

**ANALISIS COMPARATIVO DE TRES MODELOS DE SIMULACION DE
FUGAS Y EXPLOSIONES DE GAS**

ING. HELI FERNANDO PADILLA VARGAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE GAS
BUCARAMANGA
2007**

**ANALISIS COMPARATIVO DE TRES MODELOS DE SIMULACION DE
FUGAS Y EXPLOSIONES DE GAS**

ING. HELI FERNANDO PADILLA VARGAS

MONOGRAFIA

**ING. EMILIANO ARIZA LEON
DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE GAS
BUCARAMANGA
2007**

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	20
1. GENERALIDADES DE LAS EXPLOSIONES DE GAS	21
1.1. ¿QUÉ ES UNA EXPLOSIÓN DE GAS?	21
1.2 TERMINOS TECNICOS DE LAS EXPLOSIONES DE GAS	25
1.2.1. EXPLOSIÓN	25
1.2.2 COMBUSTIÓN.	25
1.2.3. EXPLOSIONES DE GAS	26
1.2.4. EXPLOSIONES DE GAS CONFINADAS	27
1.2.5. EXPLOSIONES DE GAS PARCIALMENTE CONFINADAS	27
1.2.6. EXPLOSIONES DE GAS INCONFINADAS.	28
1.2.7. EXPLOSIONES DE NUBES DE VAPOR (VCE)	28
1.2.8. VELOCIDAD DE LLAMA Y VELOCIDAD DE QUEMADO	29
1.2.9. TASA DE QUEMADO	29
1.2.10. DEFLAGRACIONES.	30
1.2.11. DETONACIONES.	30
1.2.12. TURBULENCIA	31
1.2.13. INESTABILIDAD HIDRODINÁMICA	32

1.2.14. LLAMARADA	33
1.2.15. BLEVE	33
1.2.16. ONDAS DE CHOQUE.	35
1.2.17. ONDA EXPLOSIVA (BLAST WAVE)	35
1.2.18 PRESIÓN	37
2. COMBUSTION DE MEZCLAS DE AIRE-COMBUSTIBLE	40
2.1. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD (LFL Y HFL)	40
2.2. COMPOSICIÓN ESTEQUIOMÉTRICA	42
2.3. PUNTO DE LLAMA (FLASH POINT)	43
2.4. ENERGÍA MÍNIMA DE IGNICIÓN	43
2.5. TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN.	44
2.6. CALOR DE REACCIÓN.	45
2.7. TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA	46
2.8. POTENCIAL DEL AUMENTO DE PRESIÓN	47
2.9. OTRAS ATMÓSFERAS DIFERENTES AL AIRE	48
3. DEFLAGRACIONES	50
3.1. ONDAS DE DEFLAGRACIÓN Y PRESIÓN DE LA EXPLOSIÓN	50
3.2. ACELERACIÓN DE LLAMA EN UN CANAL DEBIDO A LOS OBSTÁCULOS.	56
3.3. EXPERIMENTOS EN UN TUBO DE 50 M ³	59
3.4. EXPERIMENTOS EN UN RECIPIENTE EN FORMA DE CUÑA	61
3.5. EXPERIMENTOS DE EXPLOSION EN UN RECIPIENTE CÚBICO.	63
4. DETONACIONES	67
4.1 ONDAS DE DETONACIÓN	67

4.2 ONDA DE RAREFACCIÓN DETRÁS DEL FRENTE DE UNA ONDA DE DETONACIÓN.	71
4.3 DEFLAGRACIÓN PARA LA TRANSICIÓN DE LA DETONACIÓN (DDT)	73
4.4 PROPAGACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ONDA DE LA DETONACIÓN	76
4.5 ESTIMACIÓN DE CARGAS PARA DETONACIÓN	78
4.6 PAUTAS EN LAS DETONACIONES	79
5. BLEVE – BOLA DE FUEGO	81
5.1 INTRODUCCIÓN	81
5.2 DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO	83
5.3 CONDICIONES PARA LA EXISTENCIA DE BLEVE	87
5.3.1 Sobrecalentamiento y despresurización	87
5.3.2 Temperatura y línea límite de sobrecalentamiento	88
5.4 ESTIMACION DE LOS EFECTOS	92
5.4.1 Radiación Térmica	92
5.4.2 ENERGÍA LIBERADA DEL ESTALLIDO	100
5.4.3 ONDA DE SOBREPRESION	103
5.4.4 FRAGMENTOS PROYECTADOS	105
5.5 MEDIDAS DE PREVENCIÓN	109
6. ONDAS DE EXPLOSION Y RESPUESTA ESTRUCTURAL	114
6.1 ESCALA	115
6.2 MÉTODO TNT	117
6.3 EL MÉTODO DE MULTI-ENERGÍA	120
6.4 ESCALA DE EXPERIMENTOS	124

6.5 MÉTODOS NUMÉRICOS	125
6.6 REFLEXIÓN DE ONDAS DE LA EXPLOSIÓN EN CAMPO LIBRE	128
6.7 RESPUESTA ESTRUCTURAL	130
6.8 RESPUESTA DINÁMICA	131
6.9 CARGAS DE LAS EXPLOSIONES DE GAS	134
6.10 NIVEL DE DAÑO	139
6.11 DAÑO A LOS EDIFICIOS	142
6.12 EFECTO DOMINÓ	145
6.13 EFECTO EN LAS PERSONAS	146
7. EXPLOSIONES DE GAS EN VASIJAS, TUBERÍAS Y CANALES	148
7.1 VASIJAS CERRADAS	148
7.2 TUBERÍAS	152
7.3 PRESIÓN ACUMULADA	158
8. EXPLOSIONES DE GAS EN COMPARTIMIENTOS, EDIFICIOS Y MODULOS COSTA FUERA	160
8.1 EXPLOSIONES DE GAS Y VENTEO	160
8.2 FORMAS DE COMPARTIMIENTO	166
8.3 TIPOS DE ÁREAS DE VENTEO	170
8.4 EL EFECTO DE CONGESTIÓN Y OBSTRUCCIONES	178
9. EXPLOSIONES DE GAS EN ÁREAS DE PROCESO Y ÁREAS INCONFINADAS	181
9.1 CONFINAMIENTO	182
9.2 COMBUSTIBLE	183

9.3 LLAMARADA	185
9.4 EDIFICIOS Y OTRAS ÁREAS EN PARTE CONFINADAS	187
9.5 ARREGLOS DE TUBERÍA	188
9.6 ÁREAS DE PROCESO ABIERTAS	189
9.7 TÚNELES Y ALCANTARILLAS	191
9.8 EXPLOSIONES MÚLTIPLES Y ONDAS DE EXPLOSIÓN	191
9.9 SIMULACIONES CON EL SOFTWARE	193
9.10 DISEÑO DE LA PLANTA	195
10. ALGUNOS CASOS DE EXPLOSIONES	197
10.1 FLIXBOROUGH, 1974	197
10.2 BERGE ISTRRA	198
10.3 PIPER ALPHA, 1988	198
10.4 PORT HUDSON, MISSOURI, 1970	199
10.5 RAFNES, 1998	199
11. SIMULACION DE EXPOSIONES CON MODELOS DE SOFTWARE	200
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	208
BIBLIOGRAFIA	210

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Árbol de eventos que muestra las consecuencias de las descargas accidentales de gas – combustible o líquido evaporándose en la atmósfera.	21
Figura 1.2 Explosión de gas en un área parcialmente confinada con equipos de proceso.	23
Figura 1.3. Ilustración de una explosión de gas a chorro (jet fire).	26
Figura 1.4. Explosión confinada dentro de un tanque.	27
Figura 1.5. Explosión de gas en áreas de proceso.	28
Figura 1.6. Propagación de la llama en un tubo.	29
Figura 1.7. Onda de detonación de acuerdo a la teoría ZND.	31
Figura 1.8. Trayectoria de las partículas en el flujo laminar y turbulento.	31
Figura 1.9. Un cilindro en una corriente de flujo a diferentes números de Reynolds.	32
Figura 1.10. Aceleración del gradiente de densidad, a la derecha es inestable, a la izquierda es estable.	33
Figura 1.11. Ocurrencia de un BLEVE	34
Figura 1.12. Consecuencias más graves de los BLEVE.	34
1.2.16. ONDAS DE CHOQUE.	35
Figura 1.13. Onda de choque.	35
Figura 1.14. Onda explosiva a campo libre	36
Figura 1.15. Ondas explosivas.	37
Figura 1.16. Presión lateral y presión reflejada.	39

Figura 2.1. Rangos de inflamabilidad para diversas mezclas de aire-combustible a condiciones de 1 atm y 25 °C	40
Figura 2.2. Efecto de la temperatura.	41
Figura 2.3. Punto de Llama	43
Figura 2.4. Energía de ignición para el metano a 1 atm y 25 °C	44
FIGURA 2.5. Temperatura de autoignición	44
Figura 2.6. Temperatura de autoignición de una mezcla propano-metano (mezclas estequiométrica)	45
Figura 2.7. Temperatura adiabática de llama para el metano a 25 °C y a 1 atm.	47
Figura 2.8. Comparación de la presión de explosión para varias mezclas estequiométricas de aire-combustible en un contenedor de 10 m. (Bjorkaug, 1988)	47
Figura 2.9. Límites de inflamabilidad como proporción gas inerte / gas inflamable	49
Figura 3.1. Estructura de un frente de llama laminar en una nube de gas.	51
Figura 3.2. Velocidades laminares de quemado (Glassman, 1977; Kuo 1986).	52
Figura 3.3. Arrugamiento del frente de llama cuando $\delta <$ tamaño del remanso turbulento	52
Figura 3.4. Perfil de presión – distancia para una deflagración que se propaga en un tubo.	54
Figura 3.5. Máxima Sobrepresión vs Velocidad de la llama para el modo planar y el modo esférico (Moen y Saber, 1985)	54
Figura 3.6. Explosión en un recipiente cerrado.	55
Figura 3.7. Generación de turbulencia debido a los obstáculos durante una explosión de gas.	56

Figura 3.8. Velocidad de la llama y velocidad de flujo en un recipiente de un metro en forma de cuña con cinco obstáculos. (Bjorkhaug, 1986).	56
Figura 3.9. Salida de productos de combustión antes de los obstáculos para liberar presiones.	58
Figura 3.10. Desaceleración de una llama al pasar de una región obstruida a una sin obstrucciones (Harris y Wickens, 1989)	58
Figura 3.11. Tubo de explosión de 50 m ³ .	60
Figura 3.12. Presión de explosión para una mezcla propano-aire en un tubo de 50 m ³	60
Figura 3.13. Recipiente de explosión en forma de cuña	62
Figura 3.14. Presión de explosión para el propano-aire en un recipiente de 10 m en forma de cuña. Para el techo sólido, la salida se encuentra al final del recipiente con respecto al punto de ignición.	62
Figura 3.15. Recipiente de explosión cúbico con tuberías 3x3	64
Figura 3.16. Presión de explosión para una mezcla aire-propano en un recipiente de explosión cúbico.	65
Figura 3.17. Comparación de la presión de explosión para una mezcla aire-propano en recipientes cúbico, en forma de cuña y en tubo, con una proporción de obstáculo de 0.5 y 5 obstáculos.	66
Figura 4.1. Velocidad de detonación CJ y presión para el aire-etileno.	68
Figura 4.2. Estructura ZND y modelo de una estructura real de un frente de la detonación. La balanza de longitud característica del modelo de la celda, el tamaño de la celda, l , se muestra en la figura.	69
Figura 4.3. El tamaño de la celda contra la concentración de combustible para el acetileno, etileno e hidrógeno en el aire (25°C y 1 atm) (Shepherd, 1.991)	70

Figura 4.4. El tamaño de la celda contra la concentración de combustible para el etileno, propano y metano en el aire (25°C y 1 atm) (Shepherd, 1991).	70
Figura 4.5. El perfil de presión-distancia para una propagación de la detonación en un tubo con un extremo cerrado	72
Figura 4.6. El perfil de presión-tiempo de un transductor de presión localizado cerca de una área de transición a la detonación (Engebretsen, 1991).	75
Figura 4.7. Transición a la detonación en una tubería.	76
Figura 4.8. Los requisitos para la propagación de una detonación planar en las tuberías y en los canales.	77
Figura 4.9. Requisitos para la transmisión exitosa de una detonación planar dentro de una onda de detonación esférica tridimensional.	78
Figura 4.10. El límite para la propagación de ondas de detonación en una nube de aire-combustible.	78
Figura 6.1. La onda de explosión en campo libre.	114
Figura 6.2. Máxima Presión de Explosión (lateral) contra la distancia para una explosión a nivel de suelo de TNT.	116
Figura 6.3. Máxima Presión lateral de la Explosión contra la Distancia, R^* , para TNT el estallido conectó con tierra.	117
Figura 6.4. La carga de explosión de aire-combustible hemisférica para la multi-energía	120
Figura 6.5. Una nube de gas puede causar más de una onda de explosión.	123
Figura 6.6. La propagación de la explosión en dos áreas obstruidas con un área intermedia llena de gas.	124
Figura 6.7. Presión de explosión para ondas de explosión desde explosiones de 1 barg en un confinamiento de 100, 1000, 10,000 y 100,000 m ³ .	124

Figura 6.8. Comparación del comportamiento simulado con experimentos para una nube de gas de 20 m ³ .	127
Figura 6.9. Comparación del comportamiento simulado con experimentos para una nube de gas de 600 m ³ .	128
Figura 6.10. Reflexión de la explosión fuera de un edificio.	129
Figura 6.11. Una casa sujeta a una onda de explosión puede ser reducida a un sistema de un solo grado de libertad.	131
Figura 6.12. El desplazamiento de un solo grado de libertad como la función de tiempo, t, cuando es sujeta a un pulso triangular.	132
Figura 6.13. El Factor de Carga dinámica (FCD)	133
Figura 6.14. La curva de tiempo-presión	134
Figura 6.15. Los resultados experimentales de la prueba con cargas en una tubería.	137
Figura 6.16. La reflexión de una onda de choque cuando golpea de frente una pared.	137
Figura 6.17. La interacción de una onda de explosión con un objeto pequeño. La historia del tiempo-carga que consiste en una fase reflejada y una fase de arrastre. (Baker. 1983)	138
Figura 6.18. Las curvas del Iso-daño. (Baker, 1983)	142
Figura 6.19. La sobrepresión debido a una explosión interna causará el derrumbamiento del edificio (Eckhoff, 1991).	144
Figura 6.20. Las deformaciones o movimientos debido a las explosiones, pueden causar nuevas descargas e incendios.	146
Figura 7.1. Presión de la explosión para la combustión de volumen constante de aire-etileno y aire-metano a 1 bar y 25°C predicho por STANJAN (Salater, 1991).	150

Figura 7.2. La presión de la explosión contra la presión inicial para el aire-propano estequiométrico en una vasija de 7 litros (Bartknecht 1981)	151
Figura 7.3. Los valores aproximados para el aumento de presión contra el radio lleno en una vasija cerrada.	152
Figura 7.4. La aceleración de la llama en una tubería, canal o túnel.	153
Figura 7.5. La velocidad de llama en una tubería de diámetro 1.4 m con aire-metano. (Bartknecht 1971)	154
Figura 7.6. La transición para la detonación de una tubería deformada.	156
Figura 7.7. La distancia de acumulación para la detonación contra el diámetro de la tubería. (Steen y Schampel, 1983).	157
Figura 7.8. La distancia de acumulación para el etileno y el aire-propano. Tuberías de diámetro de 50 mm. (Steen y Schampel, 1983).	158
Figura 7.9. Los experimentos de Presión Acumulada (Heinrich, 1988).	159
Figura 8.1. Explosiones de gas en un área parcialmente confinada que contiene equipo de proceso	162
Figura 8.2. La sobrepresión máxima observada en un tubo de 50 m ³ , Moen, (1982), comparado con la presión superior límite (la curva sólida), basada en las áreas de venteo para la ignición central en las vasijas casi esféricas como lo propuesto por Bradley y Mitcheson (1978).	165
Figura 8.3. Para un volumen cúbico, el mejor venteo de explosión en el caso de las áreas de venteo, será sobre dos paredes finales.	167
Figura 8.4. La altura del módulo puede ser importante.	168
Figura 8.5. Módulo alargado con venteo de explosión en tres lados.	169
Figura 8.6. Módulo alargado con tres lados de venteo y una pared sólida en la parte central del compartimiento.	170

Figura 8.7. La distancia del desplazamiento para los elementos de una pared sujeta a un pulso triangular de 1 barg, una presión máxima y una duración de 100 m/sec.	172
Figura 8.8. Tipo de tablero de alivio Stord Industrier AS	175
Figura 8.9. Simulación de software de la presión de explosión contra la presión de apertura de las paredes de alivio.	176
Figura 8.10. Vista superior de dos compartimientos.	179
Figura 9.1. Ilustración de una planta de proceso.	183
Figura 9.2. Comparación de la presión de explosión para varias mezclas estequiométricas de aire-combustible en una vasija en forma de cuña de 10 m	184
Figura 9.3. La flotación puede generar un viento fuerte.	186
Figura 9.4. Explosión de gas en un arreglo de tubería.	189
Figura 9.5. Vista Lateral de una fila de tanques.	190
Figura 9.6. Explosiones múltiples en un área de proceso.	192
Figura 9.7. La Planta Naptha Cracker II en Beek en Los Países Bajos	195
Figura 9.8. El resumen de las restricciones principales impuestas en el plan contra las explosiones de gas.	196
Figura 11.1 Interfaz de entrada del software BREEZE HAZ/FIRE	201
Figura 11.2. Cuadro de diálogo de entrada de datos de producto.	202
Figura 11.3. Datos de entrada de la masa de producto a analizar.	203
Figura 11.4 Entrada de datos de condiciones meteorológicas al modelo de simulación.	204
Figura 11.5 Matriz de resultados del ejemplo de BLEVE para el propano	205

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Clasificación de ondas explosivas de explosiones de gas de acuerdo a la distancia.	37
Tabla 2.1 Concentraciones estequiométricas en aire de diversos combustibles.	42
Tabla. 2.2. Temperaturas de autoignición.	45
Tabla 2.3. Calor de reacción y calor de combustión para diversos combustibles.	46
Tabla 2.4. Rango de concentración inflamable en el aire (Dotker, 1985)	48
Tabla 2.5. Requerimientos de gases inertes para prevenir la propagación de llama en combustibles con N ₂ , CO ₂ , halógeno 1211 y halógeno 1301 a 25 °C y 1 atm. (Kutchá, 1985)	49
Tabla 3.1. Diámetro, proporción de obstáculo de volumen (VBR) y número de tuberías en el recipiente de explosión cúbico.	64
Tabla 5.1. Causas externas mas frecuentes que han originado BLEVE.	82
Tabla 5.2. Influencia de la masa inicial de combustible sobre el diámetro de la bola de fuego	96
Tabla 5.3 Predicción de la altura (extremo superior de la llama) de la bola de fuego.	98
Tabla 5.4 Proyección de fragmentos en accidentes BLEVE	106
Tabla 5.5 Probabilidad de Proyección de fragmentos en recipientes cilíndricos.	107
Tabla 6.1. Los efectos de la sobrepresión de la explosión en las partes vulnerables de una refinería. (Stephens 1970).	140
Tabla 6.2. Fallas de presión típicas de algunos elementos de edificios estructurales bajo las condiciones de una explosión de gas (Harris 1983)	143

Tabla 11.1 Cuadro comparativo de los modelos de explosión bajo parámetros comunes.

GLOSARIO

BLEVE: Explosión de los vapores de un líquido contenido a altas presiones. Una explosión de vapor debido a la rapidez de los líquidos cuando una vasija con una sustancia con alta presión del vapor se quiebra.

COMBUSTION: El quemado del gas, líquido o sólido en el cual el combustible se oxida, desprendiendo calor y algunas veces luz.

DEFLAGRACION: Una onda de combustión propagada a velocidad relativa subsónica por el gas sin quemar inmediatamente delante de la llama.

DETONACIÓN: Una onda de combustión propagada a velocidad relativa supersónica por el gas sin quemar inmediatamente delante de la llama.

EXPLOSION: Un evento encabezado por un rápido incremento de presión.

EXPLOSION DE GAS: Es un proceso donde la combustión de una nube de gas premezclada causa un aumento rápido de la presión.

EXPLOSION DE GAS CONFINADO: Explosión que ocurre dentro de tanques, equipo de proceso, tuberías, en alcantarillas, sistemas subterráneos, cuartos cerrados, instalaciones subterráneas, etc.

EXPLOSION DE GAS INCONFINADO: Una deflagración en una nube inconfinada e inobstruida.

EXPLOSION NUBE DE VAPOR: Es una explosión de gas.

EXPLOSION DE GAS PARCIALMENTE CONFINADA: Ocurre cuando un combustible es recargado accidentalmente, mezclado con aire y encendido dentro de un edificio parcialmente abierto.

HFL: Se define como el límite superior de inflamabilidad.

HVAC: Calor, venteo y acondicionamiento del aire.

LFL: Se define como el límite inferior de inflamabilidad.

LLAMARADA: Una deflagración lenta de una nube de gas inobstruida, inconfinada y premezclada, produciendo una sobrepresión despreciable.

ONDA DE CHOQUE: Es una onda de compresión plenamente desarrollada de amplitud grande en la que la velocidad, la densidad y la presión de la partícula cambian drásticamente.

ONDA EXPLOSIVA: Se define como la onda puesta en movimiento por una explosión.

ONDA DE RAREFACCION: Ondas que se desplazan en regiones que tienen relativamente pocas moléculas y corresponden a zonas de baja presión.

PRESION: Es un tipo de tensión que uniformemente se ejerce en todas las direcciones, y es medida como la fuerza por unidad de área.

PRESION DINAMICA: Es el aumento de presión que tendrá un fluido en movimiento, si fuera traído por un fluido isentrópico contra el gradiente de presión.

PRESION DE ESTANCAMIENTO: Es la suma de las presiones estáticas y dinámicas.

PRESION ESTATICA: Es el componente normal de la tensión en una superficie que queda en la dirección del flujo.

PRESION LATERAL: Presión perpendicular calculada a la dirección de propagación de una onda de explosión.

INTRODUCCION

La expansión tecnológica experimentada por la industria de los hidrocarburos en nuestro país y en el mundo ha conllevado a una mejora notoria en la optimización de los procesos industriales. Sin embargo, la proliferación de instalaciones industriales y el transporte de materiales necesarios en las operaciones unitarias de algunos productos ha implicado la aparición de nuevos riesgos, que pueden originar accidentes graves sobre la población y el entorno.

Dadas las condiciones de explotación y producción gasífera en nuestro país, el análisis de riesgos de explosión en las instalaciones y áreas de proceso, es un factor predominante en el diseño, construcción operación y mantenimiento de dichas instalaciones, no sólo por el riesgo en pérdidas humanas, sino por el control de situaciones accidentales que afectan las operaciones de las cadenas productivas del mercado del gas y su impacto negativo en el negocio.

Una vez se conozcan las causas y las consecuencias de los diversos eventos de explosión que ocurren en las mezclas de gas combustible, se podrá determinar con un mayor grado de certeza la afectación en las diversas áreas de proceso en la industria de los hidrocarburos y diseñar estrategias metodológicas encaminadas a la mitigación de los impactos de las explosiones en el medio circundante.

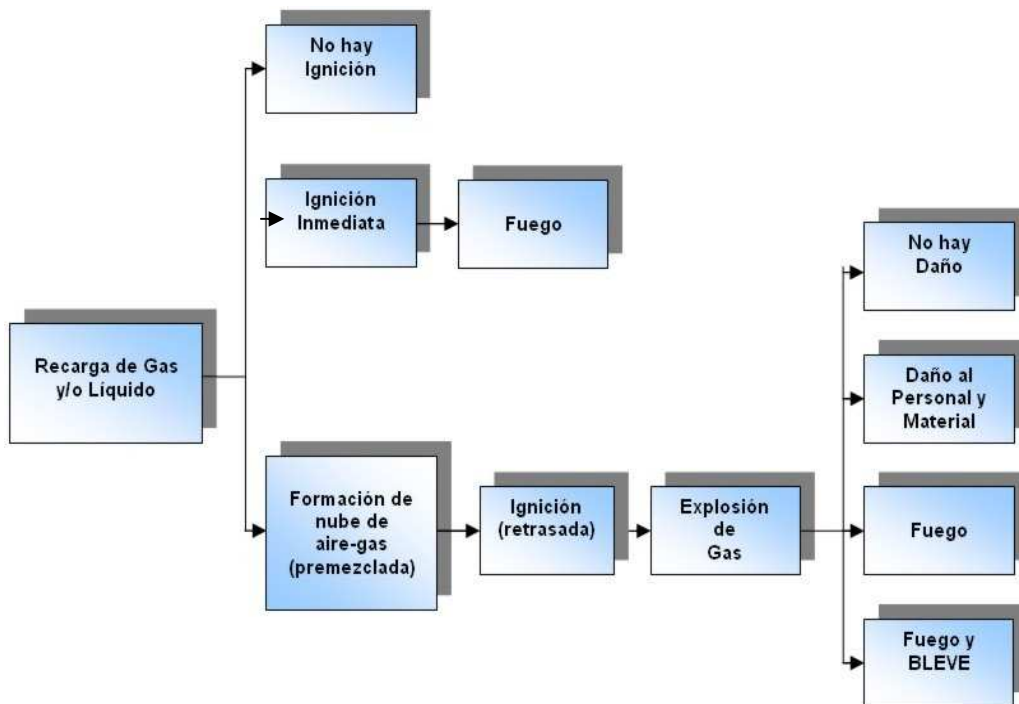
La presente monografía es una descripción básica de los diversos eventos de explosión de gases que acontecen en la industria y sirve como punto de partida a investigaciones futuras en temas relacionados con análisis de riesgo en el personal y equipos, la respuesta de las estructuras a los eventos de explosión y el comportamiento de materiales y sistemas antes las situaciones de accidentes.

