^* . La velocidad de fricción, u_* , se define como el promedio de fluctuaciones de la velocidad del viento en diferentes direcciones.

La escala de temperatura, T^* , es calculada durante condiciones de estabilidad neutra al promediar las fluctuaciones de la velocidad del viento en la dirección transversal y su temperatura, (T).

Otra longitud de escala es conocida como longitud de Monin - Obukov, (λ) la cual permite generalizar los perfiles de viento a otras clases de estabilidad y es definida por [Woodward y Pitblado, 2010]:

$$\lambda = \frac{u_*^2}{0.4g\left(\frac{T^*}{T}\right)} \quad (4.1)$$

Rugosidad de la superficie

La rugosidad de la superficie sobre la que tiene lugar la dispersión provoca turbulencias. En los modelos de dispersión se tiene en cuenta mediante la

denominada “longitud de rugosidad” de la superficie, z_r . Técnicamente, la longitud de rugosidad de la superficie es un factor de escala que afecta a los perfiles verticales de velocidad del viento, cuyos valores son establecidos mediante ajuste por mínimos cuadrados de datos de perfiles de velocidad del viento observados previamente. Así por ejemplo para una estabilidad neutra, el perfil de velocidad del viento puede ser modelado como una función logarítmica de altura, z , con la siguiente expresión [Woodward y Pitblado, 2010]:

$$u_x = \frac{u_s}{k_v} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4.2)$$

donde la constante k_v es la constante de Von Karman, la cual tiene un valor de 0.35 sobre una superficie plana y 0.4 para el resto de las superficies.

Tabla 4.2 Valores de rugosidad usados en los modelos de dispersión

Clasificación del terreno	Descripción	Rugosidad , z_r (m)
Altamente poblado	Núcleos urbanos con edificios altos, zona muy accidentada o montañosa.	3-10
Área urbana	Comunidades, aldeas, con poco desnivel.	1-3
Área residencial	Áreas pobladas pero con edificios de baja altura, zona arbolada, industrial sin grandes obstáculos.	1
Grandes refinerías	Columnas de destilación y otras piezas de equipos de gran altura	1
Pequeñas refinerías	Equipos pequeños, sobre un área menor.	0.5
Áreas cultivadas	Áreas abiertas , casas dispersas	0.3
Terreno	Pocos árboles, hierba de una altura considerable, llanuras.	0.1
Desierto	Desierto, superficie plana.	0.001
Mar	Mar en calma, nieve que cubre una superficie plana.	0.0001

4.3 Dispersión de vapores a la atmósfera desde vertidos de gases licuados

Es conveniente distinguir los diferentes casos que se presentan cuando tratamos de la evaporación de un líquido o gas licuado, por fuga y derrame accidental (Fig. 4.2). Cuando se almacenan sustancias, éstas pueden estar:

- En estado líquido a temperatura ambiente (líquidos no hirvientes), que al derramarse forman un charco de líquido que se evapora.
- En forma líquida a temperatura ambiente y a una presión mayor que la presión atmosférica (gases licuados bajo presión).
- En forma líquida, enfriándolos hasta su temperatura de ebullición a presión atmosférica (gases refrigerados).



Fig. 4.2 Diagrama de los procesos que pueden tener lugar tras el escape accidental de un líquido (Santamaría et al., 1994).

La forma de dispersarse de un escape va a depender tanto de las características de la propia emisión como de las características de la atmósfera.

Evaporación de líquidos no hirvientes

En este primer caso se trata de un líquido con un punto de ebullición mayor que la temperatura ambiente. Cuando el vertido del líquido se produce a una

temperatura inferior a su temperatura de ebullición, se produce un charco de líquido no hirviente; la principal fuerza impulsora para la evaporación es la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del líquido y la del medio que lo rodea.

Un parámetro fundamental en este caso particular será la existencia de corrientes de aire sobre la balsa. La velocidad de evaporación depende en gran parte de la existencia de dichas corrientes. Las fórmulas utilizadas para su estimación relacionan de una forma empírica los coeficientes de transferencia de materia con la velocidad del viento. Así, en contraste con los casos siguientes, que estarán controlados por la transmisión de calor, en este caso el transporte de materia es el que controla el fenómeno. Una de las expresiones para estimar la velocidad de evaporación de líquidos no hirvientes es la propuesta por Opschoor (1977):

$$M_e = \frac{k^* M_m P}{R T} \ln \left(1 + \frac{P_s - P_{amb}}{P - P_s} \right) \quad (4.3)$$

en la que k^* corresponde al coeficiente de transferencia de masa, P_s y P_{amb} son la presión de vapor del material evaporado sobre la superficie del líquido y la del medio que lo rodea, M_m es el peso molecular, P es la presión total y R la constante universal de los gases.

Evaporación de líquidos sobrecalentados

Cuando un material almacenado se mantiene como líquido a una temperatura mayor que su temperatura normal de ebullición mediante la aplicación de sobrepresión, si se produce un escape el líquido que se derrama estará a una temperatura superior a su temperatura de ebullición a presión atmosférica, de ahí su nombre de líquido sobrecalentado.

Al producirse la pérdida de contención, el gas licuado sufre la caída súbita en su presión de almacenamiento (la presión de vapor correspondiente a la temperatura de almacenamiento) hasta la presión atmosférica. Al ser esta

temperatura superior a la temperatura de ebullición se producirá una evaporación instantánea (evaporación flash o súbita), que al mismo tiempo puede arrastrar una cantidad considerable de líquido en forma de aerosol (gotas), aumentando a su vez la superficie disponible para la evaporación. Una parte de esas gotas puede caer al suelo en forma de lluvia, formando un charco, mientras que otra parte se evaporará a causa de la absorción de calor procedente del aire arrastrado por la emisión de fluido.

Si el derrame es de una magnitud menor, la evaporación del charco será muy rápida y todo el gas licuado se incorporará al ambiente en poco tiempo. En derrames de proporciones mayores, tras la rápida evaporación inicial, el suelo se encontrará suficientemente frío como para que la subsiguiente evaporación del charco transcurra más lentamente.

La evaporación súbita puede considerarse como un proceso adiabático, ya que el proceso es muy rápido comparado con las velocidades de transmisión de calor implicadas. Como resultado, se producirá un enfriamiento del ambiente en el que ocurre la evaporación y el proceso continuará hasta que la temperatura del líquido sea igual a su temperatura de ebullición (si la cantidad de materia es suficiente), resultando un mecanismo equivalente al de evaporación de líquidos hirvientes. La masa de líquido evaporada súbitamente en este caso puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación (Santamaría et al., 1994):

$$M_e = m_o \left(1 - e^{-\frac{C_l(T_o - T_{eb})}{\Delta h_v}} \right) \quad (4.4)$$

en esta expresión se observa que la evaporación es función de la masa inicial de líquido m_o , la entalpía de vaporización Δh_v y la capacidad calorífica del líquido C_l promediados entre T_o y T_{eb} , temperaturas inicial y de ebullición respectivamente.

Cabe mencionar que la expresión anterior es válida para un sólo componente,

por lo que para el caso de mezclas de líquidos se recurre comúnmente al cálculo mediante un programa de simulación.

Evaporación de líquidos hirvientes

La evaporación de líquidos hirvientes se presenta en el caso de gases licuados criogénicamente o licuados a presión después de que el vertido del líquido (sobrecalentado) llega a temperaturas próximas a las de ebullición. En este caso, una vez que ha ocurrido la evaporación súbita o flash, el líquido necesita un aporte de energía para ser evaporado, por lo que al entrar en contacto con el suelo éste se convierte en la principal fuente de calor. El proceso estará controlado por la velocidad a la que tenga lugar la transferencia de calor a través de la interfase suelo – líquido.

El caudal de evaporación en este caso puede ser calculado utilizando la siguiente expresión:

$$M_e = \frac{K_s(T_s - T_{eb})}{\Delta h_v \sqrt{\pi \alpha_s t}} \quad (4.5)$$

En la que K_s es la conductividad térmica del suelo, T_s y T_{eb} son la temperatura del sustrato y la de ebullición respectivamente, Δh_v es la entalpía de vaporización, α_s la difusividad térmica del sustrato y t es el tiempo; cómo que éste aparece en el denominador, a medida que transcurre el tiempo y el sustrato va enfriándose, la velocidad de evaporación predicha por la ecuación anterior tiende a cero.

La mayoría de los incidentes por escape empiezan con la fuga de una sustancia peligrosa, es decir, la pérdida de contención. Estos incidentes se pueden originar por orificios o roturas de recipientes de proceso, por juntas de unión en bridas, o por válvulas y venteos de emergencia, por mencionar las causas más frecuentes.

Los modelos que comúnmente se utilizan para la estimación de la posterior

dispersión atmosférica de los gases o vapores pueden clasificarse en dos grandes apartados, modelos para gases neutros y modelos para gases pesados, dado que el comportamiento de la nube está fuertemente influenciado por la densidad del gas. En el siguiente apartado se comentan brevemente sus principales características.

4.4 Modelos para gases neutros (modelos gaussianos)

Estos modelos tienen como objetivo describir la dispersión de nubes de gases con una densidad similar a la del aire.

Los modelos gaussianos son de uso común en problemas de dispersión de contaminantes de fuentes puntuales tales como, por ejemplo, chimeneas industriales en las que los gases salen a cierta temperatura. Básicamente, suponen que el penacho de un efluente presenta una distribución normal o de Gauss de las concentraciones en función de la distancia hasta el punto de escape (emisión instantánea) o hasta el eje de la nube (emisión continua).

Cabe hacer notar que estos modelos son aptos para estimar efectos locales y que su grado de precisión y acierto es, en general, decreciente en tanto se aplican a zonas con relieve complicado (montañas, terrenos con obstáculos, pendientes, etc.) y caracterizadas por condiciones atmosféricas complejas.

Para el caso de un *escape continuo*, la concentración depende únicamente de la posición (x, y, z) para una emisión que tiene lugar a una altura efectiva H sobre el nivel del suelo y está dada por la siguiente expresión (Casal et al., 1999):

$$c_{(x,y,z,H)} = \frac{m}{2\pi u_w S_y S_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) * \left[\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2S_z^2}\right) + \sigma^* \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2S_z^2}\right) \right] \quad (4.6)$$

donde:

m es el flujo másico de la emisión (kg s^{-1}),

σ^* es el coeficiente de reflexión del suelo usualmente $\sigma^*=1$ (-).

Para aplicar esta ecuación se requieren los valores de la desviación estándar o coeficientes de dispersión (Pasquill-Gifford) S_y y S_z . Éstos son función de la distancia a favor del viento desde el punto de emisión y de las condiciones atmosféricas, obteniéndose de gráficos o mediante cálculo.

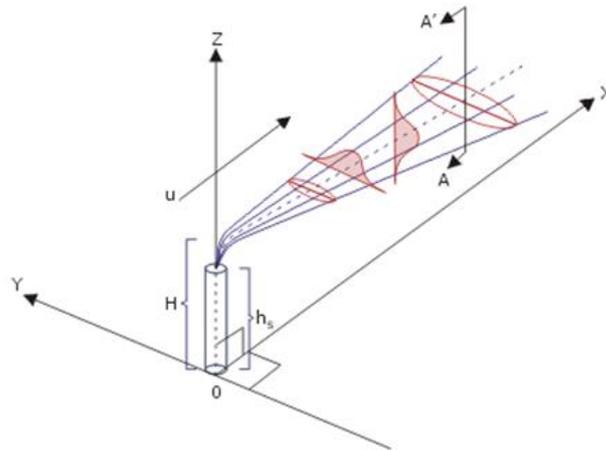


Fig. 4.3 Representación esquemática de un penacho con dispersión gaussiana (Turner, 1970).

La ecuación anterior puede ser modificada para situaciones específicas. Para receptores a nivel del suelo, $z = 0$, se simplifica a:

$$c_{(x,y,0,H)} = \frac{m}{\pi u_w S_y S_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2S_y^2}\right) * \left[\exp\left(\frac{-(H)^2}{2S_z^2}\right) \right] \quad (4.7)$$

Para un escape producido a nivel del suelo ($H = 0$), la expresión (4.6) se simplifica:

$$c_{(x,y,z,0)} = \frac{m}{\pi u_w S_y S_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2S_y^2}\right) * \left[\exp\left(\frac{-(z)^2}{2S_z^2}\right) \right] \quad (4.8)$$

Y la ecuación (4.7) puede ser simplificada aún más si la concentración a nivel del suelo es calculada para la línea central de la pluma ($y = 0$):

$$c_{(x,0,0,H)} = \frac{m}{\pi u_w S_x S_y S_z} \exp\left(\frac{-H^2}{2S_z^2}\right) \quad (4.9)$$

Para el caso de una *fuga instantánea*, la concentración en un punto dado dependerá de la posición (x, y, z), de la altura efectiva (H) de la fuente y del tiempo (t). Puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$c_{(x,y,z,H,t)} = \frac{m}{2\pi^{3/2} S_x S_y S_z} \exp\left(-\frac{(x-u_w t)^2}{2S_x^2} - \frac{y^2}{2S_y^2}\right) * \left[\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2S_z^2}\right) + \alpha \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2S_z^2}\right) \right] \quad (4.10)$$

en la que m es la masa vertida instantáneamente.

4.5 Modelos para gases pesados

Durante la dispersión de una masa de gas pesado, los vapores y gases con densidades superiores a la del aire tienen la tendencia a caer y dispersarse a ras del suelo hasta que la nube alcance una densidad parecida a la del aire. De igual forma, estos gases pueden acumularse en zonas bajas (valles, drenajes, etc.) con el riesgo de causar un accidente grave.

Entre los parámetros que determinan que una sustancia en fase vapor se comporte como un gas pesado pueden citarse la masa molecular, la temperatura, reacciones químicas etc. La dispersión de la nube de gas se puede dividir en las siguientes tres etapas:

Etapas de flotabilidad. La nube cae por efecto de la gravedad y se extiende lateralmente mientras se reduce su altura. El fenómeno dura sólo algunos segundos y está modelado por la siguiente ecuación obtenida del teorema de Bernoulli:

$$u_f = C_E \left[\frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_g} \cdot g \cdot H \right]^{1/2} \quad (4.11)$$

en la que C_E es una constante cuyo valor es aproximadamente la unidad.

Etapa de dispersión estable y estratificada. El efecto del viento causa la dispersión de la nube; como consecuencia de su alta densidad, se forma un flujo estratificado (adherido al suelo) que reduce la entrada de aire y la disolución de la nube.

Etapa de dispersión pasiva, neutra o gaussiana. La nube de gas o vapor, tras dispersarse, llega a alcanzar una densidad y temperatura similares a las del aire de su alrededor.

Aparte de las ecuaciones que modelan la evolución de la nube bajo la acción de la gravedad, se tendrían que añadir las siguientes:

- Ecuaciones generales de equilibrio.
- Ecuaciones que modelan la entrada de aire en la masa del gas pesado puntualmente en la etapa de dispersión estratificada (ecuaciones de carácter empírico).
- Transferencia de calor nube-suelo/agua (de acuerdo con el tipo de superficie).
- Posible condensación de la humedad ambiental.

Por lo mencionado anteriormente, se generan un gran número de ecuaciones para modelar la evolución de la concentración en función del tiempo a una determinada distancia del punto de escape. Para resolver el conjunto de ecuaciones planteadas se recurre al uso de modelos de cálculo complejos, resueltos con ayuda de alguna herramienta computacional.

4.6 Tipos de modelos de dispersión

Los modelos de dispersión permiten predecir la intensidad de la evaporación, dadas unas condiciones iniciales y unas determinadas características físicas y químicas del producto, así como la evolución de la nube de gases en función de la posición y del tiempo. Pertenecen normalmente a una de las siguientes categorías: modelos basados en las ecuaciones de Navier Stokes, modelo Lagrangiano no lineal, modelos de capa superficial plana o integral de dos

dimensiones, modelos integrales de una dimensión y modelos empíricos simplificados.

Modelos basados en las ecuaciones de Navier Stokes

Este tipo de modelos son los más complejos, y están planteados para resolver las ecuaciones tridimensionales de transporte turbulento obtenidas de los balances de materia, momento y energía. Los correspondientes códigos de cálculo son denominados modelos de zonas o modelos computacionales de dinámica de fluidos (CFD), y se basan en la solución de las ecuaciones de Navier Stokes. Los códigos pueden incluir la capacidad para modelar zonas de flujo laminar y turbulento. Los efectos de la turbulencia a muy pequeña escala se incluyen mediante términos empíricos, que son agregados a las ecuaciones de conservación promedio. El código de CFD requiere especificar el dominio, la malla computacional, el modelo de turbulencia y las condiciones de frontera. La malla debe ser suficientemente fina para asegurar la estabilidad numérica; para problemas complejos esto puede significar una gran malla. Es posible asimismo insertar obstáculos dentro de la malla, circulando el flujo alrededor de los mismos.

El código más ampliamente utilizado para la dispersión según este modelo es el FEM3 (Chan, 1992), que se encuentra actualizado en la versión FEM3C. Desarrollado por Lawrence Livermore National Laboratory, FEM3 usa un esquema de elementos finitos en el espacio y un esquema de diferencias finitas en el tiempo. La última versión de FEM3 modela flujos sobre terreno de relieve variable y con la presencia de obstáculos, así como también estructuras de nubes complejas tales como vórtices y bifurcaciones.

Las limitaciones de estos códigos son las aproximaciones y suposiciones que utilizan para modelar los efectos de la turbulencia y flotabilidad. Debido a las limitaciones computacionales, no todas las longitudes y escalas de tiempo asociadas a la turbulencia pueden ser simuladas. Esto es debido a que las ecuaciones de conservación son un promedio, de manera que las escalas más

pequeñas no pueden resolverse. Además, este tipo de modelos puede resultar muy costoso, aunque pueden ejecutarse con un sólo procesador.

Modelo lagrangiano no lineal

Este código, denominado de segundo orden (SCIPUFF) (Sykes et al., 1999) y desarrollado por Titan Research and Technology, incluye un modelo de fuga de gases densos. SCIPUFF usa un modelo Lagrangiano de dispersión de la nube, que utiliza la interacción no lineal entre una colección de nubes gaussianas para representar un modelo tridimensional con zonas de concentración dependientes del tiempo. Los efectos de la densidad del gas son reproducidos con la ecuación de conservación del momento. También pueden modelarse en estado no estacionario, duración finita y múltiples fuentes, así como con flujo sobre terrenos complejos.

Modelos de capa superficial (integral de dos dimensiones)

Los modelos de capa superficial utilizan ecuaciones que asumen que las dimensiones laterales son mucho mayores que la dimensión vertical, lo cual es representativo de fugas de gas denso. Uno de ellos, TWODEE, ha sido desarrollado para fugas de gases densos por Hankin y Britter (1999). Las variables de profundidad promedio se resuelven en dos dimensiones (laterales) usando las ecuaciones de conservación. Se utilizan correlaciones empíricas para determinar la relación de arrastre de aire dentro de la nube. Este modelo permite la incorporación de los efectos de un terreno complicado y los cambios de fase. Es un compromiso entre los modelos basados en las ecuaciones de Navier-Stokes y los integrales de una sola dimensión, aunque requiere de un tiempo de cálculo mayor que estos últimos.

Modelos integrales de una dimensión

Los modelos integrales unidimensionales como SLAB, HEGADAS y DEGADIS (Ermak, 1980; Colenbrander, 1983; Spicer y Havens, 1989) usan perfiles similares que asumen una forma específica para el perfil de concentración a

través del viento. Su punto débil es que no pueden modelar el flujo alrededor de obstáculos o sobre terrenos complicados. Los modelos como DEGADIS son utilizados ampliamente en el sector público y privado debido a la conveniencia del rápido tiempo de ejecución de cálculo, facilidad de uso y acceso libre. Existen algunos modelos de este tipo, tales como GASTAR, desarrollado por Cambridge Environmental Research Consultants (CERC), que incorporan los efectos del terreno tales como cambios de pendiente o la rugosidad variable de la superficie, incluyendo los obstáculos entre otras características. Según diversos autores, este tipo de modelos son físicamente realistas, computacionalmente baratos y adecuados para su uso en la evaluación del riesgo; son pues una alternativa muy práctica en comparación con otros modelos como pueden ser los de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Modelos empíricos

Son el resultado de las modificaciones de los modelos gaussianos que se basan en la ecuación de conservación de la masa. Los perfiles de concentración a favor del viento están representados por una ecuación acorde. Se asume que la nube tiene una forma gaussiana, con entrada de aire en la periferia, y que en el interior de la nube la composición es uniforme. Finalmente, Germeles y Drake, Fay y Lewis, etc. (Heavy Gas and Risk Assessment, 1979) han propuesto asimismo diversos modelos empíricos.

4.7 Modelo de dispersión DEGADIS

El código de cálculo utilizado en el presente trabajo para reproducir la dispersión de gases procedentes de vertidos de gases licuados ha sido DEGADIS; en los capítulos siguientes –en la parte correspondiente al estudio de la dispersión y los límites de inflamabilidad– se muestra la aplicación de este modelo. A continuación se presenta una descripción más amplia del mismo.

DEGADIS (*Dense Gas Dispersion Model*) fue desarrollado por Havens y Spicer

en 1985. Es una derivación del modelo HEGADAS desarrollado anteriormente por Shell para analizar derrames de combustibles. A éste se le añade un modelo de caja que caracteriza la dispersión inicial de los vapores producidos en el derrame. DEGADIS es un modelo integral unidimensional que predice la dispersión de gases pesados a nivel del suelo. Para determinar qué etapa es dominante se utiliza el número de Richardson el cual representa la relación entre la energía potencial de la fuga y la energía cinética del fluido:

$$R_i = \frac{g}{u_*^2} \left(\frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_a} \right) \left(\frac{m}{\rho_g u_w D} \right) \quad (4.12)$$

$R_i \leq 1.0$: la fuga de la fuente es esencialmente pasiva

$1.0 \leq R_i \leq 30$: dispersión estable y estratificada

$R_i \geq 30$: la fuga está en la etapa de flotabilidad.

La figura 4.2 (Spicer y Havens, 1989) muestra la representación de una nube de vapor de un gas denso que se va dispersando en la dirección preponderante del viento (eje x), así como en la dirección perpendicular al viento (eje y) y en la vertical (z). Puede apreciarse cómo la dispersión inicial se caracteriza con un modelo de caja con una anchura y altura inicial.

Posteriormente, la nube de vapor se va dispersando en la dirección predominante del viento, diluyéndose tras mezclarse con el aire y vapor de agua y haciéndose menos densa. A partir de ese momento la dispersión ocurre lateralmente en forma exponencial y se va suavizando en la dirección perpendicular al viento (y), hasta que se llega a una distribución gaussiana una vez que la anchura B ha disminuido a cero. Cabe mencionar que en la dirección vertical la distribución de la nube de vapor no es gaussiana, debido a que la nube de vapor es más densa que el aire. Los perfiles de concentración son calculados mediante las dos ecuaciones siguientes:

$$C(x, y, z) = c_c \exp \left\{ - \left[\frac{z}{S_z(x)} \right]^\beta \right\} \text{for } |y| < b \quad (4.13)$$

$$C(x, y, z) = c_c \exp \left\{ \left[\frac{|y| - b(x)}{S_y(x)} \right]^2 - \left[\frac{z}{S_z(x)} \right]^\beta \right\} \text{for } |y| > b \quad (4.14)$$

donde

C es la concentración,

c_c es la concentración central a nivel del suelo,

b es la mitad de la anchura de la parte media de los perfiles transversales de la nube de vapor, y

S_y y S_z son los coeficientes de dispersión horizontal y vertical respectivamente. β es igual a $1+\alpha$, siendo α un parámetro relacionado con el perfil del viento. Dicho perfil es desarrollado con la siguiente expresión:

$$u_x = u_o \left(\frac{z}{z_o} \right)^\alpha \quad (4.15)$$

en la que el parámetro α es evaluado por el programa para las diferentes condiciones de estabilidad atmosférica, estando su valor comprendido entre 0 y 1. El valor de éste parámetro es determinado mediante el ajuste por mínimos cuadrados ponderados del siguiente perfil logarítmico:

$$u_x = \frac{u_*}{k_v} \left[\ln \left(\frac{z + z_r}{z_r} \right) - \Psi \left(\frac{z}{\lambda} \right) \right] \quad (4.16)$$

donde, k_v es la constante de Von Karman, z_r es la rugosidad de la superficie, ψ es la corrección al perfil de velocidad logarítmico y λ corresponde a la longitud de Monin-Obukhov. A partir de estos perfiles los coeficientes de dispersión horizontal y vertical de las ecuaciones 4.11 y 4.12 son resueltos por ecuaciones diferenciales ordinarias [Spicer y Havens, 1989].

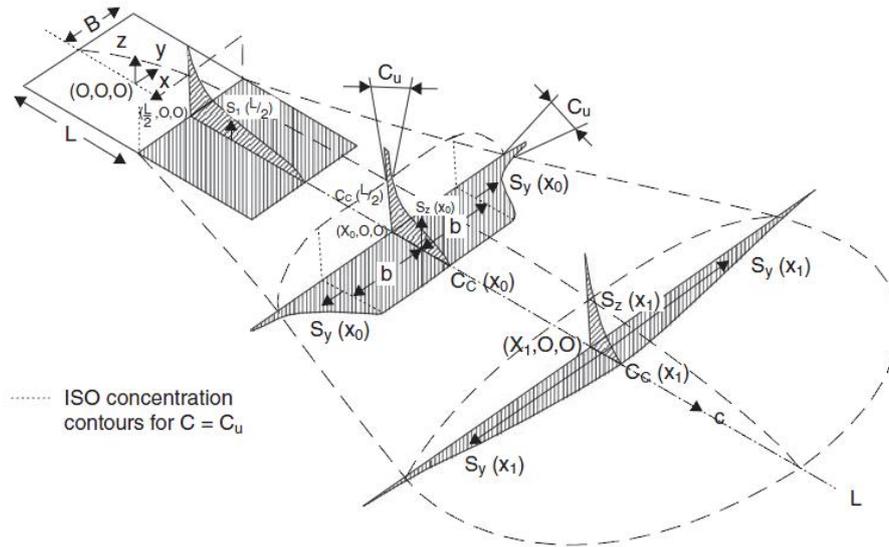


Figura 4.4 Diagrama de nube de vapor en DEGADIS (Spicer y Havens, 1989).

Degadis se divide en tres métodos de cálculo diferentes (NDEN es una variable de Degadis usada para especificar el perfil de densidad del contaminante):

- 1) NDEN=0. En este caso el contaminante es tratado como un gas ideal, donde la capacidad calorífica del contaminante debe ser proporcionada por el usuario. Otra característica importante es que considera el efecto de condensación de la humedad del ambiente y la transferencia de calor entre la superficie y la nube de vapor. Este método es válido para modelar gases criogénicos/refrigerados. Equivalente a tipo de fuga no isotérmica en Degadis.
- 2) NDEN=-1. El contaminante es tratado como gas ideal con una capacidad calorífica igual a la del aire. Pero, a diferencia del caso anterior, el efecto de la condensación y de la transferencia de calor a la nube es ignorado. Este método es usado para modelar fugas de gases a temperatura ambiente. Equivalente a una fuga isotérmica en Degadis.

- 3) NDEN>0. El contaminante es tratado como aerosol. La fracción molar, concentración (kg/m^3) y densidad de la mezcla aire/combustible (kg/m^3) deben ser suministradas por el usuario. Estos tripletes de datos son usados para especificar la concentración del contaminante en función de la densidad basada en la mezcla adiabática con el aire. El orden de los tripletes que se han de introducir en Degadis debe ir de aire puro en el primer triplete de la serie hasta contaminante puro en el último. La temperatura en la nube puede ser estimada como función de la concentración o densidad de la mezcla, ya que ésta no es incluida de manera directa en el fichero de salida de Degadis. La capacidad calorífica del contaminante y la transferencia de calor a la nube son despreciadas. Es usado para modelar fugas de aerosoles y equivale a seleccionar el modo de fuga isotérmica.

Por lo que cuando se trate de gases refrigerados a presión atmosférica (GNL y GLP) el método de cálculo será el (1) correspondiente en Degadis a NDEN=0; en el caso del GLP, si la fuga proviene de un líquido presurizado a temperatura ambiente, el gas será tratado como un aerosol (NDEN>0).

El archivo de salida del modelo DEGADIS genera, entre otra información, una tabulación en función de la distancia en la dirección del viento desde el punto de derrame, con los siguientes valores: $b(x)$, anchura lateral del derrame; $C(x)$, concentración en el suelo y en el eje de simetría de la nube; S_y , desviación estándar lateral de la nube; y S_z , desviación estándar vertical de la nube, así como la temperatura en la nube a diferentes distancias. Esta información se proporciona hasta que la concentración central $C(x)$ alcanza un valor mínimo.