1. GENERALIDADES DE LAS EXPLOSIONES DE GAS

1.1. ¿QUÉ ES UNA EXPLOSIÓN DE GAS?

Una explosión de gas es un proceso donde la combustión de una nube de gas premezclada, es decir, de aire-combustible ó combustible/oxidante, puede causar un aumento rápido de la presión. Las explosiones de gas pueden ocurrir dentro de equipos de proceso ó tuberías, en edificios o módulos costa fuera, en áreas de proceso abiertas o en áreas confinadas. Cuando se habla de una explosión de gas, es común incluir el evento antes y después del proceso de la explosión de gas. La Figura 1.1 muestra lo que puede pasar si el gas combustible o el líquido evaporado se escapa accidentalmente a la atmósfera.

Figura 1.1 Árbol de eventos que muestra las consecuencias de las descargas accidentales de gas – combustible o líquido evaporándose en la atmósfera.



Dentro de los límites de inflamabilidad o si falta la fuente de ignición, la nube de gas puede diluirse y desaparecer. La ignición puede ocurrir inmediatamente o puede tardarse hasta varios minutos, de acuerdo a las circunstancias. En caso de una ignición inmediata, habrá presencia de fuego.

La situación más peligrosa ocurrirá si una nube de aire-combustible grande premezclada se forma y se enciende. El tiempo de la descarga para la ignición puede ser de unos pocos segundos o de varios minutos. La cantidad de combustible puede ser de unos kilogramos ó de varias toneladas.

La presión generada por la onda de combustión depende de qué tan rápido se propague la llama y cómo pueda expandirse la presión fuera de la nube de gas. Las consecuencias de las explosiones de gas van desde ningún daño a una total destrucción. Debido a las explosiones de gas, el aumento de la presión puede ocasionar daños personales o materiales.

El fuego es muy común dentro de las explosiones de gas. Cuando se enciende una nube, se puede propagar la llama de dos diferentes modos a través de las partes inflamables de la nube de gas. Los modos son:

- La deflagración

- La detonación.

La deflagración es el modo más común de propagación de la llama, y se propaga a una velocidad relativa subsónica para el gas quemado; las velocidades típicas

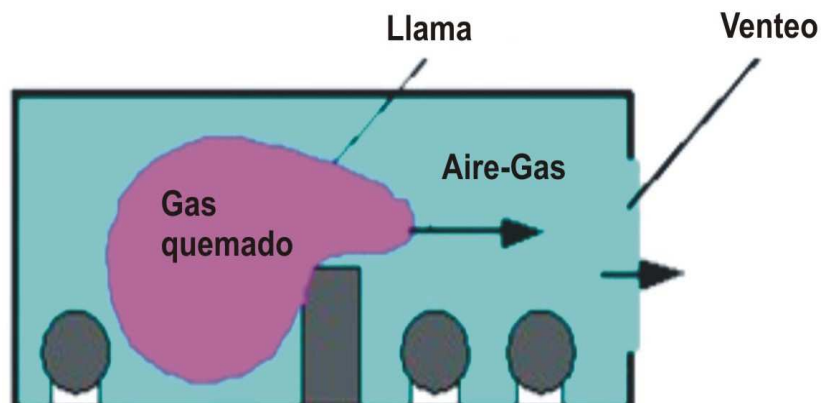
de la llama son del orden de 1 a 1000 m/seg. La presión de la explosión puede alcanzar valores de varios bar (1 bar=14,7 psi), dependiendo de la velocidad de la llama.

La onda de detonación es una onda de combustión supersónica. La onda de choque y la onda de combustión están en este caso acopladas. En una nube aire-combustible, la onda de detonación se propagará a una velocidad de 1500-2000 m/seg. Y el pico de presión típicamente es de 15 a 20 bar.

En una explosión de gas accidental de una nube de aire-hidrocarburo, la llama inicialmente saldrá a una velocidad laminar del orden de 3-4 m/seg. Si la nube está realmente inconfiada y sin obstrucciones (sin equipo ni estructuras que rodeen la nube) no es probable que la llama acelere a más de 20-25 m/seg y la sobrepresión será despreciable si la nube no se confina.

En un edificio o en un módulo costa fuera con equipos de proceso como se muestra en el esquema de la Figura 1.2, puede acelerar la llama a varios cientos de metros por segundo.

Figura 1.2 Explosión de gas en un área parcialmente confinada con equipos de proceso.



Cuando el gas se está quemando, la temperatura aumentará y el gas se expandirá a un factor de 8 a 9 veces. El gas sin quemar es por consiguiente, empujado delante de la llama y generará un campo de flujo turbulento, aumentando la efectividad de la tasa de quemado y la velocidad del flujo, mecanismo de regeneración positiva causa la aceleración de la llama y aumentos súbitos de presión y en algunos casos la transición para la detonación.

En una situación confinada, como en una vasija cerrada, no es requisito para el aumento de la presión, la alta velocidad de la llama. En este caso, el alivio de presión es muy pequeño y se generará un proceso lento de combustión.

Las consecuencias de una explosión de gas dependerán de:

- Composición del combustible.
- Tamaño y concentración de la nube.
- Localización del punto de ignición.
- Fuerza de la fuente de ignición.
- Localización, tamaño y tipo de explosión en las áreas de venteo.
- Localización y tamaño de los equipos y elementos estructurales.
- Esquemas de mitigación.

Las explosiones de gas son muy sensibles a cambios en estos factores, sin embargo, no es una tarea fácil estimar las consecuencias de una explosión de gas.

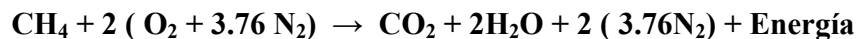
1.2 TERMINOS TECNICOS DE LAS EXPLOSIONES DE GAS

1.2.1. EXPLOSIÓN

Se define como un evento que conlleva a un aumento rápido de la presión. Este aumento de presión puede ocasionarse por reacciones nucleares, pérdida de confinamiento en un recipiente de alta presión, explosivos, explosiones de metal y vapor de agua, reacciones de combustión de polvo, llovizna o gas con aire u otro oxidante.

1.2.2 COMBUSTIÓN.

El quemado de gas, líquido o sólido en el cual el combustible se oxida desprendiendo calor y algunas veces luz. La combustión del metano (CH₄) se describe por la ecuación química:



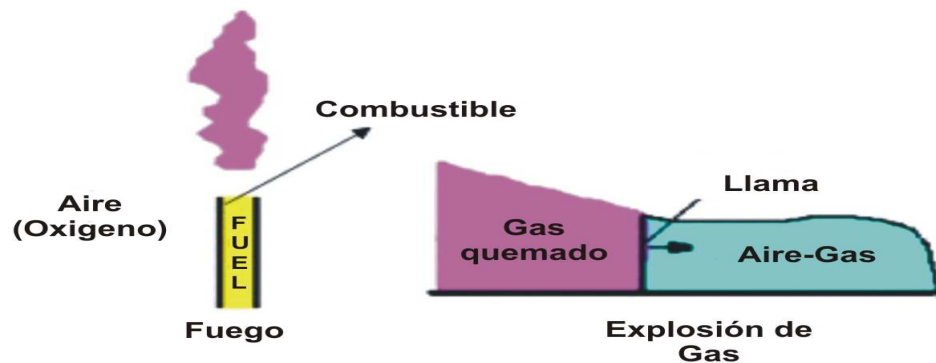
Los productos químicos resultantes de la combustión completa de un hidrocarburo son principalmente CO₂ y vapor de agua. El proceso de combustión resultará en un aumento de la temperatura debido a la transformación química de energía en calor. Cabe anotar que la ecuación anterior es una simplificación del proceso de combustión real.

Puede ocurrir la combustión de combustibles gaseosos de dos maneras diferentes. Una es el fuego, donde el combustible y el oxígeno se mezclan durante el proceso de combustión.

En otro caso, como se ilustra en la Figura 1.3, el combustible y el aire están premezclados y la concentración de combustible debe estar dentro de los límites

de inflamabilidad. En general, la situación de premezcla permite más rápidamente quemar el combustible, es decir, se consume más combustible por unidad de tiempo.

Figura 1.3. Ilustración de una explosión de gas a chorro (jet fire).



1.2.3. EXPLOSIONES DE GAS

La definición de una explosión de gas es un proceso donde la combustión de una nube premezclada de gas, aire-combustible, causa un aumento rápido de la presión. Las explosiones de gas pueden ocurrir dentro de equipos de proceso o tuberías, en edificios o módulos costa fuera, en áreas de proceso abiertas o inconfiadas.

Las consecuencias de una explosión de gas dependerán del ambiente en el que esté contenida la nube de gas. Por consiguiente, es común clasificar las explosiones de gas de acuerdo al ambiente donde el evento de explosión ocurre:

- Explosiones de gas confinadas (tanques, vasijas de proceso, tuberías)
- Explosiones de gas parcialmente confinadas (Edificaciones o módulos costa fuera)

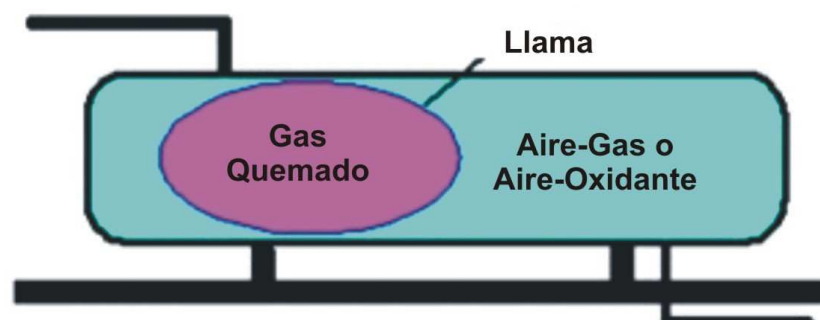
- Explosiones de gas inconfiadas en plantas de proceso y otras áreas inconfiadas

Debe señalarse que estas condiciones no están estrictamente definidas. Por ejemplo, una explosión en una tubería de un área de proceso puede involucrar partes confinadas e inconfiadas.

1.2.4. EXPLOSIONES DE GAS CONFINADAS

En la Figura 1.4 se muestra que las explosiones de gas confinadas son las explosiones que ocurren dentro de tanques, en tuberías de proceso, en cuartos cerrados y en instalaciones subterráneas. También se llaman *explosiones confinadas* a las explosiones internas. Es típico en este tipo de explosiones, que la velocidad de combustión no necesita ser alta para causar un incremento importante en la presión.

Figura 1.4. Explosión confinada dentro de un tanque.



1.2.5. EXPLOSIONES DE GAS PARCIALMENTE CONFINADAS

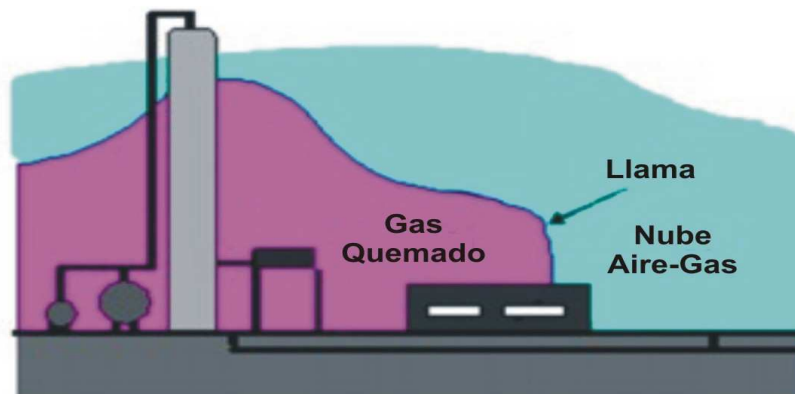
Las explosiones parcialmente confinadas ocurren cuando se escapa accidentalmente un combustible dentro de una edificación parcialmente abierta. El

edificio confina la explosión y la presión de la explosión sólo puede salir a través de las áreas abiertas y ventiladas, ocasionando una baja sobrepresión. El tamaño de las aberturas de ventilación y sus áreas son factores importantes en la presión resultante de la explosión.

1.2.6. EXPLOSIONES DE GAS INCONFINADAS.

Se utiliza este término para las explosiones en áreas de proceso. Pruebas a gran escala han demostrado que la ignición de una nube de gas inconfina por una débil fuente de ignición, producirá una pequeña sobrepresión. El término inconfinado debe usarse con cuidado, pues en una planta de proceso hay áreas parcialmente confinadas y obstruidas.

Figura 1.5. Explosión de gas en áreas de proceso.



1.2.7. EXPLOSIONES DE NUBES DE VAPOR (VCE)

No hay diferencia entre una explosión de una nube de vapor y una explosión parcialmente confinada o inconfina, no se diferenciará entre una explosión de una nube de vapor y una explosión de gas.

1.2.8. VELOCIDAD DE LLAMA Y VELOCIDAD DE QUEMADO

La velocidad de llama S , se define como la velocidad relativa de la llama a un observador estacionario. La velocidad de quemado, U , se define como la velocidad de la llama respecto a la nube de gas inmediatamente detrás de ella.

La relación entre la velocidad de llama y la velocidad de quemado es:

$$S = U + u$$

Donde u es la velocidad del gas sin quemar justo detrás de la llama. Para mezclas estequiométricas de hidrocarburos, S es del orden de $8 \cdot U$.

Figura 1.6. Propagación de la llama en un tubo.



1.2.9. TASA DE QUEMADO

La tasa de quemado (Kg / seg) es la cantidad de combustible consumida por unidad de tiempo. La tasa de quemado es una medida de la energía liberada en una explosión. También se define como la masa de combustible consumida por una unidad de tiempo y volumen.

1.2.10. DEFLAGRACIONES.

Una deflagración es una onda de combustión que se propaga a velocidad relativa subsónica al gas sin quemar delante de la llama, donde la velocidad de la llama U , es muy inferior a la velocidad del sonido C , en el gas sin quemar. La velocidad del gas sin quemar delante de la llama es producida por la expansión de los productos de combustión.

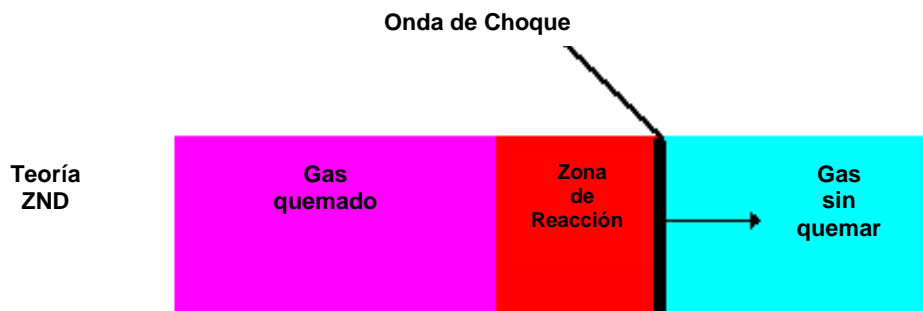
En una explosión accidental de gas, la deflagración es el modo más común de propagación de la llama, del orden de 1 m/seg a 500-1000 m/seg que corresponden a explosiones con presiones de pocos milibar a varios bar.

1.2.11. DETONACIONES.

Una detonación es una onda de combustión propagándose a velocidad relativa supersónica inmediatamente al gas sin quemar delante de la llama, donde la velocidad de detonación D , es mayor que la velocidad del sonido C , en el gas sin quemar.

En términos simples, una detonación se define también como una onda de choque inmediatamente seguida por una llama (teoría ZND), como se observa en la Figura 1.7. La compresión del choque calienta el gas y acciona la combustión. Sin embargo, actualmente la onda de detonación es una onda de choque tridimensional seguida por una zona de reacción.

Figura 1.7. Onda de detonación de acuerdo a la teoría ZND.



1.2.12. TURBULENCIA

En la dinámica de fluidos se divide el flujo en laminar y turbulento. En el flujo laminar, el flujo se distribuye en láminas o capas, mientras que en el flujo turbulento, el flujo se distribuye de manera irregular, caracterizado por una fluctuación aleatoria en la velocidad media de flujo. (Ver Figura 1.8)

Figura 1.8. Trayectoria de las partículas en el flujo laminar y turbulento.

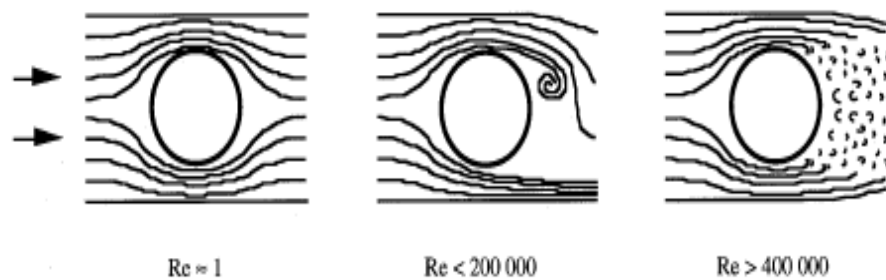


El flujo laminar o turbulento dependen principalmente de la velocidad de flujo u , dimensión característica de la geometría L y de la viscosidad cinemática ν . El número de Reynolds Re , está definido por:

$$Re = \frac{uL}{\nu}$$

Y es un parámetro adimensional que caracteriza el régimen de flujo, laminar o turbulento. (Ver Figura 1.9)

Figura 1.9. Un cilindro en una corriente de flujo a diferentes números de Reynolds.

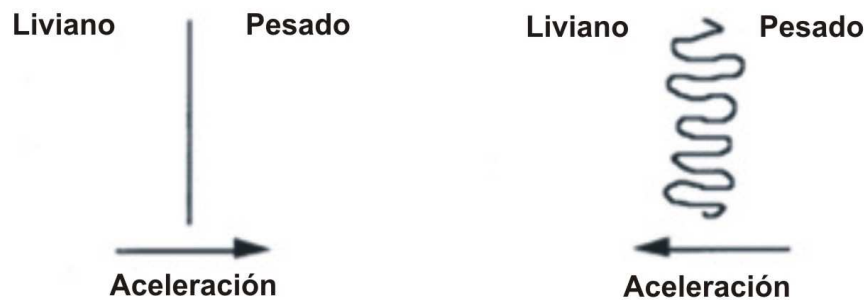


La turbulencia es muy importante en cuanto define qué tan rápido se puede propagar la llama en una nube de gas premezclada.

1.2.13. INESTABILIDAD HIDRODINÁMICA

La interfaz entre un gas liviano y uno pesado se establece si es acelerado el fluido en la dirección del gradiente de la densidad positiva. Sin embargo, si está acelerando el fluido en otra dirección, la interfaz es inestable. (Ver figura 1.10)

Figura 1.10. Aceleración del gradiente de densidad, a la derecha es inestable, a la izquierda es estable.



Este fenómeno de inestabilidad hidrodinámica también ocurre en las explosiones de gas. Si la llama es expuesta de frente a una onda de compresión por parte del gas pesado, dentro del gas liviano o una onda se propaga en la dirección opuesta, el frente de llama se vuelve inestable y aumenta la tasa de quemado.

1.2.14. LLAMARADA

Llamarada es el término que se usa para una deflagración lenta de una premezcla de gas inconfinado, produciendo una sobrepresión despreciable. Los efectos térmicos son el principal riesgo.

1.2.15. BLEVE

Es la abreviatura de **“Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion”** Un BLEVE es una explosión de los vapores de un líquido en ebullición contenido a altas

presiones. La falla del contenedor es ocasionada por un fuego externo, como se observa en la Figura 1.11

Si la sustancia es un combustible, el BLEVE puede resultar en bolas muy grandes de fuego. La salida como cohetes de los contenedores es también un riesgo relacionado con los BLEVE, generalmente ocurren en tanques y carro tanques, pero pueden ocurrir también en áreas de proceso. (Ver Figura 1.12)

Figura 1.11. Ocurrencia de un BLEVE

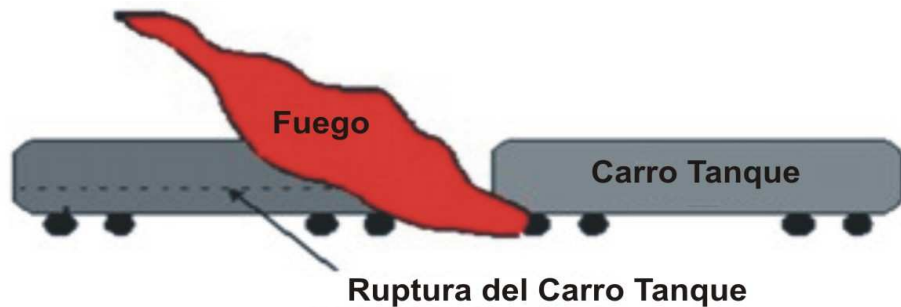


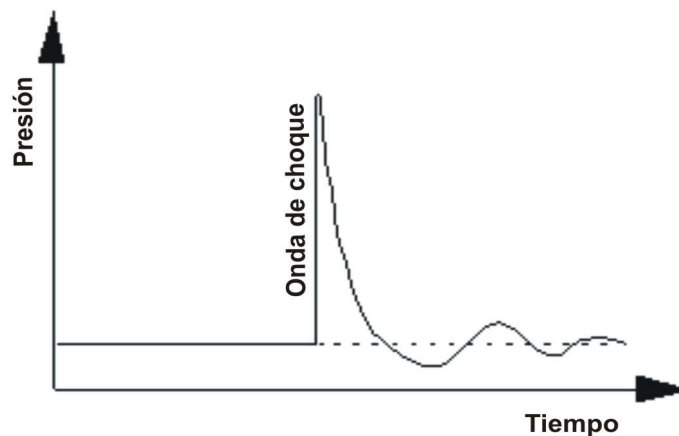
Figura 1.12. Consecuencias más graves de los BLEVE.



1.2.16. ONDAS DE CHOQUE.

Una onda de choque se define como una onda de compresión plenamente desarrollada, de amplitud grande en la que la velocidad, la densidad y la presión de la partícula, cambian drásticamente (Mcgraw Hill, 1978). El espesor de la onda de choque es de libre recorrido y debe ser tratada como una discontinuidad (Ver Figura 1.13).

Figura 1.13. Onda de choque.



Una onda de choque se propaga a velocidad relativa supersónica inmediatamente al gas delante del choque. La velocidad de propagación de la onda de choque dependerá del radio de presión a través de la onda. A mayor presión, mayor velocidad de propagación.

1.2.17. ONDA EXPLOSIVA (BLAST WAVE)

Una onda explosiva se define como la onda puesta en movimiento por una explosión (McGraw Hill, 1978). El término onda explosiva abarca ondas de

compresión sónica, las ondas de choque, y las ondas de rarefacción (son ondas que se desplazan en regiones que tienen relativamente pocas moléculas y corresponden a zonas de baja presión).

La Figura 1.14 en principio ilustra los diferentes tipos de ondas explosivas. Se tiene:

- Tener una onda de choque seguida de una onda de rarefacción,
- Una onda de choque seguida de una onda de condensación sónica y luego una onda de refracción,
- Una onda de compresión y una onda de rarefacción. El tipo de onda explosiva depende de cómo y cuándo se libera la energía en la explosión y la distancia del área de explosión. (Ver Figura 1.15)

Figura 1.14. Onda explosiva a campo libre

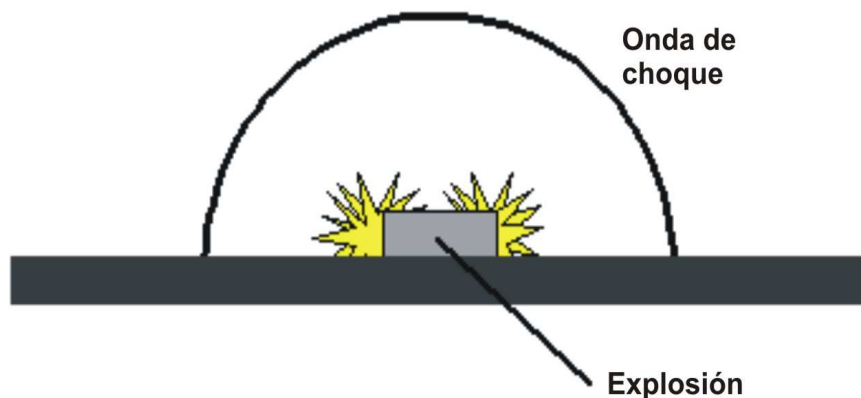


Figura 1.15. Ondas explosivas.

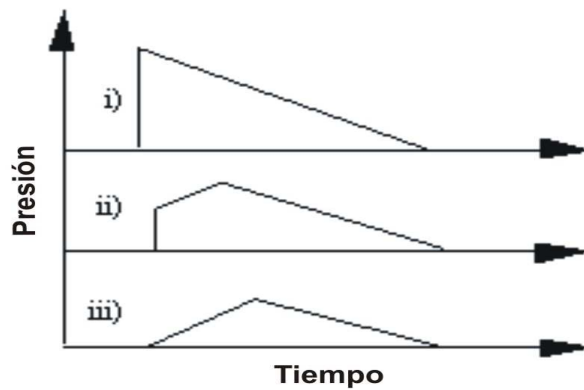


Tabla 1.1 Clasificación de ondas explosivas de explosiones de gas de acuerdo a la distancia.

Clasificación	Pico de Sobrepresión	
	Cercana	≥ 10 psi
Media distancia	0.5-10 psi	0.034-0.69 bar
Lejana, a campo libre	≤ 0.5 psi	≤ 0.034 bar

Para efectos prácticos, el término explosión de gas a campo libre, se definirá como la propagación hemisférica de una onda explosiva fuera de la nube de explosión.

1.2.18 PRESIÓN

La presión es un tipo de tensión que uniformemente se ejerce en todas las direcciones, es medida como la fuerza por unidad de área. (Diccionario Básico McGraw Hill, 1978).

En dinámica de fluidos se utiliza normalmente:

- presión estática,
- presión dinámica,
- presión de estancamiento.

La presión estática es lo que normalmente llamamos *presión*. La definición de presión estática es el componente normal de la tensión en una superficie que queda en la dirección del flujo.

La presión dinámica es el aumento de presión que tendrá un fluido en movimiento, si fuera traído por un fluido isentrópico contra el gradiente de presión. La presión dinámica puede expresarse a través de la velocidad de flujo u , y la densidad ρ :

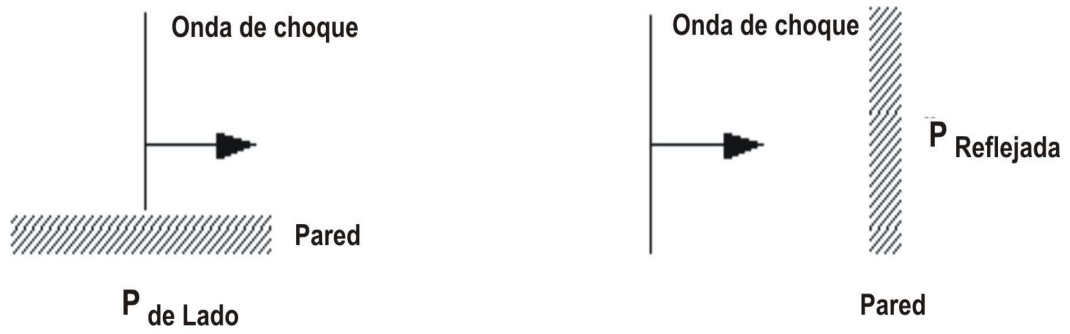
$$P_{Dym} = \frac{1}{2} \rho \cdot u^2$$

La presión de estancamiento es la suma de las presiones estáticas y dinámicas:

$$P_{Stag} = P_{Stat} + P_{Dym}$$

Para ondas explosivas y ondas de choque, se utilizan los términos presión reflejada y presión lateral. La presión lateral es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, y es la presión estática detrás de la onda de choque. La presión reflejada es moderada cuando la onda golpea a un objeto de frente, como una pared.

Figura 1.16. Presión lateral y presión reflejada.



2. COMBUSTION DE MEZCLAS DE AIRE-COMBUSTIBLE

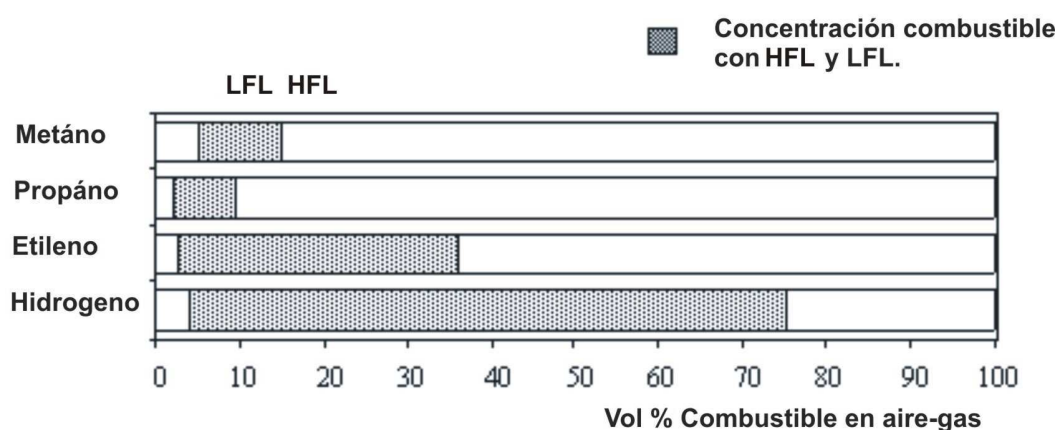
Las consecuencias de una explosión de gas dependerán del tipo de combustible, del oxidante y de su concentración. A través de años de investigación se han determinado las propiedades, características y umbral de daño de varios combustibles usados en la industria.

2.1. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD (LFL Y HFL)

Una mezcla de aire-combustible solo se quemará si la concentración del combustible está entre el límite inferior de inflamabilidad (LFL) y el límite superior de inflamabilidad (HFL).

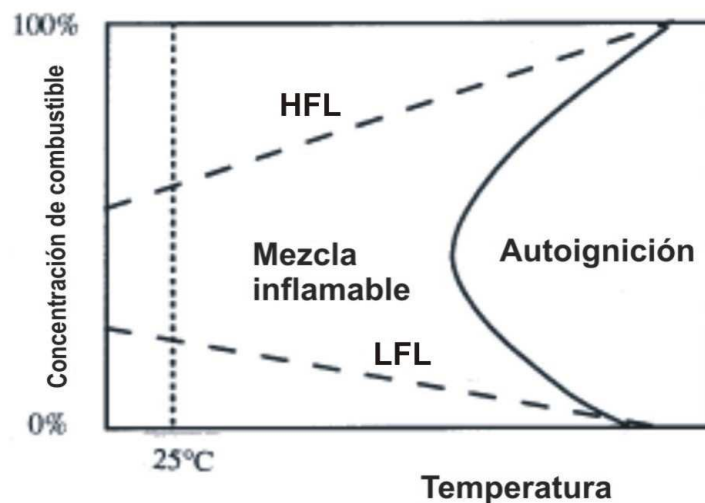
Los límites de inflamabilidad se obtienen a través de datos experimentales. Las condiciones iniciales de presión y temperatura son 1 atm y 25 °C.

Figura 2.1. Rangos de inflamabilidad para diversas mezclas de aire-combustible a condiciones de 1 atm y 25 °C



El rango de inflamabilidad del hidrógeno es muy amplio, lo cual nos dice que una nube premezclada es muy fácil de obtener. Para el metano y el propano, los rangos inflamables son mucho más pequeños, pero una fuente de ignición puede “esperar” hasta que la nube de gas pueda encender y explotar. Es una muy buena práctica operar siempre bajo el LFL.

Figura 2.2. Efecto de la temperatura.



Como se muestra en la figura 3.2, se ensanchará el rango de inflamabilidad cuando aumente la temperatura inicial. Los cambios en la presión inicial no afectan significativamente el LFL, pero aumentan el HFL.

El límite de inflamabilidad para las mezclas de combustible se puede calcular por la ley de Le Chatelier:

$$LFL_{\text{Míx}} = \frac{100}{\frac{C_1}{LFL_1} + \frac{C_2}{LFL_2} + \dots + \frac{C_i}{LFL_i}}$$

Donde C1, C2...Ci es la proporción de cada combustible en la mezcla (Kuchta, 1985).

Von Niepenberg (1978), utilizó la regla de Le Chatelier para predecir los límites de inflamabilidad de mezclas de combustibles con presencia de gases inertes. Debe anotarse que la fórmula de Le Chatelier no aplica correctamente para H₂ y para hidrocarburos insaturados. Sólo aplica para componentes químicamente similares. Para el gas natural el LFL es del 4% del volumen, y el HFL es del 15%.

2.2. COMPOSICIÓN ESTEQUIOMÉTRICA

Se define como la composición en la cual las cantidades de combustible y oxígeno (aire) están balanceadas y no se presenta excesos de combustible o de oxígeno después de ocurrir la reacción.

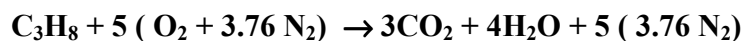


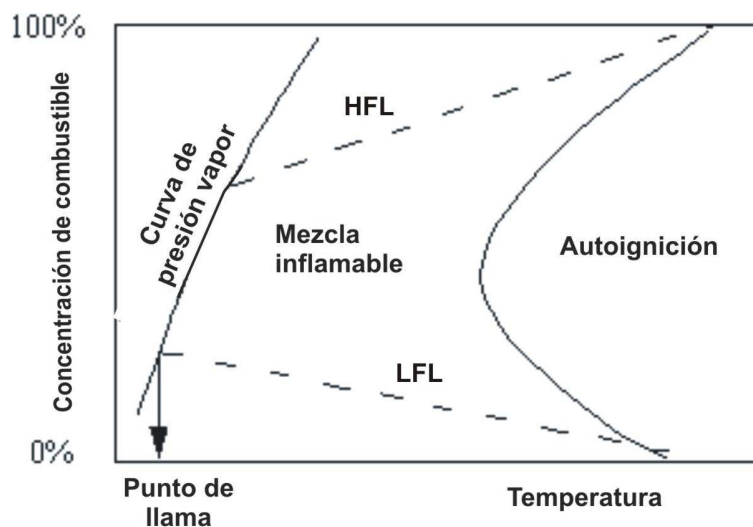
Tabla 2.1 Concentraciones estequiométricas en aire de diversos combustibles.

	Hidrógeno	Etileno	Propano	Metano
% combustible (vol)	30	3.5	4.0	9.5
g m³	26.9	81.7	79.1	67.8

2.3. PUNTO DE LLAMA (FLASH POINT)

Es la mínima temperatura en la cual se creará suficiente vapor para formar una mezcla inflamable con aire, cerca de la superficie del líquido o dentro de su contenedor. Operar a temperaturas por debajo del punto de llama del combustible líquido evitará que se formen mezclas inflamables a menos que se formen nubes de partículas (debido a una salpicadura).

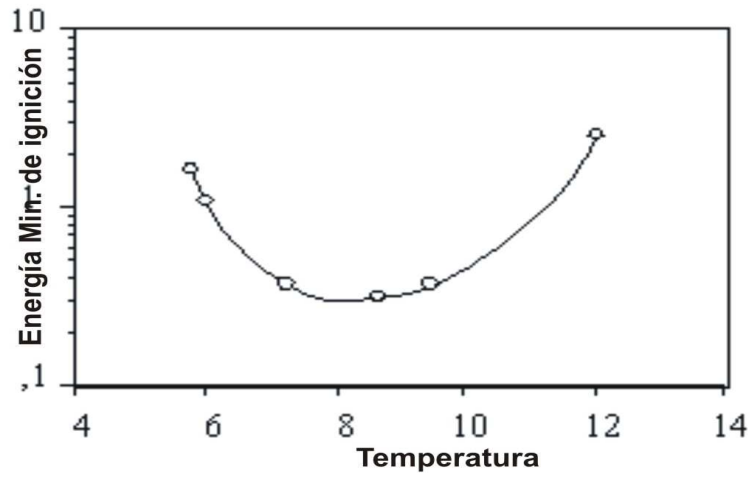
Figura 2.3. Punto de Llama



2.4. ENERGÍA MÍNIMA DE IGNICIÓN

Es la medida de la energía requerida para que una fuente de ignición, pueda encender como una chispa, una nube de gas. La energía de ignición depende de la concentración del combustible. Para la mayoría de los combustibles, la energía mínima de ignición en ambiente normal está entre 0.1 y 0.3 mJ.

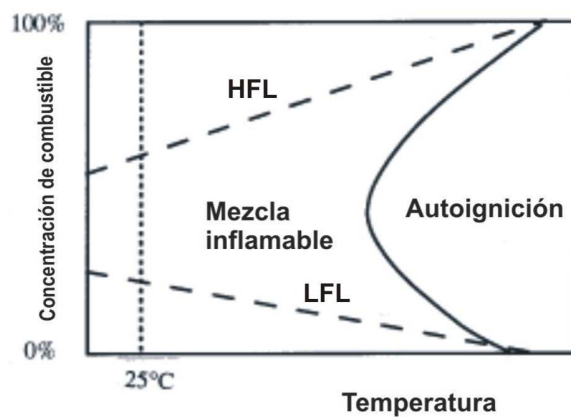
Figura 2.4. Energía de ignición para el metano a 1 atm y 25 °C



2.5. TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN.

Cuando una mezcla inflamable se calienta a una temperatura determinada, espontáneamente iniciará la reacción química. Se define como la temperatura más baja de una pared adyacente a la mezcla aire-combustible que puede llegar a la ignición.

FIGURA 2.5. Temperatura de autoignición



La temperatura de autoignición puede fluctuar entre 540 °C (metano) y 210 °C (n-decano). Para mezclas de hidrocarburos, la temperatura de autoignición estará entre las temperaturas de autoignición de sus componentes puros.

Figura 2.6. Temperatura de autoignición de una mezcla propano-metano (mezclas estequiométrica)

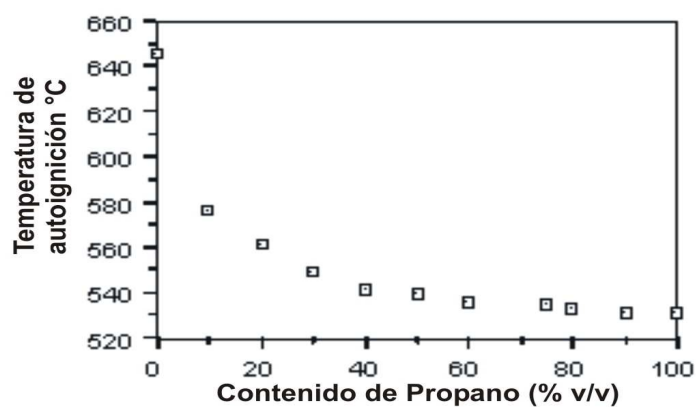


Tabla. 2.2. Temperaturas de autoignición.

	Hidrógeno	Etileno	Propano	Metano
TAI °C	520	520	450	540

2.6. CALOR DE REACCIÓN.

Se define como la energía químicamente limitada en el combustible. Esta propiedad se da normalmente como la energía por masa de combustible (J/kg).

Con respecto a las explosiones de gas este valor puede ser engañoso. Algunos combustibles pueden tener un bajo calor de reacción, pero tienen un potencial de explosión muy alto. Respecto al riesgo de una explosión de gas, el calor de reacción de la nube de gas es la propiedad mas importante del volumen de energía, pues nos dice cuanta energía por volumen se puede liberar en una explosión de gas.

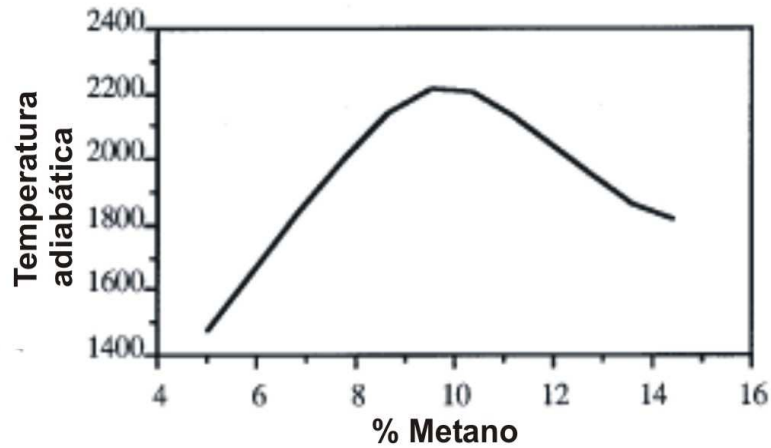
Tabla 2.3. Calor de reacción y calor de combustión para diversos combustibles.

	Hidrógeno	Metano	Propano	Etileno
Calor de reacción <i>MJ / m³</i> por <i>m³</i> mezclas estequiométricas de gas.	3.2	3.4	3.7	3.9
Calor de Combustión [<i>MJ / Kg</i>] valor bajo	120	50	46	47

2.7. TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LLAMA

Es la máxima temperatura obtenida cuando se quema un combustible a presión constante sin pérdida de calor. Es un parámetro que caracteriza el contenido de energía de la mezcla. En el caso de la mezcla aire-metano, la temperatura adiabática de llama ocurre cerca de la composición estequiométrica (9.5% de metano en el aire). Para la mayoría de mezclas de hidrocarburos, este valor es el mismo que el del metano, es decir, aproximadamente 2000 °C.

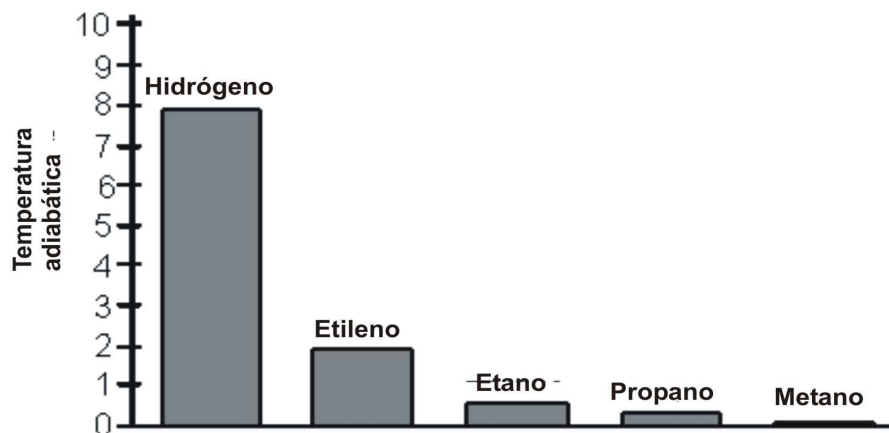
Figura 2.7. Temperatura adiabática de llama para el metano a 25 °C y a 1 atm.



2.8. POTENCIAL DEL AUMENTO DE PRESIÓN

En la actualidad no existe una sola propiedad que se pueda utilizar para la caracterización del aumento potencial de la presión en una mezcla combustible-aire. El aumento de la presión en las explosiones de gas depende en gran medida de la geometría donde ocurre la explosión. El comportamiento individual de cada combustible es diferente dependiendo de las condiciones.

Figura 2.8. Comparación de la presión de explosión para varias mezclas estequiométricas de aire-combustible en un contenedor de 10 m. (Bjorkaug, 1988)



2.9. OTRAS ATMÓSFERAS DIFERENTES AL AIRE

En equipos de proceso o en contenedores cerrados, las explosiones de gas pueden ocurrir con otros oxidantes diferentes al aire. Los oxidantes pueden ser oxígeno, NO y NO₂.

Cuando aumenta la concentración de oxígeno hasta el 21% como en el aire, aumentará el riesgo de la explosión. La energía mínima de ignición para el metano es reducida de 0.3 mJ en el aire a 0.003 mJ en oxígeno (Kutchka, 1985). El cloro es un oxidante fuerte y puede llevar a serias explosiones. En el oxígeno y el cloro el rango de inflamabilidad es mucho más amplio.

Tabla 2.4. Rango de concentración inflamable en el aire (Dotker, 1985)

	% Hidrógeno	% Metano
Aire	4.0-75.6	4.0-16.0
Oxígeno	3.9-95.8	5.0-61.9
Cloro	3.5-89	5.5-63

Agregando gases inertes como el nitrógeno N₂, ó el Dióxido de Carbono CO₂, se reduce el riesgo de la explosión.

Figura 2.9. Límites de inflamabilidad como proporción gas inerte / gas inflamable

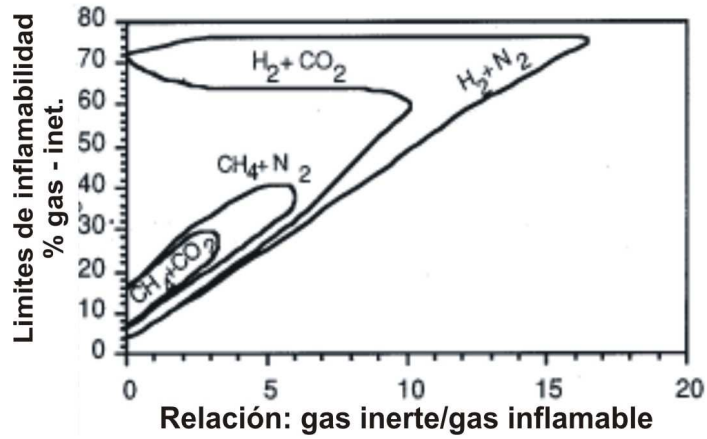


Tabla 2.5. Requerimientos de gases inertes para prevenir la propagación de llama en combustibles con N_2 , CO_2 , halógeno 1211 y halógeno 1301 a 25 °C y 1 atm. (Kutcha, 1985)

	Mínima concentración inerte (% vol)			
	N_2	CO_2	Halógeno 1211	Halógeno 1301
Metano	36	23	4.0 (5.3)	2.0 (4.7)
Propano	42	28	5.9	6.5
Etileno	48	39	9.6	11.0
Hidrógeno	71	57	27	20.0

Los halógenos son más efectivos para inertizar que el N_2 y el CO_2 , pero debido a su alto impacto negativo en el ambiente, se limitará su uso.

3. DEFLAGRACIONES

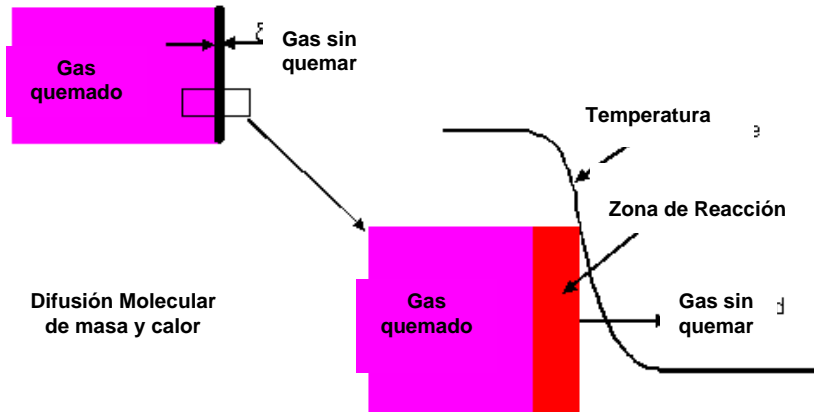
Una deflagración es el modo más común de propagación de la llama en explosiones de gas. Se define como una explosión cuando se propaga la onda de combustión a velocidad subsónica, cuyos rangos de velocidad van de 500 m/seg a 1000 m/seg. La presión de la explosión irá de unos milibar a varios bar, dependiendo de la velocidad de la llama.

La velocidad de la llama y presión de explosión dependerán fuertemente de la geometría dentro de la nube de gas y fuera de ella. Predecir la velocidad de la llama y la presión de la explosión no es una tarea fácil, aun cuando se conocen parámetros como el tamaño de la nube, la concentración de combustible y el punto de ignición. El fenómeno de aceleración de la llama es un problema matemáticamente complejo, pues el resultado es muy sensible a la variación de parámetros específicos.

3.1. ONDAS DE DEFLAGRACIÓN Y PRESIÓN DE LA EXPLOSIÓN

En una explosión de gas la velocidad de propagación puede medir más de tres órdenes de magnitud, el mecanismo de propagación de la llama será bastante diferente en los diversos regímenes de velocidad.

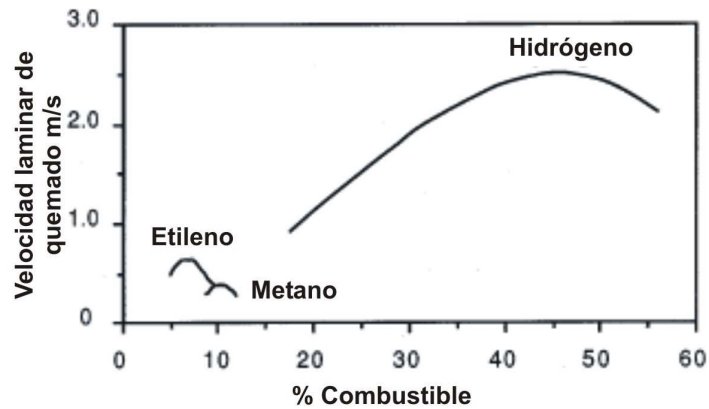
Figura 3.1. Estructura de un frente de llama laminar en una nube de gas.