C:\DEGADIS\MAPLIN15.iis														
Secondary source length [m] :				20.000				Secondary source half-width [m] :				7.8540		
Distance	Mole Fraction	Concentration	Density	Temperature	Half Width	Sz	Sy	Width at z=	5.00 mole%	15.0 mole%	15.0 mole%	15.0 mole%		
(m)		(kg/m**3)	(kg/m**3)	(K)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
10.0	.668	.777	1.47	172.	7.85	.262	.000	7.85	7.85					
10.3	.665	.769	1.47	172.	7.44	.261	.558	8.42	8.22					
12.5	.646	.733	1.45	176.	7.09	.258	1.55	9.79	9.22					
18.4	.598	.631	1.42	186.	7.21	.258	2.96	12.2	11.1					
22.4	.551	.565	1.39	194.	7.44	.264	3.68	13.6	12.1					
26.4	.511	.504	1.37	202.	7.69	.274	4.32	14.8	13.0					
30.4	.472	.449	1.35	209.	7.95	.287	4.91	15.8	13.8					
34.4	.435	.399	1.33	217.	8.19	.303	5.47	16.7	14.4					
38.4	.399	.355	1.31	224.	8.41	.322	5.99	17.5	14.9					
42.4	.366	.315	1.30	231.	8.61	.343	6.50	18.3	15.3					
46.4	.335	.281	1.28	237.	8.79	.366	6.99	18.9	15.5					
50.4	.306	.251	1.27	242.	8.94	.393	7.46	19.4	15.7					
54.4	.280	.225	1.26	247.	9.07	.421	7.91	19.9	15.7					
58.4	.256	.202	1.26	252.	9.17	.452	8.36	20.2	15.7					
62.4	.234	.182	1.25	255.	9.25	.485	8.79	20.5	15.4					
66.4	.214	.164	1.24	259.	9.31	.520	9.21	20.8	15.1					
70.4	.197	.149	1.24	262.	9.35	.556	9.62	20.9	14.6					
74.4	.181	.135	1.24	264.	9.38	.594	10.0	21.0	13.9					
78.4	.167	.124	1.24	266.	9.41	.632	10.4	21.1	13.0					
82.4	.155	.114	1.24	268.	9.44	.669	10.8	21.2	11.4					
86.4	.144	.105	1.23	269.	9.47	.706	11.2	21.2						
90.4	.134	9.789E-02	1.23	270.	9.50	.743	11.6	21.2						
94.4	.126	9.125E-02	1.23	271.	9.54	.779	11.9	21.2						
98.4	.118	8.536E-02	1.23	272.	9.58	.814	12.3	21.2						
102.	.111	8.010E-02	1.23	273.	9.63	.849	12.6	21.1						
106.	.105	7.538E-02	1.23	274.	9.68	.883	13.0	21.1						
110.	9.928E-02	7.113E-02	1.23	275.	9.73	.916	13.3	21.0						
118.	8.947E-02	6.378E-02	1.23	276.	9.84	.982	14.0	20.7						
122.	8.518E-02	6.059E-02	1.23	276.	9.90	1.01	14.4	20.6						
130.	7.757E-02	5.497E-02	1.23	277.	10.0	1.08	15.0	20.1						

Figura 4.5 Resultados generados por DEGADIS para la dispersión de una nube de vapor de GNL.

DEGADIS calcula la dispersión de nubes de vapores solamente en condiciones de terreno llano y libre de obstáculos. La influencia principal de los obstáculos que pudieran presentarse, como edificios u otras estructuras, radica en desviar la dirección de la nube, ya que ésta se desplaza por acción de la gravedad y, por lo tanto, buscará la trayectoria que implique menor energía potencial.

Es importante considerar que los eventuales obstáculos representan pérdidas de carga, por lo que la nube no se extendería más allá de las distancias que se calculan aplicando DEGADIS para un terreno plano y despejado de obstáculos.

Para poder ejecutar el modelo DEGADIS es necesario introducir información sobre las características físicas y químicas de la sustancia involucrada, las características del derrame y la meteorología en el lugar del mismo (fig. 4.5).

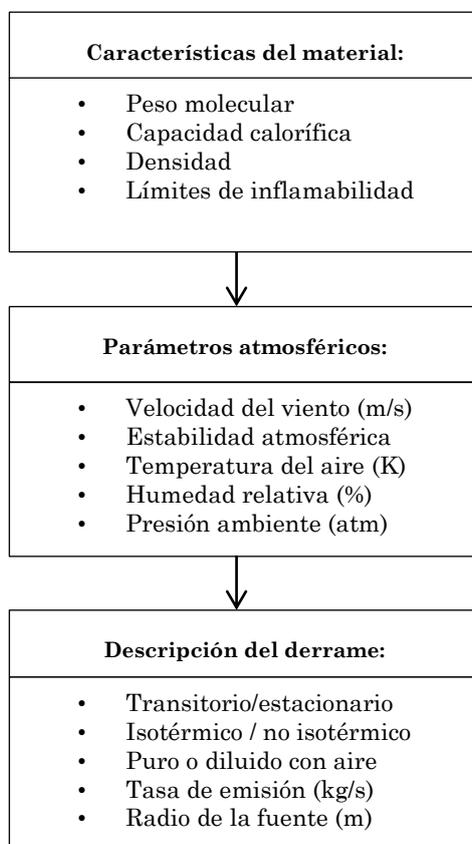


Fig. 4.6 Diagrama con los datos de inicio requeridos por DEGADIS.

Existen varias razones por las que se decidió elegir el código Degadis, entre ellas la rapidez de cálculo, la facilidad de uso y el libre acceso. La guía técnica de la versión 2.1 de Degadis se encuentra referenciada en la bibliografía [Spicer y Havens, 1989], además de estar disponible de manera gratuita, al igual que el programa, en la página en línea de la EPA (Environmental Protection Agency). Degadis ha demostrado que da predicciones consistentes con una amplia cantidad de pruebas experimentales realizadas con diferentes sustancias en superficies planas. Además, las predicciones de DEGADIS con respecto a la extensión de la nube inflamable son bastante cercanas en comparación con las mediciones registradas de derrames con propano y GNL [Havens, 1992; Spicer y Havens, 1987]. Finalmente, una razón adicional para utilizar DEGADIS es

que calcula la temperatura de la nube a lo largo de su trayectoria y, a partir de ésta, la condensación de la humedad atmosférica y por tanto el contorno de la nube visible.

Capítulo 5. Factor de seguridad para la dispersión atmosférica de vertidos de GNL

5.1 Introducción

La utilización de gases licuados, bien sea a presión atmosférica o a presión y temperatura ambiente, ha aumentado considerablemente en la última década. Tanto el gas natural licuado (GNL) como el gas licuado de petróleo (GLP, propano y butano) presentan unas características muy interesantes como combustibles, especialmente desde el punto de vista medioambiental. Así, las instalaciones de almacenamiento de estos productos han proliferado y, con ellas, el transporte de los mismos por carretera o ferrocarril. Dado que un vertido de estos gases licuados puede originar fácilmente una nube inflamable, en principio más pesada que el aire, no puede ignorarse el riesgo asociado a este tipo de instalaciones.

5.2 Gases criogénicos/refrigerados: GNL

La demanda de gas natural se incrementa cada año por parte de las industrias, residencias, empresas y el sector de energía eléctrica y, en consecuencia, hay el correspondiente crecimiento en la producción anual de gas natural.

En el caso de los Estados Unidos, alrededor del 25% de la energía que se utilizó durante el año 2009 provenía del consumo de gas natural; se espera que la demanda de GNL en los EEUU aumente de $2.4 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ que se consumieron en 2009 a $3.1 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$ en 2030 [EIA, 2009]. De acuerdo con un informe elaborado por el Centro de Economía Energética [Michot, 2006], los Estados Unidos tienen el mayor número de instalaciones de GNL en el mundo, repartidas por todo el país y a menudo situadas cerca de los núcleos de población que requieren el gas natural.

El consumo de gas natural también ha aumentado de manera paulatina en la Unión Europea. Se espera un aumento de $9.9 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ en 2010 a $2.54 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$ en el año 2030 [Kavalov et al., 2009].

Además, se estima que el consumo de gas natural aumentará también rápidamente en otros países como China y la India. En consecuencia, las autoridades han incrementado sus advertencias sobre la posibilidad de riesgos significativos originados por derrames de GNL causados por accidentes o ataques intencionados. Por esta razón se ha despertado un gran interés por el análisis de los posibles riesgos asociados al almacenamiento, tratamiento y transporte de gas natural licuado (GNL), un aspecto imprescindible para garantizar la seguridad de las instalaciones de GNL actuales y futuras.

5.2.1 Distribución del GNL

El gas natural se puede transportar y distribuir de dos formas distintas: en estado gaseoso mediante redes de transporte y distribución, o bien en estado líquido (GNL) por medio de buques que lo transportan hasta plantas de regasificación o plantas satélite de GNL, para su posterior distribución en fase gas o líquida.

La cadena de producción del gas natural se inicia en los pozos de extracción, donde es tratado, siendo a continuación transportado por medios convencionales, usualmente mediante gasoductos, hasta las terminales marítimas de licuefacción.



Fig.5.1 Esquema de una instalación portuaria de almacenamiento y transporte de GNL.

En las plantas de licuefacción, el GNL es enfriado hasta $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura a la cual el gas pasa a ser un líquido a presión atmosférica. En esta forma más compacta (el volumen específico del GNL es 600 veces más pequeño que en su estado gaseoso a la misma presión), el gas es almacenado en depósitos criogénicos a presiones próximas a la atmosférica.

El gas natural es posteriormente transferido a buques de diseño especial, acondicionados para el transporte marítimo criogénico. Estos buques transportan el GNL hasta las terminales portuarias de destino, denominadas Plantas de Regasificación, en las que el GNL es descargado mediante bombas criogénicas y brazos articulados, siendo almacenado en depósitos criogénicos sin presurización, con una gran capacidad de hasta 200.000 m^3 de GNL.

Desde estos depósitos puede ser transportado en camiones cisterna criogénicos, o bombeado a alta presión hacia las instalaciones de regasificación y transportado por tuberías a las empresas de distribución.

Las primeras plantas de licuación y regasificación de gas natural o “peak-shaving” se instalaron en Estados Unidos, con el fin de satisfacer la creciente demanda que se presenta en ciertos momentos en las redes de distribución de gas natural ya saturadas. Así, mientras que en períodos de baja demanda el

gas natural es licuado y almacenado en grandes depósitos criogénicos de gran capacidad, en períodos de elevada demanda es nuevamente regasificado y enviado a la red de distribución.

Siguiendo el modelo de las plantas peak-shaving surgieron las llamadas plantas satélite, con funciones similares pero de menor capacidad; sin embargo, estas plantas no están provistas de unidades de licuación. El gas natural es transportado en estado líquido en camiones cisterna desde las plantas de regasificación a las plantas satélite, donde se almacena en depósitos criogénicos. El gas licuado sale del depósito a medida que el consumo lo demanda y unos vaporizadores lo devuelven a su estado gaseoso.

Actualmente existen más de 100 plantas de peak-shaving funcionando en Estados Unidos, además de las plantas satélite instaladas.

En Europa se contabilizan algunas plantas de peak-shaving con licuación en Inglaterra, Alemania, Bélgica y Holanda y algunas plantas satélite para usos concretos establecidas de un modo aislado.



Fig. 5.2 Planta de peak-shaving en Carolina del Norte. Es una de las más grandes en Estados Unidos, con una capacidad de 0.1 billones de metros cúbicos.

En España, las plantas satélite han resultado ser un medio eficaz para abastecer las necesidades de consumo en industrias o poblaciones que, debido a su gran distancia a las redes de distribución, no pueden disponer permanentemente de gas natural por este medio. La primera planta satélite en España se puso en servicio en noviembre de 1970, en la ciudad de Figueres en Girona. Para el año 2002 el número de plantas activas ya era de 100 en industrias y 58 para distribución del gas.

Japón es otro país donde, además de la distribución por gasoductos, se hace amplio uso de plantas satélite para todas aquellas áreas en que no es económico colocar un gasoducto.



Fig. 5.3 Planta satélite de gasificación de Gas Natural Licuado en Europa.

Entre las ventajas que presentan las plantas satélite de GNL, se encuentra la de permitir la distribución a núcleos urbanos alejados de las redes. Además, la técnica constructiva de las plantas satélite resulta sencilla, disponible y experimentada, haciendo posible el poder disponer de gas natural a media

presión de un modo simple, a un coste menor del que representaría la conexión por gaseoducto.

El GNL se puede usar como tal en vehículos, o se puede bombear a presión y calentar para obtener en forma rápida Gas Natural Comprimido (GNC); un ejemplo de ello es la estación de gas natural licuado y gas natural comprimido (GNL/GNC) más grande del mundo, construida por Chart-NexGen en California. Tiene una capacidad de almacenamiento de 240 m³, con 6 dispensadores de gas natural licuado y 3 dispensadores de GNC (Fig. 5.4).



Fig. 5.4 Estación de GNL/GNC construida por Chart-NexGen en California.

5.2.2 Riesgos del GNL

Los peligros potenciales asociados a un derrame de GNL son diversos y varían dependiendo del tamaño del derrame, las condiciones ambientales y el lugar en el cual se produce el derrame. Para considerar los riesgos correspondientes, hay que tener en cuenta las propiedades del gas y las condiciones en que se produce la pérdida de contención.

Una percepción errónea muy común es pensar que el peligro asociado al gas natural proviene de ser un líquido presurizado; no obstante, el gas natural que es licuado por enfriamiento no se almacena bajo grandes presiones y también

tiene asociado cierto riesgo.

La densidad del GNL es aproximadamente la mitad en comparación con la densidad del agua y, a su punto de ebullición, el vapor es 1,5 veces más pesado que el aire, pero a medida de que se calienta su densidad se reduce, alcanzando 0.5 veces la del aire a temperatura ambiente.

Cuando el GNL se derrama sobre el suelo o el agua, está inicialmente muy frío. Debido a la alta tasa de transferencia de calor desde el agua o el suelo, el gas licuado se evapora rápidamente, produciendo una nube de poca altura; es visible debido a la condensación de vapor de agua de la atmósfera, que le confiere un color blanco.

Los peligros causados por un derrame de GNL son diversos, pudiendo incluir el daño criogénico causado por el contacto directo o incluso el daño por sobrepresión debido a la transición de fase rápida (RPT) que se produce si hay mezcla entre el GNL y el agua.

Un derrame de GNL sobre agua o en tierra forma una balsa que se esparce y simultáneamente se evapora; esta situación puede derivar en un incendio de la balsa si hay ignición inmediata.

Si no se enciende inmediatamente puede ocurrir un incendio de llamarada. Éste se produce tras la liberación del gas inflamable al aire libre formando una nube de vapor, si ésta encuentra un punto de ignición (ignición retardada) dentro de la región inflamable de la misma.

Por otra parte, si la nube de vapor inflamable producida por un derrame accidental de GNL alcanza un área confinada, entonces se puede producir una explosión con efectos mecánicos.

El componente principal del GNL es el metano, por lo que el vapor de GNL es inflamable en el aire en una gama de concentraciones comprendidas entre el 5% (LFL) y el 15% (UFL) en volumen. Cuando la concentración de combustible está por debajo del límite inferior de inflamabilidad (LFL), la nube de vapor no

se puede quemar porque hay muy poco metano presente. Por otro lado, cuando la concentración de GNL supera el límite superior de inflamabilidad (UFL), la nube es demasiado rica en gas natural licuado y no puede incendiarse ya que hay poco oxígeno.

5.3 Contorno visible de la nube y zona de inflamabilidad

En el caso de un derrame de GNL, a medida que la nube va creciendo se irá desplazando con el viento. Dado que una parte de la nube es visiblemente blanca, por el fenómeno anteriormente mencionado -originado por la condensación de la humedad atmosférica-, es posible observar si se aproxima a determinadas instalaciones (hornos, motores eléctricos, vías de circulación de automóviles, etc.) en las que probablemente encontrará un punto de ignición. Ahora bien, para que se produzca la ignición, es necesario que la zona de la nube que alcanza la instalación en cuestión se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad; en caso contrario, la ignición de la nube no es posible.

Sería por tanto de gran interés, desde el punto de vista de la gestión de la emergencia, disponer de una manera rápida y simple de establecer precisamente esto, es decir, si la nube visible que está a punto de encontrar un probable punto de ignición es o no inflamable, o sea, si esta zona de la nube se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad.

En la siguiente sección se define un parámetro desarrollado precisamente con esta finalidad.

5.4 Factor de seguridad de dispersión (DSF) para nubes de GNL

Blackmore y colaboradores (1982) publicaron un informe basado en los experimentos de Maplin Sands, en el cual indican que para las nubes de GNL el límite inferior de inflamabilidad coincide con el perímetro visible de la nube cuando la humedad relativa de la atmósfera a través de la cual la nube se

propaga es del 50%.

Tomando esta observación como punto de partida, decidimos estudiar la relación entre la región inflamable de una nube de vapor de GNL, establecida por el límite inferior de inflamabilidad (LFL), y el límite visible de dicha nube. Después de diversos intentos llegamos a la conclusión de que la relación que mejor se adaptaba a nuestro objetivo era el cociente de estos dos valores. Así, proponemos un factor, que hemos denominado “Factor de Seguridad de Dispersión” (DSF), que viene dado por la siguiente expresión:

$$DSF = \frac{X_{LFL}}{X_{VIS}} \quad (5.1)$$

donde

X_{LFL} es la longitud (alcance) de la nube inflamable para la isopleta correspondiente al límite inferior de inflamabilidad (LFL) (m), y

X_{VIS} es la longitud de la nube visible (m).

Dada esta definición, si para una determinada situación el factor DSF es menor que la unidad, esto indicará que la región inflamable se localiza dentro del perímetro visible de la nube de vapor. En cambio, si el factor DSF es mayor que la unidad, es evidente que la región inflamable se encuentra más allá de los límites de la nube visible. Este factor puede dar por tanto una información muy importante en el caso de un derrame de GNL, desde el punto de vista de la gestión de emergencias.

La distancia máxima que la nube inflamable puede alcanzar (X_{LFL}) se ha calculado con el programa de dispersión de gases DEGADIS; este programa estima la distancia máxima alcanzada en un momento determinado por una determinada concentración a partir de un modelo en estado estacionario sin transferencia de calor entre la nube y la superficie del derrame de GNL.

Además, DEGADIS estima la temperatura de la nube de dispersión a

diferentes distancias. Esto proporciona una manera de determinar el contorno de la nube visible (establecido por la condensación de la humedad atmosférica) en función de la temperatura de rocío de la atmósfera (función de su humedad absoluta).

Como ya se ha mencionado, las nubes de GNL tienen una temperatura muy baja; enfrían por tanto el aire circundante, el cual se satura y condensa en pequeñas gotas que permanecen en suspensión en la atmósfera. Este fenómeno ocurre a partir de núcleos de condensación formados en la nube, empezando dicha condensación cuando la temperatura del aire en aquel punto alcanza la temperatura de rocío ($T_{\text{rocío}}$); cualquier posterior enfriamiento provocará más condensación, siendo esta condensación –una niebla, en definitiva– la que hace que la nube sea visible.

El punto de rocío es función de la cantidad de vapor de agua presente en el aire, es decir, de la humedad absoluta (kg de agua / kg de aire seco). Por lo tanto, el punto de rocío se puede considerar función de la temperatura ambiente y de la humedad relativa del aire, pudiéndose calcular con la siguiente expresión analítica:

$$T_{\text{rocío}} = \sqrt[8]{\frac{H_R}{100} \cdot [112 + (0.9 \cdot T)] + (0.1 \cdot T)} - 112 \quad (5.2)$$

donde

$T_{\text{rocío}}$ es la temperatura en el punto de rocío, °C

T es la temperatura ambiente, °C, y

H_R es la humedad relativa, %.

La humedad relativa es la relación porcentual entre la presión parcial del vapor de agua en el aire y la presión de vapor del agua a la misma temperatura. Esto representa la relación entre la cantidad de humedad presente en la atmósfera a una determinada temperatura y la máxima cantidad que puede dicha atmósfera contener (a la misma temperatura) sin

alcanzar la saturación. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la capacidad del aire para contener vapor de agua.

Las temperaturas seca y húmeda del aire se pueden medir utilizando un equipo convencional, pudiendo la humedad relativa obtenerse a partir de estos valores. También se pueden utilizar diversos tipos de sensores para medir este parámetro de manera directa: sensores de humedad capacitivos, sensores de humedad resistivos y sensores de conductividad.

5.4.1 Datos experimentales

De acuerdo con la serie de ensayos a gran escala realizados con GNL comentados anteriormente, el escenario desarrollado en este estudio considera un derrame no confinado, en el cual el GNL se vaporiza rápidamente formando una nube visible de poca altura. El radio de la balsa formada se estima en 10 m en las pruebas de Maplin Sands y 20 m en las pruebas de Burro, con una velocidad de evaporación de $0,085 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ [Ermak et al., 1982; Blackmore et al., 1982].

En el Capítulo 3 se han comentado ampliamente la serie de ensayos experimentales realizados en la década de los ochenta para estudiar el comportamiento de los vertidos de GNL. El conjunto de pruebas disponibles incluye derrames bajo diferentes condiciones atmosféricas. Todas las pruebas se realizaron en superficies libres de obstáculos y el tipo de material se restringió a GNL y GLP. La Tabla 5.1 resume las pruebas más importantes de dispersión de nubes de GNL para las cuales hay datos disponibles y que son relevantes para esta tesis.

Se seleccionaron las temperaturas de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ y $35 \text{ }^\circ\text{C}$ para proporcionar ejemplos de cálculo del factor de seguridad de dispersión (DSF), ya que éstas son representativas de las temperaturas presentes durante las pruebas experimentales a escala real anteriormente citadas.

Tabla 5.1 Características principales de los experimentos con GNL más relevantes

Pruebas	Velocidad de derrame (kg s ⁻¹)	Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Clase de estabilidad atmosférica	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa del aire (%)
Burro, China Lake. LLNL, 1980	87 - 130	2.4 - 9.6	C, D y E	33 - 33.8	5 - 12.5
Maplin Sands Shell, 1980	18 - 33	4.1 - 9.8	D	11 - 17	52 - 83
Coyote, China Lake LLNL, 1981	100 - 121	4.6 - 11.9	C y D	38 - 20.8	11.3 - 23

Con respecto al porcentaje de humedad relativa, se realizaron pruebas dentro de una gama de valores comprendidos entre el 5% y el 90%, los cuales se corresponden con los porcentajes de humedad relativa de los ensayos experimentales: 5% -12,5% (Burro) y 52% -83% (Maplin Sands). Estos valores incluyen las situaciones correspondientes a las áreas costeras, por lo general con mucha humedad debido a la gran cantidad de agua disponible para evaporarse a la atmósfera, y a las zonas desérticas que tienen poca humedad, excepto cuando una tormenta húmeda pasa a través de la zona.

5.4.2 Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de las simulaciones con DEGADIS fueron validados comparándolos con los datos procedentes de las diversas pruebas experimentales a escala real.

En cuanto a las dimensiones de la nube visible, fueron obtenidas de información puntual citada en algunos informes, mientras que en otros casos fueron determinadas a partir del análisis de fotografías aéreas de las pruebas experimentales, tomando como referencia las dimensiones del lugar donde se

desarrollaron las mismas; a título de ejemplo, se muestra la figura 5.5 para la prueba 39 de Maplin Sands [Blackmore et al., 1982].



Figura 5.5 Fotografía aérea de la nube de vapor de la prueba 39 de Maplin Sands, formada desde un derrame continuo de GNL (Blackmore et al., 1982).

En cuanto a la distancia alcanzada por la región inflamable, los datos se obtuvieron de informes y artículos sobre las pruebas a escala real. La Tabla 5.2 muestra la longitud de la pluma visible (X_{VIS}) y la extensión máxima a favor del viento del límite inferior de inflamabilidad (X_{LFL}) para los cinco casos experimentales usados para validar este estudio.

Las representaciones gráficas de la figura 5.6 (a-c) muestran la variación en el factor de seguridad de dispersión (DSF) con respecto a la humedad relativa para una nube de vapor de GNL, para dos velocidades de derrame (10 y 100 kg s^{-1} , respectivamente), a dos temperaturas ambiente diferentes (15 °C y 35 °C) y con dos velocidades del viento: 2 m s^{-1} (5.2-a) y 10 m s^{-1} (5.2-b). Estas condiciones han sido seleccionadas como representativas de las existentes durante las pruebas a gran escala. En esta figura se han representado tanto los

valores del factor DSF correspondientes a los datos experimentales de las pruebas de Maplin Sands y de Burro como los calculados con el código DEGADIS.

Tabla 5.2 Longitud de la nube inflamable y la pluma visible para derrames experimentales de GNL [Koopman et al, 1982; Hirst et al, 1983; Havens, 1992; Spicer et al, 1987; Blackmore et al, 1982; Mannan, 2005]

Experimento	X_{LFL}	X_{VIS}
Maplin 27	200 ±20	300
Maplin 29	190 ±20	240
Maplin 39	130±20	200
Maplin 56	110±30	260
Burro 8	420±20	120

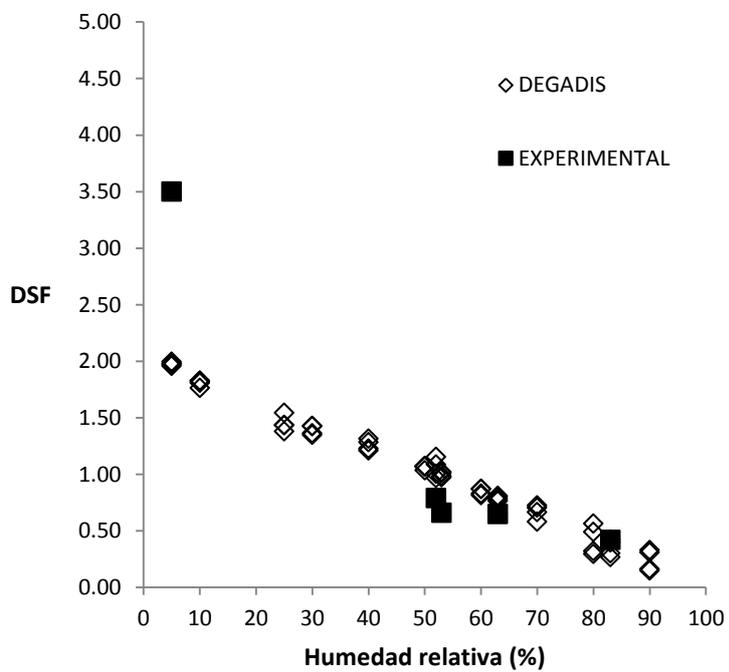
En la figura 5.6 (c) se muestran en un solo conjunto los datos presentados en las dos gráficas anteriores. Como puede apreciarse en esta figura, aunque hay cierta dispersión los valores estimados con DEGADIS para el factor de seguridad están razonablemente de acuerdo con los correspondientes a los datos experimentales. Es de notar que el factor DSF disminuye a medida que aumenta la humedad relativa del aire. Esto indica que la región inflamable está dentro de los límites de la nube visible, lo que implicaría una situación más segura para una determinada posición de la nube respecto a una eventual fuente de ignición. Con una humedad relativa del 50%, el valor del DSF es esencialmente 1, como observaron ya Blackmore et al. [1982]; esto indica que la región inflamable coincide esencialmente con los límites visibles de la nube de GNL.

Cuando la humedad relativa disminuye, el valor del DSF aumenta. Esto es debido al hecho de que la humedad absoluta del aire disminuye, lo que conduce

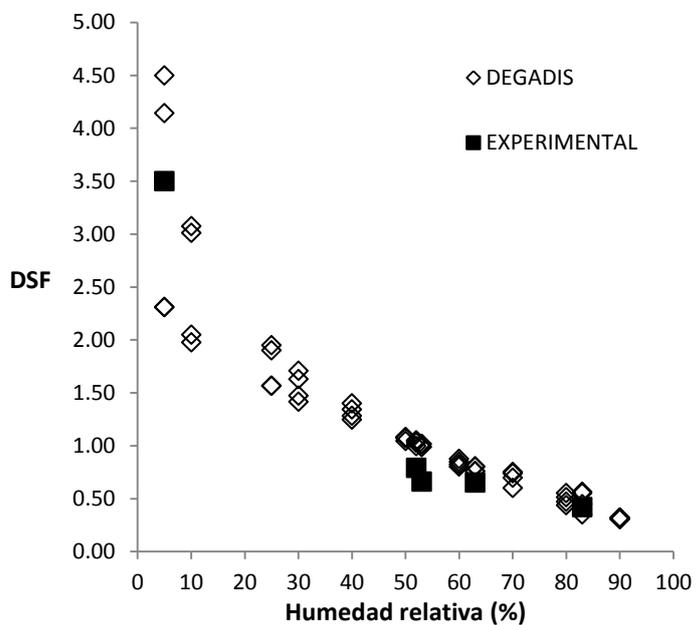
a una disminución en el punto de rocío. Esto implica que se requieren temperaturas más bajas para provocar la condensación del agua en la nube; por tanto, en estas condiciones el frente de condensación se desplaza hacia atrás, a cierta distancia con respecto al contorno de la nube. Debido a este retroceso, la longitud de la pluma visible (X_{VIS}) disminuye y, de acuerdo con la ecuación (5.1), el factor DSF aumenta. Por lo tanto, la región inflamable se extiende más allá de los límites de la nube visible. Desde el punto de vista de la evaluación de riesgo por observación visual de la nube, esta situación es claramente más peligrosa que la anterior, ya que la ignición de la nube puede tener lugar en un punto que todavía no ha sido alcanzado por la parte visible de la nube inflamable.