Cuando se enciende la nube por una fuente débil de ignición, empieza la llama como una llama laminar. Para este tipo de llama, el mecanismo de propagación es la difusión molecular de calor y masa. Este proceso de difusión es relativamente lento y la velocidad de propagación es del orden de 3 - 4 m/seg.

La velocidad de propagación de la llama laminar depende del tipo de combustible y de su concentración. La figura 3.2 muestra la velocidad laminar de quemado para el metano, el etileno y el hidrógeno. Son típicas de los hidrocarburos velocidades de 0.4 - 0.5 m/seg. El etileno, el acetileno y el hidrógeno tienen velocidades superiores debido a su alta difusión molecular. Debido a las diversas técnicas de medición, se tendrán valores diferentes para la velocidad laminar de quemado.

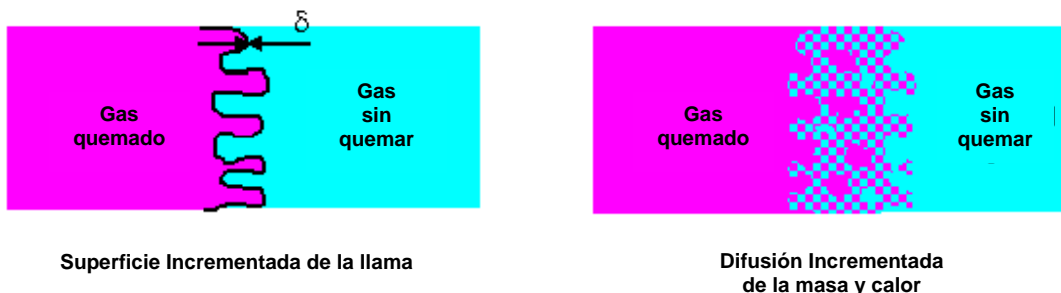
Figura 3.2. Velocidades laminares de quemado (Glassman, 1977; Kuo 1986).



En la mayoría de las explosiones accidentales, se acelerará la llama laminar y el tránsito a una deflagración turbulenta; desde el campo de flujo al frente de llama se pondrá turbulento. La turbulencia se ocasiona por la interacción del campo de flujo con los equipos de proceso, las tuberías y otras estructuras.

Uno de los mecanismos que causan el aumento de la rata de quemado en las deflagraciones turbulentas, es el arrugamiento del frente de llama por grandes remansos turbulentos.

Figura 3.3. Arrugamiento del frente de llama cuando $\delta <$ tamaño del remanso turbulento



Cuando la escala de longitud integral de turbulencia, l_t , es del orden del espesor de la llama ó más delgada, la llama se vuelve un cepillo de llama de espesor turbulento. En este régimen, la turbulencia causa una difusión aumentada de calor y masa y por eso se incrementa la tasa de quemado.

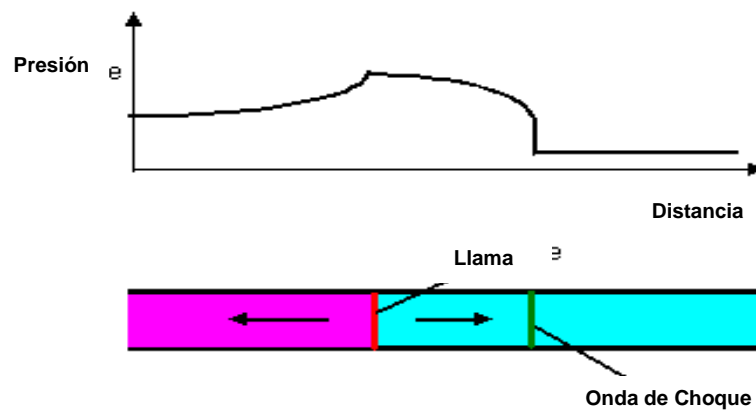
Cuando se propaga una llama a través de una nube de gas, hay dos mecanismos que causan el aumento de presión:

- Propagación rápida de la llama
- Quemado en un volumen confinado.

En la mayoría de las explosiones accidentales, una combinación de estos dos efectos causará el aumento de presión.

Si se tiene una propagación de deflagración en una tubería, se pueden tener situaciones como en la figura 3.4. El frente de llama presentará una caída pequeña de presión. Esta caída de presión sirve para satisfacer las ecuaciones de conservación por el frente de llama.

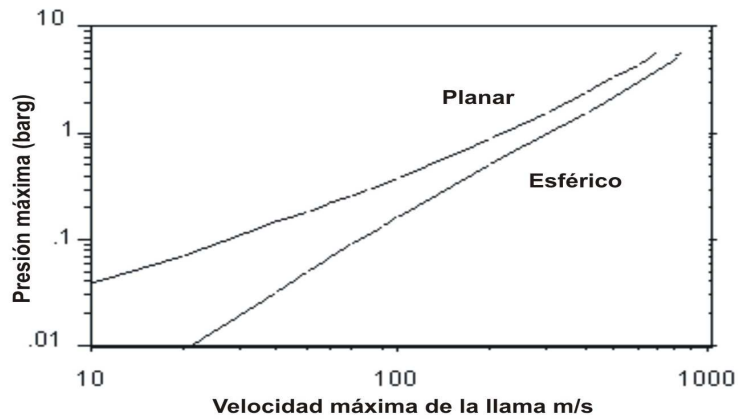
Figura 3.4. Perfil de presión – distancia para una deflagración que se propaga en un tubo.



Para obtener una onda de choque delante de una llama, es necesario tener una velocidad alta de la llama. La figura 3.5 muestra la máxima sobrepresión contra la velocidad de la llama en dos modos de propagación de llama, i) el modo planar, es decir, la propagación de la llama en un tubo y ii) el modo esférico, la propagación de la llama en un medio inconfinado.

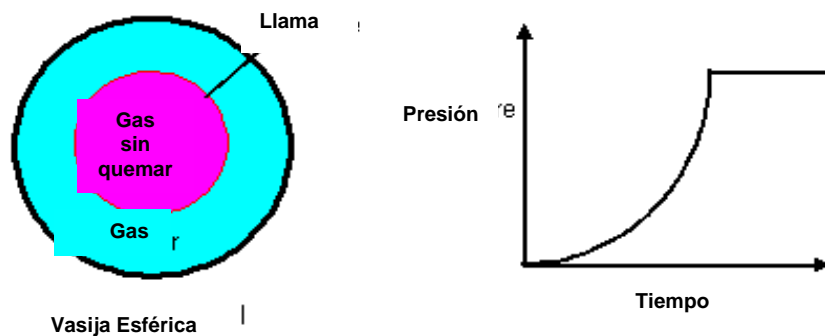
El modo esférico de propagación de la llama exige una velocidad de llama más alta que el modo planar para obtener la misma presión de la explosión. Esto puede explicarse porque el gas se puede extender con más libertad en un modo esférico que en un modo planar.

Figura 3.5. Máxima Sobrepresión vs Velocidad de la Llama para el modo planar y el modo esférico (Moen y Saber, 1985)



Si la explosión ocurre dentro de un recipiente cerrado, la propagación de la llama no exigirá presiones altas. Un recipiente como el que se muestra en la figura 3.6 prevendrá la expansión del gas cuando se queme y lo llevará a un aumento de presión. Una mezcla estequiométrica de aire-combustible en un recipiente cerrado, elevará la presión de 8 a 9 bar en el momento de la explosión. Abriendo una pared del recipiente, será reducido un alivio de presión. La reducción dependerá de qué tan rápido se esté quemando el recipiente y de la ubicación y tamaño del venteo.

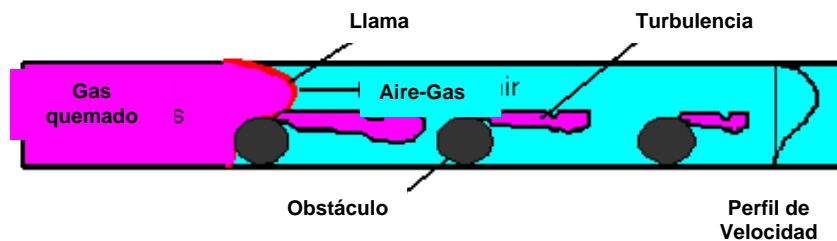
Figura 3.6. Explosión en un recipiente cerrado.



3.2. ACELERACIÓN DE LLAMA EN UN CANAL DEBIDO A LOS OBSTÁCULOS.

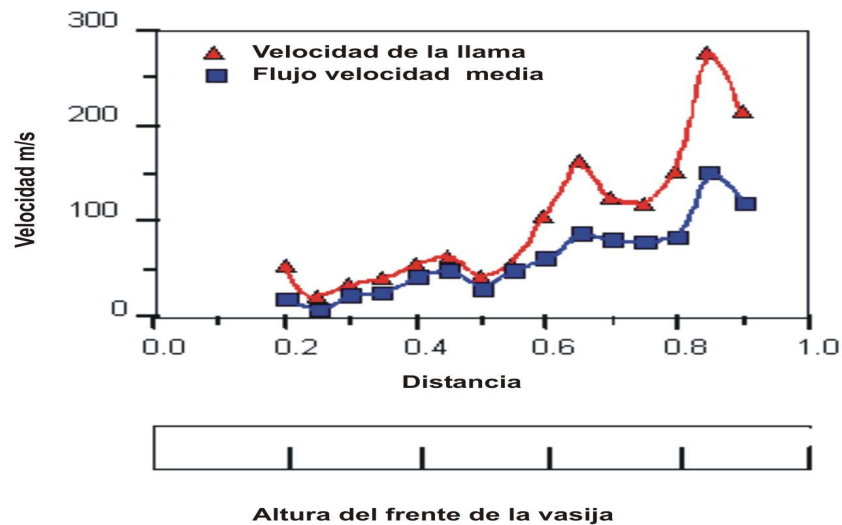
En un área parcialmente confinada con obstáculos pueden acelerar la llama a varios cientos de metros por segundo durante una explosión de gas. Los mecanismos de la rata de quemado, que causan el aumento en las deflagraciones de gas son el arrugamiento en el frente de la llama debido a los remansos y el transporte turbulento de masa y calor al frente de la reacción. Esta turbulencia es causada por la interacción del flujo con las estructuras, las tuberías, etc.

Figura 3.7. Generación de turbulencia debido a los obstáculos durante una explosión de gas.



La figura 3.7 muestra cómo debido a los obstáculos se genera la turbulencia. Cuando la llama consume el gas sin quemar, los productos de combustión se expandirán. Esta expansión puede ser de 8 a 9 veces el volumen inicial. El gas sin quemar es empujado delante de la llama y se generará un campo de flujo turbulento. Cuando se propaga la llama en un campo de flujo turbulento, la tasa de quemado aumentará dramáticamente. Este aumento de la tasa de quemado aumentará la velocidad de flujo y la turbulencia más lejos del frente de la llama.

Figura 3.8. Velocidad de la llama y velocidad de flujo en un recipiente de un metro en forma de cuña con cinco obstáculos. (Bjorkhaug, 1986).

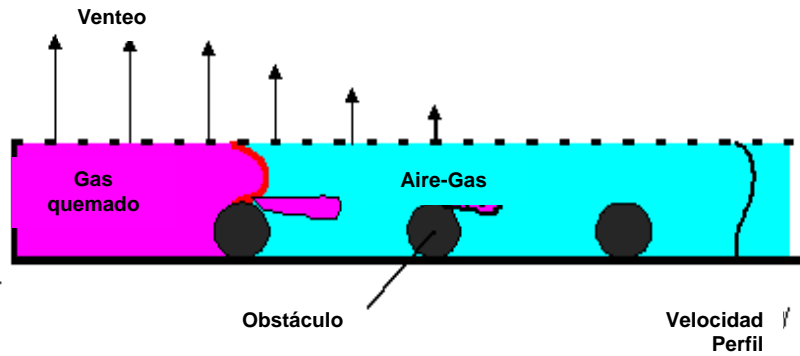


En la figura 3.8 la velocidad de llama y la velocidad de flujo son medidas en un recipiente de 1 metro en forma de cuña. Podemos ver el aumento gradual de las velocidades en la medida en que se propaga bajo el recipiente el frente de llama. Se puede ver también el aumento entre la velocidad de la llama y la velocidad de flujo. El aumento de la velocidad de llama causará la explosión.

La aceleración de la llama se puede evitar venteando los productos de combustión como se muestra en la figura 3.9. Se reducirán el flujo y la turbulencia delante del gas sin quemar delante de la llama. Venteando los productos de combustión, se minimizará el efecto de aceleración de los obstáculos.

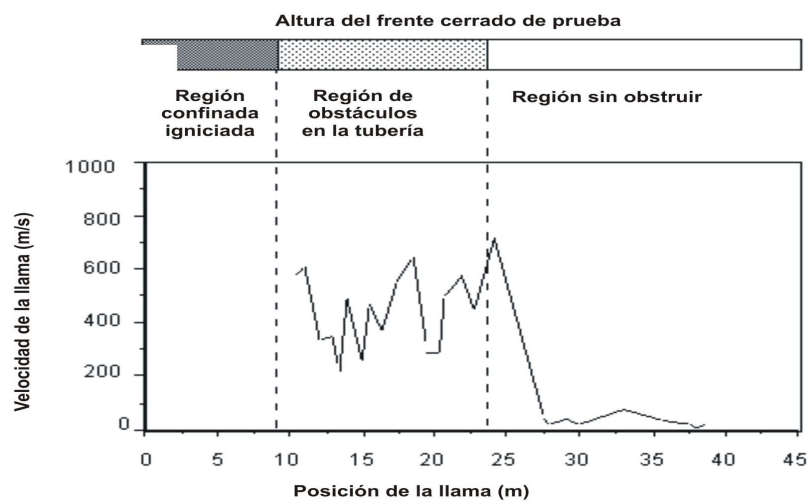
Ventilando los gases de salida delante de la llama puede contribuir a bajar la presión de la explosión, sobretodo cuando se ventea fuera de los obstáculos. Si aun sacando los gases, se repiten los obstáculos, ocurrirá la aceleración de la llama.

Figura 3.9. Salida de productos de combustión antes de los obstáculos para liberar presiones.



Cuando se propaga una deflagración a través de una región de obstáculos y termina en una región sin obstáculos, descenderá la velocidad de la llama y se ajustará al nuevo ambiente. La figura 3.10 muestra cómo una deflagración disminuye la velocidad cuando se propaga de una región con obstáculos a una sin obstrucciones. La velocidad de la llama en la región sin obstruir es tan baja que la presión que se genera es despreciable.

Figura 3.10. Desaceleración de una llama al pasar de una región obstruida a una sin obstrucciones (Harris y Wickens, 1989)



En una deflagración hay dos mecanismos que guían el aumento de la presión en el gas confinado a saber:

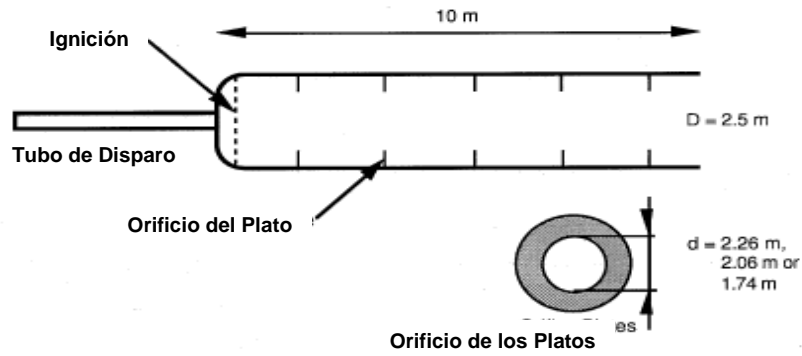
- la aceleración de la llama debido a la turbulencia generada por los obstáculos.
- La ventilación proporcionando un alivio de presión ó reduciendo el efecto de regeneración.

Estos mecanismos compiten entre sí. La aceleración de la llama debido a la turbulencia aumentará la presión mientras que ventilando los gases se reducirá la presión. El equilibrio entre estos dos es lo que guiará el aumento de la presión. Al analizar las explosiones de gas deben tenerse en cuenta estos dos factores.

3.3. EXPERIMENTOS EN UN TUBO DE 50 M³

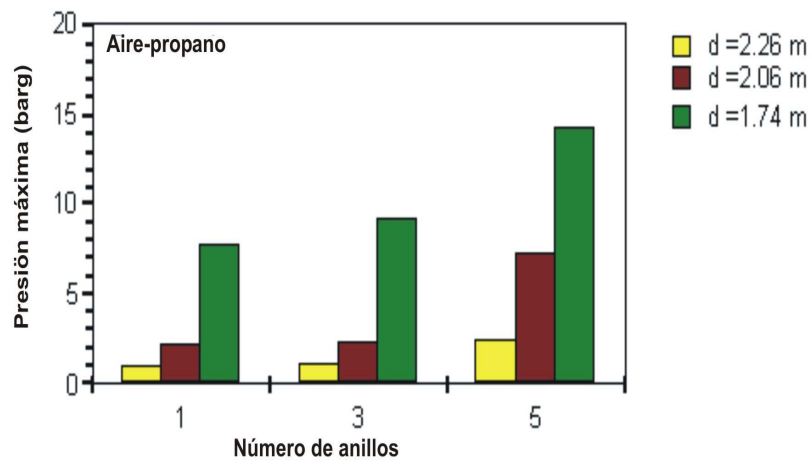
El tubo es de 10 m de longitud y 2.5 m de diámetro. Está cerrado en un extremo y abierto en el otro. Dentro del tubo se pueden montar platinas de orificio. El número de platinas y el diámetro interno de los anillos es variable. La fuente de ignición es un dispositivo de encendido activado eléctricamente (fuente plana de ignición) ó un solo dispositivo de encendido (fuente puntual de ignición). En la mayoría de los ensayos se llenó el tubo con una mezcla homogénea de aire-combustible.

Figura 3.11. Tubo de explosión de 50 m³.



La figura 3.12 muestra algunos resultados de las pruebas con mezclas estequiométricas de aire-propano en un tubo de 50 m³ con una fuente plana de ignición. La presión aumenta de 1 bar a 14 bar, de acuerdo al número y tamaño de orificios dentro del tubo.

Figura 3.12. Presión de explosión para una mezcla propano-aire en un tubo de 50 m³



Cuando el diámetro del orificio es 1.74 m, bloqueará el plato el 50% del área libre del tubo. En el caso que el diámetro del orificio es de 2.25 m, la proporción del obstáculo es el 16%. En la medida que aumenta la proporción del obstáculo, se reducirá el área de venteo y aumentará la velocidad a través de la parte abierta del orificio. Cada platina de orificio acelerará la llama debido a la turbulencia que genera.

3.4. EXPERIMENTOS EN UN RECIPIENTE EN FORMA DE CUÑA

El recipiente en forma de cuña es como se muestra en la figura 3.13. El volumen del recipiente es de 18.5 m³, la longitud es de 10 m y la altura es de 1.25 m. Dentro del recipiente se pueden montar diferentes tipos y números de obstáculos. El techo del recipiente puede ser sólido o perforado.

Con el recipiente de explosión en forma de cuña, ha sido posible estudiar el efecto de varios tipos de arreglos de venteo en combinación con los obstáculos. Los resultados mostrados en la figura 3.14 muestran el efecto de la salida de gas de combustión a través de un techo perforado.

Figura 3.13. Recipiente de explosión en forma de cuña

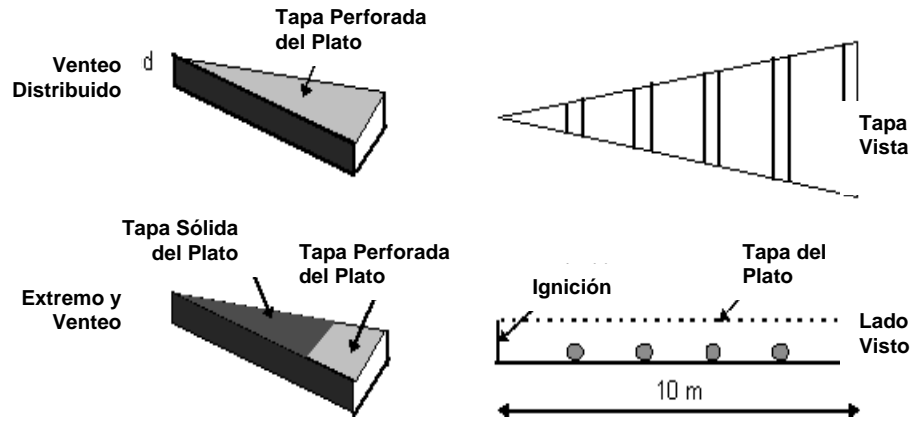
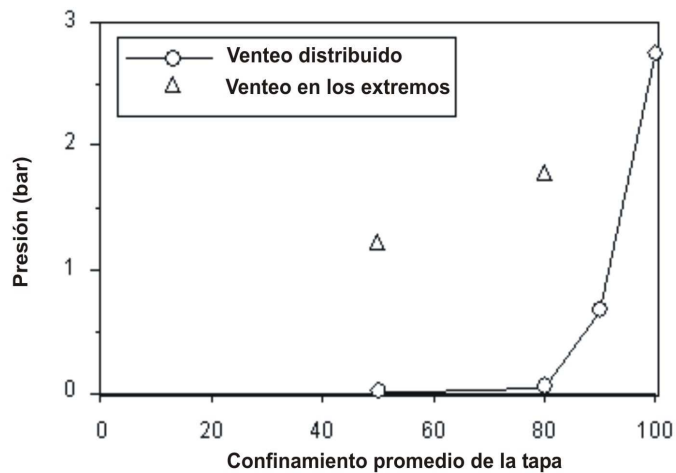


Figura 3.14. Presión de explosión para el propano-aire en un recipiente de 10 m en forma de cuña. Para el techo sólido, la salida se encuentra al final del recipiente con respecto al punto de ignición.



La presión de explosión depende fuertemente del confinamiento de la cubierta. En el caso del 50% de confinamiento, la presión de explosión estaba en menos de 0.05 bar. Cuando el cierre de la cubierta estaba entre el 80% y el 100%, aumentó la presión de la explosión casi dos órdenes de magnitud. Esto es típico para las

explosiones de gas. Los cambios pequeños en la geometría conllevan a considerables cambios en la magnitud de la explosión.

La mayoría de modelos para la predicción de la presión de explosión no tiene en cuenta la ubicación del venteo, simplemente se utiliza el tamaño del área de venteo como un parámetro de entrada. Es obvio que estos modelos son inadecuados y en algunos casos pueden generar sobrepresiones equivocadas por los órdenes de magnitud. Los únicos modelos que pueden responder a los efectos combinados de dar salida a los gases y su ubicación en la sobrepresión de la explosión, son aquellos basados en la solución de ecuaciones dinámicas de fluido.

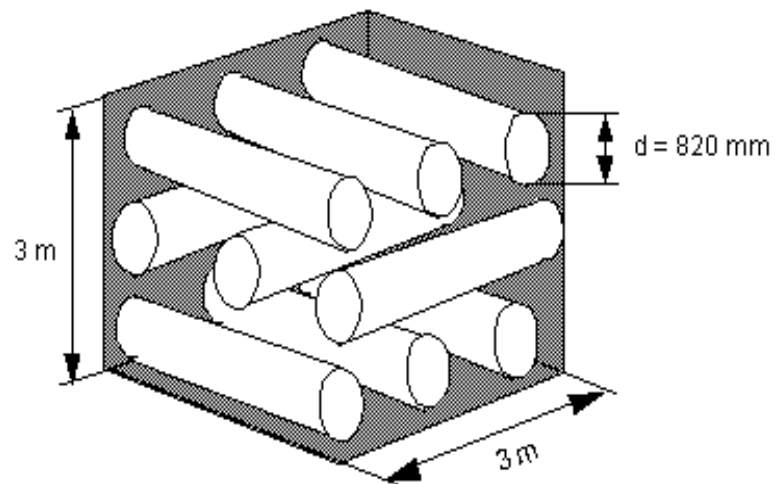
3.5. EXPERIMENTOS DE EXPLOSION EN UN RECIPIENTE CÚBICO.

El recipiente de explosión cúbico se muestra en la figura 3.15. Consiste en una esquina abierta con una longitud de 3 m. En esta esquina se montan las obstrucciones interiores. Las obstrucciones consisten en tuberías con diámetros de 164 mm, de 410 mm y de 820 mm. Todas con porosidades diferentes y proporciones de obstáculo de volumen (VBR).

Tabla 3.1. Diámetro, proporción de obstáculo de volumen (VBR) y número de tuberías en el recipiente de explosión cúbico.