Se observó que el valor del factor DSF se incrementa de forma importante bajo ciertas condiciones: atmósferas extremadamente secas (humedad relativa < 10%) y alta velocidad de viento (10 m/s). Cuando la humedad relativa disminuye a valores de $H_R < 10\%$ los resultados son influenciados por otras variables, especialmente la velocidad del viento y la intensidad de la fuente (esto es especialmente importante cuando $H_R \approx 5\%$). La mayor dispersión de los datos en la figura 5.6 se puede observar justo en esta zona, por lo que bajo estas condiciones específicas, sería probable tener una inexactitud en la correlación del factor DSF si únicamente es función de la humedad relativa. Sin embargo, esto ocurre a valores muy bajos de H_R , los cuales prácticamente sería imposible encontrar en una situación de emergencia.

a)



b)



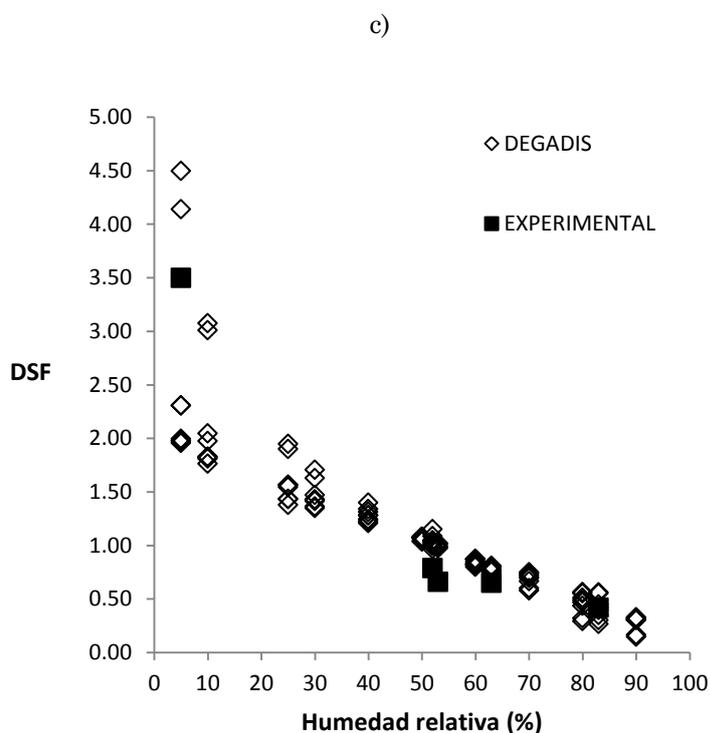


Figura 5.6 Variación del factor DSF con respecto a la humedad relativa para la dispersión de una nube de GNL. Los datos experimentales (véase la Tabla 5.2) se comparan con las predicciones de DEGADIS para dos velocidades de derrames (10 y 100 kg s^{-1}) y dos temperaturas (15 °C y 35 °C) con las velocidades del viento siguientes: a) $u_w = 2 \text{ m s}^{-1}$; b) $u_w = 10 \text{ m s}^{-1}$; c) ambos conjuntos de datos.

Teniendo en cuenta este comportamiento, el factor DSF es un parámetro que puede dar una buena indicación del peligro existente en el caso de una nube de vapor inflamable. Conociendo la humedad relativa del aire es posible establecer el peligro asociado a la ignición de la nube visible. Evidentemente, esta información –basada en la observación visual y en la determinación de la humedad relativa de la atmósfera– no tiene por qué ser determinante, pero en una situación de emergencia puede ser de gran utilidad.

5.4.3 Influencia de las diversas variables sobre el factor de seguridad de dispersión (DSF)

Teniendo en cuenta la posible utilización del factor DSF en situaciones de emergencia y para una mejor caracterización de dicho factor, es interesante estudiar cuál es la influencia sobre el mismo de las principales variables que juegan un papel significativo en los cálculos de dispersión, tales como la temperatura ambiente, la tasa de derrame, la velocidad del viento, la rugosidad superficial y la estabilidad atmosférica (A - F).

En realidad, todos estos parámetros tienen esencialmente el mismo efecto en la estimación de ambas distancias: zona inflamable (X_{LFL}) y zona visible (X_{VIS}). Por lo tanto, la relación del factor DSF no debería ser influenciada por ellos. De todas formas, se ha considerado necesario estudiar la dependencia del factor de seguridad de dispersión con respecto a dichas variables.

Para realizar este análisis se eligieron las siguientes condiciones: velocidad de escape comprendida entre 10 kg s^{-1} y 100 kg s^{-1} y velocidad del viento en el intervalo de 2 m s^{-1} a 10 m s^{-1} . En cuanto a la estabilidad atmosférica, la clase elegida fue la D, correspondiente a una atmósfera neutra; la rugosidad de la superficie se estableció como de $2.05 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ [Havens, 1992].

Las gráficas de la figura 5.7 (a) y (b) muestran que a ambas temperaturas ($15 \text{ }^\circ\text{C}$ y $35 \text{ }^\circ\text{C}$) el factor DSF toma prácticamente los mismos valores. Con una humedad relativa de aproximadamente 50%, su valor se aproxima de nuevo a la unidad. Por lo tanto, la influencia de la temperatura ambiente sobre el factor DSF puede ser considerada insignificante.

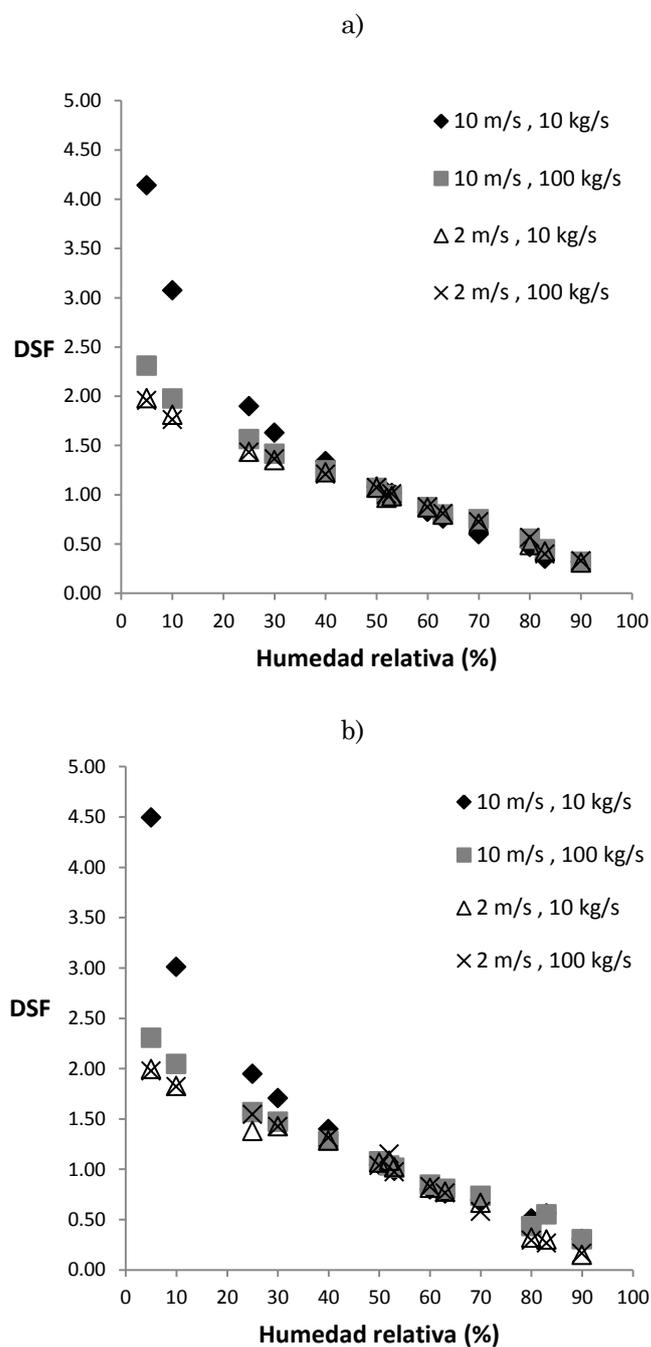


Figura 5.7 Variación del factor DSF con respecto a la humedad relativa obtenida de la simulación con DEGADIS para la dispersión de una nube de GNL: (a) 15 °C; (b) 35 °C.

La Figura 5.8 (a-b) muestra la influencia de la velocidad de vertido (que oscila entre 100 kg s^{-1} y 10 kg s^{-1}) a 35° C y diversas humedades relativas sobre el factor DSF calculado; se han supuesto dos diferentes velocidades del viento. Se puede observar que a valores bajos de la velocidad de viento ($u_w = 2 \text{ m s}^{-1}$) la influencia de la tasa de derrame es insignificante; sin embargo, a velocidades de viento altas ($u_w = 10 \text{ m s}^{-1}$) el valor del DSF aumenta significativamente a medida que la tasa de emisión disminuye cuando $H_R \leq 10\%$. Por lo tanto, el factor DSF predicho por DEGADIS es esencialmente independiente de la velocidad del viento, excepto para valores muy bajos de H_R .

También se ha analizado la influencia de la rugosidad de la superficie sobre la que tiene lugar la dispersión. Se han seleccionado los siguientes valores de longitud de rugosidad superficial (z_r): 0.1 m para un terreno llano, 0.01 m para dispersión sobre agua o una superficie de desierto y 0.0001 m para mar en calma, superficie cubierta de nieve o con pendiente muy ligera. Como se puede observar en la figura 5.9, este parámetro tiene asimismo un efecto despreciable sobre el factor DSF.

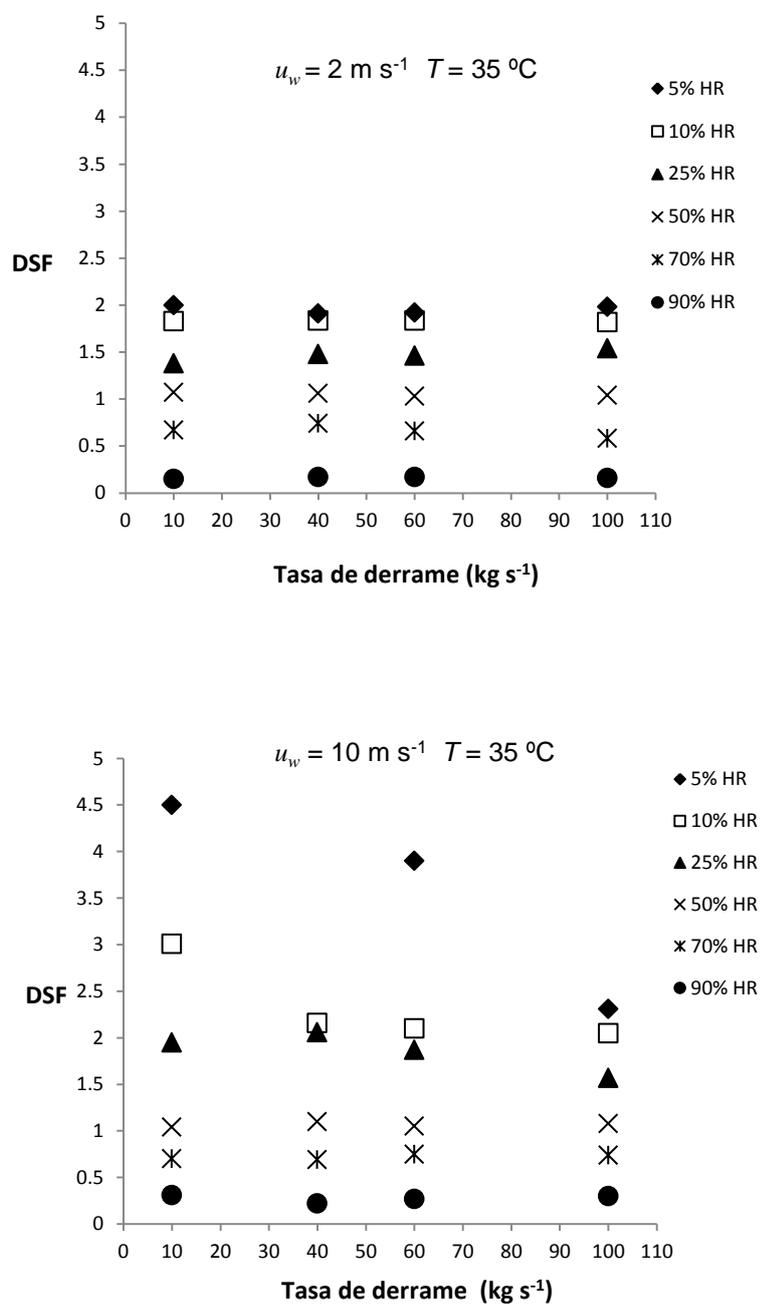


Figura 5.8 Variación del factor DSF en función de la velocidad de vertido y la humedad relativa con una velocidad del viento baja ($u_w = 2 \text{ m s}^{-1}$) y alta ($u_w = 10 \text{ m s}^{-1}$).

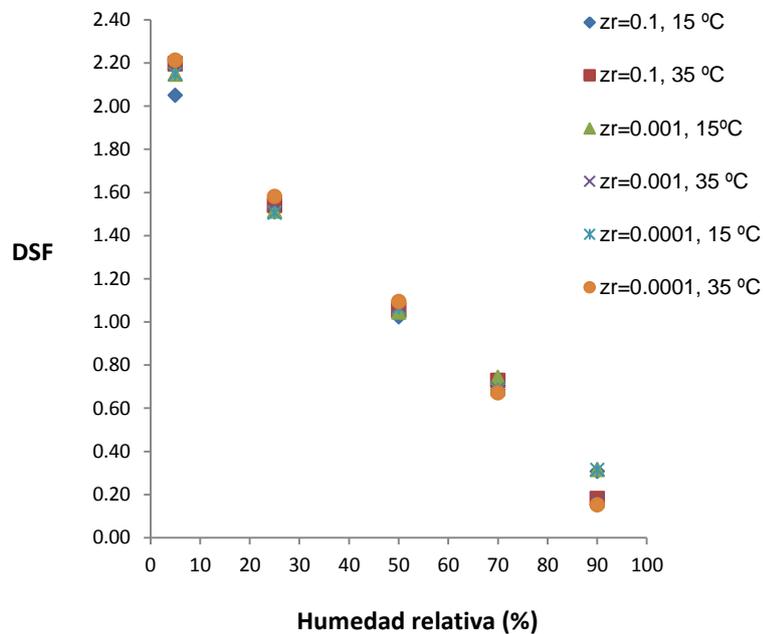


Figura 5.9 Efecto de la rugosidad superficial sobre el factor DSF en el caso de un derrame de GNL (tasa de derrame de 50 kg s^{-1} y velocidad del viento de 5 m s^{-1}).

Finalmente, se ha estudiado la influencia de la estabilidad atmosférica. Las categorías C-A corresponden a los ambientes más inestables y las categorías E-F a condiciones estables. Una atmósfera neutra está representada por la categoría D. De la figura 5.10 se puede concluir que la estabilidad atmosférica no tiene un efecto significativo en el factor de seguridad de dispersión.

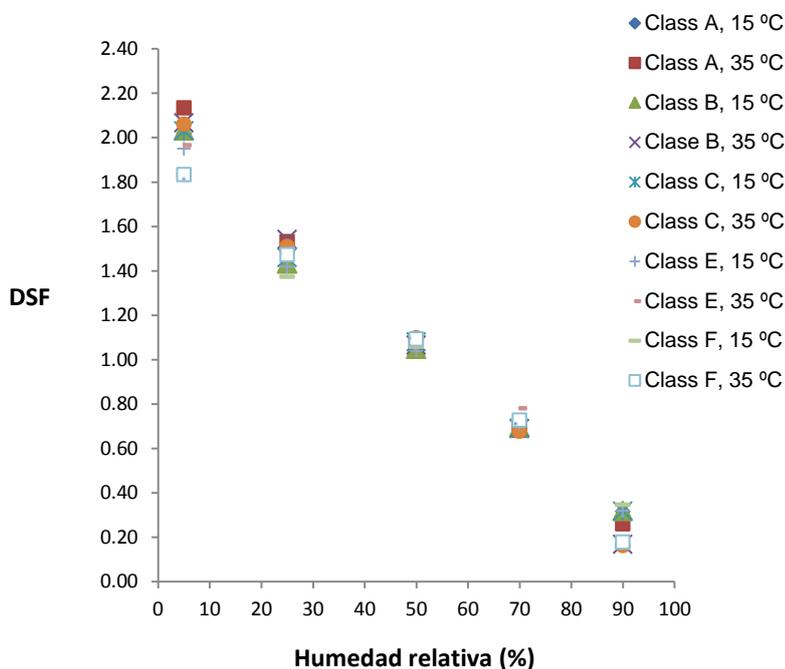


Figura 5.10 Efecto de la estabilidad atmosférica sobre el factor DSF en el caso de un derrame de GNL (velocidad de derrame de 40 kg s⁻¹ y velocidad del viento 3 m s⁻¹).

5.4.4 Predicción del factor de seguridad de dispersión (DSF)

La extensión de la nube visible en un momento determinado es un aspecto muy interesante en la práctica. En el caso de un derrame de GNL, si la distancia alcanzada por la nube visible puede ser determinada, la longitud de la nube inflamable puede ser estimada por la relación definida con el factor DSF:

$$X_{LFL} = DSF \cdot X_{VIS} \tag{5.3}$$

Se ha llevado a cabo un análisis de regresión para obtener una expresión que pueda ser utilizada para estimar de una forma rápida el factor DSF. Como se muestra en las secciones anteriores, el factor DSF debe ser considerado

dependiente de la humedad relativa (H_R) únicamente, ya que el resto de las variables atmosféricas que podrían afectar a la dispersión no presentan una influencia significativa, excepto para valores muy bajos de humedad relativa, $H_R \leq 10\%$; en este caso los resultados son altamente influenciados por otras variables, especialmente la velocidad del viento y la velocidad de derrame.

Teniendo en cuenta la distribución de los valores del factor DSF como una función de H_R en las Figuras 5.6 (a) y (b), se realiza una observación de sumo interés. Mientras que todos los datos siguen la misma tendencia para $40\% \leq H_R \leq 90\%$, la dispersión aumenta a medida que H_R disminuye en el rango de $10\% \leq H_R \leq 40\%$. Por esta razón se han obtenido dos expresiones (Fig. 5.11) mediante la selección de los respectivos conjuntos de datos significativos. La primera, que es esencialmente válida para situaciones con poco viento ($u_w \leq 2 \text{ m s}^{-1}$), es:

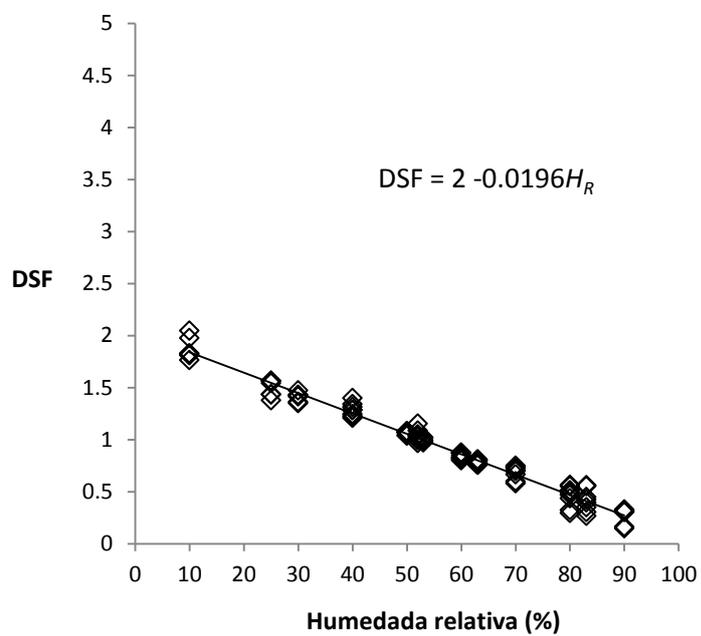
$$DSF = 2 - 0.0196 H_R \quad (5.4)$$

Sin embargo, como puede observarse en las diversas figuras, hay cierta dispersión de los datos, que se vuelve significativa a medida que disminuye H_R . Por lo tanto, también se ha obtenido una expresión "conservadora" que permite la estimación del factor DSF en el "peor" caso:

$$DSF = 5.71 - 0.0019 H_R - 1.16 \ln H_R \quad (5.5)$$

Ambas expresiones han sido representadas en la figura 5.11. Se puede observar que las predicciones son muy parecidas cuando $H_R > 50\%$. Tras realizar el correspondiente análisis estadístico, se han obtenido las siguientes observaciones: el coeficiente de determinación (R^2) para la ecuación 5.4 es de 0.97, lo que significa que el 97% de la variación en el factor de seguridad de dispersión se explica por la humedad relativa, con un error típico de 0.03.

a)



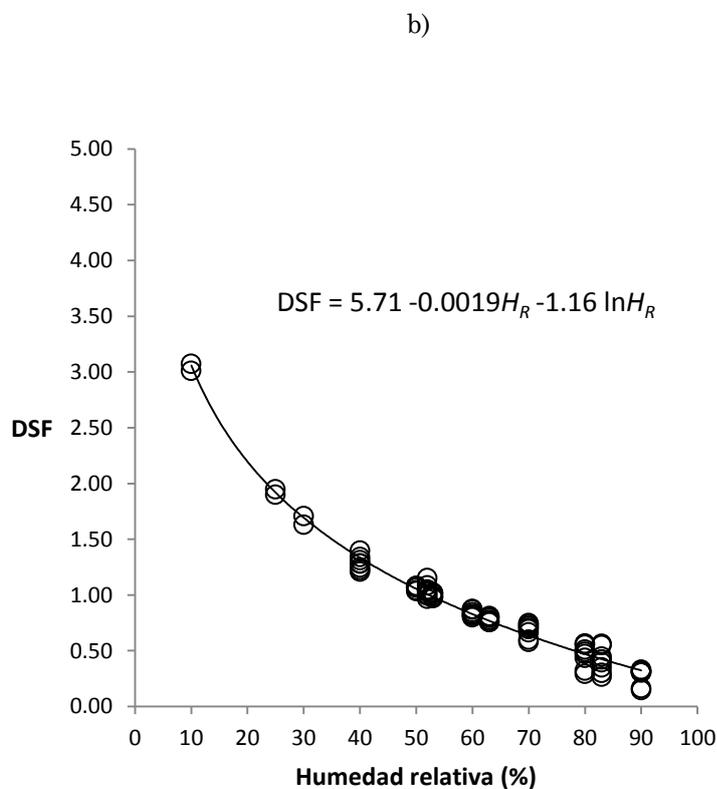


Figura 5.11. Análisis de regresión del factor DSF con respecto a la humedad relativa en el caso de un derrame de GNL, obtenidos a partir del modelo de dispersión DEGADIS: (a) correlación general (Ec. 5.4, $R^2 = 0.97$); (b) correlación conservadora (Ec. 5.5, $R^2 = 0.98$); ambas expresiones se aplican para $H_R \geq 10\%$.

En cambio, en la ecuación (5.5) el coeficiente de determinación es de 0.98, lo que significa que el 98% de la variación en el factor DSF se puede atribuir a la humedad relativa, con un error estándar de 0.02. De estos valores se puede concluir que las ecuaciones (5.4) y (5.5) son adecuadas para describir la relación entre estas variables.

Capítulo 6. El factor de seguridad en la dispersión atmosférica de vertidos de propano

6.1 Introducción

El Gas Licuado de Petróleo (GLP), una mezcla de propano y butano, tiene un gran número de aplicaciones: se utiliza en el transporte, en el sector comercial, la industria, la agricultura y la calefacción y la cocina domésticas, entre otros fines. El sector doméstico es una de las aplicaciones más notorias del GLP, con casi el 45% de la demanda mundial. Sin embargo, el transporte es uno de los sectores con mayor crecimiento, representando casi el 9% y 23.7 millones de toneladas del consumo total mundial en el año 2011 [Hart et al., 2011]. Al igual que en el caso del GNL, dicho consumo mundial ha aumentado significativamente en los últimos años; según los autores antes citados, el incremento en el año 2000 respecto a 1990 fue del 45%.

Entre los países con mayor consumo del mundo se encuentran los Estados Unidos y Canadá, con aproximadamente unos 50.9 millones de toneladas consumidas en 2010. China es también una gran consumidora, habiendo desplazado a Japón en el consumo de GLP: en 2006 el consumo en China fue de 19 millones de toneladas, mientras que en Japón fue de 18.2 millones de toneladas [Hart et al., 2008]. Por continentes, Asia es ya el mayor consumidor del mundo con 63.4 millones de toneladas, cantidad que va en aumento.

6.2 Producción y distribución del GLP

La producción de GLP en el mundo ha crecido a razón de un 3.3% anual

acumulado durante el período que va desde 1991 a 2000, año en que la producción creció un 38% respecto a la del año 1991.

En 1991 la producción fue de 146.7 millones de toneladas, mientras que en el año 2000 alcanzó los 200 millones de toneladas. En 2011 la producción mundial de GLP alcanzó un nuevo máximo histórico de 269 millones de toneladas [World LP Gas Association, 2012]. Se espera que la producción aumente a 275 millones de toneladas para el año 2014 [Hart et al., 2011]. La principal región productora de GLP en el mundo es Norteamérica, con alrededor de 55 millones de toneladas anuales, seguida por Oriente Medio donde se producen unos 52 millones de toneladas por año; en esta región, Arabia Saudita es el mayor productor. En Asia se está produciendo asimismo una importante cantidad de GLP, casi 40 millones de toneladas por año (datos del 2010).

El gas licuado de petróleo se obtiene de la producción de gas natural y del refinado del petróleo. Se puede obtener de la destilación primaria del petróleo, así como también de los demás procesos a los que son sometidos otros productos de la destilación del petróleo como el reformado catalítico, el cracking catalítico, la alquilación, el cracking térmico, etc.

Dado que el GLP en estado gaseoso es un componente con menor presión de vapor y puntos de ebullición más altos que el gas natural, antes de transportar dicho gas se somete a una destilación fraccionada. Mediante esta operación se separa el gas natural del resto de hidrocarburos con los que inicialmente se encuentra mezclado; de estos hidrocarburos se obtiene el GLP, entre otras sustancias.

La red de distribución del GLP empieza en grandes instalaciones de suministro de las empresas comercializadoras. El GLP suele ser transportado por tuberías subterráneas hasta las terminales de suministro directamente desde la fuente de importación o desde una refinería próxima. A su vez, las plantas distribuidoras locales acuden a estaciones de suministro mayores para abastecer a sus consumidores. La distribución del GLP puede ser en envases o

a granel, dependiendo de determinadas circunstancias tales como la aplicación, la escala de uso y la preferencia del consumidor (Fig. 6.1).

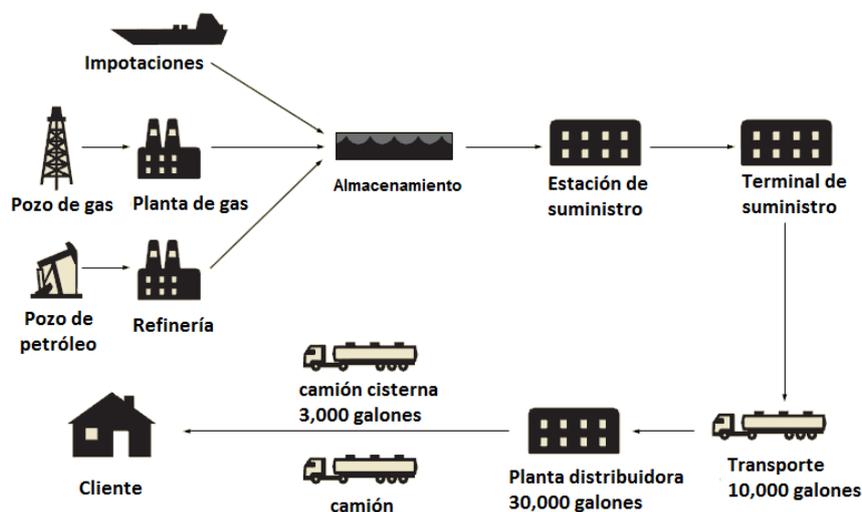


Fig. 6.1 Sistema de distribución del GLP.

El GLP puede ser almacenado bajo presión o refrigerado. La elección del tipo de almacenamiento depende de diferentes factores, tales como la seguridad, los requerimientos en el proceso de distribución y los costes.

Como una guía de referencia, el almacenamiento presurizado se tiende a utilizar en volúmenes de hasta 3200 m³, semi-presurizado de 2400 m³ a 6400 m³ y se refrigera para volúmenes superiores a 6000 m³ y hasta 100000 m³ [Brook et al., 2005]. Con el objetivo de minimizar el volumen de almacenamiento del GLP, con frecuencia se almacena como un gas licuado. Para grandes cantidades la opción más económica es almacenarlo a presión atmosférica para reducir al mínimo el número y el coste de los tanques, aunque hay que tener en cuenta el gasto de funcionamiento del sistema de refrigeración necesario.

Existen numerosas instalaciones que almacenan gases licuados (Fig. 6.2). Por ejemplo, en Tarragona se encuentra un tanque de almacenamiento de propano

refrigerado con una capacidad de 40000 m³; el gas almacenado es utilizado como materia prima en la producción de propileno.



Fig. 6.2 a) Terminal de almacenamiento de GLP en Amberes, Bélgica: dos tanques de GLP refrigerado con una capacidad de 50000 m³ y ocho esferas de 3300 m³ con GLP presurizado. b) Vista aérea de un tanque de almacenamiento de propano refrigerado en Tarragona, España.

El propileno es un componente clave en la industria petroquímica; entre los materiales que se obtienen del mismo se encuentran el polipropileno, el acrilonitrilo (utilizado en la fabricación de fibras acrílicas y revestimientos), el óxido de propileno, el cumeno (resinas epoxi y policarbonato), alcoholes oxo (utilizados en plastificantes para PVC y recubrimientos) y alcohol isopropílico.

El propileno se obtiene principalmente en el refino de petróleo y en la producción de etileno. Pero también existen una serie de tecnologías que permiten la producción de propileno a partir de otras materias primas. La demanda creciente de propileno y la disponibilidad a un bajo precio de materia prima hacen de la deshidrogenación del propano (PDH) un método muy atractivo desde el punto de vista económico para la producción de propileno [American Chemistry Council, 2007].

El propano comparte con el propileno muchas propiedades físicas y químicas, que los convierten en sustancias muy similares (véase la Tabla 6.1). Basándose en este hecho, es posible extrapolar algunas predicciones para propano

(incluyendo determinadas correlaciones) también para el propileno.

Tabla 6.1. Propiedades físicas y químicas del propano y propileno [American Chemistry Council, 2007]

Propiedades	Propano	Propileno
Estado físico	Gas, líquido bajo presión	Gas, líquido bajo presión
Formula molecular	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆
Peso molecular (g/mol)	44	42.08
Punto normal de ebullición (°C)	-42.2	-47.8
Punto de fusión (°C)	-188	-185.3
Temperatura crítica (°C)	96.6	91
Presión crítica (bar)	42.5	46.1
Densidad del gas (a 1.013 bar y en el pto. de ebullición) (kg/m ³)	2.423	2.365
Temperatura de autoignición (°C)	470	460
Límites de inflamabilidad en aire, vol. % a 20 °C y 1 atm	2.1-10.1	2.0-11.0

6.3 Características del GLP

El Gas Licuado de Petróleo es un hidrocarburo compuesto esencialmente por propano y butano.

En condiciones de presión y temperatura ambientales (aproximadamente 1 atm y 20 °C), el GLP se encuentra en estado gaseoso. Para tener GLP en estado líquido a la presión atmosférica, la temperatura debe ser inferior, en caso de tratarse de propano, a -42.2 °C. A temperatura ambiente, el GLP puede ser licuado si se le somete a una presión moderadamente alta, del orden de unas 8 atm. La densidad y presión de vapor del GLP varían según su composición. Su peso molecular es mayor que el del aire, por lo que en estado gaseoso el GLP es más pesado que éste y, por ello, en caso de escape se comporta como un gas pesado y tiende a ubicarse en lugares bajos.

El GLP se obtiene en los procesos antes mencionados en estado de vapor, pero se convierte en líquido mediante compresión y enfriamiento simultáneos (-42.2

y 0.5 °C para el propano y butano, respectivamente), transformándose 273 litros de vapor de propano y 238 litros de vapor de butano, respectivamente, en 1 litro de líquido. El GLP líquido es menos pesado y menos viscoso que el agua, por lo que puede pasar a través de poros que resultan impermeables para ésta, el gasoil o el queroseno.

6.4 Riesgos asociados al GLP

El GLP no es tóxico pero puede provocar asfixia. También puede ocasionar irritación en contacto con la piel y ojos. Es altamente inflamable y su combustión es muy rápida, generando altas temperaturas. El GLP tiene unos límites inferior y superior de inflamabilidad para el propano del 2.3 % y 9.6 % (en volumen) de gas en aire, respectivamente, y para el butano de 1.9 y 8.6 % de gas en aire. El GLP es incoloro e inodoro, por lo que en determinadas aplicaciones para percibirlo en el ambiente se le añade mercaptano como agente odorante.

Los peligros potenciales de la fuga de GLP son diversos y varían dependiendo de varios factores: el tamaño del derrame, las condiciones de almacenamiento, las condiciones ambientales y las características del lugar en el cual se produce el derrame.

Uno de los aspectos más peligrosos de una fuga de GLP es la formación de nubes inflamables, que pueden producir una explosión y, simultáneamente, un incendio de llamarada.

Otra posibilidad es que tras el incendio de llamarada las llamas regresen al punto de origen de la fuga, resultando en un incendio de la balsa (pool fire), un dardo de fuego o incluso un BLEVE si las llamas afectan al depósito.

Incendio de llamarada (flash fire)

Este tipo de incendio puede producirse si la ignición no tiene lugar inmediatamente después de la fuga. Esto permite –en función de las condiciones meteorológicas existentes– la formación de una nube, la cual

evoluciona de manera que si encuentra un punto de ignición se inflamará toda la masa comprendida entre los límites de inflamabilidad.

En el caso de que el orificio de escape sea pequeño, tendrá lugar una emisión continua del material. En cambio, en el caso del colapso del contenedor o una rotura de dimensiones significativas, tendrá lugar la evaporación flash del propano, produciéndose una emisión instantánea del material a la atmósfera.

En el supuesto de que la fuga se produzca por la parte inferior se considera que se emite todo el producto contenido en la cisterna. Suele considerarse que el propano líquido del interior de la cisterna sigue una evolución adiabática, de manera que el producto se va enfriando como consecuencia de la evaporación, disminuyendo así la presión de vapor y, por lo tanto, reduciéndose también el caudal de fuga.

Incendio de balsa

Si el gas licuado se encuentra almacenado a temperatura ambiente y a una presión mayor que la presión atmosférica, al producirse la fuga el gas licuado escapará al exterior, produciéndose una evaporación flash que dará lugar a una fuga bifásica. Cierta cantidad de líquido en forma de aerosol (gotas) será arrastrada por la corriente de salida. Una parte de esas gotas puede caer al suelo, formando un charco debido al enfriamiento y condensación. Éste combustible, si encuentra un punto de ignición o es alcanzado por una llamarada dará lugar a un incendio de balsa.

Dardo de fuego

Otra posibilidad que se puede presentar a raíz de un escape de GLP es un dardo de fuego (jet fire). En este caso se puede asumir un caudal de fuga constante si el contenedor no está aislado térmicamente (suponiendo que la temperatura en el interior permanece constante), ya que el calor requerido para la evaporación será aportado por el emitido durante la combustión del dardo de fuego.

BLEVE

El BLEVE, seguido habitualmente en el caso del GLP de una bola de fuego, es uno de los accidentes de peores consecuencias debido a la gran extensión afectada por la radiación térmica producida. Una primera circunstancia que podría producir un BLEVE es la generación de calor procedente de un accidente previo, como por ejemplo un dardo de fuego que incida sobre el mismo contenedor. Al aumentar la temperatura y con ello la generación de vapor en el interior en el mismo, la presión aumentará. Pese a que la válvula o válvulas de seguridad están en principio diseñadas para hacer frente a esta situación, es posible que la acción de las llamas debilite la resistencia de la pared del depósito, provocando la rotura súbita del mismo y produciendo la explosión BLEVE.

6.5 Escenarios a estudiar

Cuando se trata de analizar el riesgo asociado a un escape, existen varias posibilidades, función de diversos parámetros como pueden ser el tiempo de emisión, el caudal emitido, las condiciones de almacenamiento o las condiciones meteorológicas. En el presente caso se han estudiado dos posibilidades de fuga para el GLP en función del estado en el que se encuentra almacenado: a) la fuga de gas licuado de propano refrigerado a presión atmosférica y b) la fuga de GLP presurizado a temperatura ambiente (Fig. 6.3).

En ambas situaciones el riesgo vendrá establecido por la formación de una nube inflamable, lo cual será función, como se ha comentado, de las condiciones meteorológicas prevalentes. En esta situación es posible que se produzca una explosión y una llamarada (flash fire) si la nube encuentra un punto de ignición en su zona de inflamabilidad, es decir, aquella en la que la concentración está comprendida entre los límites superior e inferior de inflamabilidad.

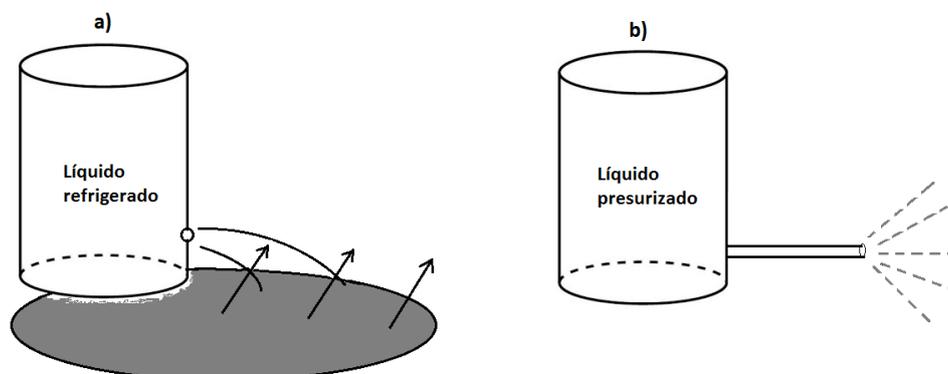


Fig. 6.3 Esquema de dos escenarios posibles de fuga de GLP: a) fuga de gas licuado refrigerado a presión ambiente, b) Fuga bifásica de gas licuado presurizado a temperatura ambiente.

A continuación se analiza el primer escenario propuesto. Cuando se produce una fuga de esta naturaleza se asume que todo el gas licuado de petróleo se evapora (ebullición), tomando calor del suelo y de la atmósfera, y forma una nube de gas.

6.6 Factor de seguridad de dispersión (DSF) para nubes de propano

En el capítulo anterior se ha presentado el “Factor de Seguridad de Dispersión” (DSF), que viene dado por la siguiente expresión:

$$DSF = \frac{X_{LFL}}{X_{VIS}} \quad (6.1)$$

Su utilidad se ha puesto de manifiesto mediante su aplicación al caso específico de una fuga de gas natural. Es evidente que este factor puede aplicarse, con las especificidades adecuadas, a la dispersión de otros gases. En este apartado se desarrolla un estudio similar aplicado al propano.

Como en el caso del gas natural, la distancia máxima que la nube inflamable

alcanza (X_{LFL}) se ha calculado con el programa de dispersión de gases DEGADIS. Este código estima la distancia máxima alcanzada en un momento determinado por el límite inferior de inflamabilidad, a partir de un modelo en estado estacionario sin transferencia de calor entre la nube y la superficie del derrame de propano.

DEGADIS también estima la temperatura de la nube que se está dispersando a diferentes distancias. Esto proporciona una manera de determinar el contorno de la nube visible (establecido por la condensación de la humedad atmosférica) en función de la temperatura de rocío de la atmósfera. Las nubes de propano, al igual que las de GNL, tienen una temperatura muy baja, enfriando por tanto el aire circundante, el cual se satura y condensa en pequeñas gotas que permanecen en suspensión en la atmósfera. Es esta niebla la que hace visible la nube de gas que, de no ser por este fenómeno, sería completamente transparente e incolora. El fenómeno de condensación empieza cuando la temperatura del aire alcanza el punto de rocío ($T_{\text{rocío}}$).

6.7 Datos experimentales relevantes

En este primer escenario se considera un derrame no confinado de propano (refrigerado a presión ambiente), el cual se vaporiza rápidamente formando una nube de vapor. Nuevamente, la investigación bibliográfica ha puesto de manifiesto que se ha realizado muy poca experimentación a gran escala sobre este fenómeno. Únicamente se han encontrado la serie de ensayos a gran escala realizados con GLP en Maplin Sands, que se ha tomado como referencia experimental. El GLP utilizado en estas pruebas experimentales consistía básicamente en propano (97-98 % en masa) con pequeñas cantidades de etano. El radio de la balsa formada se ha estimado en 10 m, con una velocidad de evaporación de $0,012 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [Blackmore et al., 1982].

La Tabla 6.2 resume las pruebas de dispersión de nubes de propano de Maplin Sands para las cuales hay datos disponibles y que han sido relevantes para validar este primer escenario.

Tabla 6.2 Características principales de los experimentos con GLP más relevantes
[Blackmore et al., 1982]

Experimento	Velocidad de derrame (kg s ⁻¹)	Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Clase de estabilidad atmosférica	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa del aire (%)
Maplin 43	19.2	5.5	D	17	70
Maplin 46	23.3	8.1	D	19	71
Maplin 51	46.7	7	D	-	80
Maplin 54	19.2	3.8	D	8.5	85

Se han seleccionado nuevamente las temperaturas de 15 °C y 35 °C para proporcionar ejemplos de cálculo del factor de seguridad de dispersión (DSF); estos valores cubren la gama de temperaturas existentes durante las citadas pruebas y además han permitido hacer comparaciones con los resultados previamente presentados para el gas natural.

El porcentaje de humedad analizado ha estado comprendido entre el 5% y el 90%, valores que incluyen situaciones correspondientes tanto a zonas desérticas como a áreas costeras y que comprenden por supuesto los porcentajes de humedad relativa de los ensayos experimentales a gran escala: 52% -83% (Maplin Sands).

6.8 Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de las simulaciones con DEGADIS para el cálculo del factor de seguridad de dispersión (DSF) han sido validados mediante su

comparación con los valores procedentes de las pruebas experimentales a gran escala citadas.

Con respecto a las dimensiones de la nube visible, los datos fueron obtenidos de manera directa de algunos de los informes publicados por los investigadores [Hirst et al., 1983; Blackmore et al., 1982], o bien determinados a partir del análisis de fotografías aéreas de las pruebas experimentales, tomando como referencia las dimensiones del lugar donde se desarrollaron las mismas. A título de ejemplo, en la Fig. 6.4 se muestran imágenes de la prueba 54 de Maplin Sands [Puttock et al., 1983].

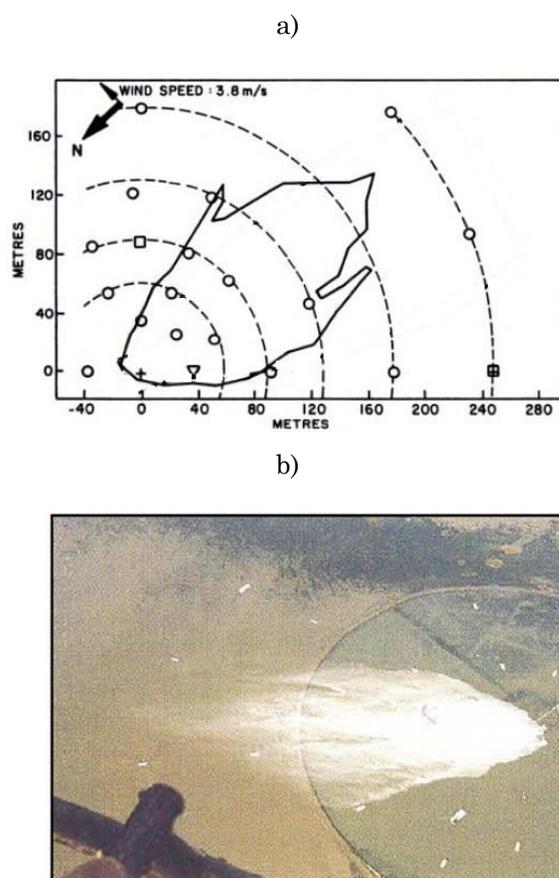


Fig. 6.4 a) Plano y b) fotografía aérea de la nube de gas formada a partir del derrame de propano durante la prueba 54 de Maplin Sands (Puttock et al., 1983).

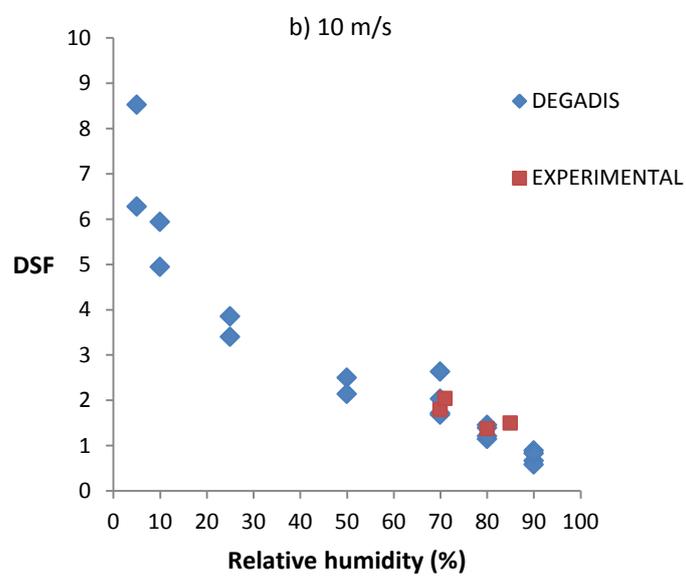
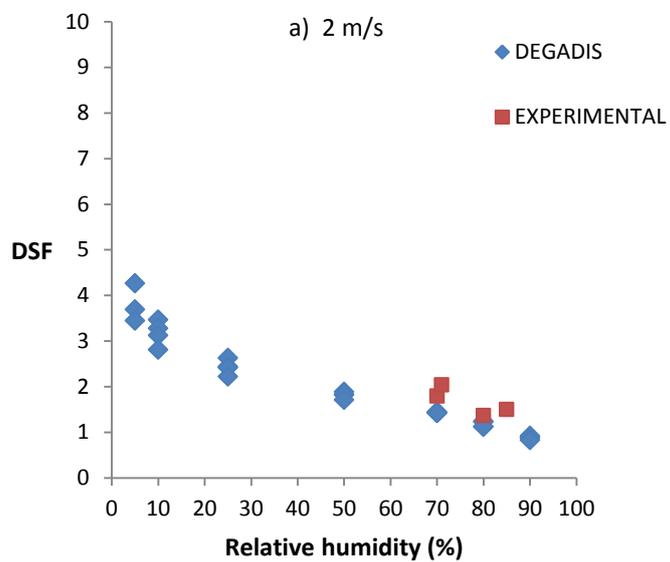
La distancia alcanzada por la región inflamable durante las pruebas fue obtenida asimismo de informes y artículos de las pruebas de Maplin Sands. En la Tabla 6.3 se puede observar la longitud de la pluma visible (X_{VIS}) y la distancia máxima a favor del viento del límite inferior de inflamabilidad (X_{LFL}), para las cuatro pruebas experimentales usadas para validar este primer escenario, en el que tras el vertido se produce la ebullición del propano y la formación de la nube.

En la Figura 6.5 (a-c) se muestran los valores del factor de seguridad de dispersión (DSF) calculados con el código DEGADIS y también los correspondientes a los datos experimentales de las pruebas de Maplin Sands.

En las gráficas de dicha figura se observa la variación del factor DSF con respecto a la humedad relativa para dos velocidades de derrame (10 kg s^{-1} y 100 kg s^{-1} , respectivamente), a dos temperaturas ambiente diferentes ($15 \text{ }^\circ\text{C}$ y $35 \text{ }^\circ\text{C}$) y bajo dos velocidades del viento: 2 m s^{-1} y 10 m s^{-1} . Estos valores han sido seleccionados como representativos de las condiciones existentes durante las pruebas a escala real.

Tabla 6.3. Alcance de la nube inflamable y de la pluma visible en los derrames experimentales de propano [Hirst et al., 1983; Blackmore et al., 1982; Puttock et al., 1983]

Experimento	X_{LFL}	X_{VIS}
Maplin 43	215	120
Maplin 46	245	120
Maplin 51	260	190
Maplin 54	300	200



En la figura 6.5 (c) se muestran en un sólo conjunto los datos presentados en las dos gráficas anteriores.

Al igual que en el caso del gas natural, el factor DSF disminuye a medida que aumenta la humedad relativa del aire. No obstante, a diferencia de lo que ocurre con el GNL, la región inflamable se extiende hasta más allá de los límites de la nube visible en una gama mayor de valores de la humedad relativa, cercana al 80 %. Esto implicaría una situación de mayor peligro para una determinada posición de la nube respecto a una eventual fuente de ignición, en una gama de humedades atmosféricas mayor.

De acuerdo con Blackmore (1982), el porcentaje de humedad en el cual la región inflamable coincide con los límites de la nube visible es aproximadamente del 90%, valor que se acerca a lo obtenido con DEGADIS. Al utilizar este código para predecir el límite inflamable y visible de una nube de propano, el valor del factor DSF es de 1 cuando el porcentaje de humedad relativa es superior al 85%.

Cuando la humedad relativa está por debajo del 85%, el valor del DSF aumenta. Esto implica que el alcance de la nube visible (X_{VIS}) es menor que el del límite inferior de inflamabilidad y, de acuerdo con la ecuación (6.1), el factor DSF aumenta. Desde el punto de vista de la evaluación del riesgo mediante la observación del límite visible de la nube, esta situación es notoriamente más peligrosa para el caso de una nube de propano que para una nube de gas natural. En el caso de una fuga de propano, la región inflamable se extiende más allá de los límites de la nube visible; es decir, la ignición de la nube puede tener lugar en un punto que queda fuera del alcance de la nube visible, en un rango de humedad relativa más amplio. Esto representa un peligro evidente desde el punto de vista de la gestión de una emergencia.

Se ha observado asimismo que el valor del factor DSF se incrementa notablemente bajo determinadas condiciones, especialmente en el caso de atmósferas secas (humedad relativa < 25%) y alta velocidad de viento (igual o

superior a 10 m/s). Cuando la humedad relativa disminuye a valores de $H_R < 25\%$ los resultados son influenciados por otras variables, especialmente por la velocidad del viento y la intensidad de la fuente. En la figura 6.5 se puede observar una notable dispersión de los resultados justo en esta zona, por lo que bajo estas condiciones específicas la imprecisión en la determinación del factor DSF es importante. Sin embargo, esto ocurre a valores muy bajos de H_R , que en la práctica son poco comunes.

6.9 Influencia de las diversas variables sobre el factor de seguridad para la dispersión atmosférica (DSF)

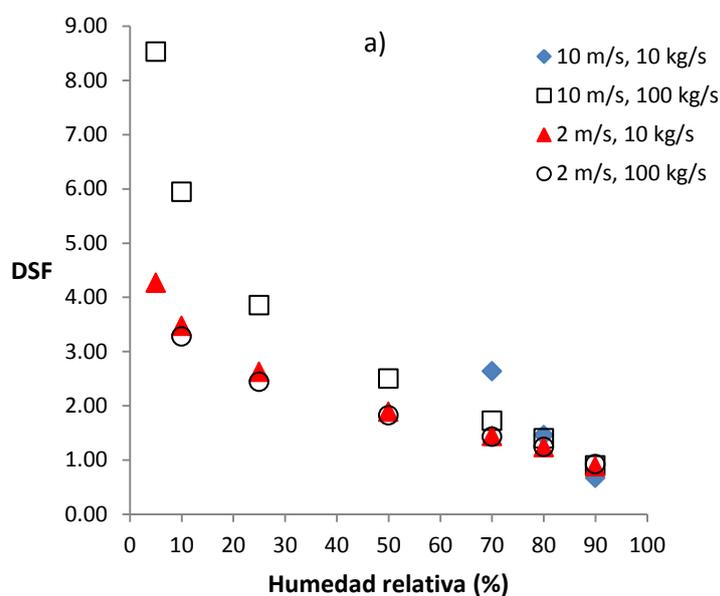
Como en el caso del GNL, asumiendo la posible utilización del factor DSF en situaciones de emergencia, se ha considerado conveniente estudiar cuál es la influencia sobre el mismo de las principales variables que pueden jugar un papel significativo en los cálculos de dispersión: temperatura ambiente, velocidad de derrame, velocidad del viento, rugosidad de la superficie sobre la que tiene lugar la dispersión y categoría de estabilidad atmosférica (A - F).

Como es lógico esperar también en el caso del propano, todos estos parámetros han de tener esencialmente el mismo efecto en la estimación de ambas distancias, alcance de la zona inflamable (X_{LFL}) y de la zona visible (X_{VIS}). Por lo tanto, el valor del factor DSF no debería tener ninguna influencia significativa sobre los mismos. De todas formas, se ha comprobado si esta suposición era o no correcta.

Para realizar este análisis se eligieron las siguientes condiciones: velocidad de escape comprendida entre 10 y 100 kg s⁻¹ y velocidad del viento en el intervalo comprendido entre 2 m s⁻¹ y 10 m s⁻¹. En cuanto al estudio de la estabilidad atmosférica, se utilizan las cinco categorías que abarcan condiciones de menor a mayor estabilidad, mientras que la categoría elegida en las demás simulaciones fue la D, correspondiente a una atmósfera neutra; la rugosidad de la superficie se estableció como de $2.05 \cdot 10^{-4}$ m.

Las gráficas de la figura 6.6 (a) y (b) muestran que a ambas temperaturas (15 °C y 35 °C), el factor DSF toma prácticamente los mismos valores con una humedad relativa superior al 50%. Con una humedad relativa de alrededor del 85%, su valor se aproxima a la unidad. Por lo tanto, la influencia de la temperatura ambiente sobre el factor DSF puede ser considerada despreciable.

La Figura 6.7 muestra la influencia de la velocidad de vertido (que oscila entre 100 kg s⁻¹ y 10 kg s⁻¹) a 15 °C y diversas humedades relativas sobre el factor DSF calculado; los cálculos se han realizado para dos velocidades distintas de viento. Se puede observar que a valores bajos de la velocidad de viento ($u_w = 2$ m s⁻¹) la influencia de la velocidad de derrame es despreciable.



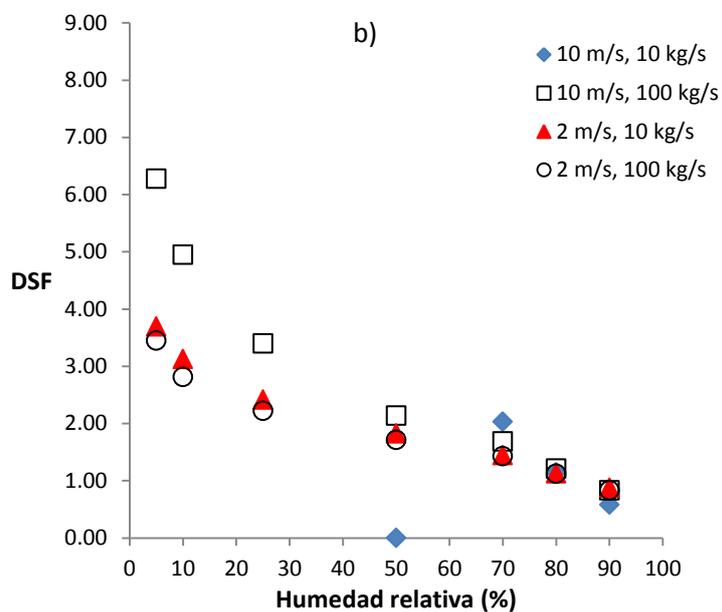
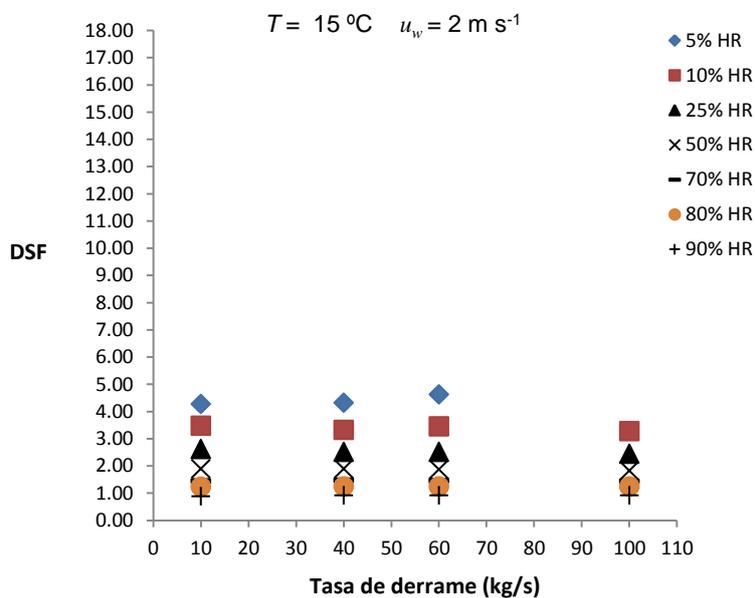


Figura 6.6 Variación del factor DSF con respecto a la humedad relativa; valores obtenidos de la simulación con DEGADIS para la dispersión de una nube de propano: (a) 15 °C; (b) 35 °C.