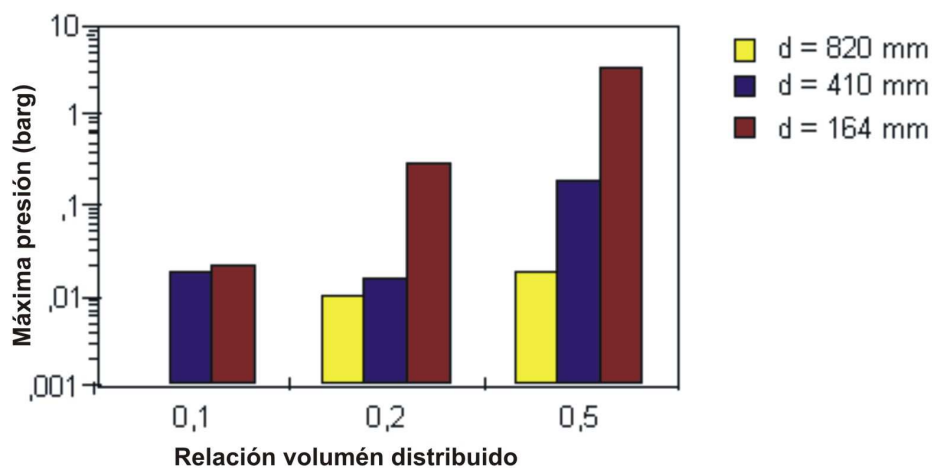
	Proporción de obstáculo de Volumen (VBR)		
D (mm)	0.1	0.2	0.5
164	6 x 6	9 x 9	15 x 15
410	3 x 3	4 x 4	6 x 6
820		2 x 2	3 x 3

Figura 3.15. Recipiente de explosión cúbico con tuberías 3x3



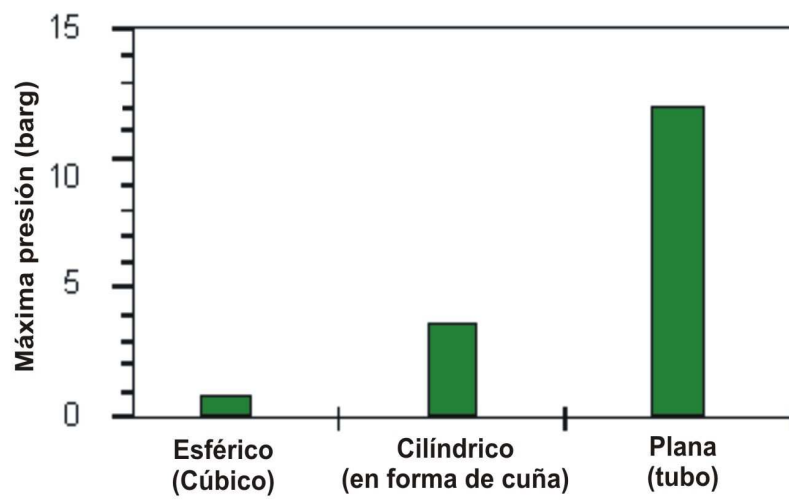
La velocidad de la llama fue 10 m/seg sin obstáculos y aproximadamente 1000 m/seg en arreglos densamente condensados para mezclas estequiométricas aire-propano. Las presiones producidas han ido de unos cuantos milibares a 4 bares. La figura 3.16 muestra la presión de explosión máxima para varias proporciones de obstáculos y diferentes diámetros. Para una misma proporción de obstáculo, los diámetros más pequeños generan una presión más alta. A más proporción de obstáculo, aumentará la presión de explosión.

Figura 3.16. Presión de explosión para una mezcla aire-propano en un recipiente de explosión cúbico.



De los anteriores resultados podemos concluir que la proporción del obstáculo y su volumen es importante, así como la forma y tamaño de los obstáculos. Si se comparan los resultados del recipiente cúbico con otras pruebas similares, el recipiente en forma de cuña y el tubo, se encuentra que el recipiente cúbico presenta la presión de explosión más baja.

Figura 3.17. Comparación de la presión de explosión para una mezcla aire-propano en recipientes cúbico, en forma de cuña y en tubo, con una proporción de obstáculo de 0.5 y 5 obstáculos.



4. DETONACIONES

Una detonación es la más devastadora explosión de gas. Al contrario de la deflagración, una detonación no requiere de confinamiento u obstrucciones para propagarse a alta velocidad. Particularmente, en una situación inconfiada, el comportamiento de una detonación es muy diferente al de una deflagración. Una detonación se define como una onda de combustión supersónica (es decir el frente de la detonación es propagado dentro del gas quemado a una velocidad mas elevada que la velocidad de sonido delante de la onda). El gas delante de una detonación es por consiguiente imperturbado por la onda de la detonación. En las mezclas de aire-combustible a la presión atmosférica, la velocidad de la detonación es típicamente de 1500 - 2000 m/s y la presión máxima es de 15-20 bar (1 bar=14,7 psig).

La transición para la detonación, la propagación y transmisión de las ondas de la detonación, dependen fuertemente de la reactividad de la nube de gas.

4.1 ONDAS DE DETONACIÓN

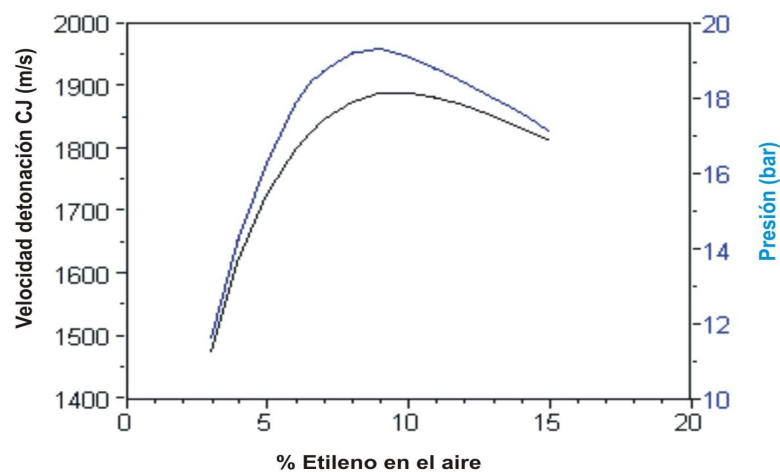
Las ondas de la detonación se observaron experimentalmente hace más de 100 años. Chapman y Jouguet fueron los primeros en presentar una teoría que describe esta onda de combustión supersónica, propagándose a una velocidad única. La teoría CJ (Chapman-Jouguet), (Fickett y Davis, 1979) trata la onda de la detonación como una discontinuidad con una tasa de reacción infinita. Las ecuaciones de conservación para la masa, velocidad adquirida y energía por la onda unidimensional dan una única solución para la velocidad de la detonación (la

velocidad CJ), y el estado de productos de la combustión inmediatamente detrás de la onda de detonación. Basado en la teoría CJ, es posible calcular la velocidad de la detonación, la presión de la detonación, etc. Si es conocida la mezcla de gas. La Teoría CJ no requiere información alguna sobre la tasa de reacción química (es decir la cinética química).

Durante la Segunda Guerra Mundial, Zeldovich, Döring y Von Neumann mejoraron el modelo CJ, teniendo en cuenta la proporción de la reacción. Como lo mostrado en la Figura 4.2 el modelo ZND describe la onda de la detonación como una onda de choque, inmediatamente seguida por una zona de reacción (es decir la llama).

El espesor de esta zona se da por la tasa de la reacción. La teoría ZND da las mismas velocidades de la detonación y presiones como la teoría CJ, la única diferencia entre los dos modelos es el espesor de la onda.

Figura 4.1. Velocidad de detonación CJ y presión para el aire-etileno.



Una detonación real es una onda de choque tridimensional seguida por una zona de reacción. El choque principal consiste en segmentos curvos del choque. En las líneas de separación entre estos segmentos de choque, la onda del choque actúa recíprocamente en una Configuración Mach. En la Figura 4.2 se da una ilustración bidimensional de la estructura real.

Figura 4.2. Estructura ZND y modelo de una estructura real de un frente de la detonación. La balanza de longitud característica del modelo de la celda, el tamaño de la celda, l , se muestra en la figura.



Teoría ZND

El tamaño de la pieza es un modelo generado por el punto triple (proviene de Mach) de la onda de choque, es una medida de la reactividad de la mezcla que representa una medida de longitud caracterizando la reacción global química de la onda (Lee, 1984). Esta medida de longitud, l , es a menudo el tamaño de la celda o la anchura de la misma. La mezcla más reactiva, el más pequeño tamaño de la celda. Las figuras 4.3 y 4.4 muestran la detonación, el tamaño de la celda de detonación contra la concentración de combustible para varias mezclas de aire-combustible.

Figura 4.3. El tamaño de la celda contra la concentración de combustible para el acetileno, etileno e hidrógeno en el aire (25°C y 1 atm) (Shepherd, 1.991)

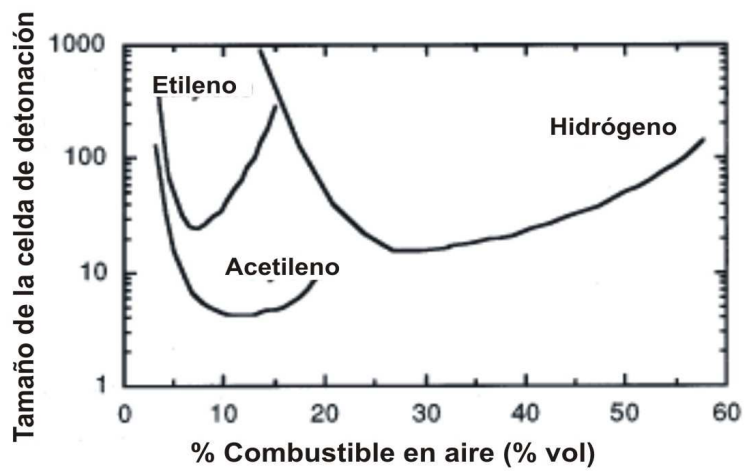
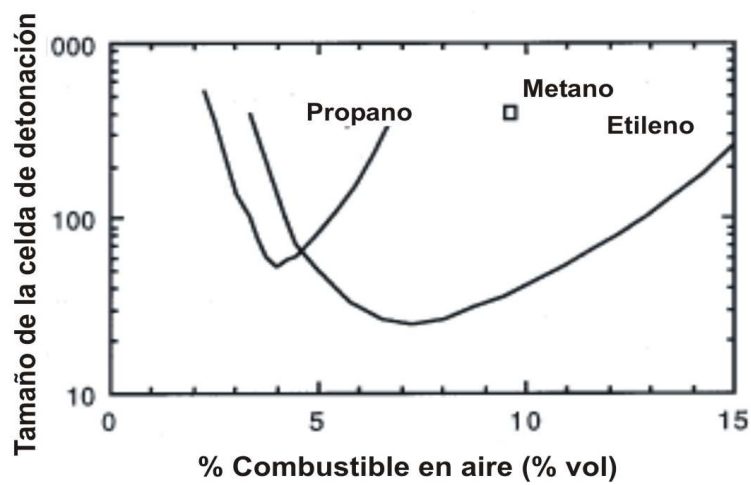


Figura 4.4. El tamaño de la celda contra la concentración de combustible para el etileno, propano y metano en el aire (25°C y 1 atm) (Shepherd, 1991).



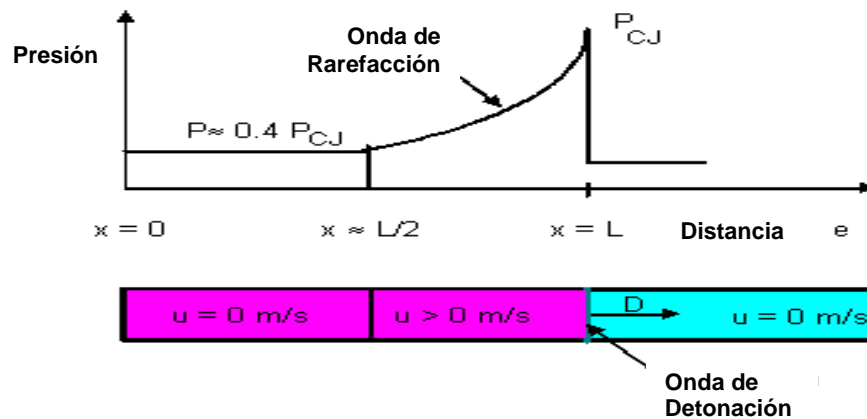
El tamaño de la celda está experimentalmente medido y por eso se presentan algunas variaciones en los resultados reportados. Son poco comunes las variaciones de un factor de dos.

El tamaño de la celda, l , es un parámetro de importancia práctica. La transición de la deflagración para la detonación, propagación y transmisión a la detonación, pueden ser algunos aspectos para ser evaluados, basados en el conocimiento del tamaño de la celda. Esto se discutirá en las secciones siguientes.

4.2 ONDA DE RAREFACCIÓN DETRÁS DEL FRENTE DE UNA ONDA DE DETONACIÓN.

Hasta ahora se ha discutido la presión de la detonación (es decir la presión CJ) de un frente de detonación. Después del frente de la detonación (el plano CJ) los productos de combustión se extenderán. Esta expansión dependerá de las condiciones del límite.

Figura 4.5. El perfil de presión-distancia para una propagación de la detonación en un tubo con un extremo cerrado



En la Figura 4.5 es ilustrada la expansión de productos de combustión que forman una onda de detonación que se propaga en un tubo (es decir propagación unidimensional). El tubo está cerrado en $x = 0$ y se propaga de izquierda a derecha. Cuando la detonación está en $x = L$, la cola de la onda de la expansión se localizará aproximadamente $x = L/2$, la cola de la onda de expansión se propagará la mitad de la velocidad de la detonación para estas condiciones de límite. El proceso de la expansión entre el frente de la onda (las condiciones CJ) y la cola de la onda de expansión puede aproximarse como un inicio isentrópico.

En este caso la tubería está cerrada en $x = 0$. La condición del límite a $x = 0$ son por consiguiente el igual de velocidad del gas para poner a cero ($u = 0 \text{ m/s}$). Para esta condición del límite la presión se extenderá a $P \geq 0.4P_{CJ}$. Note que esta presión es aproximadamente igual que la presión de combustión de volumen constante. Esta presión será constante de $x = 0$ a la cola de la onda de rarefacción (es decir $x \geq L/2$).

Para otras condiciones del límite $u \neq 0 \text{ m/s}$, la presión variará con las condiciones del límite. El modo de propagación para la detonación, es decir el modo esférico o modo del planar, influirá en la cuesta de la expansión detrás de la onda.

4.3 DEFLAGRACIÓN PARA LA TRANSICIÓN DE LA DETONACIÓN (DDT)

Cuando una deflagración es lo suficientemente fuerte, una transición súbita de la deflagración a la detonación puede ocurrir. Esto se ha observado en varios experimentos, sobre todo en aquéllos que involucran mezclas estequiométricas muy reactivas y semejantes como el aire-acetileno, aire-hidrógeno, ó combustibles con atmósferas enriquecidas de oxígeno.

Hay también algunos ejemplos de deflagración para la transición de la detonación en las mezclas de aire-combustible con la reactividad moderada.

i) En un experimento de CMR (Chr. Michelsen Research) (Hjertager, 1.988) una vasija de forma de cuña de 10 m de largo, una mezcla estequiométrica con aire-propano, 100% confinamiento de la cima y obstrucciones redondas, la transición a la detonación fue observada. Este experimento muestra que una explosión de aire-propano comenzó con una fuente de ignición débil, puede acelerar a una detonación en menos de 10 m, si el confinamiento es suficiente y están presentes las obstrucciones.

ii) Moen (1985 y 1989) ha observado la transición a la detonación debido a las llamas de un disparo a chorro de la llama. En una prueba el informó la transición a la detonación en una mezcla ligera de aire-acetileno ($5\%C_2H_2$) en una situación esencialmente cerrada. La transición a la detonación se causó por un disparo a chorro de la llama en una nube inconfiada. Estos experimentos demostraron que

las detonaciones pueden inducirse en una nube de aire-combustible inconfina da con reacción moderada con tal de que sea grande el tamaño de la nube.

iii) Los experimentos de Gas Británico (Acton, 1990) en una geometría de sección de tubería también mostró la transición a la detonación para el aire-propano. La transición a la detonación ocurrió después de 15 m. Este experimento mostró que en situaciones relativamente abiertas, como un puente de tubería, la geometría puede apoyar la aceleración de la llama para la detonación.

Estos experimentos muestran que la transición para la detonación puede ser obtenida por la aceleración de la llama debido a los obstáculos y el confinamiento ó si se dispara un chorro de llama fuera del venteo en un volumen confinado dentro de una nube confinada.

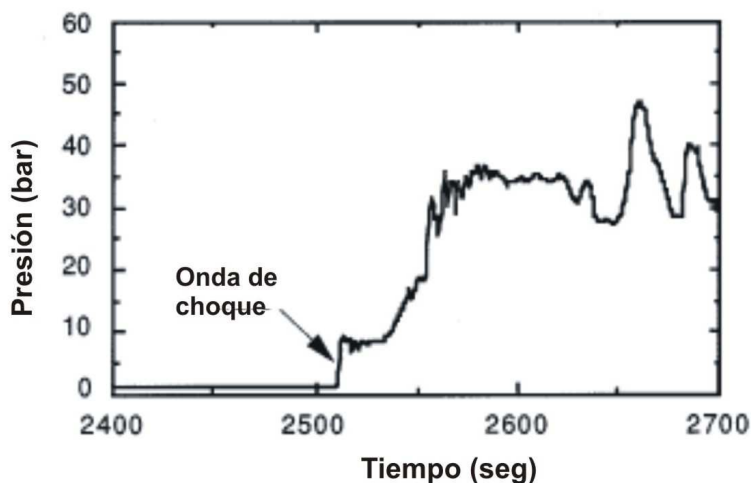
El mecanismo de transición a la detonación no se ha podido explicar totalmente. No existe ninguna teoría que pueda predecir las condiciones de la deflagración a la detonación. Solo se tiene una comprensión cualitativa del fenómeno; esto es probable ya que las explosiones locales causan la transición a la detonación. El tamaño de estas explosiones localizadas debe ser del orden de 10 veces el tamaño de la celda (Moen, 1.985).

Desde un punto de vista práctico, es importante reconocer que esa transición a la detonación causará extremadamente altas presiones en el área dónde la transición tiene lugar.

La Figura 4.6 se muestra un perfil de presión-tiempo de un experimento dónde la transición a la detonación ocurrió. El primer levantamiento de presión a $t = 2510\mu sec$. Es la onda de choque la que comprime el gas quemado. La presión

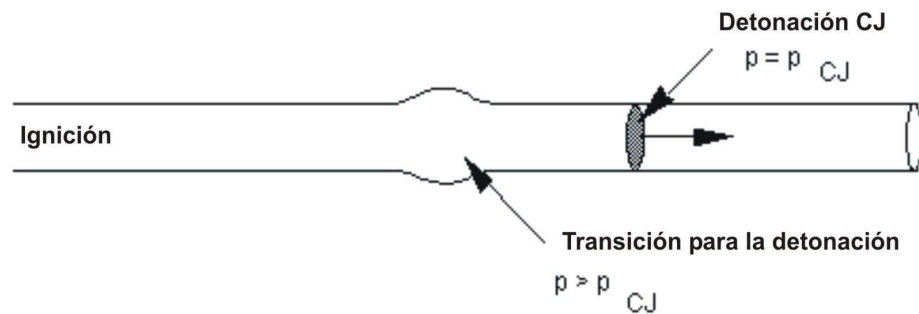
continúa subiendo después de la onda de choque, y como consecuencia una transición a la detonación ocurre. Debido a esta pre-condensación, la presión de la detonación en el proceso de la transición es más alta que la presión en una onda de detonación estabilizada (es decir la presión CJ).

Figura 4.6. El perfil de presión-tiempo de un transductor de presión localizado cerca de una área de transición a la detonación (Engebretsen, 1991).



En una situación de accidente dónde la transición a la detonación ha ocurrido, el daño localizado puede observarse. Un ejemplo es una explosión accidental dentro de una tubería. En una posición particular la tubería se extendió radialmente, como lo mostrado en la figura 4.7:

Figura 4.7. Transición a la detonación en una tubería.



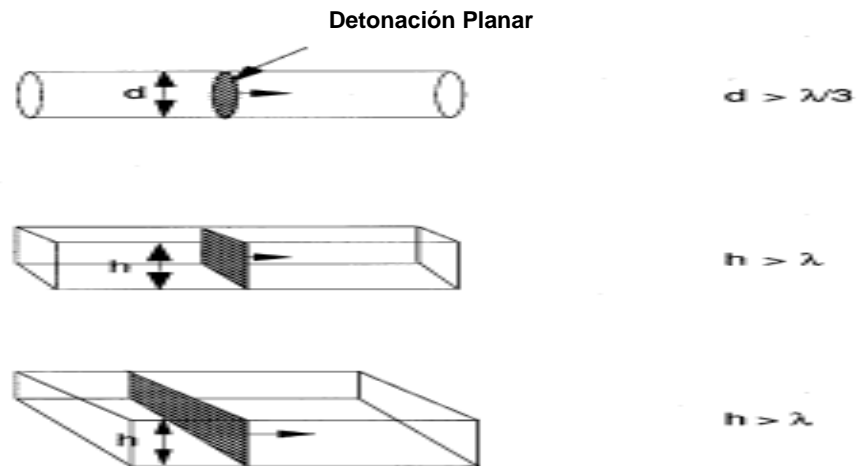
En este caso la tubería pudo resistir la presión CJ, por la ubicación donde la presión de la transición a la detonación tuvo lugar, representada en una fuerza extrema en la resistencia de la tubería.

4.4 PROPAGACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ONDA DE LA DETONACIÓN

De la Teoría CJ, la velocidad de la detonación y la presión pueden ser predecidas, sin depender de las condiciones geométricas. Sin embargo, realmente la propagación y transmisión de una detonación están limitadas por las condiciones geométricas. Las condiciones limitadas se controlan por la sensibilidad de las mezclas de gas y la medida de longitud de la geometría.

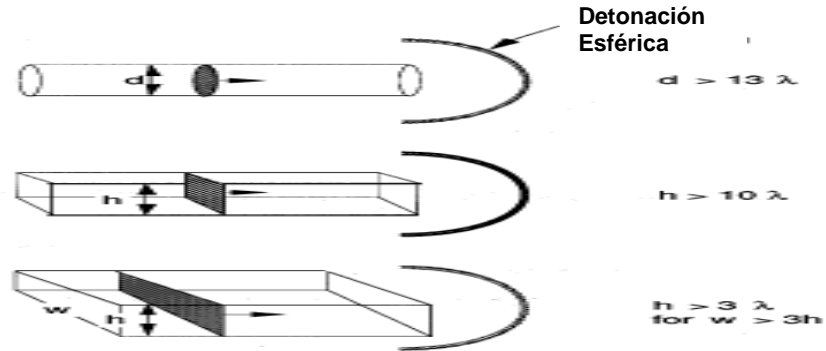
El tamaño de la celda es una medida de longitud que caracteriza la reactividad de la mezcla. Usando estas dos medidas de longitud, pueden evaluarse las condiciones para que se lleve a cabo la propagación y su transmisión. La Figura 4.8 muestra los límites de propagación de una detonación dentro de las tuberías y canales. Se observa que una tubería se sostiene más en la propagación de la detonación que un canal.

Figura 4.8. Los requisitos para la propagación de una detonación planar en las tuberías y en los canales.



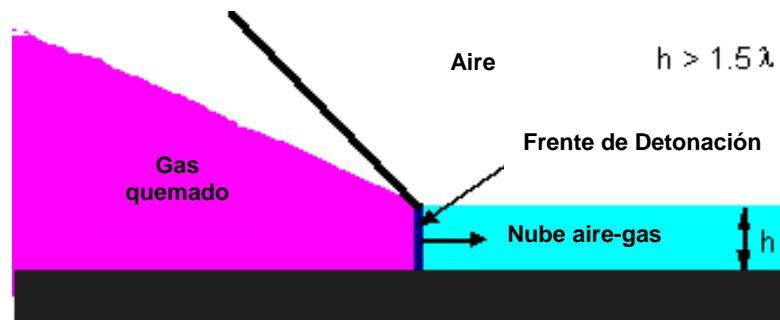
En la Figura 4.9 se muestran los requisitos para una transmisión de detonación planar de una tubería o canal en una localización inconfiada (es decir una onda de detonación esférica tridimensional). Para hacer una transmisión exitosa, hay necesidad de más celdas que para el modo de propagación planar. La información en la Figura 4.9 es útil evaluando la posibilidad para la transmisión de una detonación de un área confinada, como por ejemplo un edificio, un ducto de ventilación, una alcantarilla etc.

Figura 4.9. Requisitos para la transmisión exitosa de una detonación planar dentro de una onda de detonación esférica tridimensional.



En la figura 4.10 se muestra el requisito para la propagación en una nube inconfiada.

Figura 4.10. El límite para la propagación de ondas de detonación en una nube de aire-combustible.



4.5 ESTIMACIÓN DE CARGAS PARA DETONACIÓN

Para estimar los valores CJ para las mezclas de gas, hay diversos software como el STANJAN del Prof. W.C. Reynolds de la Universidad de Stanford.