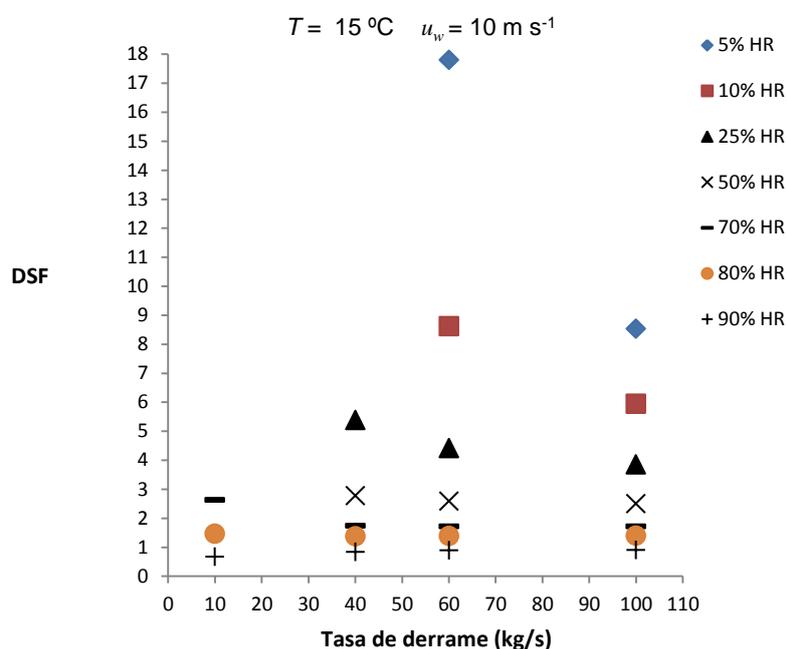


Figura 6.7 Variación del factor DSF en función de la velocidad de vertido y la humedad relativa con una velocidad del viento baja ($u_w = 2\text{ m s}^{-1}$) y alta ($u_w = 10\text{ m s}^{-1}$).

Asimismo, se ha analizado la influencia de la rugosidad de la superficie sobre la que tiene lugar la dispersión del propano. Se seleccionaron los mismos valores de longitud de rugosidad superficial (z_r) que en caso del GNL: 0.1 m para un terreno llano, 0.01 m para dispersión sobre agua o una superficie de desierto, y 0.0001 m para la dispersión sobre el mar en calma, una superficie cubierta de nieve o una superficie con pendiente muy ligera. Como se puede observar en la Figura 6.8, este parámetro tiene también un efecto despreciable sobre el factor DSF, excepto a humedades relativas muy bajas ($H_R \leq 5\%$).

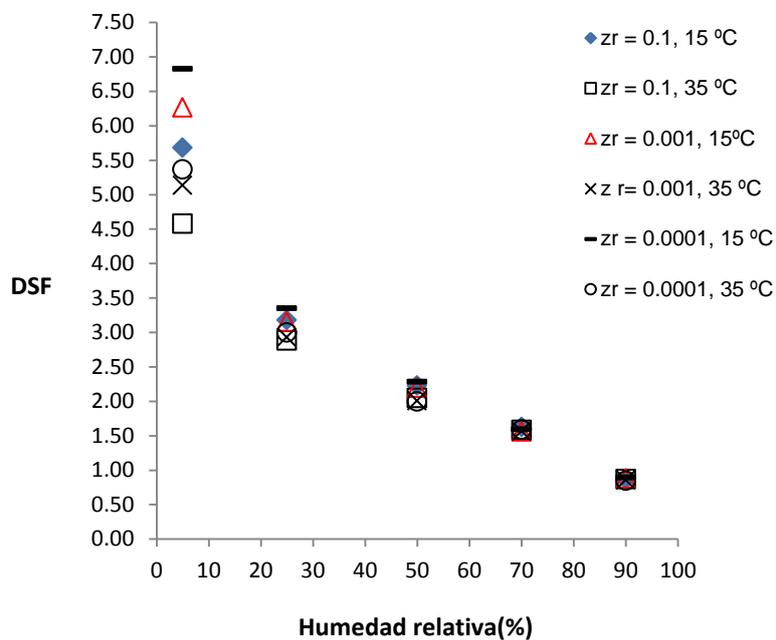


Figura 6.8 Efecto de la rugosidad superficial sobre el factor DSF en el caso de un derrame de propano (velocidad de vertido de 50 kg s^{-1} y velocidad del viento de 5 m s^{-1}).

Por último, se estudió la influencia de la estabilidad atmosférica. De la figura 6.9 se puede concluir que la estabilidad atmosférica no tiene un efecto significativo sobre el factor de seguridad de dispersión (como era de esperar), excepto nuevamente a humedades relativas muy bajas ($H_R \leq 5\%$).

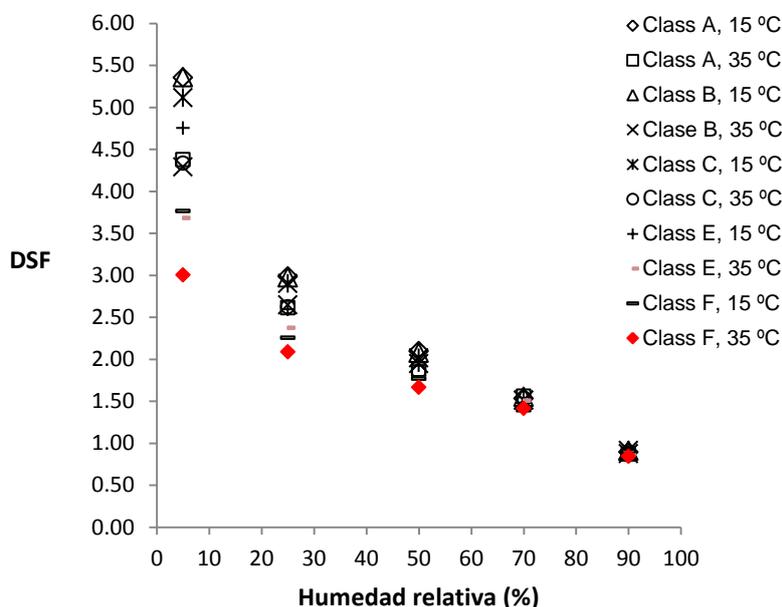


Figura 6.9 Efecto de la estabilidad atmosférica sobre el factor DSF en el caso de un derrame de propano (velocidad de derrame de 40 kg s^{-1} y velocidad del viento 3 m s^{-1}).

6.10 Predicción del factor de seguridad para la dispersión atmosférica (DSF)

En el caso de un derrame de propano, si se puede observar la distancia alcanzada por la nube visible es posible estimar el alcance de la nube inflamable (X_{LFL}) mediante la relación definida a partir del factor DSF:

$$X_{LFL} = DSF \cdot X_{VIS} \quad (6.2)$$

Se ha realizado un análisis de regresión para obtener una expresión que pueda ser utilizada para estimar de forma rápida el factor de seguridad para la dispersión. Como se ha demostrado anteriormente, el factor DSF puede ser considerado dependiente únicamente de la humedad relativa (H_R), ya que el resto de las variables atmosféricas que podrían afectarlo no presentan una

influencia significativa, excepto para valores muy bajos de humedad relativa, del orden de $H_R \leq 10\%$. Para estas condiciones, que en la práctica son extremadamente improbables, los resultados son altamente influenciados por otras variables, principalmente la velocidad del viento y la velocidad de emisión.

Como en caso del GNL, se ha realizado una observación similar con respecto a la distribución de los valores del factor DSF en función de H_R (Figuras 6.5 (a) y (b)). Teniendo en cuenta que los datos siguen la misma tendencia para el intervalo de $50\% \leq H_R \leq 90\%$ y que la dispersión aumenta a medida que H_R disminuye sobre la gama de valores de humedad relativa $10\% \leq H_R \leq 50\%$, se ha decidido (al igual que para el caso del gas natural) obtener dos expresiones mediante la selección de los respectivos conjuntos de datos significativos. La primera, que es esencialmente válida para situaciones con poco viento ($u_w \leq 2$ m s⁻¹), es:

$$DSF = 3.1 - 0.024H_R \quad (6.3)$$

Sin embargo, como puede observarse en las diversas figuras, hay cierta dispersión de los datos, que se vuelve significativa a medida que disminuye H_R . Por lo tanto, también se ha obtenido una expresión más conservadora que permite la estimación del factor DSF en la peor situación posible:

$$DSF = 10.2 - 2.06 \ln H_R \quad (6.4)$$

Ambas expresiones han sido representadas en la figura 6.10. Tras realizar el correspondiente análisis estadístico se han obtenido los siguientes valores: el coeficiente de determinación (R^2) para la ecuación 6.3 es de 0.97, lo que significa que el 97% de la variación en el factor de DSF se explica por la humedad relativa, con un error típico de 0,03. Para la ecuación 6.4 el coeficiente de determinación es de 0.96, lo que significa que el 96% de la variación en el factor DSF se puede atribuir a la humedad relativa, con un

error estándar de 0.04.

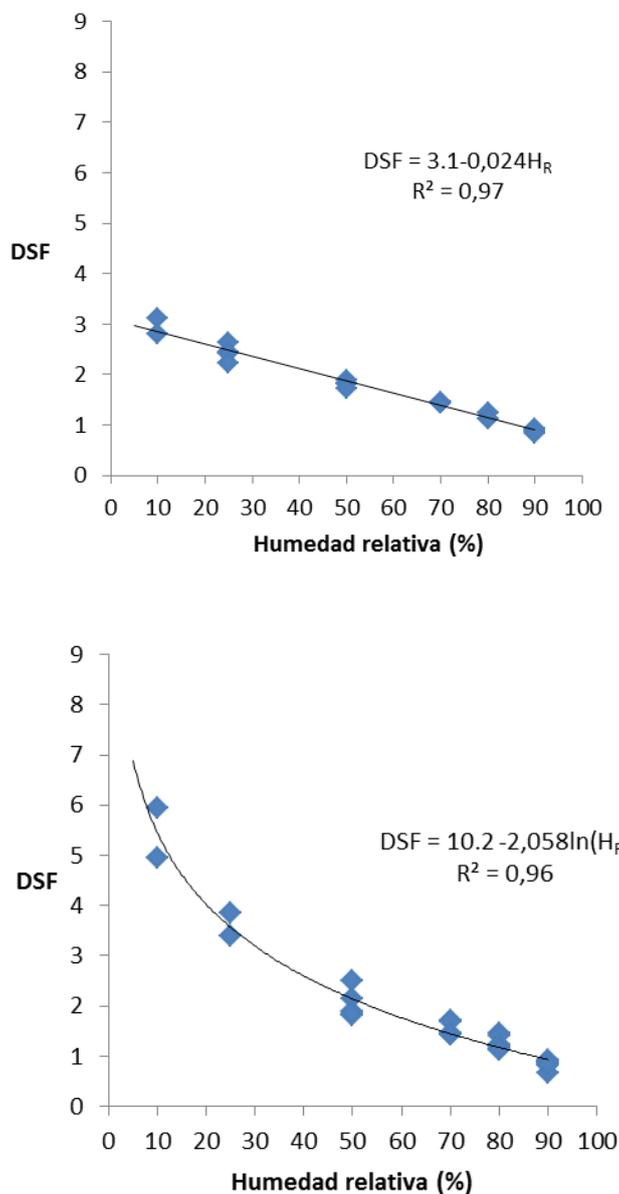


Figura 6.10 Análisis de regresión del factor DSF con respecto a la humedad relativa en el caso de un derrame de propano, obtenidos a partir del modelo de dispersión DEGADIS: (a) correlación general; (b) correlación conservadora; ambas expresiones se aplican para $H_R \geq 10\%$.

De estos valores se puede concluir que las ecuaciones (6.3) y (6.4) son adecuadas para describir la relación entre estas variables, siendo por tanto una herramienta interesante para estimar en caso de emergencia el alcance de la nube inflamable en función del de la nube visible. Dada la similitud existente entre el propano y el propileno, posiblemente estas expresiones sean también aplicables a la dispersión de este segundo gas; sin embargo, esto no se ha podido comprobar con datos experimentales.

6.11 Factor de seguridad (DSF) para una fuga bifásica de GLP a temperatura ambiente

Degadis utiliza diferentes métodos de cálculo según el tipo de fuga que se presenta. En el caso de una fuga bifásica, el material vertido es tratado como un aerosol y la fracción molar, concentración (kg/m^3) y densidad de la mezcla aire/combustible (kg/m^3) deben ser suministradas por el usuario. Estos tripletes de datos son usados para especificar la concentración del contaminante (en este caso propano) en función de la densidad basada en la mezcla adiabática con el aire. El orden de los tripletes que se han de introducir en Degadis debe ir de aire puro en el primer triplete de la serie hasta contaminante puro en el último, en el orden siguiente: 1) fracción molar del contaminante, 2) concentración del contaminante (kg/m^3) y 3) densidad de la mezcla (kg/m^3).

En el presente caso se ha utilizado el simulador Hysys en su versión 7.3 para simular la mezcla propano/aire, con el fin de obtener los datos correspondientes de temperatura, densidad y composición de la mezcla. En la fig. 6.11 puede verse el entorno de la simulación en Hysys en el cual se introducen dos corrientes, la del aire y la de propano, en un mezclador, se produce el flash de la sustancia bifásica y su mezcla.

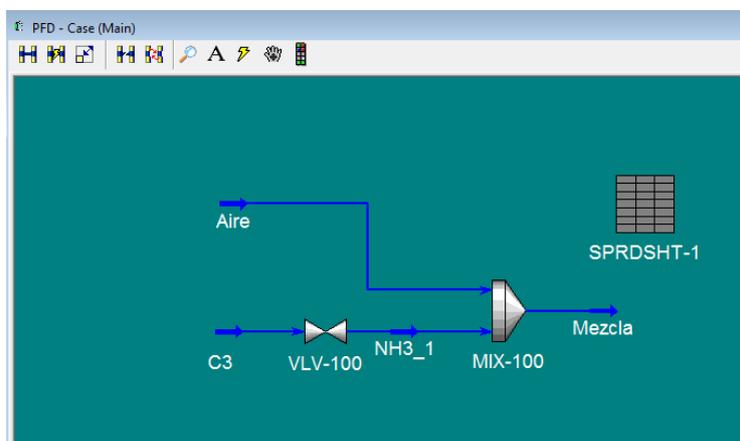


Fig. 6.11 Diagrama de proceso en Hysys de la mezcla aire/propano.

En la tabla 6.3 se pueden ver de manera resumida los resultados obtenidos con Hysys en la corriente de salida, para una mezcla de propano y aire a una temperatura ambiente de 15 °C.

Tabla 6.3 Resultados obtenidos con Hysys, para una mezcla de propano y aire a una $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Mezcla-Mass Density (kg/m ³)	Mezcla-Master Comp Mole Frac(Propane)	Mezcla- Temperature (°C)	Mezcla- Temperature (K)
State 1	1.34	0.00	9.83	282.98
State 2	1.37	0.02	4.80	277.95
State 3	1.40	0.03	-0.10	273.05
State 4	1.43	0.04	-4.87	268.28
State 5	1.46	0.05	-9.53	263.62
State 6	1.49	0.06	-14.07	259.08
State 7	1.53	0.07	-18.52	254.63
State 93	5.20	0.93	-46.01	227.14
State 94	5.31	0.94	-45.50	227.65
State 95	5.43	0.95	-44.98	228.17

State 96	5.55	0.96	-44.45	228.70
State 97	5.68	0.97	-43.91	229.24
State 98	5.82	0.98	-43.35	229.80
State 99	5.96	0.99	-42.78	230.37

Así, por ejemplo, con una temperatura ambiente de 15 °C y una humedad relativa del 5%, la temperatura de rocío ($T_{\text{rocío}}$) es de 248.9 K. Interpolando de la Tabla 6.3 en la columna de temperatura de la mezcla, se obtiene el correspondiente valor de densidad: 1.57 kg/m³. Y a partir de la densidad de los resultados generados por Degadis se obtiene la distancia a la que sería visible la nube bajo las condiciones ya mencionadas (véase la Fig. 6.12).

Distance (m)	Mole Fraction	Concentration (kg/m**3)	Density (kg/m**3)	Temperature (K)	Half Width (m)	Sz (m)	Sy (m)	Width at z= 2.00 (m)	10.0 m to: 10.0 (m)	10.0 mole% mole%
21.2	.594	2.40	3.47	288.	16.7	.159	12.5	42.0	35.5	
21.5	.588	2.36	3.45	288.	17.5	.157	12.5	42.9	36.3	
22.1	.576	2.29	3.39	288.	19.9	.151	12.6	45.3	38.7	
22.7	.565	2.23	3.35	288.	21.7	.147	12.7	47.2	40.5	
24.0	.534	2.06	3.23	288.	26.2	.141	12.9	51.7	44.9	
25.3	.501	1.88	3.10	288.	30.4	.139	13.1	56.1	49.0	
29.3	.402	1.40	2.75	288.	42.3	.144	13.8	68.3	60.4	
33.3	.309	1.00	2.47	288.	53.0	.160	14.5	79.2	70.2	
37.3	.233	.716	2.26	288.	62.9	.186	15.4	89.2	78.8	
41.3	.177	.517	2.09	288.	72.1	.217	16.4	98.4	86.1	
45.3	.140	.390	1.95	288.	80.8	.249	17.3	107.	92.5	
49.3	.116	.304	1.82	288.	88.8	.282	18.3	115.	97.1	
53.3	9.760E-02	.240	1.69	288.	96.1	.320	19.3	122.		
57.3	8.224E-02	.193	1.60	288.	103.	.360	20.4	128.		
61.3	6.958E-02	.157	1.53	288.	109.	.405	21.4	134.		
65.3	5.925E-02	.130	1.47	288.	114.	.452	22.4	139.		
69.3	5.080E-02	.108	1.43	288.	119.	.502	23.4	143.		
73.3	4.388E-02	9.183E-02	1.40	288.	124.	.553	24.5	147.		
77.3	3.818E-02	7.867E-02	1.37	288.	128.	.607	25.5	150.		
81.3	3.346E-02	6.804E-02	1.35	288.	133.	.662	26.5	152.		
85.3	2.964E-02	5.967E-02	1.34	288.	136.	.719	27.5	154.		
89.3	2.630E-02	5.247E-02	1.32	288.	140.	.777	28.4	155.		
93.3	2.347E-02	4.648E-02	1.31	288.	143.	.836	29.4	156.		
97.3	2.107E-02	4.146E-02	1.30	288.	147.	.897	30.4	154.		
101.	1.901E-02	3.720E-02	1.29	288.	150.	.958	31.3			
105.	1.723E-02	3.357E-02	1.28	288.	153.	1.02	32.3			
109.	1.569E-02	3.044E-02	1.28	288.	156.	1.08	33.2			
113.	1.434E-02	2.773E-02	1.27	288.	158.	1.15	34.1			
117.	1.316E-02	2.537E-02	1.27	288.	161.	1.21	35.0			
121.	1.212E-02	2.330E-02	1.26	288.	164.	1.28	35.9			
125.	1.120E-02	2.148E-02	1.26	288.	166.	1.34	36.8			
129.	1.038E-02	1.987E-02	1.26	288.	168.	1.41	37.7			
133.	9.647E-03	1.843E-02	1.25	288.	171.	1.48	38.6			

Fig. 6.12 Resultados generados por Degadis para la dispersión de una fuga bifásica de propano a $T = 15$ °C.

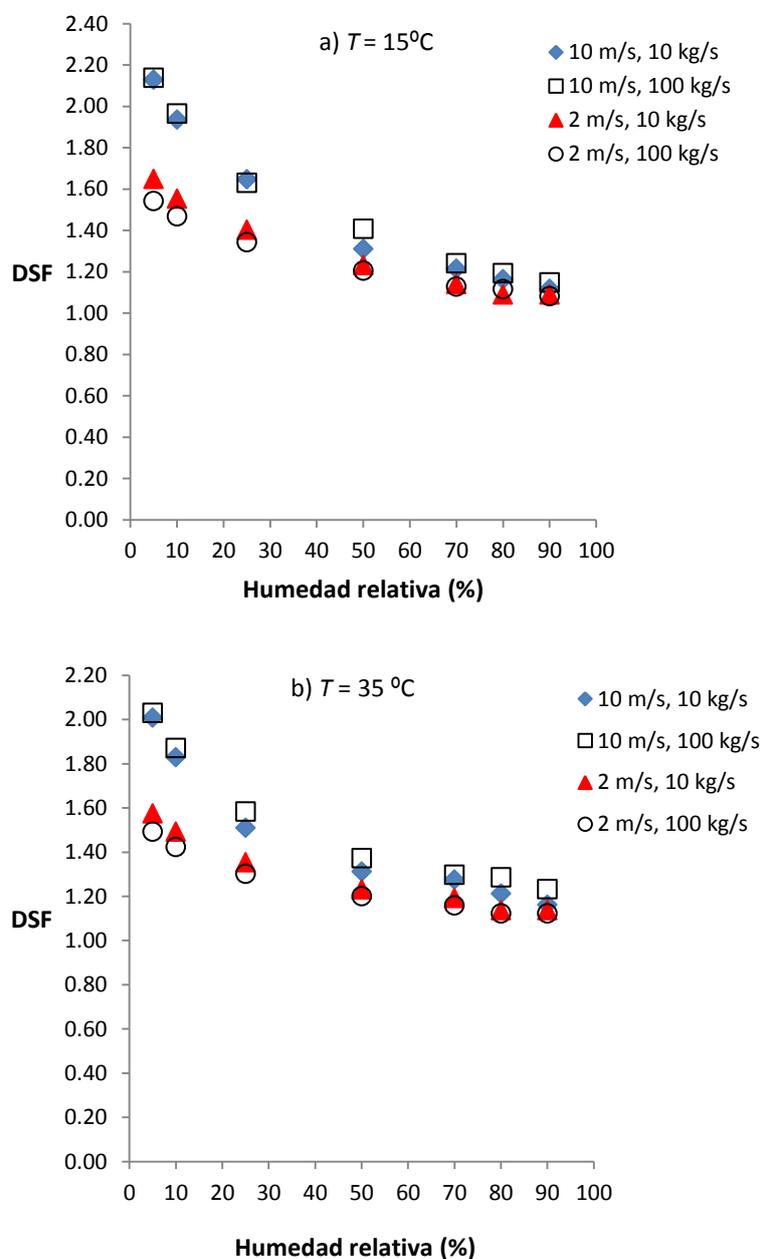


Fig.6.13 Variación del factor DSF con respecto a la humedad relativa para la dispersión de una nube de propano de un escape bifásico obtenidos con DEGADIS para dos velocidades de derrame (10 y 100 kg s⁻¹) y con las velocidades del viento siguientes: a) $u_w = 2 \text{ m s}^{-1}$; b) $u_w = 10 \text{ m s}^{-1}$.

En la Fig. 6.13 se muestra la variación del factor DSF con respecto a la humedad relativa para la dispersión de una nube de propano formada de un escape bifásico. Se puede observar que el valor del factor DSF se encuentra en una gama de valores que va de 2.14 a 1.08, lo cual indica que la distancia alcanzada por la región inflamable siempre es mayor que el alcance de la nube visible. Sin embargo, esto no se ajusta a la realidad ya que en el caso de una fuga de estas características se alcanzan temperaturas de subenfriamiento en la mezcla (≈ -70 °C según el caso) debido a la evaporación de las gotículas de líquido en el aire. En el presente caso, la temperatura de la mezcla disminuye desde la temperatura ambiente (15 °C) hasta casi -73 °C, a la que se encuentra una mezcla de vapor más gotas de líquido, para después alcanzar la temperatura de ebullición del propano (-42 °C). Por tanto, sería de esperar que, contrariamente a lo obtenido, la distancia alcanzada por la nube visible fuera mucho mayor bajo estas condiciones de fuga.

En la Fig. 6.14 se puede observar el comportamiento de la temperatura para la mezcla aire/propano resultado de la fuga bifásica de propano. Por lo tanto, es evidente que para este escenario en particular las estimaciones del factor DSF realizadas con Degadis deben de incurrir en un error. Al no tener datos experimentales con los cuales validar los resultados, no ha sido posible realizar una comparación para estimar el grado del error en el cálculo del factor DSF.

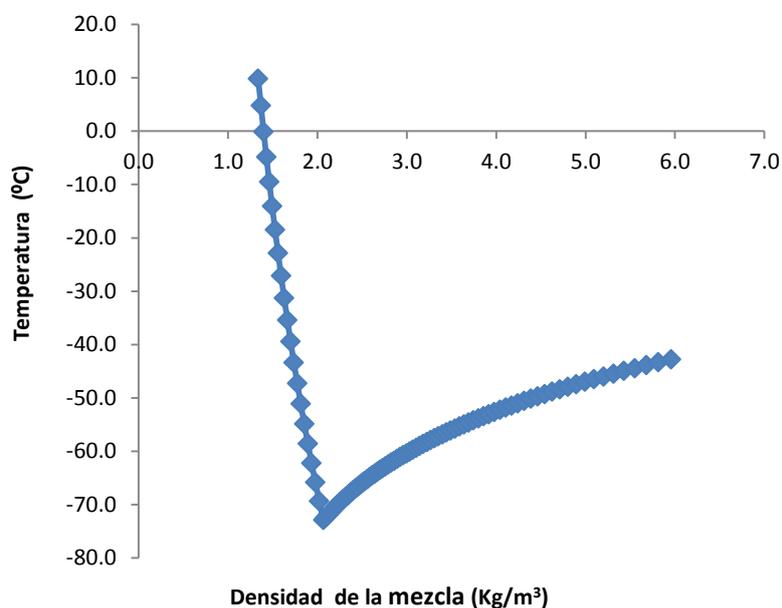


Fig.6.14 Evolución de la temperatura frente a la densidad de una mezcla de aire-propano a una $T = 15$ °C.

En la Fig. 6.15 se observa la comparación del factor DSF en el caso de una fuga de propano refrigerado y en el de una fuga bifásica del mismo material. En la gráfica se observa que el factor DSF es mucho menor que el obtenido para el propano refrigerado en la gama de valores de humedad relativa comprendida entre 5% y 70 %. Se alcanza un valor similar de DSF en ambos tipos de fuga (líquido refrigerado y flujo bifásico) cuando el valor de $H_R \approx 80\%$, sin que alcance nunca un valor menor que la unidad en ningún punto del rango de humedades. Este comportamiento resulta contrario a lo esperado, como se ha señalado anteriormente.

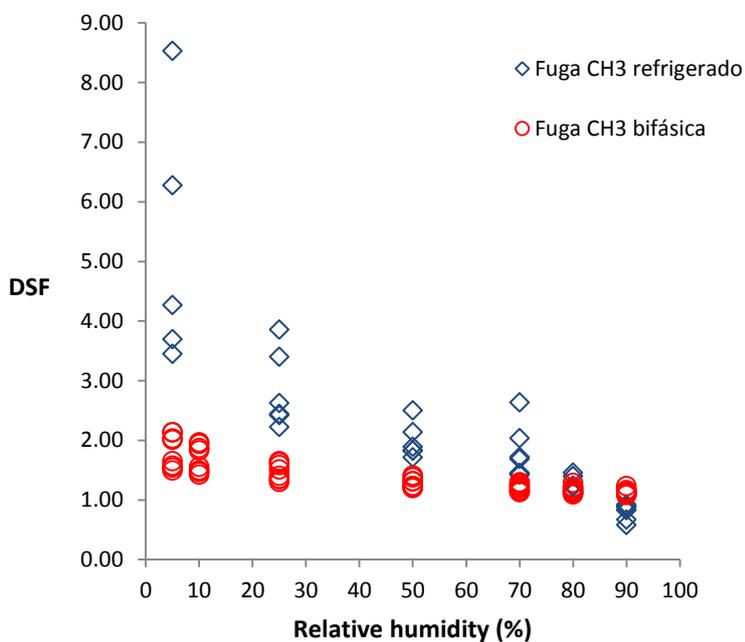


Fig.6.15 Comparación de la variación del factor DSF con respecto a la humedad relativa para dos tipos de fuga de propano; valores obtenidos con DEGADIS para dos velocidades de derrame (10 y 100 kg s⁻¹) y dos temperaturas (15 °C y 35 °C) con las velocidades del viento siguientes: a) $u_w = 2 \text{ m s}^{-1}$; b) $u_w = 10 \text{ m s}^{-1}$.