4.6 PAUTAS EN LAS DETONACIONES

La probabilidad de ocurrencia de una detonación en mezclas de aire-combustible depende fuertemente del tipo de combustible. Los combustibles muy reactivos, como el hidrógeno, el acetileno o el etileno, pueden detonar en una situación de accidente. Para situaciones de accidentes que involucren combustibles de este tipo, deben considerarse las detonaciones como un posible escenario.

Otros combustibles probablemente causen una detonación menor. En particular no existen datos sobre detonaciones que involucren el aire-metano puro. Generalmente, en nubes de gas grandes con un alto grado de confinamiento y/o con obstrucciones de alta densidad, las detonaciones no pueden ser controladas. La manera más eficaz de mitigar la ocurrencia de una detonación, es evitar situaciones dónde la deflagración puede acelerar a una condición dónde la transición es posible, es decir las deflagraciones de alta presión.

La presión de la detonación CJ puede calcularse por los códigos como STANJAN, BREEZE, FLACS, etc. Pueden usarse tales datos, para las ondas de detonación estables. Sin embargo, en caso de la transición de la deflagración para la detonación, la presión será mucho más alta que los valores CJ.

La propagación y transmisión de ondas de la detonación dependen principalmente del tamaño de la celda (es decir el tipo de combustible y de la concentración del combustible) y de las condiciones geométricas. Operando con dimensiones geométricas (d, w, h) es más pequeño que los límites indicados en las Figuras 4.8 y 4.10, esto es muy improbable, ya que una detonación estable puede ocurrir.

El tamaño de la celda no es un número exacto como una medida de detonabilidad. En la literatura una variación de un factor de dos se encuentra a menudo. Al usar

los tamaños de las celdas para la estimación de limitar las condiciones para una propagación o transmisión exitosa, ellos deben considerarse como los valores aproximados. Deben usarse factores de seguridad.

5. BLEVE – BOLA DE FUEGO

5.1 INTRODUCCIÓN

Las explosiones de gas de tipo BLEVE son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria o en el transporte de sustancias peligrosas. Desde un punto de vista riguroso, como se verá más adelante estas explosiones no siempre tienen efectos térmicos. No obstante, en la mayoría de los casos reales la sustancia involucrada es combustible; esto provoca que la explosión sea seguida por la formación de una bola de fuego, de efectos muy graves. En realidad, cuando se habla de BLEVE, en general a lo que se hace referencia realmente es a la combinación de los fenómenos BLEVE – bola de fuego, esto es, un accidente que involucra simultáneamente efectos térmicos y mecánicos.

El BLEVE es un accidente que sucede con cierta periodicidad: las sustancias que lo pueden producir (butano, propano, cloruro de vinilo, cloro, etc.) son relativamente comunes en la industria, y abundan las instalaciones susceptibles de sufrirlo (depósitos, cisternas). Por otra parte, de vez en cuando sucede durante el transporte, ya sea por carretera o por tren, con las connotaciones especiales que esto conlleva. El origen puede ser diverso (reacción fuera de control, colisión, etc.), pero una de las causas más frecuentes es la acción del fuego sobre un recipiente.

Desde que la palabra BLEVE, formada por las iniciales de *boiling liquid expanding vapor explosión* (explosión del vapor en expansión de un líquido hirviendo) fue utilizada por primera vez por Smith, Marsh y Walls el año 1957 (WALL 58),

muchos autores han tratado este tipo de accidente. Una parte importante de ellos se han dedicado a describir el fenómeno.

Otros han analizado casos concretos y unos cuantos han propuesto expresiones matemáticas para estimar sus efectos. Por la complejidad de este fenómeno, que tiene al mismo tiempo características de explosión y de incendio, es oportuno dedicarle específicamente un capítulo. En el mismo se hace una descripción de las características principales de estos accidentes y de sus aspectos fundamentales, y también se presenta una metodología práctica para la estimación de sus efectos.

Esta información permite hacer un análisis estadístico elemental sobre cuáles han sido las causas externas que han originado con más frecuencia un accidente de este tipo. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Causas externas mas frecuentes que han originado BLEVE.

<i>Causa</i>	<i>%</i>
<i>fuego</i>	<i>26</i>
<i>rebosamiento</i>	<i>18</i>
<i>descarrilamiento</i>	<i>20</i>
<i>reacción fuera de control</i>	<i>12</i>
<i>colisión</i>	<i>10</i>
<i>sobrepresión</i>	<i>6</i>
<i>otras</i>	<i>8</i>

Algunas de las causas pueden existir simultáneamente (por ejemplo, de los 18 casos de “fuego”, 5 tuvieron lugar inmediatamente después de un descarrilamiento). Incluso así, da buena cuenta del elevado número de casos en los que un incendio ha provocado un incremento de presión en el recipiente con la explosión consiguiente, como también de la importancia que tienen el rebosamiento, los accidentes en el transporte de determinadas sustancias y las reacciones fuera de control. Estos datos ponen de manifiesto que este tipo de accidente ocurre tanto en instalaciones fijas como en transporte.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO

Si un recipiente que contiene un líquido de presión es calentado – por ejemplo, por la radiación procedente de un incendio – la presión en su interior irá en aumento. Llegará un momento en el que las paredes no podrán resistir la elevada tensión a la que están sometidas y cederán. Esto sucederá principalmente en la parte superior del recipiente, donde la pared al no estar bañada por el líquido no estará refrigerada, de este modo aumentará su temperatura y disminuirá su resistencia mecánica. En cambio, la parte del recipiente situada por debajo del nivel del líquido que contiene transmitirá el calor recibido al líquido, por lo que se calentará mucho menos que la parte superior. En caso de abertura de una válvula de seguridad, la ebullición del líquido implicará una refrigeración aún mayor de esta superficie, debido al calor de vaporización.

La despresurización súbita del líquido hará que este se encuentre a una temperatura superior a la que le correspondería en la curva de saturación P-T para la nueva presión. El líquido que se encuentra en estas condiciones de inestabilidad se define como “líquido sobrecalentado”. Si su temperatura en el momento de la despresurización es superior a una temperatura denominada

“temperatura límite de sobrecalentamiento” (que sería distinta para cada producto), se producirá una vaporización instantánea y brutal de una parte del mismo, que será vertido al exterior en forma de mezcla bifásica líquido/vapor.

El incremento extraordinario de volumen que experimenta un líquido al vaporizarse que es de unas 1.700 veces en el caso del agua y de unas 250 veces en el caso del propano, más la expansión del vapor preexistente, provocarán una onda de presión (explosión, estallido del depósito), así como la rotura del recipiente en varios pedazos que serán lanzados a una distancia considerable. Si la sustancia contenida inicialmente en el recipiente no es combustible, la onda de sobrepresión y la proyección de fragmentos serán los únicos efectos de la explosión. Este sería el caso de la explosión de una caldera de vapor que contuviera, evidentemente, agua (como se verá mas adelante, de hecho, y estrictamente hablando para que sea una explosión BLEVE la presión dentro de la caldera debería tener un valor mínimo).

En cambio, si la sustancia contenida en el recipiente es combustible, como suele suceder en la industria química (por ejemplo, gas de petróleo licuado como el etileno o el propano), la masa de líquido y vapor vertida en el momento de la explosión se incendiará, y dará lugar a una hoguera de forma aproximadamente hemisférica que se extenderá inicialmente a ras del suelo. El efecto de la radiación térmica en esta primera fase (muy corta ya que suele durar sólo un par de segundos), si bien ha sido menospreciada por algún autor, es muy importante. Esta masa de combustible sólo puede arder en superficie, porque su interior, muy rico en combustible, (hay que tener en cuenta la presencia de la fase líquida arrastrada en el proceso de vaporización instantánea) y prácticamente sin aire, se encuentra fuera de los límites de inflamabilidad.

En realidad, no todo el combustible presente en el recipiente en el momento de la explosión forma parte de esta hoguera. Una parte del mismo puede ser arrastrada por la estela formada por los fragmentos del depósito que salen disparados. En un caso (Ciudad de México 1984) se ha sugerido que parte del combustible había sido proyectado hasta distancias considerables sin inflamarse, y posteriormente se incendió y provocó incendios y explosiones locales en las viviendas de los alrededores; este efecto, sin embargo, no se ha observado en ningún otro accidente. Todo esto afecta, evidentemente, a la cantidad de combustible que queda disponible para alimentar la bola de fuego y, por tanto, afecta también a sus dimensiones y a su duración.

Posteriormente la turbulencia del incendio provoca que vaya entrando aire dentro de la masa de combustible. Simultáneamente, la radiación procedente de la combustión va evaporando las gotas de líquido y evaporando el conjunto. Como resultado de todo este proceso, la masa en ignición va aumentando su volumen en forma turbulenta (se han propuesto valores del orden de 1 m/s para la velocidad de crecimiento del diámetro), adquiriendo una forma mas o menos esférica y va ascendiendo, dejando una estela de diámetro variable semejante en la forma a la de la típica “seta” de una explosión nuclear. Las dimensiones de las bolas de fuegos formadas de este modo pueden ser extraordinariamente grandes, con un desprendimiento de radiación térmica fortísimo. La acción de la combinación BLEVE - bola de fuego puede sintetizarse, pues, en los efectos siguientes:

- radiación térmica,
- onda de sobrepresión,
- fragmentos despedidos por la explosión,
- lluvia eventual de combustible en los alrededores (citada sólo en un caso).

Estos efectos han sido enumerados siguiendo aproximadamente un orden de mayor a menor gravedad respecto a sus consecuencias. Es necesario aclarar, sin embargo, que este orden es difícil de establecer, dada la distinta forma de actuar de las diferentes acciones: puntual o por lo menos muy direccional en el caso de los fragmentos, radial barriendo toda el área en el caso de la onda de sobrepresión y de la radiación térmica.

Es importante resaltar la imprevisibilidad que presenta el momento en el que se producirá la explosión. Hace algunos años, se consideraba que desde el comienzo de la emergencia – por ejemplo, desde el inicio de un incendio que afectaba a un depósito- se requería de un tiempo determinado para que se produjera la explosión. Se creía, por tanto, que existía la posibilidad de tomar determinadas medidas (por ejemplo, que los bomberos refrigerasen con mangueras). No obstante, a medida que se ha ido acumulando información sobre los BLEVE se ha visto que este tiempo podía ser extraordinariamente corto; en el accidente de San Juan Ixhuatepec (Ciudad de México) el tiempo transcurrido entre la primera explosión, que originó distintos incendios y la primera BLEVE fue solo de 69 segundos (las dos explosiones fueron registradas por un sismógrafo).

El tiempo a partir del cuál puede ocurrir un BLEVE en un recipiente afectado por un incendio depende de los siguientes factores: a) flujo calorífico del incendio, que será función de la distancia al fuego del recipiente afectado, de si hay contacto directo con las llamas y el tipo de llamas (llamas turbulentas, de antorcha, etc.); b) radio de la esfera o del cilindro que forma el recipiente; c) grado llenado del recipiente; d) capacidad de alivio de las válvulas de seguridad; e) espesor de la capa de producto ignífugo aplicado como protección pasiva. Teóricamente, un recipiente ignífugo debería poder aguantar el efecto de las llamas de un incendio de balsa (flujo calorífico del orden de 100 kWm^{-2}), durante unas 2 h. Si se trata de un dardo de fuego, el flujo calorífico aumenta considerablemente (pasa a ser de

unos 350 kWm^{-2}). En estas condiciones se han registrado BLEVE en los primeros 8 minutos. Para el desarrollo de este tipo de accidentes se han propuesto los tiempos siguientes: contacto directo con dardos de fuego, 5 min, contacto directo con llamas turbulentas, 30 min, (este valor coincide con el citado por ciertas normas de intervención de reconocido prestigio que fijan el tiempo en 20-30 min).

Aunque este tiempo puede variar en función de las características de la instalación (existencia de aislamiento térmico, refrigeración, etc.), es evidente que otros factores pueden contribuir a reducirlo aún más (impactos o daños debidos a ondas de sobrepresión, por ejemplo); lo más prudente, pues, en estas circunstancias, es tener presente que la explosión puede producirse en cualquier momento y evacuar rápidamente la zona.

5.3 CONDICIONES PARA LA EXISTENCIA DE BLEVE

5.3.1 Sobrecalentamiento y despresurización

Si bien la explosión de un recipiente que contenga un líquido inflamable a presión casi siempre provocará una bola de fuego, no siempre se puede hablar rigurosamente de explosión BLEVE. Para que la explosión sea de este tipo, con la violencia extraordinaria que la caracteriza y que es la que provoca que los fragmentos puedan alcanzar distancias considerables, se tienen que cumplir unas determinadas condiciones:

- *Sobrecalentamiento* considerable del líquido, de forma que el mismo esté a una temperatura superior a su temperatura límite de sobrecalentamiento. Esta condición la cumplen la mayoría de los gases licuados (GPL, amoníaco, cloro). Por otra parte, también pueden cumplirla líquidos contenidos en recipientes cerrados que se ven sometidos a un

calentamiento anómalo, por ejemplo, por la radiación de un incendio; y, como ya se ha dicho anteriormente, también la cumple el agua a presión en el interior de una caldera. En todo caso, para la existencia de BLEVE en sentido estricto es necesario un valor mínimo de este sobrecalentamiento.

- *Despresurización súbita*, de forma que se reduzca instantáneamente la presión a la que se encuentra toda la masa de líquido contenida en el recipiente. Un fenómeno de este tipo, suele comportar, en caso de accidente, la rotura del depósito, ya sea por el incremento excesivo de la presión interior y, simultáneamente, por el calor excesivo de las paredes a causa de un incendio, o ya sea por un impacto. Sea cual sea la razón, la sustancia contenida en el recipiente pasa en un instante desde la presión a la que estaba almacenada – extraordinariamente alta si el recipiente había estado sometido a la acción de un incendio – a la presión para que la vertical trazada por el punto de equilibrio en la curva P-T en la que se encontraba el líquido, corta a la recta límite de sobrecalentamiento.

Cuando se dan las dos condiciones anteriores se produce una vaporización casi instantánea con formación de núcleos de vaporización en toda la masa (nucleación homogénea). Se ha sugerido la formación de “un millón de núcleos de ebullición por milímetro cúbico y milisegundo”. En estas condiciones, la velocidad de incremento del volumen es extraordinaria y la violencia de la explosión es muy elevada. Este es, estrictamente hablando, el fenómeno asociado a la explosión BLEVE.

5.3.2 Temperatura y línea límite de sobrecalentamiento

Diversos autores han sugerido procedimientos para establecer la temperatura límite de sobrecalentamiento y la línea límite de sobrecalentamiento, que determinan, para cada sustancia, las condiciones a partir de las cuáles es posible

que se produzca el BLEVE. Es obligado aquí citar los trabajos de Reid (1.979), la esencia de los cuáles se comentará brevemente.

Las condiciones de límite de sobrecalentamiento en las que se producirá la nucleación espontánea en toda la masa del líquido, se pueden establecer a partir de la línea tangente a la curva de presión de vapor-temperatura en el punto crítico.

La relación entre la presión de vapor y la temperatura es la establecida por la ecuación de Antoine:

$$\ln P = - \frac{A}{T} + B \quad (5.1)$$

La tangente a la curva de saturación en el punto crítico se obtiene calculando la derivada de la presión respecto a la temperatura:

$$\frac{dP}{dT} = A \frac{P}{T^2} \quad (5.2)$$

Aplicando esta expresión al punto crítico,

$$\frac{dP_c}{dT_c} = \frac{p_c A}{T_c^2} = \operatorname{tg} \alpha \quad (5.3)$$

Esta expresión da, pues, la pendiente de la línea tangente a la curva de saturación en el punto crítico. La ecuación de la recta será:

$$P = \operatorname{tg}\alpha \cdot T + b \quad (5.4)$$

La utilidad de esta expresión se verá más claramente mediante un ejemplo. Se calcula a continuación el valor límite de sobrecalentamiento para el butano. Los datos de equilibrio correspondientes al punto crítico y a la presión atmosférica son:

$$P_c = 38,7 \text{ atm} \quad T_c = 425,8 \text{ K}$$

$$P = 1 \text{ atm} \quad T = 272,5 \text{ K}$$

Introduciendo estos datos en la ecuación de Antoine, se hallan los valores de las constantes A y B para el butano (para la presión expresada en atm y la temperatura en K):

$$A = 2769 \quad B = 10,16$$

La pendiente de la tangente a la curva de saturación en el punto crítico es, pues:

$$\operatorname{tg}\alpha = 38,7 \cdot \left(\frac{2769}{425,8^2} \right) = 0,591$$

Y el valor de la ordenada en el origen, b , se encuentra introduciendo nuevamente los valores correspondientes al punto crítico, con lo que se obtiene $b = -213$. De este modo se determina la ecuación de la recta tangente; su intersección con el eje de temperaturas a $P = 1$, da una temperatura de 89°C. Para el sistema de coordenadas empleado con origen en 0°C, la ordenada en el origen será la presión correspondiente a 273 K,

$$P_{273} = 0,591 \cdot 273 - 213 = -52 \text{ atm}$$

Supongamos un depósito de butano a temperatura ambiente (unos 20°C), en el que el líquido y el vapor están en equilibrio a una presión absoluta de 2 atm. Si por la radiación emitida en un incendio, la temperatura aumenta hasta 70°C, la presión en el interior del depósito será de 8 atm. Si en estas condiciones el depósito estalla (por fallo del material o por impacto, por ejemplo), habrá una despresurización desde 8 atm hasta la presión atmosférica. A presión atmosférica, la temperatura de la mezcla líquido-vapor formada será – 0,5 °C; el punto correspondiente de despresurización corresponde a la línea vertical que une N con O. Al no llegar esta línea hasta la recta tangente a la curva de saturación en el punto crítico, se puede considerar estrictamente que no habrá BLEVE. Es decir, si bien se producirá una fuerte vaporización instantánea, no se dará una nucleación en toda la masa del líquido.

En cambio, si en el calentamiento la temperatura del líquido llega, por ejemplo, a 90°C en la despresurización se alcanza la recta tangente. En este caso se darían las condiciones necesarias (sobrecalentamiento) para que se produzca la nucleación antes mencionada y sucedería una explosión BLEVE.

En realidad, la utilización de la recta tangente a la curva de saturación en el punto crítico como valor límite para la existencia de BLEVE implica un margen de seguridad; los datos experimentales parecen poner de manifiesto que la diferencia entre el límite real de sobrecalentamiento capaz de provocar BLEVE y el establecido por esta recta es del orden de 20 a 35°C. Esto es debido a que cuando el producto se despresuriza hasta alcanzar la línea límite de sobrecalentamiento, se produce también una ligera disminución de temperatura, de forma que para alcanzar el punto de intersección de la tangente en el punto crítico con la recta $P = 1 \text{ atm}$ (temperatura límite de sobrecalentamiento) será necesario partir de una temperatura superior. Si desde esta nueva temperatura se traza una vertical se obtendrá un nuevo punto o temperatura límite para la recta

P=1 atm. Uniendo este nuevo punto límite con el punto crítico, se obtendrá una nueva línea límite de sobrecalentamiento más cercana a la realidad que la tangente propuesta por Reid. Ha sido propuesta la expresión siguiente para calcular este límite de sobrecalentamiento:

$$T_g - T_s = 0,82206T_{cr} - 0,89485T_s \quad (5.5-a)$$

Donde T_g es la temperatura límite de sobrecalentamiento y T_s la temperatura de saturación correspondiente a la presión atmosférica. Algunos autores en vez de esta expresión utilizan la siguiente:

$$T_g = 0,89 T_{cr} \quad (5.5-b)$$

La diferencia entre las temperaturas obtenidas mediante estas dos expresiones oscila entre -3°C y +5°C. Existen, sin embargo, algunas reservas, sobre la utilidad de estas predicciones en un caso real. En el calentamiento de un depósito por un incendio, a escala real, aparecen sin duda algunos factores, como por ejemplo los sobrecalentamientos locales, que dificultan La predicción para determinados casos de si se producirá BLEVE o no. Este es un campo en el que queda aún un interesante trabajo de investigación por realizar.

5.4 ESTIMACION DE LOS EFECTOS

5.4.1 Radiación Térmica

El impacto más importante de una explosión BLEVE que involucre a una sustancia inflamable es el debido a su intensa radiación térmica. La energía térmica es

liberada en un período relativamente corto, del orden hasta de 40 s; el fenómeno se caracteriza por una radiación intensa, ya desde su inicio, de manera que no permite la huida de las personas que se encuentran en los alrededores (que, por otra parte, habrán sufrido también los efectos de la explosión mecánica). Los parámetros que se deben evaluar para la predicción del peligro originado por una bola de fuego son su diámetro, su duración y la radiación térmica en puntos concretos. A continuación se presenta la metodología para calcular estos valores.

Distintos autores han propuesto correlaciones para la predicción del diámetro y la duración de una bola de fuego a partir de la cantidad de combustible involucrado en la misma. Estas correlaciones corresponden a las expresiones siguientes:

$$D = a \cdot M^b \tag{5.6}$$

$$t = c \cdot M^e \tag{5.7}$$

Siendo a, b, c y e constantes empíricas o semiempíricas el valor de las cuales varía según el autor de que se trate. Satyanarayana, comparó las predicciones de los diferentes modelos con datos experimentales, es decir, datos reales procedentes de explosiones. El análisis estadístico demostró que la mejor correlación para la estimación del diámetro de la bola de fuego es la propuesta por Gayle, seguida muy de cerca por las propuestas por Marshall Roberts, TNO y High. Respecto al tiempo de duración del fenómeno, no fue posible realizar ninguna comparación ya que no hay datos reales en la literatura. Parece aconsejable, pues, utilizar también la ecuación de Gayle. En otro análisis comparativo efectuado con 23 modelos, Capdevila obtuvo como mejores correlaciones las de Gayle, Marshall, Roberts, Moorhouse, TNO, High y Clay.

Resulta difícil, por lo tanto con los pocos datos experimentales disponibles, precisar cual es realmente la mejor expresión. La predicción del diámetro y la duración de la bola de fuego se puede realizar, pues, mediante las expresiones siguientes:

$$D = 6,14 \cdot M^{0,325} \quad (5.8)$$

$$t = 0,41 \cdot M^{0,340} \quad (5.9)$$

Donde las unidades de D son m, las de M, kg y las de t, s.

D es el diámetro de la bola de fuego, M la masa de combustible y t el tiempo de duración de la bola de fuego.

Es interesante destacar, sin embargo, que se dispone aún de relativamente pocos datos experimentales (reales) para llevar a cabo este tipo de análisis comparativo; por otra parte, estos datos- procedentes siempre de accidentes reales en el caso de grandes bolas de fuego – no siempre son lo suficientemente fiables, ya que a menudo las filmaciones son defectuosas e incompletas. La notable dificultad que implica la experimentación a gran escala hace que sea extraordinariamente interesante al estudio de los casos reales de bola de fuego que de vez en cuando se producen en la industria o en el transporte de determinados productos.

Todo ello provoca que los resultados de un análisis de este tipo puedan variar según los datos utilizados. Así, en otro estudio efectuado en 8 ecuaciones, las mejores ecuaciones resultaron ser las propuestas por Marshall y API. Otros autores han observado notables discrepancias entre las diversas correlaciones existentes.

Esto pone de manifiesto una vez más que estas expresiones lo que proporcionan en realidad es el orden de magnitud y que querer realizar un cálculo preciso en este tipo de fenómeno es una pérdida de tiempo; hay que tener en cuenta, entre

otras cosas, que no se puede aspirar a calcular con precisión, ni tampoco tiene ningún sentido hacerlo, el diámetro de una masa de fuego que nunca es exactamente una esfera.

La imprecisión no reside solo en la dispersión de los resultados obtenidos en las distintas correlaciones. Otro factor que influye es la proporción de la masa total del combustible presente inicialmente en el depósito, que realmente pasa a formar la bola de fuego. Es decir, como en tantos otros casos de análisis de riesgos, la dificultad surge en la propia definición del problema.

Hay que tener en cuenta que una parte del combustible ha estado saliendo del depósito por las válvulas de seguridad desde el mismo momento en el que se abrieron; la cantidad así perdida dependerá del tiempo transcurrido entre este momento y el de la explosión. Además, otra parte sale acompañando los fragmentos de depósitos lanzados por la explosión y forma una estela en la trayectoria de los mismos.

En definitiva, resulta imposible precisar que cantidad de masa de combustible contribuirá realmente a formar la bola de fuego. Esta dificultad aparece en los criterios recomendados por diferentes autores. Así, Nazario propone utilizar la masa correspondiente a la máxima capacidad del depósito y TNO recomienda el 90% de este valor, estos aparecen ser los criterios más aconsejables, si bien otros autores consideran que solo el $\frac{2}{3}$ ó $\frac{2}{4}$ partes del combustible inicial pasan a la bola de fuego.