Capítulo 7. Características del incendio de una nube de gas o vapor inflamable

7.1 Introducción

Se han llevado a cabo muy pocos estudios experimentales y se han propuesto muy pocos modelos en relación con los incendios de nubes de gas o vapor inflamable a lo largo de las últimas décadas, en comparación con otros tipos de incendios. En esta sección se comentan y analizan algunos de los modelos más frecuentemente citados en la bibliografía, proponiéndose asimismo nuevas expresiones.

Los modelos matemáticos se utilizan para estimar las consecuencias de los accidentes, es decir, la radiación térmica emitida por las llamas en el caso de un incendio (Fig. 7.1). Su grado de complejidad varía significativamente. En teoría, los modelos complejos deben proporcionar mejores resultados, pero en la práctica puede ser difícil su aplicación debido a que requieren información y datos que no siempre están disponibles; por otra parte, algunos pueden ser muy sencillos y fáciles de usar, pero normalmente conllevan mayores errores de cálculo dadas las simplificaciones que aplican [Casal, 2008].

En esta sección se describen algunos de los principales parámetros utilizados para modelar el incendio de una nube de vapor, como son las dimensiones de la nube inflamable, la velocidad de propagación de las llamas, la altura de las mismas, así como la metodología para el cálculo de la radiación térmica.

En términos generales, un modelo de incendio consiste de un conjunto de ecuaciones que describen el fenómeno, el cual requiere una serie de datos de entrada y especificaciones para generar los resultados esperados.

Especificaciones del modelo	Resultados del modelo
<ul style="list-style-type: none"> • Ecuaciones • Condiciones iniciales/limites o de contorno • Dimensiones de la nube • Velocidad del viento • Potencia emisiva • Efectos del terreno • Efectos de los obstáculos • Otros 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones de la llama • Velocidad de propagación de la llama • Radiación térmica incidente sobre un objetivo dado • Otros

Fig.7.1 Características principales al modelar el incendio de una nube de vapor inflamable.

7.2 Velocidad de propagación de la llama

La velocidad del viento es un factor fundamental en la dispersión de una nube de vapor inflamable, así como en el desarrollo de la velocidad de propagación de la combustión. No obstante, también hay que señalar que de acuerdo con las pruebas experimentales la velocidad de propagación varía en función de la distancia y el tiempo, como fue evidente durante la serie de pruebas de Coyote (Rodean et al, 1984).

El proceso de propagación de las llamas tiene lugar pocos segundos después de la ignición; en general, se observó que las mismas tienden a extenderse rápidamente en ambos sentidos con respecto a la dirección del viento a partir de la fuente de ignición. Las llamas están inicialmente contenidas dentro de la nube, pero subsecuentemente se extienden por encima de la misma. Durante el crecimiento transitorio de la llama, la velocidad de propagación promedio con respecto al suelo puede ser determinada por la localización de la posición del borde de la llama contra el viento a varios intervalos de tiempo [Mudan et al, 1988].

Un incremento en la velocidad del viento aumenta el proceso de dispersión; asimismo, también el momento de la ignición es afectado por dicha velocidad.

Obviamente, para una nube de vapor rica en combustible un incremento en la concentración (siempre y cuando no se sobrepase el límite superior de inflamabilidad) significa una mayor velocidad de propagación de la llama. No obstante, si la concentración de combustible es baja, más bien retrasará la ignición además de causar una disminución en la velocidad de propagación de la llama.

De acuerdo con los datos presentados por Mudan y Croce (1988), la velocidad de propagación de la llama en función de la velocidad del viento no presentó diferencias significativas entre los dos materiales con los que trabajaron estos autores, metano y propano.

Con respecto a las pruebas a gran escala con GNL, durante la serie de experimentos de China Lake la velocidad de las llamas fue de 8-17 m/s, especificándose la velocidad en cada una de las cuatro pruebas realizadas. De la serie de pruebas de Maplin Sands se conoce únicamente que la velocidad del frente de llama fue de 10 m/s. En cambio, de las pruebas de la serie de Coyote se tiene una descripción más detallada del comportamiento de la propagación del fuego en cada una de ellas; en algunas se alcanzaron velocidades de propagación de 30-40 m/s, que disminuían súbitamente hasta valores de 5-10 m/s.

De los experimentos realizados con propano se sabe que la velocidad de propagación de la llama durante las pruebas de Maplin alcanzó un máximo de 28 m/s; concretamente en la prueba 51 se alcanzó una velocidad máxima de 20 m/s, pero su valor medio fue de 12 m/s. Por otra parte, en las pruebas desarrolladas por el HSL (Daish et al., 2001), la velocidad de las llamas estuvo comprendida entre 7.3 y 13.4 m/s.

Analizando los experimentos a escala real disponibles en los años setenta, Raj y Emmons (1975) propusieron una correlación empírica muy simple que relaciona la velocidad de la llama, u_f , con la velocidad del viento, u_w :

$$u_f = 2.3u_w \quad (7.1)$$

Más recientemente, Raj (2007) ha propuesto la siguiente expresión:

$$u_f = 0.8 + 1.6u_w \quad (7.2)$$

Esta recorrelación está basada en una serie de pruebas a escala real realizadas con nubes de vapor de GNL entre 1968 y 1979; este fue el último año en que se realizaron las pruebas de China Lake a las que hace referencia la Fig. 7.2, correspondiendo al informe disponible en el año 1984.

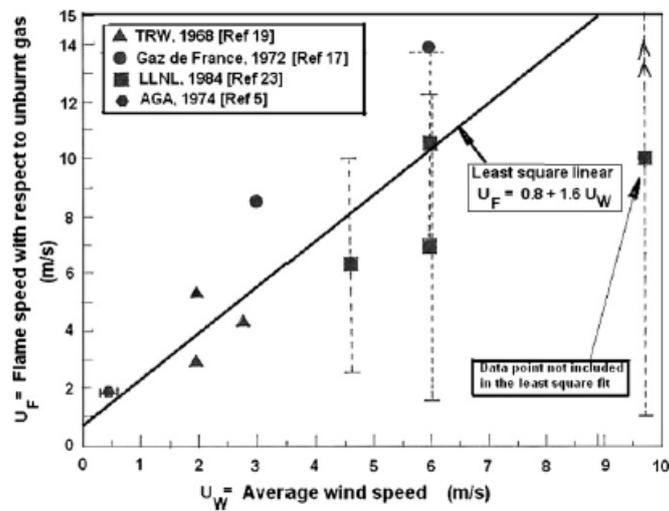


Fig.7.2 Correlación de la velocidad de la llama con la velocidad del viento en incendios de llamarada a partir de pruebas realizadas con GNL (Raj, 2007).

En el presente estudio decidimos agregar los datos registrados de velocidad de la llama en la serie de experimentos realizados en Maplin Sands y Coyote a los ya presentados por Raj (2007), con el fin de obtener una expresión que incluyera un conjunto más amplio de condiciones experimentales, la correlación de estos datos ha permitido obtener la siguiente expresión:

$$u_f = 2.1u_w + 0.93 \quad (7.3)$$

El resultado se puede ver en la Fig. 7.3, en la que se ha representado la variación de la velocidad de propagación de la llama en función de la velocidad

del viento para diversas pruebas experimentales realizadas con GNL entre 1968 y 1982; la variación es prácticamente lineal. La correlación obtenida entre estos dos parámetros se ha incluido asimismo en la figura.

Al aplicar estas dos expresiones al cálculo de la velocidad de las llamas, se ha observado que a bajas velocidades el valor es casi el mismo; no ocurre lo mismo, sin embargo, cuando la velocidad del viento es mayor, ya que entonces la diferencia de magnitud entre un valor y otro cambia significativamente obteniéndose un valor mayor con la nueva correlación propuesta. Esto parece estar de acuerdo con lo observado experimentalmente a mayores velocidades de viento, a las que aumenta proporcionalmente la velocidad de propagación de las llamas.

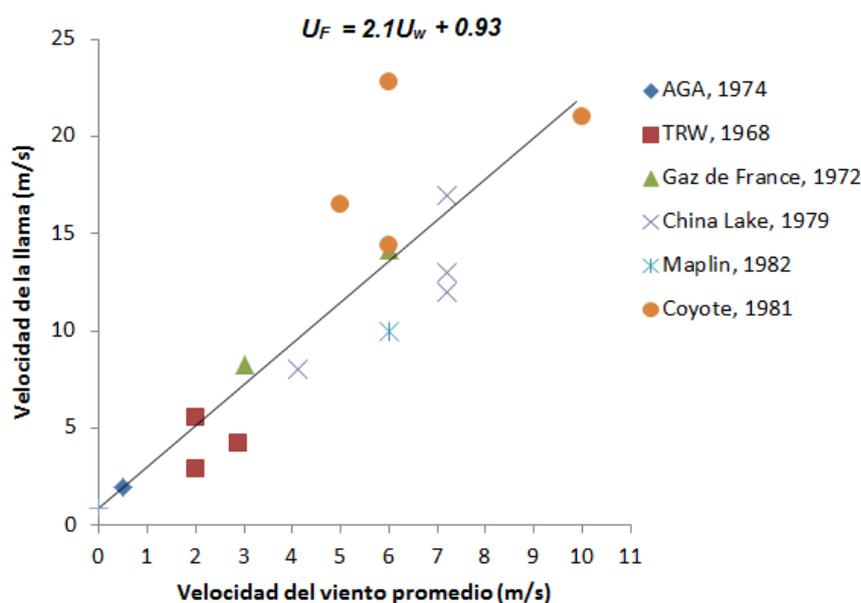


Fig.7.3 Correlación de la velocidad de la llama con la velocidad del viento en incendios de llamarada a partir de pruebas realizadas con GNL entre 1968 y 1982. (Mudan et al, 1979; Blackmore, 1982; Rodean et al, 1984; Raj, 2007).

7.3 Radiación térmica

Entre las propiedades requeridas para determinar la intensidad de la radiación en un incendio de llamarada se encuentran: las dimensiones de la nube inflamable, la velocidad de propagación de la llama a través de la misma, la potencia emisiva de la llama, el coeficiente de transmisividad atmosférica y el factor de vista de la llama en relación con el objetivo.

El flujo de calor procedente de un flash fire recibido por un observador es una función compleja de varios factores (Mudan, 1988). Uno de ellos es la potencia emisiva, que define las propiedades de radiación de las llamas. Cuando la duración del flash fire es corta y el período de combustión continuo es aún más corto, es difícil asignar un tiempo promedio para determinar poderes emisivos y flujos incidentes medios. No obstante, hay un período corto sobre el cual la radiación térmica parece tener menos fluctuación. Esta duración puede ser usada para determinar el flujo incidente promedio y la correspondiente potencia emisiva de la llama.

Otro parámetro geométrico que influye sobre la radiación térmica de los incendios de llamarada es el área de la superficie de la llama visible. Si la llama es ópticamente gruesa, la radiación térmica aumenta con el área superficial de la llama. El área aumenta inmediatamente después de la ignición, porque tanto la anchura como la longitud de la llama se incrementan con el tiempo; el área de la llama aumenta aproximadamente de forma proporcional con respecto al tiempo al cuadrado. Una vez que los vapores inflamables se han consumido, el área de la llama decrece rápidamente. Desde que la llama está en movimiento, la distancia varía continuamente hasta que el frente se aproxima al punto de la fuga, donde se forma eventualmente un incendio de balsa.

También hay que tener en cuenta la absorción de una parte de la radiación por el vapor de agua y el dióxido de carbono presentes en la atmósfera. Y, por último, la geometría de la llama relativa al observador influye en el factor de

vista, que tiene en cuenta qué porción de la llama es vista por el observador.

Por lo tanto, es evidente que la naturaleza transitoria del proceso de combustión limita severamente una caracterización detallada de la radiación térmica en la combustión de la nube de vapor inflamable. El análisis resulta difícil debido a las incertidumbres existentes, entre las que cabe citar el área y forma de las llamas, los perfiles de concentración y la localización del punto de ignición.

Estimación de la radiación térmica en los incendios

Diferentes modelos matemáticos han sido propuestos con el objetivo de estimar la radiación térmica incidente. A continuación incluimos una descripción de los modelos más conocidos y utilizados comúnmente, el modelo de llama sólida y el modelo de fuente puntual.

7.3.1 Modelo de la fuente puntual

El modelo de la fuente puntual asume que la llama se puede representar como un punto que irradia energía en todas las direcciones. El modelo considera que la energía irradiada es una fracción de la energía total liberada por la combustión y la intensidad de radiación alcanzada por un objetivo es proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente, la cual se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{Q_r}{4\pi d^2} \quad (7.4)$$

donde:

I = intensidad de radiación térmica recibida por un objeto a cierta distancia (kW m⁻²)

Q_r = flujo de calor liberado en forma de radiación (kW)

d = distancia entre el punto emisor y el objetivo (m).

El modelo no contempla la atenuación de la radiación térmica por la atmósfera

y tampoco la posición de la superficie que recibe la radiación ya que asume que está inclinada de forma que recibe el máximo flujo de radiación incidente. Aunque el modelo puede ser modificado para considerar estos factores, presenta el inconveniente de sobrestimar la radiación a distancias próximas al punto emisor debido al hecho que no toma en cuenta la geometría de la llama, por lo que no debería aplicarse para calcular distancias de seguridad entre equipos. Sin embargo es considerado aceptable cuando la distancia al objetivo es mayor de 5 diámetros desde el centro del incendio [Casal, 2008].

7.3.2 Modelo del cuerpo sólido

Este modelo es el más utilizado para calcular la radiación térmica de incendios, debido a que es más preciso que el modelo de la fuente puntual, inclusive cuando se utiliza para estimaciones a distancias cercanas a la llama.

En este modelo se asume que la llama es un cuerpo gris, el cual emite radiación térmica desde su superficie.

El modelo de llama sólida se fundamenta en las siguientes suposiciones:

- La llama se representa con geometrías tridimensionales sencillas, cuyas dimensiones se corresponden aproximadamente con las del incendio. La forma o geometría de la llama dependerá de las características del fuego. En el caso de un incendio de charco circular las llamas se aproximarán a un cilindro y en casos más generales se asume que el cuerpo irradia energía uniformemente a través de toda su superficie.
- La energía radiante se emite uniformemente a través de la superficie exterior de la llama, considerando como emisora sólo la zona visible de la misma.
- El flujo de calor incidente sobre cierto objetivo puede ser calculado por la siguiente expresión:

$$I = \tau F E \quad (7.5)$$

Donde,

τ = transmisividad atmosférica (-)

F = factor de vista entre el objetivo y la llama(-)

E = potencia emisiva promedio de las llamas (kW/m²)

7.3.3 Potencia emisiva

La potencia emisiva es la cantidad de calor emitida en forma de radiación por unidad de superficie de la llama. Asumiendo que la llama se comporta como un cuerpo gris, se puede calcular por medio de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma \varepsilon (T_f^4 - T^4) \quad (7.6)$$

Donde,

σ = constante de Stefan-Boltzmann (kW · m⁻² T⁻⁴)

ε = emisividad (-)

T_f = temperatura de la superficie radiante de la llama (K)

T = temperatura ambiente (K)

La ecuación anterior se puede escribir de manera simplificado como:

$$E = \varepsilon \sigma T_f^4 \quad (7.7)$$

Sin embargo, calcular la temperatura de la superficie radiante de la llama (T_f) y la emisividad (ε) resulta muy complicado debido a la naturaleza transitoria del fenómeno. Por ello generalmente se utilizan procedimientos empíricos para estimar el valor de la potencia emisiva y los valores experimentales obtenidos de los diferentes tipos de incendios [Casal, 2008].

7.3.4 Factor de vista

El factor de vista se puede definir como la fracción de la energía total emitida desde una fuente (llamas) hacia un receptor (objetivo). Los factores de vista

entre dos superficies se determinan en función de la geometría, es decir, de su forma, dimensiones y disposición de una respecto a la otra. Representan la fracción de la energía radiante que es emitida por la superficie emisora e interceptada por la superficie receptora. Así, cuando el factor de vista es igual a la unidad implica que la llama cubre completamente el campo de visión de la superficie receptora.

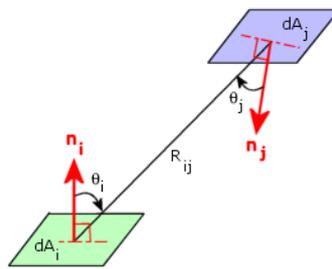


Figura 7.4 Representación del emisor y receptor para el cálculo del factor de vista.

En el caso de las dos superficies infinitesimales \$dA_i\$ y \$dA_j\$, el factor de vista \$dF_{ij}\$ está dado por:

$$dF_{ij} = \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R_{ij}^2} dA_j \tag{7.8}$$

En donde \$\theta_i\$ y \$\theta_j\$ son los ángulos entre las normales unitarias a las áreas y la línea \$R_{ij}\$ que conecta las dos áreas. Si las dos áreas son finitas, entonces el factor de vista está dado por:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_1} \iint_{A_1 A_2} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R_{ij}^2} dA_i dA_j \tag{7.9}$$

Esta integración generalmente se resuelve numéricamente y también puede ser reducida a una simple integral con solución analítica (Chamberlain, 1987).

7.3.5 Transmisividad atmosférica

La transmisividad atmosférica toma en cuenta que la radiación emitida es parcialmente absorbida por el aire presente entre la llama y el objeto receptor. El valor de la transmisividad depende de la distancia entre las llamas y el objetivo. Se puede estimar a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\tau = 1.53(P_w \cdot d)^{-0.06} \quad \text{para } P_w \cdot d < 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (7.10-a)$$

$$\tau = 2.02(P_w \cdot d)^{-0.09} \quad \text{para } 10^4 \leq P_w \cdot d \leq 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (7.10-b)$$

$$\tau = 2.85(P_w \cdot d)^{-0.12} \quad \text{para } P_w \cdot d < 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (7.10-c)$$

donde

P_w = presión parcial del agua en la atmósfera (N m^{-2})

d = distancia entre la superficie de la llama y el receptor.

Y la presión parcial puede calcularse con:

$$P_w = P_{wa} \frac{H_R}{100} \quad (7.11)$$

donde,

P_{wa} = presión de vapor del agua a temperatura ambiente (N m^{-2})

H_R = humedad relativa atmosférica (%).

La presión vapor del agua puede ser obtenida a partir de la temperatura atmosférica (K):

$$\ln P_{wa} = 23.18986 - \frac{3816.42}{(T - 46.13)} \quad (7.12)$$

El coeficiente de transmisividad atmosférica también puede calcularse utilizando la expresión propuesta por Raj (1982):

$$\tau = \log\left(14.1 H_R^{-0.108} d^{-0.13}\right) \quad (7.13)$$

7.4 Modelos de incendio de una nube de vapor inflamable

7.4.1 Einsenberg et al. (1975) y Fay y Lewis (1976)

Entre los modelos empíricos basados implícitamente en el supuesto de dispersión atmosférica gaussiana para estimar la concentración de combustible dentro de la nube o sus dimensiones, se encuentra el modelo propuesto por Einsenberg et al. (1975). El modelo de radiación térmica empleado se basa en la ecuación de Stefan-Boltzmann, la cual es muy sensible a la temperatura de la llama que se estime y ésta generalmente es difícil de determinar por la gran variación que se presenta durante el incendio.

El modelo estima un volumen y área de radiación, así como un tiempo de duración efectiva del incendio, utilizando un modelo de dispersión para determinar la isopleta que define el LFL asumido para esta zona. El uso de cualquiera de estas isopletas para definir los efectos de radiación térmica requiere los supuestos de que el proceso de combustión no es intenso y es de corta duración, y que toda la expansión térmica de la nube ocurre verticalmente debido a la flotabilidad.

También se encuentra el modelo desarrollado por Fay y Lewis (1976), quienes se basaron en experimentos a pequeña escala para la combustión no estacionaria de nubes de vapor combustibles no confinadas. Estos autores propusieron una serie de expresiones para calcular el diámetro máximo, la altura de las llamas y el tiempo requerido para completar la combustión. El modelo asume que la llama de difusión turbulenta no estacionaria tiene la forma de una bola de fuego (fireball). Las correlaciones presentadas por estos autores están validadas por experimentación a muy pequeña escala, con hasta 200 cm³ de diversas sustancias (metano, etano y propano). No obstante, los experimentos realizados con propano no mostraron evidencia de una bola de fuego. Al respecto existe un acuerdo general sobre las conclusiones de los experimentos realizados, según el cual un incendio repentino no se convierte en una bola de fuego excepto en la situación inusual que surgiría a partir de

una liberación masiva de gas combustible aunada a una ignición anticipada. Además, las pruebas realizadas por Shell con GNL y GLP, así como pruebas anteriores llevadas a cabo con nubes procedentes de vertidos de LNG, tampoco confirman la propuesta de Fay y Lewis.

7.4.2 Raj y Emmons (1975), CCPS (2010)

Siendo este uno de los modelos más conocidos y ampliamente usados, tiene su origen en otro desarrollado anteriormente por Steward para incendios de balsa. Un esquema del mismo puede verse en la Fig. 7.4. Entre los supuestos en que se basa están los siguientes:

1. La geometría de la nube de gas combustible es bidimensional.
2. La combustión es controlada por convección natural.
3. La velocidad de propagación de la llama es relativamente constante.
4. La profundidad de la nube es uniforme y no es afectada por la llama.
5. La variación de la profundidad de la nube de gas en la zona precombustible es lineal.
6. La correlación turbulenta de la llama en estado estacionario, para la relación entre la altura de la llama visible y la anchura de la base, es válida.

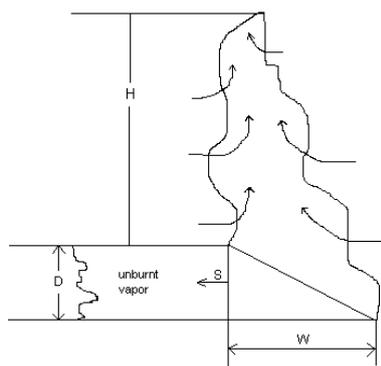


Fig.7.4 Representación de una nube de vapor inflamable según el modelo de Raj y Emmons.

Aplicando valores obtenidos experimentalmente para la razón entre la altura y la anchura de la llama y la velocidad de propagación de ésta, los autores obtuvieron la siguiente ecuación para determinar la anchura de la llama en función del tiempo:

$$\frac{2u_f t}{\delta} = \left(\frac{F_f}{F_r}\right)^{1/3} \left\{ \frac{\pi}{3\sqrt{3}} + \frac{2}{3} \ln \left[\frac{\sqrt{V^2 + V + 1}}{(1-V)} \right] - \frac{2}{\sqrt{3}} \tan^{-1} \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \left(V + \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \quad (7.14)$$

$$y \quad V = \left[\left(\frac{F_r}{F_f}\right)^{1/3} \cdot \frac{W}{\delta} \right]^{1/2} \quad (7.15)$$

donde:

$F_f = u_w^2 / g\delta =$ número de Froude de la llama (-)

$F_r =$ número de Froude = U_o^2 / gW (-)

$u_f =$ velocidad de propagación de la llama (m/s)

$g =$ aceleración de la gravedad (m/s²)

$\delta =$ grosor de la nube de gas sin quemar (m)

$U_o =$ velocidad de arrastre en la base de la llama (m/s)

$W =$ anchura de la llama (m).

Raj y Emmons estimaron el número de Froude en base a los datos de Steward de altura de la llama para llamas de difusión de hidrocarburos. El análisis indicó la siguiente relación para la altura de la llama en una fuente de calor lineal:

$$\left(\frac{h_f}{W} \right)_{\text{estequiométrica}} = 4.98 N_{co}^{1/3} \quad (7.16)$$

donde N_{co} es el número de combustión, definido como:

$$N_{co} = F_r \frac{\rho_o'^2 w [r^* + w / \rho_o']^2}{(1-w)^3} \quad (7.17)$$

siendo:

ρ_o' = relación de densidades = densidad del vapor en la base de la llama/
densidad del aire (-)

r^* = relación estequiométrica de la mezcla aire-combustible (-)

w = relación de expansión volumétrica inversa, que es definida como sigue:

$$w = \frac{1}{(1 + Q_c / r^* C_p T)} \quad (7.18)$$

siendo

Q_c = calor de combustión ($J \cdot kg^{-1}$)

C_p = calor específico ($J \cdot kg^{-1} K^{-1}$)

T = temperatura ambiente (K).

La anchura máxima de la nube de vapor combustible está dada por:

$$\xi = \frac{W}{\delta} = (F_r / F_f)^{-1/3} \quad (7.19)$$

Datos experimentales obtenidos con nubes de gas combustibles de metano y propano indican que la anchura de la llama varía conforme la nube se propaga de regreso al punto de la fuga. Se ha observado que la anchura de la llama se incrementa en función del tiempo, hasta que toda la nube es consumida. A partir de observaciones experimentales Raj y Emmon establecieron una relación casi proporcional entre la altura de la llama visible h_f y la anchura de la base de la misma, $h_f / W = 2$. Este factor empírico relaciona la altura de la llama visible con la velocidad de combustión u_w mediante un balance de masa para la zona triangular delimitada por el frente de llama y la base de la llama:

$$h_f = 20d^* \left[\frac{u_f^2}{gd^*} \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right) \frac{w(r^*)^2}{(1-w)^3} \right]^{1/3} \quad (7.20)$$

donde

$$u_f = 2.3u_w$$

d^* = profundidad de la nube (m)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

h_f = altura de la llama visible (m)

ρ_a = densidad del aire (kg/m³)

ρ_0 = densidad de la mezcla aire-combustible (kg/m³).

Es de notar que el valor numérico 20 que aparece en el cálculo de la altura de la llama corresponde a un coeficiente empírico, originalmente obtenido de los datos de incendios de charco procedentes de experimentos realizados a escala de laboratorio.

La aplicación de la expresión dada por Raj para el valor inverso de la expansión volumétrica (w) resulta algo compleja, así que CCPS (Center for Chemical Process Safety, 1994) ha propuesto una modificación para dicho valor en el modelo de Raj, dada por la siguiente expresión:

$$w = \frac{\phi - \phi_{st}}{\alpha^* (1 - \phi_{st})} \quad \phi > \phi_{st} \quad (7.21)$$

$$w = 0 \quad \phi \leq \phi_{st}$$

siendo:

α^* = relación de expansión a presión constante para la combustión estequiométrica (-)

ϕ = composición de la mezcla aire-combustible (relación de volumen de combustible) (-)

ϕ_{st} = composición de la mezcla estequiométrica (relación de volumen de

combustible) (-).

Como se puede observar, el modelo se basa principalmente en suponer una concentración homogénea en la nube y el estado estacionario de la misma. El modelo requiere el conocimiento de la velocidad de propagación, la cual es calculada mediante una correlación empírica basada en los datos obtenidos de la experimentación de una serie de derrames de GNL y GLP. Dicha correlación asume que la velocidad de propagación de la llama es proporcional al viento; no obstante, no tiene en cuenta los efectos de la dispersión ni la influencia de factores como la rugosidad del terreno, la transferencia de calor a la nube o la turbulencia inducida por el modo de fuga.

También es de interés señalar que al modelar la geometría de la llama estos autores recurren a correlaciones empíricas, basadas en experimentos a pequeña escala con el combustible puro en lugar de mezclas de combustible y aire y que por tanto necesitan ser revisadas.

7.4.3 Cracknell y Carsley (1997)

Estos autores desarrollaron cálculos para dos escenarios posibles: incendios de llamarada y bolas de fuego. Respecto a los incendios de llamarada, el modelo calcula la altura de las llamas suponiendo que la misma en una posición determinada se relaciona con la concentración de material inflamable de la nube en ese punto. También señalan que, para los incendios de llamarada, la velocidad de la llama es función de la velocidad de la llama laminar y de la temperatura del gas.

El cálculo propuesto por Cracknell y Carsley se basa en las siguientes suposiciones:

- El escape de los productos de la combustión ocurre sólo verticalmente.
- Cada mol de material inflamable arrastra una cantidad estequiométrica de aire.
- La mezcla se quema a la temperatura adiabática de la llama.