No obstante, la masa de combustible aparece, en el cálculo del diámetro, afectada por un exponente que en la mayoría de los casos es igual o aproximadamente igual a $\frac{1}{3}$; esto reduce considerablemente su influencia sobre D. Esta influencia se puede poner de manifiesto calculando el diámetro según los criterios

anteriormente mencionados, para una masa máxima en el depósito de 150.000 kg.
(Tabla 5.2)

Tabla 5.2. Influencia de la masa inicial de combustible sobre el diámetro de la bola de fuego

%	<i>D, m</i>
100	295
90	285
75	269
67	259

Finalmente, otra fuente de imprecisión la constituye la estela de fuego vertical que deja la bola al ascender, que puede ser también de dimensiones considerables. Esto altera la superficie de la llama y por tanto, la radiación que llega hasta un determinado punto.

En cualquier caso, las expresiones anteriores permiten evaluar de forma aproximada las dimensiones de la bola de fuego. Hay que tener en cuenta que su tamaño y posición varían constantemente; esto provoca que el flujo calorífico recibido por un objetivo determinado no sea constante. Las filmaciones de BLEVE muestran que la bola de fuego aumenta rápidamente hasta el máximo diámetro, se mantiene en este diámetro durante un corto tiempo y después asciende y se disipa. Normalmente el cálculo de la dosis de radiación recibida se realiza

suponiendo que la bola de fuego adquiere su máximo diámetro inmediatamente después de alcanzar una altura determinada.

Para estimar la radiación recibida por una superficie a una determinada distancia, se puede aplicar a continuación el modelo del cuerpo sólido. Es necesario, pues, conocer el valor del poder emisor (E_p), el del factor de vista (F) y el de la transmisividad atmosférica (τ), así como también la distancia entre la superficie de la llama y el objetivo.

Para conocer esta distancia es necesario estimar la altura en la que se encuentra la bola de fuego. En realidad esta altura es función del volumen específico y del calor latente de vaporización; varía, pues, para cada sustancia. No obstante, esto no se suele tener en cuenta, ya que la imprecisión del cálculo no lo permite. Se han propuesto diversas expresiones para estimarla, una de las más simples es la siguiente:

$$H = 0,75D \tag{5.10}$$

Donde H es la altura donde se encuentra el centro de la bola de fuego (en m) y D es su diámetro calculado mediante la ecuación.

Otra expresión es la propuesta por Fay y Lewis:

$$h = 12,7V_i^{1/3}$$

(5.11)

Donde h es la altura de la llama visible más alta (parte superior de la bola de fuego) (en m) y V_i es el volumen inicial del vapor de la bola de fuego (en m^3).

Ambas expresiones han sido comparadas con los valores correspondientes a tres casos reales; los resultados pueden verse en la Tabla 5.3 (las alturas corresponden al extremo superior de la bola de fuego).

Tabla 5.3 Predicción de la altura (extremo superior de la llama) de la bola de fuego.

<i>Accidente</i>	<i>Combustible</i>	<i>Masa, kg</i>	<i>h, m</i> <i>(observada)</i>	<i>h, m</i> <i>(Ec.(5.10)</i>	<i>h, m</i> <i>Ec.(5.11)</i>
<i>Crescent City</i>	<i>Propano</i>	<i>35.000</i>	<i>230</i>	<i>230</i>	<i>315</i>
<i>Priolo</i>	<i>Etileno</i>	<i>80.000</i>	<i>225</i>	<i>301</i>	<i>435</i>
<i>Priolo</i>	<i>Propileno</i>	<i>50.000</i>	<i>250</i>	<i>258</i>	<i>357</i>

Se puede comprobar como los resultados de la ecuación (5.10) son mucho más aproximados a los valores observados; por lo tanto, si bien con tres casos la muestra es estadísticamente poco significativa, parece adecuado recomendar esta ecuación que además es la más sencilla.

Respecto a la fracción de energía desprendida en la combustión que es emitida en forma de radiación, no se conoce tampoco con demasiada exactitud. En realidad, esta es la imprecisión más notable en el cálculo de la radiación térmica de un BLEVE-bola de fuego. Se ha propuesto la correlación siguiente para estimar este coeficiente de radiación,

$$\eta = 0,27 \cdot P_o^{0,32}$$

Valor máximo de η limitado a 0,4

(5.12)

Donde P_o es la presión (relativa) en el recipiente justo antes de la explosión, en MPa. Esta expresión fue obtenida mediante experimentación a escala de laboratorio, con cantidades de unos cuantos kg, suponiendo una combustión completa; su aplicación a escala real parece ser que no está probada. El valor de η está comprendido entre 0,13 y 0,35, según algunos autores, y entre 0,24 y 0,40, según otros; en cualquier caso, su valor máximo es de 0,4. A partir del coeficiente de radiación y de la energía total de combustión se puede deducir la energía desprendida en forma de radiación. Así, pues, el poder emisor puede calcularse mediante la expresión:

$$E_p = \frac{\eta M H_c}{\pi D^2 t}$$

(5.13)

Donde H_c es el calor de la combustión ($kJkg^{-1}$) y t es el tiempo de duración de la bola de fuego (s). Dado que el valor de η puede presentar alguna imprecisión, otra posibilidad es utilizar directamente un valor arbitrario de E_p del orden de 200-350 $kW m^{-2}$ según otros. Respecto al factor de vista es el que hay entre una esfera y una superficie plana normal a la radiación procedente de la misma; dada la poca complejidad geométrica del sistema, este factor puede calcularse mediante una expresión muy simple:

$$F = \frac{D^2}{4r^2} \quad (5.14)$$

Donde r es la distancia entre la superficie que recibe la radiación y el centro de la bola de fuego. Finalmente, en cuanto a la transmisividad atmosférica, se puede calcular tal y como se ha explicado.

5.4.2 ENERGÍA LIBERADA DEL ESTALLIDO

Cuando un recipiente a presión experimenta una explosión BLEVE se libera la energía que contiene (obsérvese que las unidades de la presión son energía por unidad de volumen). El incremento repentino de volumen que experimenta la sustancia contenida en el recipiente tiene dos contribuciones: la del valor existente en el interior del recipiente en el momento de la explosión y la del líquido sobrecalentado que, al encontrarse bruscamente a presión atmosférica experimenta una vaporización parcial prácticamente instantánea (flash).

La energía generada en una explosión BLEVE se distribuye esencialmente en los siguientes cuatro apartados:

- La energía de la onda de presión,
- La energía cinética de los fragmentos;
- La energía potencial de los fragmentos (energía plástica de deformación que los fragmentos han absorbido);
- El calentamiento del entorno.

La distribución relativa de la energía variará en función de las condiciones particulares de la explosión. Por ello resulta muy difícil determinar con exactitud la cantidad de energía que contribuirá a la onda de presión. Se ha sugerido que en caso de una rotura frágil del recipiente, el 80% de la energía liberada se convierte en onda de presión, mientras que en caso de una rotura dúctil, de la que resultan proyectadas grandes secciones del depósito, la energía de la onda de presión es del 40% respecto al total. En ambos casos, el resto de energía se convierte en energía cinética de los fragmentos, ya que la contribución de los otros dos conceptos es casi despreciable.

En realidad, los materiales con los que están contruidos la mayoría de los depósitos o recipientes son dúctiles en condiciones normales de trabajo. La rotura frágil sólo se da en circunstancias especiales, cuando la tensión a la que es sometido el material es muy superior a su límite plástico, y esto solo llega a ocurrir en el caso del acero revenido, y del vidrio. Las expresiones BLEVE, pues, suelen ser, roturas dúctiles.

Respecto al vapor existente inicialmente en el recipiente, La energía desprendida en su expansión desde la presión de rotura del depósito hasta la presión atmosférica; viene dada por:

$$E_v = m(u_1 - u_2) \tag{5.15}$$

Donde E_v es la energía liberada en la expansión del vapor, kJ, m es la masa del vapor existente en el depósito en el momento de producirse el estallido, kg, u_1 es la energía interna del vapor en las condiciones en las cuales el recipiente revienta, kJ kg^{-1} , y u_2 es la energía interna del vapor después de la expansión hasta la presión atmosférica, kJ kg^{-1} .

Suponiendo que la expansión es isoentrópica –a causa de la velocidad a la que se produce – y que el vapor se comporta como un gas ideal, esta energía resulta ser:

$$E_v = 10^2 \cdot \left(\frac{P \cdot V}{\gamma - 1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) \quad (5.16)$$

Donde P_a es la presión atmosférica, bar, V es el volumen inicial de vapor m^3 , γ es la relación de los calores específicos y P es al presión (bar) existente en el recipiente justo antes de la explosión.

Esta energía puede expresarse en masa de TNT equivalente, utilizando el factor de conversión energético adecuado (1120 cal por gramo de TNT),

$$W_{TNT} = \left(\frac{0,021PV}{\gamma - 1} \right) \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) \quad (5.17)$$

Donde W_{TNT} es la masa de TNT equivalente (kg).

Si el recipiente contenía, además líquido sobrecalentado- como en el caso de una explosión BLEVE- la energía liberada se puede estimar de forma aproximada mediante este mismo método. Hay que tener en cuenta, en este supuesto, la masa de líquido se vaporizará súbitamente al encontrarse a presión atmosférica y calcular el volumen que ocuparía este vapor a la presión existente en el recipiente un instante antes de la explosión, añadiendo este volumen ficticio al volumen de vapor real, la masa de TNT equivalente será:

$$W_{TNT} = \left(\frac{0,021 P V^*}{\gamma - 1} \right) \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad (5.18)$$

Donde V^* es el volumen de vapor dentro del depósito más el volumen (a la presión del depósito) de vapor generado en la vaporización, en m^3 :

$$V^* = V + V_1 f \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right) \quad (5.19)$$

Aquí V es el volumen de vapor en el depósito antes de la explosión, V_1 es el volumen del líquido en el recipiente antes de la explosión (m^3) y f es la fracción de vaporización (flash), o sea, la fracción de líquido que se evapora en la despresurización. Su valor se puede calcular mediante la expresión siguiente:

$$f = 1 - e^{\left(-2,63 \cdot \frac{C_p}{H_v} \cdot (T_c - T_b) \cdot \left(1 - \left(\frac{T_c - T_o}{T_c - T_b} \right)^{0,38} \right) \right)} \quad (5.20)$$

Donde T_c es la temperatura crítica de la sustancia (K), T_b es la temperatura de la ebullición de la sustancia a presión atmosférica (K), T_o es la temperatura en la que se encuentra la sustancia en el momento de la explosión (K) y H_v es la entalpía de vaporización de la sustancia.

5.4.3 ONDA DE SOBREPRESION

El valor de la sobrepresión generada por la explosión se puede estimar a partir de la masa de TNT equivalente. Esto implica una relativa imprecisión a causa de que

en la explosión BLEVE de un recipiente, la energía es liberada a una velocidad menor que en una explosión de TNT, y principalmente porque el volumen del recipiente es comparativamente mucho más grande que el que ocuparía una cantidad equivalente de un explosivo convencional. Pese a estas distorsiones, este método es simple y permite efectuar estimaciones útiles.

Debido a que el volumen ocupado inicialmente por la energía que se libera en la explosión es mucho más elevado que el que ocuparía la masa equivalente de TNT, se debe realizar una corrección en la distancia desde el centro de la explosión hasta el lugar del que se quiere saber la sobrepresión.

Esta corrección se lleva a cabo mediante la utilización de la distancia “normalizada” o “escalada”, d_n basada en el principio de similitud de Hopkinson en el año 1.915, según el cual cuando dos cargas explosivas de geometría similar y del mismo explosivo pero de tamaño diferente detonan en la misma atmósfera, se producen ondas de presión similares en la distancia escalada. Este principio se puede ampliar a explosivos diferentes teniendo en cuenta el hecho de que dos tipos de explosión con el mismo valor de sobrepresión generan el mismo daño.

Como la sobrepresión es función de la distancia y dos explosiones distintas no tienen el mismo valor de sobrepresión a la misma distancia del centro de la explosión, se define la distancia escalada como aquella en la que el valor de sobrepresión es el mismo para ambas explosiones. La distancia escalada se relaciona con la distancia real y con la masa de TNT equivalente mediante la ley de la raíz cúbica.

$$d_n = \frac{d}{(\beta \cdot W_{TNT})^{1/3}} \quad (5.21)$$

Donde d_n es la distancia normalizada ($mkg^{1/3}$), β es la fracción de la energía liberada convertida en onda de sobrepresión y d es la distancia real (desde el centro del recipiente) a la que se quiere averiguar la sobrepresión (m).

A partir del valor de d_n es posible estimar la sobrepresión utilizando gráficos.

5.4.4 FRAGMENTOS PROYECTADOS

Los fragmentos lanzados por la energía de la explosión tienen una acción restringida y direccional, pero con un alcance mayor (en lo que se refiere a capacidad destructiva) que el de la onda de presión y que el de los efectos térmicos de la bola de fuego. Hay que tener en cuenta que en su trayectoria pueden provocar un efecto dominó y destruir otros depósitos o equipos: la velocidad requerida para que un fragmento pueda penetrar en un depósito o recipiente similar es del orden de 4-12 ms^{-1} , y la velocidad máxima que pueden alcanzar los fragmentos de una explosión BLEVE- función de las condiciones de la explosiones, del volumen de vapor inicialmente contenido en el depósito y de la forma del mismo – es del orden de 150-200 ms^{-1} .

El número de fragmentos y su distribución en el espacio depende del tipo de rotura que experimenta el recipiente y de la forma del mismo. El mecanismo por el que se propaga la grieta y al velocidad de propagación son factores importantes. Las grietas en fracturas frágiles se propagan rápidamente y tienen tendencia a ramificarse, de forma que se pueden generar muchas fracturas en el mismo recipiente con una gran cantidad de fragmentos.

En cambio, las grietas en fracturas dúctiles se propagan a velocidades menores y no se ramifican; el recipiente se parte en una cantidad relativamente pequeña de fragmentos, a menudo entre 2 y 15. En el caso más típico de BLEVE - un recipiente sometido a la acción de las llamas – la rotura será generalmente dúctil.

En caso de recipientes cilíndricos, la grieta inicial tiende a seguir en acción axial, normal al esfuerzo tangencial. Para que se produzcan “misiles” la fractura axial tiene que cambiar de dirección para propagarse en circunferencia, rodeando el recipiente y finalmente romperlo en dos partes, el fondo y el resto. Los análisis de numerosos accidentes han mostrado que se forma un misil de la parte del fondo del recipiente incluso en aquellos casos en que la rotura es frágil, ya que en este tipo de recipiente siempre se acaba formando una grieta circunferencial.

En cualquier caso, la probabilidad de que se produzca una proyección de fragmentos es muy elevada. La tabla 5.4 muestra el resultado de un análisis efectuado sobre una muestra de 130 BLEVE ocurridos mayoritariamente en recipientes cilíndricos horizontales de almacenamiento o de transporte.

Tabla 5.4 Proyección de fragmentos en accidentes BLEVE

	<i>con fragmentos</i>	<i>sin fragmentos</i>
<i>Por incendio</i>	89	24
<i>Sin incendio</i>	17	...

En cuanto al número de fragmentos en este tipo de recipiente, lo más corriente es que sean 2 o 3. Si se producen 2, suele tratarse del fondo y el resto del recipiente. Si se forman tres fragmentos pueden proceder de dos tipos de roturas distintos.

El depósito se puede dividir en dos: el fondo y la parte central (es el caso de un cilindro con el fondo soldado a la parte central); o bien puede experimentar un primer fraccionamiento en dos partes y un nuevo fraccionamiento en una de ellas (la que no es el fondo) por la línea imaginaria que separa los espacios de vapor y de líquido. El fondo suele romperse por la soldadura, si no hay soldadura, es de suponer que se romperá a una distancia del extremo del 10% de la longitud total del recipiente.

Respecto a la dirección, lo más probable es que los fragmentos salgan proyectados en la dirección del eje del cilindro. Datos recogidos en 15 accidentes así lo confirman, considerando sectores de 45° a lado y lado del eje del cilindro, se obtienen en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Probabilidad de Proyección de fragmentos en recipientes cilíndricos.

sector	probabilidad
1	0,62
2	0,38

En principio, la proyección del fondo debería tener la misma probabilidad por ambos lados; de todas maneras, es más probable que se produzca por el lado donde incide con más intensidad la llama del incendio, si bien también puede depender de la construcción del recipiente. Finalmente, la trayectoria de los fragmentos de depósitos cilíndricos es mayor que la de recipientes esféricos. Tradicionalmente se consideraba que podían alcanzar unos 500 m como máximo, pero en un accidente de la Ciudad de México un fragmento de depósito cilíndrico alcanzó los 1.100 m. Esta es, pues, la distancia que se debe respetar en emergencias, donde la distancia aconsejable de evacuación será de unos 1.100 m.

En el caso de recipientes esféricos, la cantidad de fragmentos es mucho más difícil de predecir. Un estudio basado en un número relativamente pequeño de casos reales da una media de 8,3 fragmentos por accidente, pero con una cierta tendencia a que se produzcan más fragmentos cuanto mayor sea el depósito. La correlación de los datos de la expresión da la expresión siguiente:

$$N = -3,77 + 0,0096V_r \quad (5.22)$$

Donde N es el número de fragmentos y V_r es el volumen del recipiente esférico, comprendido entre 700 y 2.300 m^3 . Sin embargo, dada la dispersión de los puntos experimentales utilizados por este autor, esta expresión es relativamente poco significativa.

En cuanto a la dirección, es prácticamente imprevisible. El estudio de algunos casos muestra que la distribución no es simétrica, como cabría esperar por la forma del recipiente; esto debe atribuirse probablemente a la posición particular

del contacto entre la llama y el recipiente en cada caso, y también puede influir en detalles de tipo constructivo.

Finalmente, respecto al alcance, un estudio llevado a cabo sobre 58 fragmentos procedentes de 7 accidentes mostró que un 70% de los fragmentos alcanzaron distancias inferiores a 200 m. No obstante, fragmentos de recipientes esféricos han alcanzado distancias de 600 m (Ciudad de México) e incluso de 700 m. La distancia recorrida es normalmente inferior, que en el caso de recipientes cilíndricos ya que la forma de estos suele ser más aerodinámica. Han sido propuestos modelos teóricos para la predicción del alcance de los fragmentos, pero en la práctica resultan poco útiles ya que para aplicarlos se tiene que saber la masa y la forma del fragmento.

5.5 MEDIDAS DE PREVENCIÓN

Si se produce una emergencia que puede conducir a un accidente del tipo de BLEVE-bola de fuego, resulta muy difícil improvisar acciones adecuadas para controlar la situación; cualquier actuación que requiera la presencia humana será muy arriesgada, porque no se puede prever en que momento se producirá la explosión. Las acciones deben ser, pues, preventivas, y tienen que tomarse a priori. El riesgo de BLEVE se puede reducir a niveles tolerables si se adoptan una serie de medidas que se comentan brevemente a continuación.

- *Terreno en pendiente.* Cualquier escape de líquido (por ejemplo, gas licuado de petróleo) tiene que poder ser retirado inmediatamente de la zona adyacente al tanque que se quiere proteger. Para ello es necesario que el terreno donde está situado el depósito se alise y tenga una pendiente del orden del 2,5% (como mínimo el 1,5%); un sistema de drenaje tiene que

conducir el líquido hacia una cuba de retención situada a suficiente distancia como para que, si se incendia, las llamas no logren alcanzar el tanque (habría que recordar aquí que las llamas pueden llegar a tener una inclinación de 45% y que su longitud puede llegar a ser aproximadamente dos veces el diámetro de la cubeta).

- *Aislamiento térmico* El recubrimiento exterior de las paredes del depósito con un producto resistente al fuego y de baja conductividad térmica (por ejemplo, hormigones especiales, fibra de vidrio o pinturas intumescentes) retrasa notablemente el calentamiento del material y, por consiguiente, el aumento de la presión dentro del recipiente en los casos en los que éste se ve sometido a la acción de un incendio. Por otra parte, en emergencias persistentes el aislamiento reduce la cantidad de calor que entra en el sistema y permite que la válvula de seguridad pueda evitar la explosión. Hay que tener en cuenta que las válvulas de seguridad no se diseñan para afrontar –por sí mismas- este tipo de emergencias ya que la sección de paso que se requeriría sería excesiva.

Hay que tener en cuenta, en todo caso, que el aislamiento térmico debe ser solo un complemento, y que se tienen que prever, además, otros sistemas (como por ejemplo la refrigeración del depósito). Es importante también aislar los elementos estructurales (pilares o patas de soporte) para evitar que, al calentarse excesivamente por el fuego, pierdan resistencia mecánica y cedan, provocando la caída del depósito (esto es lo que ocurrió con las dos esferas en un accidente en la Ciudad de México, si bien cayeron, sorprendentemente no llegaron a explotar). El aislamiento tiene que ser instalado de manera que garantice su integridad en caso de incendio y que permita una inspección periódica del estado de la superficie del depósito y de los elementos estructurales.

- *Refrigeración con agua* La utilidad de los surtidores de agua en la protección de recipientes sometidos a la acción directa del fuego ha sido demostrada durante más de 50 años. Es importante que el agua sea utilizada desde los primeros momentos y que una película con un mínimo grosor cubra totalmente la superficie del recipiente (especialmente las zonas en las que hay un contacto directo con las llamas) con el fin de evitar la aparición de áreas calientes. El caudal de agua requerido se tiene que mantener constante y evitar que, como ha pasado mas de una vez, la intervención de los bomberos y el consiguiente incremento del consumo de agua reduzca la presión en la red y el caudal- con unos valores mínimos que dependen de las circunstancias. El criterio más general es que reducir el caudal de agua por debajo de $7,5 \text{ l m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ es peligroso si hay contacto directo con la llama, ya que pueden aparecer áreas calientes; se ha recomendado, como criterio universal un caudal de $10 \text{ l m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; si solo se produce el efecto de la radiación –sin contacto con la llama- se pueden aplicar caudales más pequeños.

En caso de contacto directo de la llama con al superficie, el flujo calorífico variará con el tipo de llama (para un incendio de balsa puede ser del orden de 100 kW m^{-2} , mientras que para una llama altamente turbulenta puede llegar a ser del orden de 350 kW m^{-2}).

En esta situación, para la superficie que queda por encima del nivel del líquido contenido en el depósito se pueden requerir caudales de más de $25 \text{ l m}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Un aspecto que se debe tener en cuenta es que todos los elementos de seguridad – válvulas, tuberías, etc.- tienen que ser resistentes al fuego y a las elevadas temperaturas que tendrán que soportar durante la emergencia; en caso contrario

quedarán anuladas en los momentos iniciales, principalmente si entran en contacto directo con las llamas.

- *Reducción de la presión* De esta manera disminuye la tensión a la que se encuentra sometido el material con el que está construido el recipiente y, ante un aumento de temperatura, se reduce el peligro de explosión. La API recomienda como criterio general la instalación de dispositivos capaces de reducir la presión hasta aproximadamente 7 bar (rel.) o hasta la mitad de la presión de diseño en 15 min. Si el terreno es empinado y el recipiente está protegido, con aislamiento térmico, este tiempo puede ser superior. La despresurización puede requerir la instalación de una válvula con control remoto, además de la válvula de seguridad (instrumentación del tipo “fallo en posición segura”). El material descargado tiene que eliminarse en condiciones de seguridad, por ejemplo mediante una antorcha. Hay que tener en cuenta también que en algunos casos, una fuerte despresurización puede producir temperaturas extremadamente bajas en el depósito, y llegar a condiciones de fragilización del acero.
- *Soterramiento* La posibilidad de enterrar total o parcialmente (en taludes artificiales) los depósitos ha sido sugerida repetidamente. Sin embargo, esta medida ha tenido muchos detractores debido principalmente a la imposibilidad de inspeccionar la posible corrosión del depósito.
- *Barreras de agua.* Este método permite retener los vapores desprendidos durante el vertido- con la reducción consiguiente de la posibilidad de ignición de los mismos- y dispersarlos en la atmósfera.

- *Prevención de daños mecánicos.* Los depósitos que contienen materiales almacenados a temperaturas superiores a la ebullición a presión atmosférica, tienen que estar protegidos de los posibles impactos de grúas o torres que puedan caerse, o de choques provocados por vehículos en maniobras. Un caso especial que aquí no se trata, es el de la protección de vagones o camiones cisterna.
- *Prevención del sobrellenado.* Este es un aspecto que ha ocasionado numerosos BLEVE, pese a que cada vez es menos frecuente y se tienen más en cuenta las causas más reiteradas (falta u obturación de válvulas de seguridad).
- *Distancias mínimas de separación.* Estas distancias suelen ser establecidas en la legislación y no se discutirán aquí. Tienen razón de ser por lo que respecta a la radiación térmica y, principalmente, para evitar el contacto de las llamas del incendio de una instalación sobre las paredes de otro depósito, pero no tienen mucho sentido como protección ante una explosión (onda de sobrepresión, fragmentos).
- *Actuación sobre los mecanismos iniciadores.* Han sido propuestos diversos sistemas para evitar la ebullición en masa (introducción de mallas de aluminio en el depósito, adición de núcleos iniciadores de la ebullición). Sin embargo, estos sistemas están aún en fase de investigación, excepto para algunas aplicaciones muy puntuales.

En todo caso, es importante remarcar el interés que tiene la adopción de diversas medidas complementarias simultáneas (terreno en pendiente, recubrimiento de la cubeta con espuma, aislamiento térmico, surtidores de agua, etc.).