Para calcular la altura de la llama se determina primero la masa de combustible de la nube por unidad de superficie, a partir de un modelo de dispersión; la altura h_f de la llama está dada por:

$$h_f = V_{prods} \times M_{area} \quad (7.22)$$

En donde V_{prods} es el volumen de los productos de la combustión (m^3 / kg) y M_{area} es la masa de combustible (antes de la combustión) en la nube (kg/m^2).

Al igual que ocurre en los modelos antes mencionados, este modelo no tiene en cuenta aspectos como el perfil de concentración a través de la nube de vapor o parámetros que afectan a la dispersión. Respecto a la velocidad de la llama, el que se asuma un comportamiento laminar contradice la realidad, ya que la combustión es afectada por un grado significativo de turbulencias, como muestran los experimentos realizados con propano, los cuales dan velocidades medias del orden de 12 m/s (Mizner y Eyre, 1982); también se ha observado de experimentos a escala que la velocidad de combustión en llamas de premezcla es más rápida en los bordes.

Kumar et al. (2001)

Kumar et al. (2001) desarrollan un modelo numérico que predice la altura máxima de la llama, basado en una extensión del trabajo realizado por Raj y Emmons (CCPS, 1994). Dicho modelo incorpora las variables de velocidad del viento, temperatura, densidad y diferentes clases de estabilidad atmosférica. Las predicciones del modelo son comparadas con los resultados del modelo analítico citado en CCPS (1994), resultando que los valores de la altura máxima de la pluma predicha por CCPS son mucho mayores que la altura máxima de la pluma predicha por el modelo numérico de Kumar et al. en condiciones similares.

El modelo numérico considera las siguientes suposiciones:

- 1.- Una geometría bidimensional.

- 2.- La combustión de la nube inflamable es controlada por convección natural.
- 3.-La profundidad de la nube de vapor es pequeña en comparación con la altura de la llama.
- 4.-La profundidad de la nube de vapor es uniforme y no se ve afectada por el fuego, creando un flujo de vapor y aire dentro de la región de la nube.
- 5.- La anchura de la fuente de combustible y la velocidad de liberación del mismo son constantes.
- 6.-El combustible se libera continuamente de la fuente.

Algunas de las incertidumbres encontradas en este modelo coinciden con las ya mencionadas para el modelo de Raj y Emmons. Una de éstas es la suposición de concentración uniforme. Esto resulta de considerar un problema idealizado, en el cual un frente de llama plano se propaga horizontalmente a través de una nube de vapor uniforme de profundidad finita y concentración molar fija en el suelo. Si bien es cierto que en una nube inflamable la composición varía continuamente a través de la misma, esta suposición ayuda a simplificar el proceso de cálculo.

7.5 Altura de la llama y radiación térmica en los incendios de llamarada

En el presente estudio se propone un modelo relativamente sencillo, basado en la dispersión de una nube de gas en función del tipo de combustible liberado y de las condiciones atmosféricas presentes.

A partir de la serie de pruebas desarrolladas a gran escala, se muestra que la nube al dispersarse puede adquirir una forma de pluma o bien una forma de abanico, este último caso generalmente a velocidades de viento bajas. La Fig. 7.5 muestra las formas que adquieren las nubes producto de las fugas continuas de propano y de GNL. Esto ha conducido a la definición de una forma semi-elipsoidal para la nube, que determina, mediante su proyección sobre el

suelo, el área cubierta por el fuego.

Una vez que la nube inflamable se ha definido, la evolución del incendio dependerá de la ubicación de la fuente de ignición. Esta fuente se localiza generalmente en el contorno de la nube (este contorno está definido por el límite inferior de inflamabilidad o, si se toma un margen de seguridad, por la mitad de este valor). Después de la ignición, la llama se desplazará a través de la nube, de vuelta hacia el punto de escape.

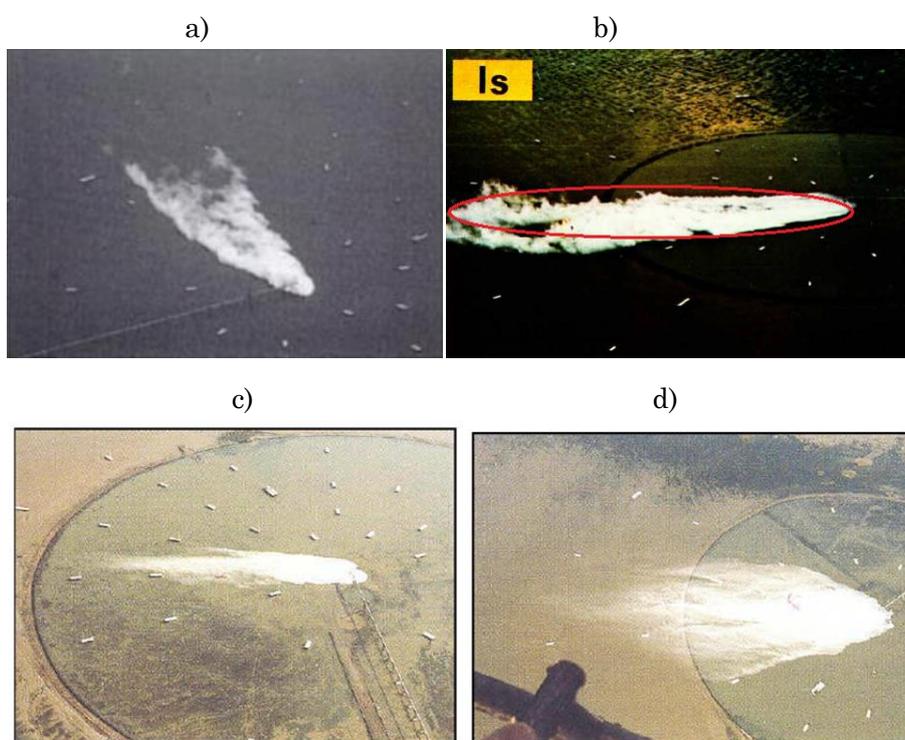


Fig.7.5 Fugas continuas de propano: a) Prueba 46 y b) Prueba 54. Fugas continuas de GNL: c) Prueba 22 y d) Prueba 54. Desarrolladas en Maplin Sands (Blackmore et al., 1983; Puttock et al, 1983)

La altura de las llamas medida en las pruebas de Maplin Sands (realizadas con propano y metano) se presenta en la tabla 7.1. De estas pruebas existen pocos datos referentes a la altura de la nube visible; no obstante, Puttock et al.

(1983) reportan que durante la prueba 54 con propano la altura de la nube fue muy baja, de 1 a 1.5 m, e igualmente refieren que la altura alcanzada por las llamas fue baja.

Tabla 7.1 Dimensiones de las nubes en las pruebas de Maplind Sands

Combustible	Propano (LPG)	Metano (LNG)
Altura de la nube	1-1.5 m	-
Altura de la llama	9-12 m	7-15 m

Las pruebas de Coyote se desarrollaron con velocidades de viento comprendidas entre 4.6 y 9.7 m/s y en condiciones de estabilidad atmosférica variando de inestable a neutra. La tabla 7.2 muestra las dimensiones de las nubes durante esta serie de pruebas. Además de la información disponible sobre las pruebas experimentales antes mencionadas, se han revisado algunos vídeos de incendios de llamarada, realizados en un área de pruebas, (de los cuales desafortunadamente no existe ningún reporte o referencia adicional más que los videos mismos) en los que el material involucrado fue gas natural (GNL). De estas observaciones se ha visto que la altura de la nube formada tras el escape está en un rango de 2 a 5 metros y la altura de las llamas del incendio de llamarada en un rango de 10 a 30 m aproximadamente.

Tabla 7.2 Dimensiones de las nubes en las pruebas de Coyote

Combustible	Propano (LPG)	Metano (LNG)
Altura de la nube	-	3-8 m
Altura de la llama	-	16-40 m

El tamaño de las llamas dependerá del tamaño de la nube, siendo siempre mayor el tamaño de las llamas. Se ha observado de los diversos experimentos de nubes de vapor inflamables, que la altura de las llamas aumenta en un factor proporcional a las dimensiones de la nube. Esto se explica en parte por la

expansión debida a la combustión, que puede desplazar los vapores inflamables, provocando un mayor tamaño de las llamas visibles.

En base a los datos reportados y observados, se ha propuesto la siguiente expresión para la altura de la llama en función de la altura de la nube visible:

$$h_f = k h_c \quad (7.23)$$

donde

h_c = altura de la nube (m)

k = constante que depende del tipo de combustible (5 para nubes de GNL) (-).

El valor de la constante k es obtenido empíricamente a partir de las observaciones realizadas en las pruebas de Coyote y de algunos vídeos de incendios de llamarada realizados con GNL. Por lo que el proponer un valor de k para otro tipo de combustible requiere necesariamente de experimentación, para validar este valor.

El tamaño y la forma de la nube dependerá de algunos factores, como pueden ser la velocidad escape, las condiciones meteorológicas y el material (por ejemplo, la altura de una nube de GNL será menor que el de una nube de gasolina).

No queda más remedio que realizar una serie de simplificaciones para obtener una expresión sumamente sencilla de la altura de la llama. Entre ellos, asumir el estado estacionario de la nube de vapor así como una composición homogénea en la zona inflamable de la misma.

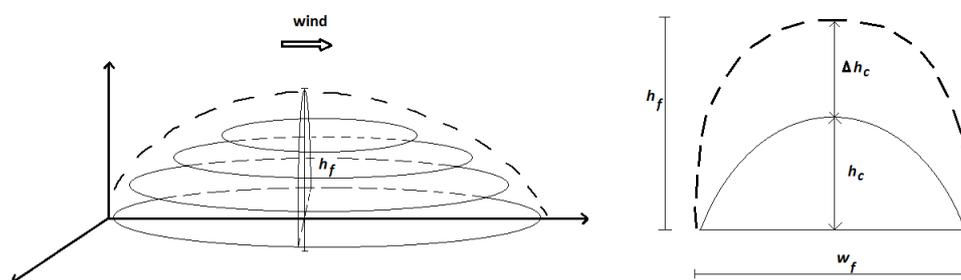


Fig. 7.6 Modelo propuesto para la altura de las llamas en el incendio de llamarada.

Para estimar la intensidad de la radiación térmica en función de la distancia, se puede aplicar el conocido modelo de llama sólida. Esto implica el conocimiento del factor de vista y de la potencia emisiva (E) de las llamas. El factor de vista se puede estimar a partir de expresiones complejas o bien atribuyendo una forma más simple a las llamas.

El poder emisivo es función de la luminosidad de la llama, que a su vez depende del tipo de combustible y del tipo de incendio. En la literatura se pueden encontrar los siguientes valores para incendios de nubes de gas: en las pruebas de Maplin Sands (Blackmore et al, 1982) se registró una potencia emisiva de $173 \pm 26 \text{ kW m}^{-2}$, mientras que en las pruebas de Coyote (LLNL, 1983) se registraron valores de $220\text{-}280 \text{ kW m}^{-2}$; finalmente, durante las pruebas de China Lake (Mudan, 1988) se obtuvo un valor de 220 kW m^{-2} . En cuanto al flujo de radiación dentro de la nube, se esperarían valores del orden de $150\text{-}340 \text{ kW m}^{-2}$, ya que si bien la duración de este tipo de incendios resulta muy corta, la incidencia de las llamas es muy alta.

7.6 Cálculo de la altura de la llama en el incendio de una nube de gas (GNL)

Con el fin de comparar los resultados generados al aplicar el modelo de CCPS (Raj et al., 1975) y el modelo propuesto en el presente estudio, se han utilizado dos experimento de la serie de pruebas realizada por Gaz de France (Daish et al., 2001).

El primer caso corresponde a la prueba no. 7, obtenida de la fuga y combustión de GNL. En esta prueba la velocidad del viento fue muy baja, de 0.9 m/s. El escape de GNL tuvo lugar en un espacio abierto. La temperatura ambiente era de 16 °C, la humedad relativa era del 58%. La altura de las llamas fue de alrededor de 15-16 m durante el flash fire, aunque la altura máxima de las mismas registrada fue de 26 m, correspondiente al fireball que tuvo lugar (Daish et al., 2001).

Para poder calcular la altura de la llama con la expresión propuesta ($h_f = k h_c$) se ha utilizado un valor aproximado de la altura de la nube de 3 m, obtenido a partir de las imágenes y medidas de referencia disponibles (Fig. 7.8).

De igual forma, para determinar la altura de la llama mediante el modelo de CCPS se necesita conocer también diversos parámetros, como la concentración del combustible en la nube, el valor inverso de la expansión volumétrica (w), así como la velocidad del viento, que influye significativamente en la ecuación propuesta. La tabla siguiente muestra la altura de la llama calculada a partir de ambos modelos.

Tabla 7.3 Resultados del cálculo de la altura de llama en la prueba 7 de Gaz de France

Modelo	Altura de la llama (m)
CCPS (Modificado de Raj, 1975)	
$h_f = 20d^* \left[\frac{u_f^2}{gd^*} \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right) \frac{w(r^*)^2}{(1-w)^3} \right]^{1/3}$	18
Propuesto $h_f = k h_c$	15



Fig.7.8 Altura de la nube (h_c) y altura de la llama (h_f) de la prueba 7 de Gaz de France obtenida de la fuga y combustión de GNL (Daish et al., 2001); el recuadro inferior a la derecha corresponde a la prueba no. 6, se ha incluido como referencia de la altura (h_f).

Como se puede observar, en este primer caso el valor obtenido mediante el modelo del CCPS para la altura de llama y el calculado con la expresión propuesta (con el correspondiente valor de la constante k para GNL), son

valores cercanos al registrado durante la prueba, de alrededor de 15.3 m.

El siguiente caso corresponde a la prueba no. 5 de la misma serie de experimentos desarrollados por Gaz de France (Fig. 7.9). En esta prueba la velocidad del viento fue baja, de 1.6 m/s. La temperatura ambiente era de 4.4 °C y la humedad relativa del 57 %. La altura de las llamas registrada fue de alrededor de 12 m durante el flash fire, aunque nuevamente llamas de mayor altitud (24 m) se desarrollaron por el fireball que tuvo lugar (Daish et al., 2001).



Fig.7.9 Altura de la nube (h_c) y altura de la llama (h_f) de la prueba 5 de Gaz de France obtenida de la fuga y combustión de GNL (Daish et al., 2001); el recuadro inferior a la derecha corresponde a la prueba no. 6, se ha incluido como referencia de la altura (h_f).

Tabla 7.4 Resultados del cálculo de la altura de llama en la prueba 5 de Gaz de France

Modelo	Altura de la llama (m)
CCPS (Modificado de Raj, 1975)	
$h_f = 20d^* \left[\frac{u_f^2}{gd^*} \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right) \frac{w(r^*)^2}{(1-w)^3} \right]^{1/3}$	26.5
Propuesto	
$h_f = k h_c$	12.5

Como se puede observar de la tabla 7.4, en este segundo caso el valor obtenido por CCPS para la altura de llama es mayor que el calculado con la expresión propuesta, siendo este último muy cercano al registrado durante la prueba de alrededor de 12 m.

Adicionalmente decidimos realizar una comparación con una de las pruebas desarrollada en China Lake en 1979, ya que durante estas pruebas la velocidad del viento fue mayor, de hasta 7.2 m/s, en comparación con las realizadas por Gaz de France en 2000. El escape de GNL tuvo lugar en un espacio abierto. La temperatura ambiente osciló entre 29 y 39 °C, la humedad relativa fue de 22-33%. La altura de las llamas, relativamente bajas, fue de alrededor de 9-11 m (Mudan et al., 1979). Las pruebas fueron esencialmente repeticiones, por lo que el volumen y la duración del derrame no tuvieron una variación significativa.

A partir de la Fig. 7.10 se ha obtenido una altura aproximada de la nube de 3 m; en esta figura se puede apreciar la flecha que señala la altura máxima de la nube justo antes de la ignición, así como la evolución de otros parámetros relacionados con el desarrollo de la nube de gas. La altura de las llamas para la prueba 17 fue de 9 m según lo reportado por Mudan et al. (1979). La Tabla 7.5 muestra los resultados obtenidos para la altura de la llama generada por la

combustión de la nube inflamable en la prueba 17 de China Lake a partir del modelo del CCPS y de la expresión que proponemos.

Como se puede observar en esta tabla, la diferencia entre el valor obtenido por CCPS para la altura de llama y el calculado con la expresión propuesta es muy significativa, de alrededor de 57 m, observándose que la sobreestimación del CCPS para la altura de la llama (6 veces más de la registrada) es mucho mayor que la correspondiente a la expresión aquí propuesta. Esto muestra claramente la gran influencia del viento sobre la expresión utilizada por CCPS y basada en el trabajo de Raj et al. (1975), ya que al aumentar dicha velocidad también lo hace la altura de la llama pero en manera desproporcionada, llevando a una sobreestimación mucho mayor.

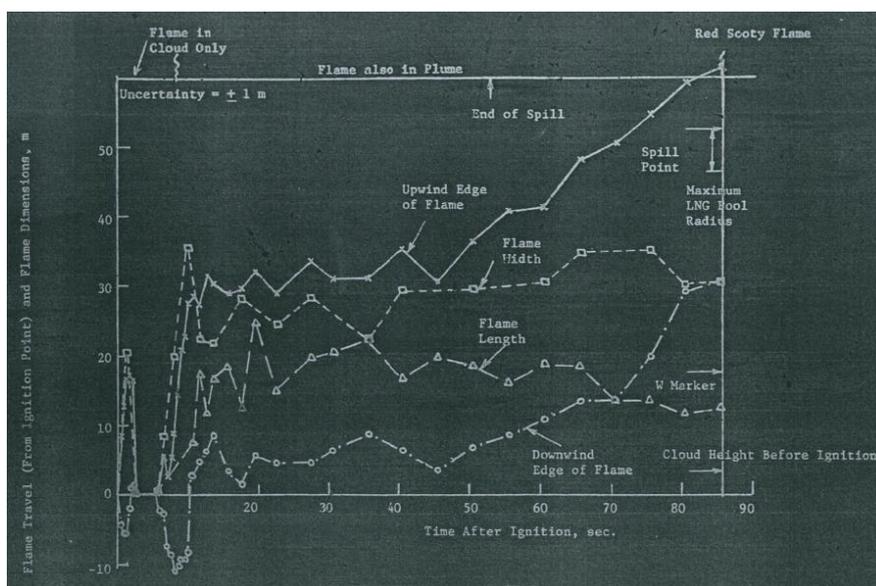


Fig. 7.10. Desarrollo de la nube de vapor en la prueba 17 de China Lake: 5.5 m³ fugados en 78 s; velocidad del viento: 7.2 m/s (Mudan et al., 1979).

Tabla 7.5 Resultados de los cálculos realizados para determinar la altura de la llama en la prueba 17 de China Lake a partir de CCPS y una expresión propuesta.

Modelo	Altura de la llama (m)
CCPS (Modificado de Raj, 1975)	
$h_f = 20d^* \left[\frac{u_f^2}{gd^*} \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right) \frac{w(r^*)^2}{(1-w)^3} \right]^{1/3}$	72.4
Propuesto	
$h_f = k h_c$	15

7.7 Cálculo aproximado de la radiación térmica en el incendio de una nube de gas (GNL)

Una vez producida la ignición, puede ser de interés el cálculo en función del tiempo de la radiación incidente sobre una superficie vertical situada a una distancia determinada del centro de la nube de gas inflamable. En esta sección se compararán los resultados de dicho cálculo tras aplicar el modelo de CCPS (Raj et al., 1975) y el modelo propuesto para la altura de llama. Con esta finalidad se ha utilizado el procedimiento propuesto por CCPS realizando algunas simplificaciones; entre ellas, se ha asumido que el frente de propagación de la llama es un plano que se desplaza a través de una nube de vapor en estado estacionario y de composición homogénea.

La aplicación del modelo de llama sólida requiere el conocimiento del factor de vista y de la potencia emisiva de la llama. En este caso, el factor de vista se estima suponiendo una forma simple para las llamas, asumiendo que el emisor es un plano vertical.

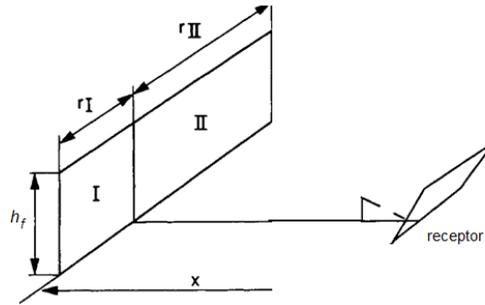


Fig 7.11 Factor de vista de una superficie plana vertical.

Para cada superficie:

$$h_r = 2h_f/W$$

$$X_r = 2X/W$$

donde

h_f = altura de la llama (m)

X = distancia entre el objetivo y la llama (m)

W = anchura de la llama (m).

Para un objetivo horizontal situado a nivel del suelo, el factor de vista es dado por:

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{X_r} \right) - \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + X_r^2}} X_r \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{h_r^2 + X_r^2}} \right) \right] \quad (7.24)$$

Y para una superficie vertical:

$$F_v = \frac{1}{2\pi} \left[h_r \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + X_r^2}} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{h_r^2 + X_r^2}} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{1 + X_r^2}} \right) \tan^{-1} \left(\frac{h_r}{\sqrt{1 + X_r^2}} \right) \right] \quad (7.25)$$

Y el factor de vista máximo es:

$$F_t = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \quad (7.26)$$

De acuerdo con CCPS (2010) la llama es asumida como un plano que se propaga en la dirección del viento (Fig. 7.12) cuya anchura se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W = 2\sqrt{r^2 - (r - u_w t)^2}$$

donde

W = anchura de la llama (m)

r = distancia al centro de la nube

t = tiempo

u_w = velocidad del viento.

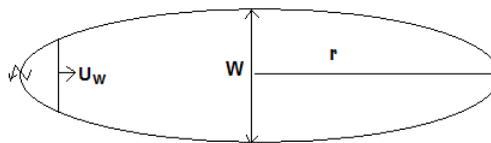


Fig. 7.12 Forma y área de propagación de la llama modificada de CCPS (2010).

Retomando la prueba no. 7 de Gaz de France, obtenida de la fuga y combustión de GNL, se estima una nube de alrededor de 30 m de longitud. A continuación se presentan los resultados obtenidos al calcular la radiación térmica recibida por un objetivo a diferentes tiempos desde la ignición (t) y distancias (X). Por ejemplo, a los 2 segundos la anchura de la llama (W) sería de 20.7 m y la radiación térmica (I) emitida por la misma aproximadamente de 18.7 kW/m² a una distancia entre el objetivo y las llamas de 45.9 m, de acuerdo con la expresión utilizada por CCPS para el cálculo de la altura de la llama (Tabla 7.6). En la Tabla 7.7 se presentan los resultados para esta misma prueba y la

gráfica correspondiente, pero en este caso se ha utilizado la nueva expresión propuesta para el cálculo de la altura de la llama.

Tabla 7.6 Resultados del cálculo de la radiación térmica recibida por un objetivo a diferentes instantes de tiempo (t) y distancia (X) a partir de la prueba no. 7 de Gaz de France (altura de la llama calculada por CCPS)

t (s)	W (m)	X (m)	h_r	X_r	F_t	τ	I (kW/m ²)
0	0.00	50					0
2	20.69	45.86	1.75	4.43	0.10	0.75	18.71
4	26.82	41.72	1.35	3.11	0.15	0.76	28.11
6	29.55	37.58	1.22	2.54	0.19	0.76	36.55
8	29.84	33.44	1.21	2.24	0.23	0.77	44.57
12	22.64	25.16	1.60	2.22	0.28	0.78	55.20
14	10.87	21.02	3.33	3.87	0.19	0.79	37.93
14.49	0.83	20.01	43.75	48.38	0.02	0.80	3.23

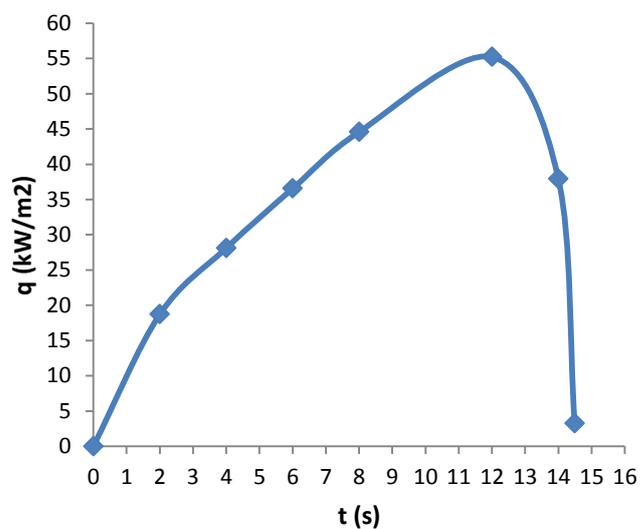


Fig.13 Radiación térmica en función del tiempo a partir de la prueba no. 7 de Gaz de France con la altura de la llama calculada por CCPS (2010), a una distancia incidente de 50 m.

Tabla 7.7 Resultados del cálculo de la radiación térmica recibida por un objetivo a diferentes instantes de tiempo (t) y distancia (X) a partir de la prueba no. 7 de Gaz de France (altura de la llama calculada por expresión propuesta)

t(s)	W(m)	X(m)	h_r	X_r	F_t	τ	I (kW/m ²)
0	0.00	50					0
2	20.69	45.86	1.45	4.43	0.09	0.75	15.95
4	26.82	41.72	1.12	3.11	0.13	0.76	24.07
6	29.55	37.58	1.02	2.54	0.17	0.76	31.48
8	29.84	33.44	1.01	2.24	0.20	0.77	38.68
12	22.64	25.16	1.32	2.22	0.25	0.78	49.04
14	10.87	21.02	2.76	3.87	0.17	0.79	34.35
14.49	0.83	20.01	36.28	48.38	0.01	0.80	2.94

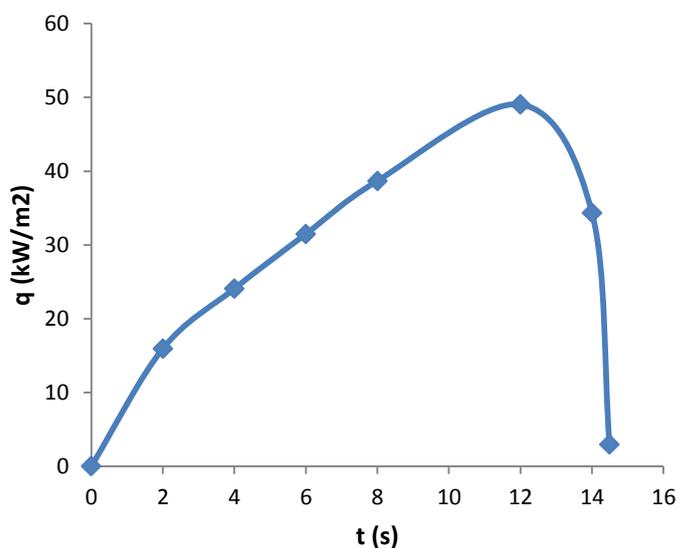


Fig.7.14 Radiación térmica en función del tiempo a partir de la prueba no. 7 de Gaz de France con la altura de la llama calculada por expresión propuesta, a una distancia incidente de 50 m.

A continuación se presentan de manera gráfica los resultados obtenidos para el cálculo de la radiación térmica en función del tiempo de la prueba no. 5 de Gaz de France (Fig. 7.15) y los resultados de la prueba no.17 de China Lake (Fig.

7.16). En estas pruebas las condiciones presentes, especialmente el aumento en la velocidad del viento, evidencian las diferencias en los resultados obtenidos cuando se utiliza la expresión propuesta para el cálculo de la altura de la llama y la del CCPS (2010).

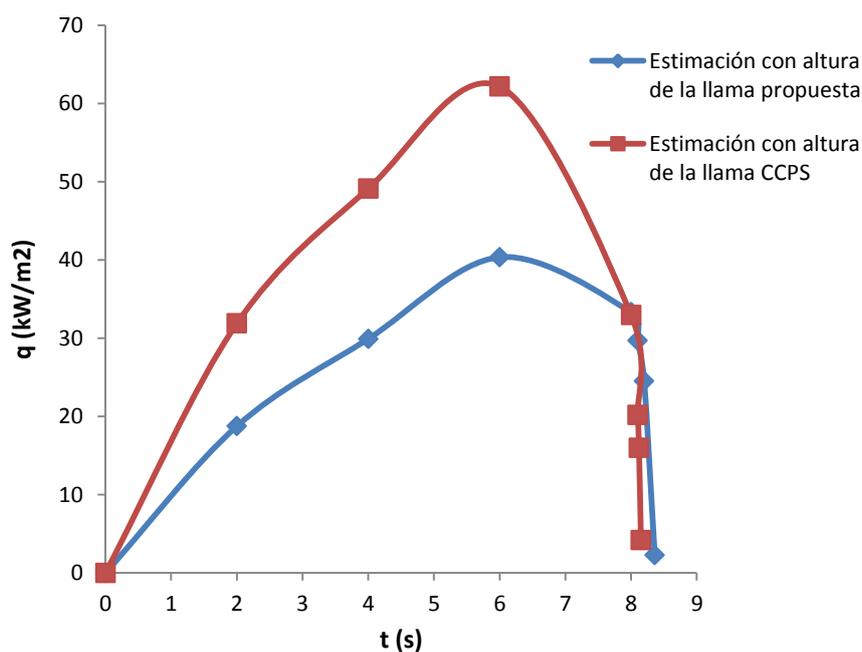


Fig.7.15 Radiación térmica como función del tiempo a partir de la prueba no. 5 de Gaz de France con la altura de la llama calculada por la expresión propuesta y con la obtenida con CCPS (2010), a una distancia incidente de 50 m.

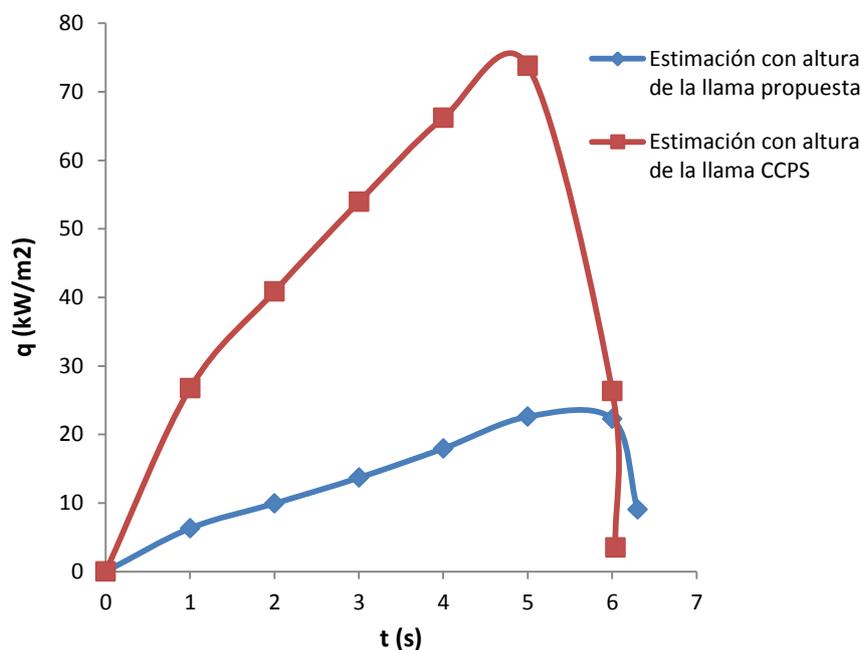


Fig.7.16 Radiación térmica como función del tiempo a partir de la prueba no. 17 de China Lake con la altura de la llama calculada por la expresión propuesta y con la obtenida con CCPS (2010), a una distancia incidente de 50 m.

Se puede observar especialmente en este último caso que la metodología propuesta por CCPS hace una sobreestimación de la radiación térmica mucho mayor, atribuible en gran parte a la velocidad del viento factor que, como ya se ha mencionado, influye significativamente en la expresión propuesta por Raj et al. (1975). En cambio, la altura de llama obtenida con la expresión propuesta (con el correspondiente valor de la constante k para GNL) es más cercano al valor registrado durante la prueba, presentando una sobreestimación mucho menor.

Conclusiones

1. El análisis bibliográfico ha puesto de manifiesto que los incendios de llamarada son muy mal conocidos. Asimismo, se ha encontrado muy poca información relativa a experimentación sobre los mismos desarrollada a gran escala.

2. Tanto el GLP como el GNL se caracterizan por un mercado claramente en expansión y por un consumo basado en múltiples instalaciones de almacenamiento y en un importante transporte. La posibilidad de un escape de gas y de la posterior formación de una nube inflamable es por tanto considerable.

3. El análisis histórico realizado sobre 176 casos de incendio de llamarada ha permitido obtener información sobre las causas, orígenes y consecuencias de los incendios de llamarada. Las principales conclusiones de dicho análisis son las siguientes:

- Se ha constatado que la substancia más frecuentemente involucrada ha sido el GLP (41% de los casos); entre GLP y GNL suman el 48% de los accidentes analizados.
- En las plantas de proceso es donde ocurren con mayor frecuencia (36% de los casos), esencialmente en recipientes de procesos.
- En el 64% de los accidentes analizados murieron entre 1 y 10 personas. En un 32% de los accidentes el incendio de llamarada fue seguido de otro accidente.

4. En caso de escape, un aspecto importante es la gestión de la emergencia una vez que la nube ha alcanzado el estado estacionario (el tiempo para alcanzar

este estado depende de la velocidad del viento, pero suele ser muy corto). En esta situación, cualquier información acerca de la posición de la región inflamable de la nube puede ser muy útil.

5. Se ha propuesto un factor de seguridad de dispersión (DSF) como una herramienta para ayudar a la toma de decisiones bajo estas circunstancias. El factor DSF es la relación entre la distancia alcanzada por el límite inferior de inflamabilidad y la distancia alcanzada por la nube visible. Los resultados obtenidos para el DSF con el código DEGADIS concuerdan bastante bien con la evidencia de los datos experimentales a gran escala.

Este factor es fuertemente dependiente de la humedad relativa del aire. Si la humedad relativa es alta, la nube será visible más allá de la región inflamable ($DSF < 1$). Si es baja, la región inflamable se extiende más allá del contorno de la nube visible ($DSF > 1$). En este último caso, la situación es potencialmente más peligrosa con respecto a la existencia de una fuente de ignición, ya que la nube inflamable no resulta visible en toda su extensión.

6. Se han propuesto dos expresiones (Ecs. 5.4 y 5.5) para estimar el factor DSF para el GNL en función de H_R . La Ec. (5.5) se recomienda para situaciones de emergencia, ya que no hay datos experimentales disponibles en el rango de H_R de 10% - 40% para confirmar la correlación lineal de la ecuación (5.4). Las estimaciones de ambas expresiones son muy cercanas cuando $H_R > 50\%$.

Se ha analizado la sensibilidad del factor DSF a las diversas variables meteorológicas, comprobándose que es esencialmente independiente de las mismas excepto cuando la humedad relativa es extremadamente baja.

7. Se han propuesto dos expresiones (Ecs. 6.3 y 6.4) para estimar el factor DSF en el caso de un derrame de gas propano licuado refrigerado a presión atmosférica.

Los resultados obtenidos con el código DEGADIS para el factor DSF en el caso de un vertido de propano refrigerado concuerdan bastante bien con la evidencia

experimental (restringida a valores $70\% < H_R < 85\%$) obtenida de ensayos a gran escala.

Debido a la similitud entre las propiedades de ambos gases, estas expresiones probablemente pueden aplicarse también a la dispersión de propileno.

8. En cuanto al escenario de una fuga bifásica de gas licuado presurizado a temperatura ambiente, se ha comprobado que las estimaciones realizadas con DEGADIS son erróneas. Por tanto, éste es un campo en el que convendría realizar un esfuerzo de investigación.

9. Se ha desarrollado un modelo matemático del incendio de una nube de gas inflamable. Entre las simplificaciones realizadas se encuentra el suponer estado estacionario y concentración uniforme, así como una determinada área y forma de las llamas.

Se ha obtenido una nueva expresión (Ec. 7.3) que permite la predicción la velocidad de propagación de la llama en función de la velocidad del viento, basada en diversas pruebas experimentales a gran escala realizadas con GNL entre 1968 y 1982, para velocidades elevadas del viento la concordancia es mejor que la de las ecuaciones precedentes.

Se ha observado de los diversos datos experimentos disponibles, que la altura de las llamas aumenta proporcionalmente a la de la nube visible. Se ha propuesto un modelo relativamente sencillo para el cálculo de la altura de las llamas (Ec. 7.23), basado en las dimensiones de la nube de gas en función del tipo de combustible y de las condiciones atmosféricas.

Nomenclatura

A	superficie, m^2
A - F	clase de estabilidad atmosférica
b	mitad de la anchura de la nube de vapor, m
C_l	capacidad calorífica del líquido, J/ kg K
C_E	constante cuyo valor es aproximadamente la unidad
C	concentración, $kg\ m^{-3}$
c_c	concentración central a nivel de suelo, $kg\ m^{-3}$
C_p	calor específico, J/kg K
d	distancia entre el punto emisor y el objetivo, m
d^*	profundidad de la nube, m
DSF	factor de dispersión de seguridad, adimensional
E	potencia emisiva (kW/m^2)
F	factor de vista entre el objetivo y la llama, (-)
F_r	número de Froude (-)
F_f	número de Froude de la llama (-)
F_t	factor de vista máximo, (-)
F_h	factor de vista horizontal, (-)
F_v	factor de vista vertical, (-)

g	aceleración de la gravedad, m/s^2
H	altura efectiva, m
H_R	humedad relativa, %
h_f	altura de la llama, m
h_c	altura de la nube, m
I	intensidad de radiación térmica de un objeto a una distancia, $kW\ m^{-2}$
K_s	conductividad térmica del sustrato, $W/m\ K$
k	constante que depende del tipo de combustible (5 para GNL), (-)
k^*	coeficiente de transferencia de masa, $kg/m^2\ s$
k_v	constante de Von Karman, adimensional
LFL	límite inferior de inflamabilidad, m
Lc	longitud de la nube, m
M_e	tasa de evaporación, $kg/m^2\ s$
M_m	peso molecular
M_{area}	masa de combustible (antes de la combustión) en la nube, kg/m^2
m_o	masa inicial de líquido, kg
m	flujo másico, $kg\ s^{-1}$
N_{co}	número de combustión
N	número de muertos en un accidente

P	probabilidad de muertes en un accidente
P_w	presión parcial del agua en la atmósfera, N m^{-2}
P_{wa}	presión de vapor del agua a temperatura ambiente, N m^{-2}
P_s	presión vapor del material evaporado, Pa
P_{amb}	presión del medio, Pa
P	presión total, Pa
Q_r	flujo de calor liberado en forma de radiación, kW
Q_c	calor de combustión, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
r	distancia al centro de la nube, m
r^*	relación estequiométrica de la mezcla aire-combustible (-)
R^2	coeficiente de determinación, adimensional
R	constante universal de los gases, J/kmol K
R_i	número de Richardson, adimensional
S_x	coeficiente de dispersión en el eje x
S_y	coeficiente de dispersión en el eje y
S_z	coeficiente de dispersión en el eje z
T^*	escala de temperatura
T	temperatura ambiente, $^{\circ}\text{C}$
T_o	temperatura inicial, K
T_{eb}	temperatura de ebullición, K
T_s	temperatura del sustrato, K
T_{eb}	temperatura de ebullición, K

T_f	temperatura de la superficie radiante de la llama, K
$T_{rocío}$	temperatura en el punto de rocío, °C
t	tiempo, m ² /s
t^*	tiempo de duración de la emisión, s
UFL	límite superior de inflamabilidad, m
U_o	velocidad de arrastre en la base de la llama, m/s
u^*	velocidad de fricción, m/s
u_x	velocidad del viento a lo largo del eje x, m/s
u_w	velocidad del viento, m/s
u_f	velocidad de la llama, m/s
u_0	velocidad del viento medida a $z=z_0$
V_{prods}	volumen de los productos de la combustión, m ³ / kg
W_C	ancho de la nube, m
W	anchura de la llama, m
w	relación de expansión volumétrica inversa, (-)
X	distancia del objetivo al frente de la llama, m
X_{LFL}	longitud de la nube inflamable correspondiente al LFL, m
X_{VIS}	longitud de la nube visible, m
x,y,z	coordenadas cartesianas
x^*	distancia desde el punto de emisión, m
z_r	rugosidad de la superficie, m
z_0	altura de referencia en el perfil de velocidad, m

λ	longitud Monin – Obukov, m
Δh_v	entalpía de vaporización, kJ/ kg
α_s	difusividad térmica del sustrato, m
σ^*	coeficiente de reflexión del suelo (-)
ρ_a	densidad del aire, kg m ⁻³
ρ_g	densidad del gas, kg m ⁻³
β	es igual a 1+ α
α	parámetro relacionado con el perfil del viento
ψ	corrección al perfil de velocidad logarítmico
α^*	relación de expansión para la combustión estequiometrica (-)
τ	transmisividad atmosférica (-)
σ	constante de Stefan-Boltzmann (kW m ⁻² T ⁻⁴)
ε	emisividad (-)
θ_i y θ_j	ángulos entre las normales unitarias a las áreas , rad
δ	grosor de la nube de vapor sin quemar, m
ρ'_o	densidad vapor en la base de la llama/ densidad del aire (-)
ξ	anchura máxima de la nube de gas, m
ρ_0	densidad de la mezcla aire-combustible, kg/m ³
ϕ	composición de la mezcla aire-combustible (-)
ϕ_{st}	composición de la mezcla estequiometrica (-)

Bibliografía

American Chemistry Council. (2007) Propylene. Product Stewardship Guidance Manual.

ARIA Analyse, Recherche et Information sur les Accidents. 2006. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Direction de la Prévention et des Risques SEI/ Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles (BARPI). France.

Bara A. y Dusserre G., (1997) The use of water curtains to protect firemen in case of heavy gas dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 10, Issue 3, 179-183.

Blackmore, D.R., Eyre, J.A., Summers, G.G., (1982) Dispersion and combustion behavior of gas clouds resulting from large spillages of LNG and LPG on to the sea, *Trans. I. Mar. E. (TM)* 94, paper 29.

Brook, P., Chodorowska, N., (2005) LPG storage systems, atmospheric vs. pressurized. Foster Wheeler Energy Limited, UK. Gastech.

Brown, T.C., et al., (1990) Falcon series data report: 1987 LNG Vapor barrier verification field trials, Final report, Gas research institute, GRI-89/0138.

Butler, C.J. y Royle, M., (2001) Experimental data acquisition for validation of a new Vapor cloud fire (VCF) modeling approach. HSL/2001/15

Casal, J., (2008) Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Amsterdam: Elsevier.

Casal, J., Planas, E., Montiel, H., Vílchez, J., (1999) Análisis de Riesgo en

Instalaciones Industriales. Ediciones UPC, Barcelona.

Center for Chemical Process Safety (CCPS) of the American Institute of Chemical Engineers AIChE, (1989). Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. New York, USA.

CCPS, (2000) Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd Ed., CCPS/AIChE, New York, USA.

CCPS, (1999) Guidelines for consequence analysis of chemical releases. Center for Chemical Process Safety/AIChE, New York, USA.

Center for Chemical Process Safety (CCPS) of the American Institute of Chemical Engineers AIChE, (1994) Guidelines for evaluating the characteristics of Vapour cloud explosions, Flash Fires and BLEVEs. New York.

CCPS, (2010) Guidelines for evaluating the characteristics of Vapour cloud explosions, Flash Fires and BLEVEs. Ed., CCPS/AIChE, New York, USA.

Chamberlain, G. A., (1987) Developments in design methods for predicting thermal radiation from flares. Chem Eng Res Des, 65a, 299-309.

Chan, S.T., (1992) Numerical simulations of LNG vapor dispersion from a fenced storage area, J. Hazard. Mater. 30, 195–224.

Colenbrander, G.W., Puttock, J.S., (1983) Dense gas dispersion behavior experimental observations and model developments, Fourth Int. Sym. on Loss Prev. and Safety, vol.90, pp. F66–F76.

Coldrick, S., Lea, C.J., Ivings, M.J., (2009) Validation database for evaluating vapor dispersion models for safety analysis of LNG facilities. Health & Safety Laboratory.

Considine, M., Grint, G.C., (1984) Rapid assessment of the consequences of the LPG releases. Proc GASTECH 84, Nov.

Croce, P.A., Mudan, K.S., (1986) Calculating Impacts for Large Hydrocarbons Fires, Fire Safety Journal 11, pp 99-112.

Cracknell, R.F., Carsley, A.J., (1997) Cloud fires-a methodology for hazard consequence modeling, *IChemE Symposium Series* 141 (1997), pp. 139–150.

Daish N.C., Linden P.F., Vieillard V., Nedelka D., Roberts T.A., Butler C.J., (2001) A new unified investigation into vapor cloud fires . In Proceedings of the 13th IGT Intl. Conference and Exhibition on Liquefied Natural Gas, Seoul, Korea 2, pp. Ps6 – 7.1 to Ps6 – 7.23 , May 14 – 17.

Darbra R.M. y Casal J., (2004) Historical analysis of accidents in seaports. *Safety Science*, 42, 2, 85-98.

Drysdale, D., (1994) An Introduction to fire dynamics. John Wiley and Sons. Chichester.

Eisenberg, N.A. et al., (1975) Vulnerability Model. A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills, Nat. Tech. Inf. Service Report AD-A015-245 Springfield, Va.

EC, (1997) Council Directive 96/82/EC of 9 December 1996 on the control of major accident hazards involving dangerous substances. Official Journal of the European Communities, Luxembourg.

Ellis J., (2011) Analysis of accidents and incidents occurring during transport of packaged dangerous goods by sea. *Safety Science*, 49 (8-9), 1231-1237.

Ermak, D.L., (1980) User's Manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases, ACRL-MA-105607, Lawrence Livermore National Laboratory.

Ermak, D.L. et al., (1982) LNG spill experiments: dispersion, RPT, and vapor burn analysis, American Gas Assoc. Operating Section Proc., T203-T209.

Ermak, D.L. et al., (1983) Results of 40m³ LNG spills onto water, in: S. Hartwig (Ed.), Heavy Gas and Risk Assessment. II, Battelle-Institute V, Frankfurt am Main, Germany, pp. 163–179.

Ermak, D. L. Chan, S. T. Morgan, D. L. Morris, L. K., (1982) A comparison of

dense gas dispersion model simulations with Burro series LNG spill test results. *Journal of Hazardous Materials*, 6, 129-160.

Ermak, D.L., et al., (1989) Heavy gas dispersion test summary report. Lawrence Livermore National Laboratory. AD-A213 880

Fay, J.A. y Lewis, D.H., (1976) Unsteady Burning of Unconfined Fuel Vapor Clouds, 16th Intl. Symp. On Comb., Comb. Inst., Pittsburgh, PA, 1387 ff.

Goldwire, H.C. et al., (1983) Coyote Series Data Report, LLNL/NWC 1981 LNG Spill Tests Dispersion, Vapor burn and rapid-phase transition, vols. 1 and 2, UCID-19953 Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.

Gómez-Mares M., (2009) Estudio experimental y modelización matemática de dardos de fuego; Ph.D. Thesis; CERTEC - Centre d'Estudis del Risc Tecnologic; Departamento de Ingeniería Química; Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona; Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.

Hanna S.R., Drivas D.G., (1996) Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models, 2nd Edition. Wiley-American Institute of Chemical Engineers. ISBN 0-8169-0702-1.

Hankin, R.K.S., Britter, R.E., (1999) TWODEE: the Health and Safety Laboratory's Shallow Layer Model for Heavy Gas Dispersion. Part 1. Mathematical Basis and Physical Assumptions, *J. Hazard. Mater.* 66, 211–226.

Hartwig, S., (1979) Heavy Gas and Risk Assessment: Proceedings of a Symposium on Heavy Gas. D. Reidel publishing company, ISBN 9027711089

Hart, W., Gist, R., Otto, K., Whitley, S., (2008) Data book 2008. The Oil and Gas Journal. ISSN 8756-7164-08.

Hart, W., Gist, R., Otto, K., (2011) Special Report: Worldwide Gas Processing: Stability of LPG markets threatened by world events. Purvin & Gertz Inc. Houston.

Havens, J., (1992) Review of dense gas dispersion field experiments, *J. Loss*

Prev. Process Ind. 5, 28-41.

Havens J., (1988) A dispersion model for elevated dense gas jet chemical releases. Volumes I and II, EPA-450/4-88-06, U.S.. Environmental Protection Agency.

Havens J.A., (1982) A Review of Mathematical Models for Prediction of Heavy Gas Atmospheric Dispersion, Institute of Chemical Engineers Symposium Series, 71.

Havens J.A., Spicer T.O., (1985) Development of an Atmospheric Dispersion Model for Heavier-than-Air Gas Mixtures. Report No. CG-D22-85 for the U.S. Coast Guard, Univ. of Arkansas.

Hirst, W. J. S., Eyre, J. A., (1983) Maplin Sands Experiments 1980: Combustion of large LNG and Refrigerated Liquid Propane Spills on the Sea. Shell Research Ltd. Heavy Gas and Risk Assessment II 211-224.

Hightower, M. et al., (2004) Guidance on risk analysis and safety implications of a large liquefied natural gas (LNG) spill over water. Sandia National Laboratory, SAND2004-6258.

Hald, K., Buchlin, J.M., Dandrieux, A., Dusserre, G., (2005) Heavy gas dispersion by water spray curtains: A research methodology. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 18, Issues 4–6, 506-511

Kavalov, B., Petric, H. Georgakaki, A., (2009) Liquefied Natural Gas for Europe. Joint Research Centre of the European Commission. ISBN 978-92-79-12392-4.

Koopman, R.P. et al., (1978) Data and calculations on 5 m³ LNG spill test, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-52976.

Koopman, R. T. et al., (1982) Analysis of Burro series 40-m³ LNG spill experiments. Journal of Hazardous Materials, 6, 43-83.

Koopman, R.P. Ermak, D.L. Chan, S.T., (1989) A review of recent field tests

and mathematical modelling of atmospheric dispersion of large spills of denser-than-air gases. *Atmospheric Environment* Vol.23, No.4, pp 731-745.

Kumar, A., Saluja, R. y Pakala, P., (2001) Development of a Numerical Model for Studying Flash Fire dynamics. Toledo,OH.

Lewis, D.J., (1982) Case studies of effects of liquid fuel fires and of vapour cloud fires and explosions, *The risks of fuel transport*, London, session1, Paper1.

Lehr, W. Simecek-Beatty, D., (2004) Comparison of hypothetical LNG and fuel oil fires on water, *Journal of Hazardous Materials*, 107, 3–9.

Luketa, H.A., (2006) A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 132, 119-140

Mannan, S., (2005) *Lee's Loss Prevention in the Process Industries Hazard Identification, Assessment and Control Volume 1*. Third edition. Department of Chemical Engineering, Texas A&M University. Butterworth Heinemann, Oxford.

Manca, D., Brambilla, S., Totaro, R., (2010) A Quantitative Assessment of the Viareggio Railway Accident. In: *20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20* S. Pierucci and G. Buzzi Ferraris (Editors), Elsevier.

Markiewicz, M., (2006) *Mathematic Modeling of the Heavy Gas Dispersion, Models and Techniques for Health and Environmental Hazard Assessment and Management*. Center of excellence management of health and environmental hazard, Otwock, Swierk.

MHIDAS Major hazard incident data service., (2006) OHS-ROM, Reference Manual.

Mizner, G.A. y Eyre, J.A., (1983) Radiation from Liquefied Gas Fires on Water, *Comb.Sci. and Tech.*, 35 pp.33-57.

Mizner G.A y Eyre J.A., (1982) Large scale LNG and LPG pool fires. IChemE

Symp. *Ser. 71*, 147 – 163.

Michot, F. M., (2006) LNG Safety and Security. Center for Energy Economics at the Bureau of Economic Geology. The University of Texas at Austin.

Montiel, H., Vílchez, J.A., Arnaldos, J., Casal, J., (1996) Historical analysis of accidents in the transportation of natural gas. *J. of Hazardous Material*, 51, 77-92.

Mudan, K.A., Croce, P.A., (1988) Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, ISBN:0-87765-353-4.

Mudan, K.S., (1984) Hydrocarbon pool and Vapour Fire Data Analysis, USDOE Report DE-AC01-83EP16008.

Mudan, K. S., Raj, P.K., Moussa, A. N., (1979) Experiments involving pool and vapor fires from spills of liquefied natural gas on water, Arthur D. Little, ADA 077073.

Muñoz, M. A., (2005) Estudio de los parámetros que intervienen en la modelización de los efectos de grandes incendios de hidrocarburo: geometría y radiación térmica de la llama. Tesis doctoral. Departament d'Enginyeria Química. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Oggero, A., Dabra, R. M., Muñoz, M., Planas, E., Casal J., (2006) A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail. *Journal of Hazardous Materials*, A133 (1-3): 1-7.

Opschoor, G., (1977) Investigations into the spreading and evaporation of LNG spilled on water. *Cryogenics*, 17 (11), 629-33.

Planas-Cuchi, E., Montiel, H., Casal, J., (1997) A survey of the origin, type and consequences of fire accidents in process plants and in the transportation of hazardous material. *Trans IChem*, 75 (Part. B) 3-8.

Puttock, J.S., Blackmore, D.R., Colenbrander, G.W., (1982) Field experiments

on dense gas dispersion, *J. Hazard. Mater.* 6.

Puttock, J.S., Colenbrander, G.W., Blackmore, D.R., (1983) Maplin Sands Experiments 1980: Dispersion results from continuous releases of refrigerated liquid propane. *Heavy gas and risk assessment II* 147-161.

Raj, P.P.K. y H.W. Emmons., (1975) On the burning of a large flammable vapor cloud. Paper presented at the Joint Technical Meeting of the Western and Central States Section of the Combustion Institute. San Antonio, TX.

Raj, P.K., (1982) MIT-GRI Safety & Res. Workshop, LNG fires, Combustion and Radiation, Technology & Management Systems, Inc., Mass.

Raj, P.K., (2007) LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges . *J. Hazard. Mater.* 140 , 444 – 464 (plus errata *J. Hazard. Mater.* 143, 603).

Rew, P. J., Deaves, D. M., Hockney, S. M., Lines, I. G., (1996) Review of flash fire modeling. HSE Contract Research Report No.94/1996.

Rodean, H.C. et al., (1984) Vapor Burn Analysis for the Coyote Series Lng Spill Experiments, UCRL-53530, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.

Ronza A., (2007) Contributions To The Risk Assessment Of Major Accidents In Port Areas; Ph.D. Thesis; CERTEC - Centre d'Estudis del Risc Tecnologic; Departament d'Enginyeria Quimica; Escola Tecnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona; Universitat Politecnica de Catalunya, Spain.

Santamaría J.M. y Braña, P.A., (1994) Análisis y reducción de riesgos en la industria química, Fundación Mapfre, Madrid.

Sklavounos, S., y Rigas, F., (2006) Simulation of Coyote series trials - Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions. *Chemical Engineering Science*, 61 (5), 1434-1443.

Spicer, T. O. y Havens J., (1996) Application of dispersion models to flammable

cloud analyses. Chemical Hazards Research Center, University of Arkansas, 700 West 20th Street, Fayetteville, AR 72701, USA.

Spicer, T.O., Havens, J.A., (1989) User's guide for the DEGADIS 2.1 dense gas dispersion model environmental protection agency, EPA-450/4-89-019.

Spicer, T. O., Havens, J. A., (1987) Field test validation of the DEGADIS model, *J. Hazard Mater.* 16, 231-245.

Sykes, R.I., Cerasoli, C.P., Henn D.S., (1999) The representation of dynamic flow effects in a Lagrangian puff dispersion model, *J. Hazard. Mater.* 64, 223–247.

Turner, D.B., (1970) Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. U.S. Environmental Protection Agency (Office of Air Programs).

Thyer, A. M., (2003) A review of data on spreading and vaporization of cryogenic liquid spills, *Journal of Hazardous Materials*, 99, 31–40.

EIA, US Energy Information Administration (2009). Annual energy outlook 2009, with projections to 2030. Editor Government Printing Office. ISBN0160829712, 9780160829710.

Wiekema, B.J., (1984) Vapour cloud explosions-Analysis based on accidents, part I. *Journal of Hazardous Materials* 8.

Vílchez, J.A, Sevilla, S., Montiel, H., Casal, J., (1995) Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 8 (2), 87-96.

Vílchez, J. A., Villafaña, D., Casal, J., (2013) A dispersion safety factor for LNG vapor clouds. *J. Hazard Mater.* 246-247, 181-188.

Vílchez, J. A. y Blanco, E., (2013) Recopilación y análisis de accidentes en carretera con cisternas que transportan gas natural licuado (GNL). Trámites, Informes y Proyectos, S.L.

Villafaña, D., Darbra, R.M., Casal, J., (2011) Flash fire: historical analysis and

modeling. A: 10th International Conference on Chemical and Process Engineering. ICheaP-10. "Chemical Engineering Transactions". p. 1111-1116. Florence, Italy.

Villafañe, D., Darbra, R.M., Casal, J., (2011) Assessing the effects of flash fires. A: XII Mediterranean Congress of Chemical Engineering. Barcelona, Spain.

Woodward, J. L. Pitblado, R. M., (2010) LNG Risk Based Safety: Modeling and Consequence Analysis. ISBN 978-0-470-31764-8. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

World LP Gas Association. Annual Report 2012. Editor World LP Gas Association.