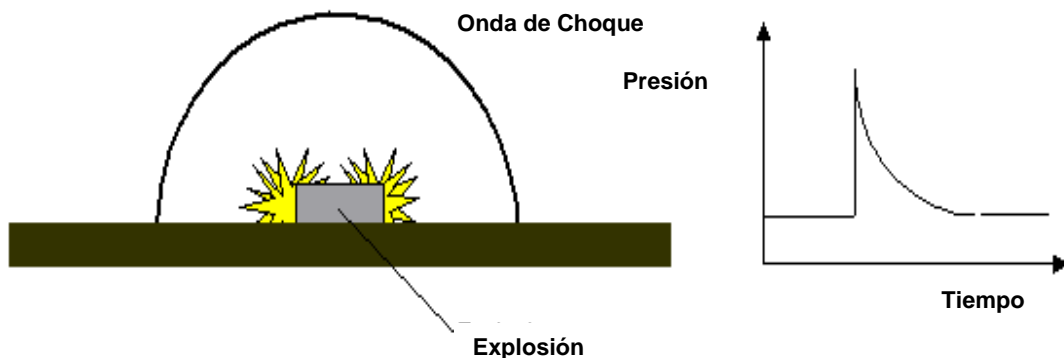
6. ONDAS DE EXPLOSION Y RESPUESTA ESTRUCTURAL

LAS ONDAS DE EXPLOSIÓN

Si una explosión de gas fuerte ocurre dentro de un área de proceso o en un compartimiento, el área circundante está sujeta a ondas de destrucción. La magnitud de la ola de explosión dependerá de:

- La fuente, es decir, la presión y duración de la explosión.
- La distancia de la explosión.

Figura 6.1. La onda de explosión en campo libre.



La Figura 6.2 muestra la máxima sobrepresión de la explosión de varios experimentos CMR en un tubo de 50 m³, una vasija de forma de cuña (los resultados escalados a 50 m³) y un 50 m³ módulo costa fuera, junto con la variación de la onda de la explosión asociada con la distancia. La parte horizontal de las curvas indica la magnitud de las nubes de gas antes de las explosiones

(Actualmente el radio de una nube hemisférica del mismo volumen como en el experimento). No hay ninguna distinción entre las vasijas de la explosión dadas aquí, son parámetros importantes el volumen de gas y la sobrepresión de la explosión.

Los resultados muestran que la onda de la explosión de una explosión de gas puede causar altas presiones lejos del área dónde actualmente tiene lugar la explosión. En el análisis de riesgo, la explosión en campo libre por consiguiente debe ser considerada. En la evaluación de investigaciones de accidentes de explosión a campo libre los daños, son registrados y después usados a menudo para la evaluación de la fuerza de la fuente de la explosión.

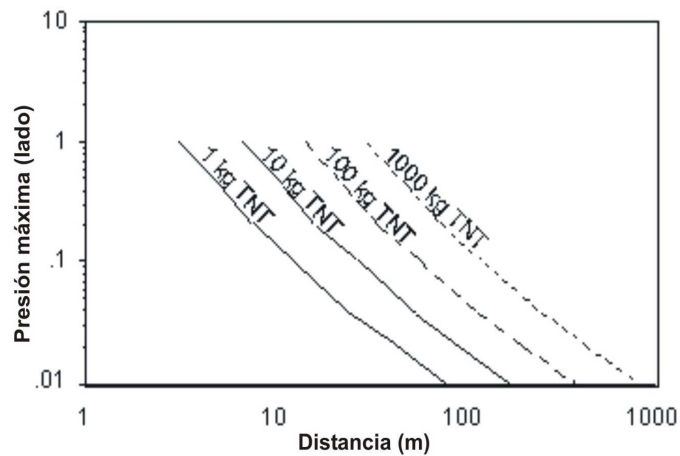
Los objetivos de este capítulo son:

- i) Describir la naturaleza de una onda de la explosión de una explosión de gas.
- ii) Presentar los métodos para estimar la onda de la explosión en una explosión de gas.

6.1 ESCALA

Se documentan justamente bien las explosiones de las detonaciones de cargas explosivas altas, como la del TNT. (Baker, 1983). La máxima presión de la explosión para las ondas de explosión de las explosiones de TNT con cargas que van de 1 Kg. a 1000 Kg., como la función de distancia R (del centro de la carga) se muestra en la Figura 6.2.

Figura 6.2. Máxima Presión de Explosión (lateral) contra la distancia para una explosión a nivel de suelo de TNT.



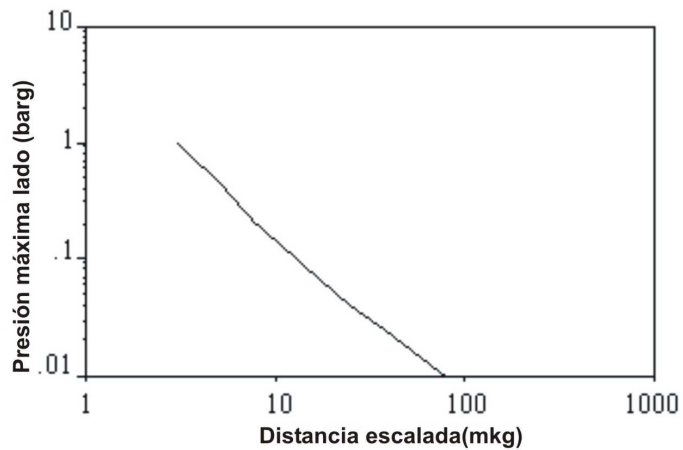
Estos datos pueden descartarse a través de una balanza de longitud normalizada (Escala de Hopkinson) R^*

$$R^* = R/W^{1/3} \tag{6.1}$$

Donde R [m] es la distancia del centro de la fuente explosiva y W [kg] es la masa de la fuente explosiva. En la Figura 6.3 se muestra el mismo juego de datos como los mostrados en la Figura 6.2, pero trazado contra la medida de longitud normalizada R^* .

Diagramas similares como los de la Figura 6.3 también existen para la duración, impulso y otros parámetros de la explosión. Estas curvas pueden encontrarse en Baker. (1.983).

Figura 6.3. Máxima Presión lateral de la Explosión contra la Distancia, R^* , para TNT el estallido conectó con tierra.



6.2 MÉTODO TNT

El diagrama para las detonaciones de TNT se ha usado para las estimaciones de las explosiones de gas, aunque hay diferencias entre las explosiones de una explosión de gas y una detonación con TNT (Sheperd, 1991, Van den Berg, 1985). En una explosión de gas la presión local puede alcanzar los valores tan altos como unos cuantos bar.

La presión de explosión para las explosiones de TNT es mucho más alta y cerrada que para la carga. Por consiguiente, los datos cercanos de campo no son pertinentes para las explosiones de gas y es recomendado no usar datos de TNT que indican presiones más altas que 1 bar para estimar las descargas de las explosiones de gas.

El método original de equivalencia de TNT se ha usado ampliamente para medir las explosiones de gas. El Método de equivalencia de TNT aplica a las curvas de presión-distancia para las explosiones de TNT en explosiones de gas y la carga equivalente de TNT es estimada de la energía contenida en la explosión de la nube de gas.

Para los hidrocarburos típicos, como el metano, el propano, el butano etc., el calor de la combustión es 10 veces más alto que el calor de reacción del TNT.

La relación entre la masa de hidrocarburos WHC y la carga de equivalencia del TNT conforman WTNT es entonces:

$$WTNT \geq 10 \cdot h \cdot WHC \quad (6.2)$$

Donde h es un factor del rendimiento ($h = 3\%-5\%$), observa Guban basado en la experiencia de 1978.

En el método original de equivalencia del TNT, la masa de hidrocarburo WHC era basada en la descarga total de la masa y el factor entregado h. Para estimar consecuencias de explosiones de gas, las condiciones geométricas (es decir el confinamiento y las obstrucciones) tienen que ser tenidas en cuenta.

En el método original de equivalencia del TNT, las condiciones geométricas no se tienen en cuenta. Los resultados de este tipo de análisis tienen por consiguiente algunas relevancias y no se deben generalizar.

Las desventajas del método de equivalencia del TNT son:

- El factor del rendimiento es necesario

- La representación de explosiones de gas débiles es difícil
- La Fase Positiva es de una sola duración
- No se representan bien los procesos de explosión de gas
- Es problemática la selección del "centro de explosión" (el método es muy sensible y no está definido)

Para tener en cuenta los efectos geométricos en el método de equivalencia del TNT, Harris y Wickens (1989) propusieron usar un factor de rendimiento del 20% ($h = 0.2$) y la masa de hidrocarburo, WHC, contenida en proporciones estequiométricas, en varias regiones congestionadas de la planta. Para el gas natural la masa equivalente de TNT puede estimarse (asumida inicialmente la presión atmosférica).

$$WTNT \geq 0.16V \text{ (kg)} \tag{6.3}$$

Donde $V [m^3]$ es el más pequeño los dos ó el volumen total de la región congestionada de la nube de gas. La Ecuación 6.3 se utiliza también para la mayoría de los hidrocarburos, donde la energía contenida por el volumen de la mezcla estequiométrica es aproximadamente el mismo ($\sim 3.5 \text{ MJ}/m^3$).

Esto indica que el método de equivalencia del TNT puede ser útil como una vasta aproximación, si uno usa un factor de rendimiento del 20% y los valores apropiados para WHC o V. De cualquier modo, para las presiones de la explosión por debajo de 1 bar, el método de equivalencia del TNT sobrestimaré la explosión. Deben aplicarse métodos más sofisticados de equivalencia por consiguiente para cosas así.

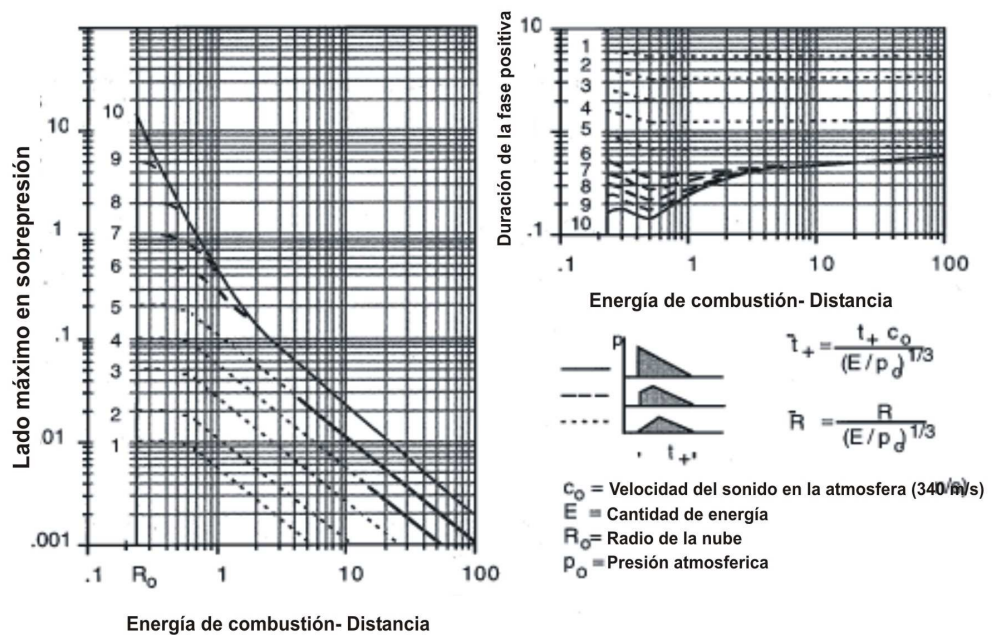
6.3 EL MÉTODO DE MULTI-ENERGÍA

El método de Multi-energía (Van den Berg, 1985) es un método más sofisticado que el método de equivalencia del TNT. Puede estimar la explosión de las explosiones de gas con una fuerza inconstante.

El método es basado sobre una simulación numérica de una onda de la explosión de una nube esférica centralmente encendida con una llama de velocidad constante.

Variando la velocidad de la llama, un juego de curvas para las diferentes fuerzas de la explosión (es decir la presión de la explosión dentro de la nube) se ha producido. La Figura 6.4 muestra las curvas menos dimensionales que son usadas en el método de multi-energía.

Figura 6.4. La carga de explosión de aire-combustible hemisférica para la multi-energía



La Figura 6.4 es similar a las curvas previas de la explosión de TNT, La curva de 10 puede usarse. Para una deflagración (curva de 1 a 9) se observa que el perfil de presión dentro de la nube no es una onda de choque seguida por una onda de expansión, pero esta puede ser para cualquiera de las dos una onda de choque seguida por un aumento de presión que cae después de pasar al frente de llama o una onda sónica (es decir la presión aumenta gradualmente) que decae después del frente de la llama.

Sin embargo, cuando una explosión es propagada fuera del centro de la explosión, la pendiente al frente se elevará y eventualmente se volverá una onda de choque, como la explosión de una carga de TNT.

La parte difícil de un análisis por el método de multi-energía es seleccionar:

- i) La presión de la explosión dentro de la nube de gas desplazado (es decir el rendimiento de la carga).

- ii) La energía de la combustión, E , dado el tamaño de la nube de gas que contribuye a la explosión (es decir el tamaño de carga).

El método de multi-energía no da información alguna sobre cual es la presión de la explosión (la fuerza de carga) a escoger en un análisis de la misma área. Esa información tiene que ser encontrada separadamente usando las simulaciones numéricas, datos experimentales o hacer una prudente suposición. La energía de la combustión, E , también es un parámetro que no es confiable para estimar.

Para una mezcla estequiométrica del volumen de un aire-hidrocarburo V , la energía de la combustión de que E puede ser estimada de:

$$E \geq 3.5(MJ / m^3)^* V$$

(6.4)

En una explosión accidental (la deflagración), sólo las áreas confinadas y/o congestionadas contribuirán a la generación de la misma área. Por consiguiente, sólo porciones del volumen de la nube total deben ser incluidas en la ecuación (6.4). Van den Berg (1985) indica que el volumen total de un área confinada y/o congestionada debe usarse en la ecuación (6.4). Sin embargo, una aproximación semejante puede conducir a conservar los números y sobrestimar en algunas situaciones la explosión.

Por ejemplo en una explosión en un volumen en parte confinado, el volumen total dará datos conservadores, particularmente en los casos de baja presión. Durante la explosión como las quemaduras de nube de gas, el gas se extenderá y empujará a los gases quemados fuera del confinamiento. El gas que se sale fuera del confinamiento, no contribuirá significativamente a la generación de la explosión.

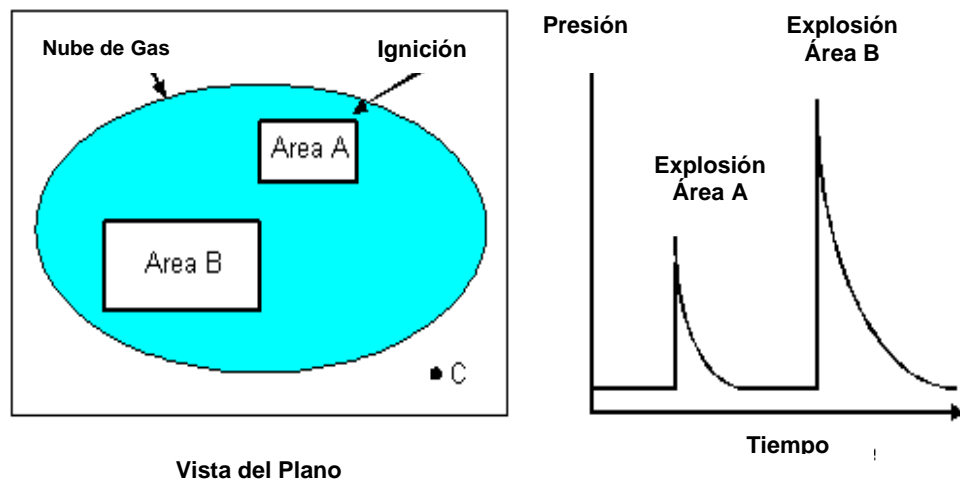
Antes de finalizar el análisis del método de multi-energía, es importante mencionar un aspecto de las explosiones de gas discutido por Van den Berg (1985). Por ejemplo, en un área de proceso, una nube de gas grande puede causar múltiples ondas de explosión. Para ilustrar esto, se incluye en la Figura 6.5.

En esta Figura se puede ver que la nube de gas cubre dos áreas obstruidas. Entre estas áreas hay espacio abierto. Si se asume que la nube se enciende en el área A, ocurrirá primero una explosión en el área A. Si ninguna transición a las

detonaciones ocurre en el área A, la velocidad de llama caerá cuando la llama propagada esté fuera del área A.

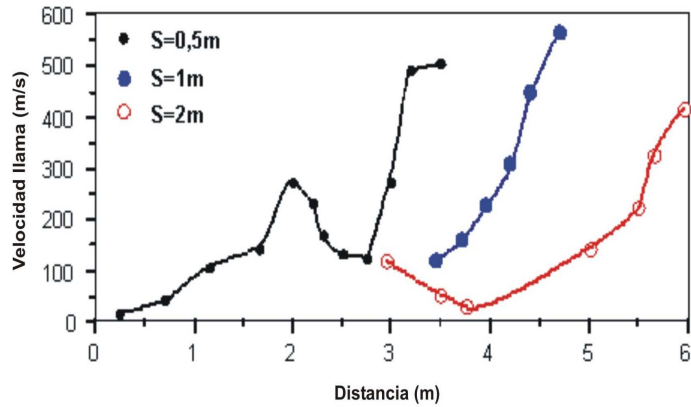
En un área abierta, la velocidad de llama será tan lenta que la generación de presión será despreciable. Cuando la llama alcanza el área B, la llama acelerará de nuevo y una nueva onda de explosión se generará. Si se revisa la presión en la localización C, se observa pasar dos ondas de explosión.

Figura 6.5. Una nube de gas puede causar más de una onda de explosión.



Este rasgo fue también confirmado experimentalmente. La propagación de la explosión de un área obstruida cercana a un área obstruida interviniendo a varias distancias, en un segundo muestra la desaceleración de la llama al propagarse fuera de la primera área obstruida y una re-aceleración (Figura 6.6) (Wingerden, 1989).

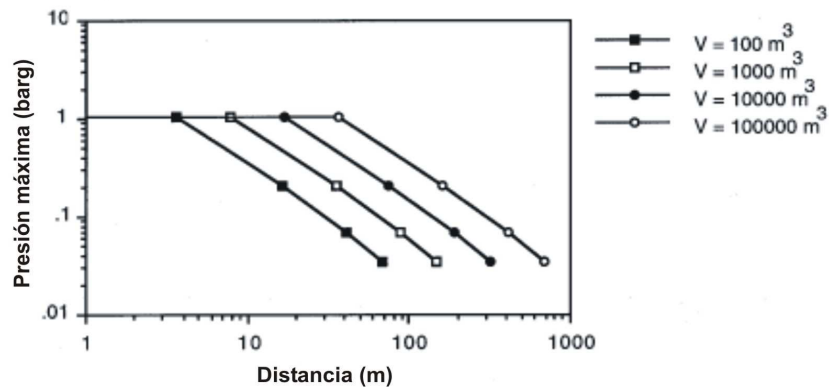
Figura 6.6. La propagación de la explosión en dos áreas obstruidas con un área intermedia llena de gas. Las dos áreas obstruidas tienen una longitud de 2 m. La longitud del área intermedia (S) varía entre 0.5 m y 2 m (Van Wingerden 1989).



6.4 ESCALA DE EXPERIMENTOS

Una alternativa al método de equivalencia del TNT y el método de multi-energía es balancear los resultados experimentales. En la Figura 6.2, se presentaron algunos datos de los experimentos de CMR. Basado en estos datos y aplicando la escala de longitud dimensional menor, un juego de curvas para las explosiones con fuerzas diferentes, para un compartimiento de 1000 m^3 , necesita ser desarrollado.

Figura 6.7. Presión de explosión para ondas de explosión desde explosiones de 1 barg en un confinamiento de 100, 1000, 10,000 y 100,000 m^3 .



Para una explosión en un confinamiento de volumen V , la onda de explosión puede simplemente encontrar la escala de la distancia real del centro de la explosión R a una distancia equivalente R_{Eq1000} y usarse esa distancia.

$$R_{Eq1000} = R \cdot \left(\frac{1000 \text{ m}^3}{V} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.5)$$

6.5 MÉTODOS NUMÉRICOS

Existen algunos métodos numéricos avanzados para la predicción de una explosión. Sin embargo, todos estos tipos de caracteres tienen limitaciones. Ellos necesitan predefinir una velocidad de llama o presión de la explosión (es decir ellos no pueden estimar el término de la fuente) o ellos requieren computadoras muy potentes para manejar la propagación de la llama y la propagación de la explosión.

Savvides y Tam (1991) han comparado los resultados del software con los resultados del método de equivalencia del TNT y los métodos de multi-energía. Se encontró que en las pruebas la sobrepresión fue creada en los focos localizados dentro de la planta dónde la densidad de equipo era alta. Ellos observaron que la sobrepresión decayó rápidamente en el espacio abierto. Las conclusiones fueron que un modelo numérico de simulación del software proporciona mucha más información que los modelos más simples, pero el tiempo de la computadora es alto para las plantas del proceso. Ellos prevén que esas mismas simulaciones se volverán una tarea rutinaria evaluando los riesgos de la explosión.

En CMR el código 3D del software necesita ser usado para explosiones combinadas y simulaciones de la explosión aunque el uso principal del software está sólo en las simulaciones de explosiones de gas. La diferencia principal entre las dos aplicaciones es que son usualmente ejecutadas sobre un dominio del cálculo grande, donde la explosión tiene lugar en una parte más pequeña de este dominio. Debido a las limitaciones en la capacidad de la computadora deben usarse volúmenes de mando más grandes, y no puede ser comparable con el hecho de que las explosiones en plantas localizadas en tierra, también pueden ser muy importantes.

Para la simulación de una explosión localizada, se necesitan volúmenes de mando pequeños. Sin embargo, para las explosiones locales con fuerza en la fuente dada, el software es útil para predecir el decaimiento de la explosión en ambientes de la nube de gas desplazado congestionados o semi-confinados.

Las figuras 6.8 y 6.9 ejemplos de la comparación de simulaciones de decaimiento de explosión que usa el software en explosiones locales en una planta de proceso con los resultados experimentales medidos para dos nubes de 20 m^3 y 600 m^3 respectivamente.

Los resultados experimentales medidos están basados en una prueba CMR en un modelo de módulo costa fuera de 50 m^3 (Solo en la Figura 6.11) y sobre dos pruebas de tubo de 10 m de largo, produciendo una máxima presión dentro de la nube de gas de 0.2, 1 y 6 bar respectivamente.

Algunas simulaciones del software generan una sobrepresión de 0.3, en la nube de 20 m^3 y de 5-6 de sobrepresión en la nube de 600 m^3 .

El decaimiento de presión, simulado fuera de las nubes de gas, muestra un comportamiento muy similar a los resultados experimentales. Las desviaciones observadas pueden ser debidas a las diferencias en la congestión fuera de la nube de gas desplazado.

Las líneas verticales en las Figuras 6.8 y 6.9 muestran el radio de equivalencia, nubes de gas hemisféricas de volúmenes 20 m^3 y 600 m^3 respectivamente

Figura 6.8. Comparación del comportamiento simulado con experimentos para una nube de gas de 20 m^3 .

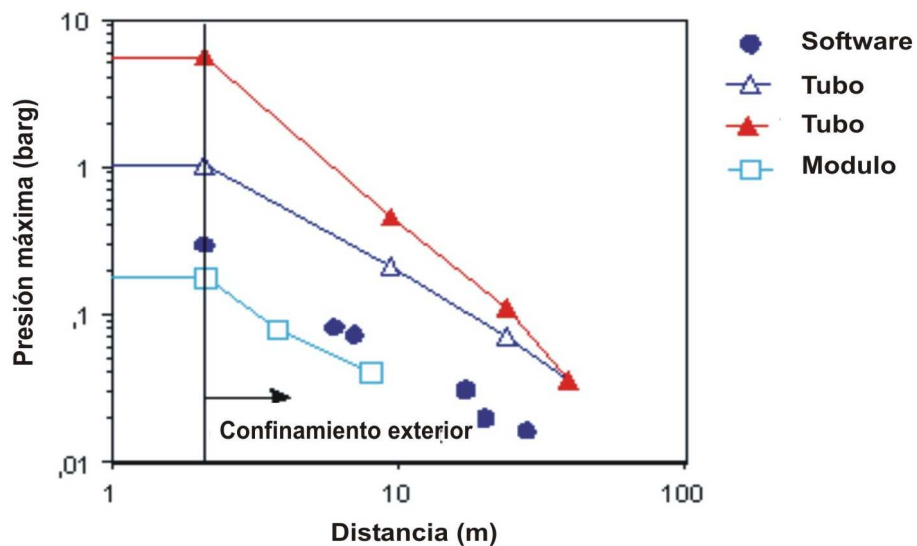
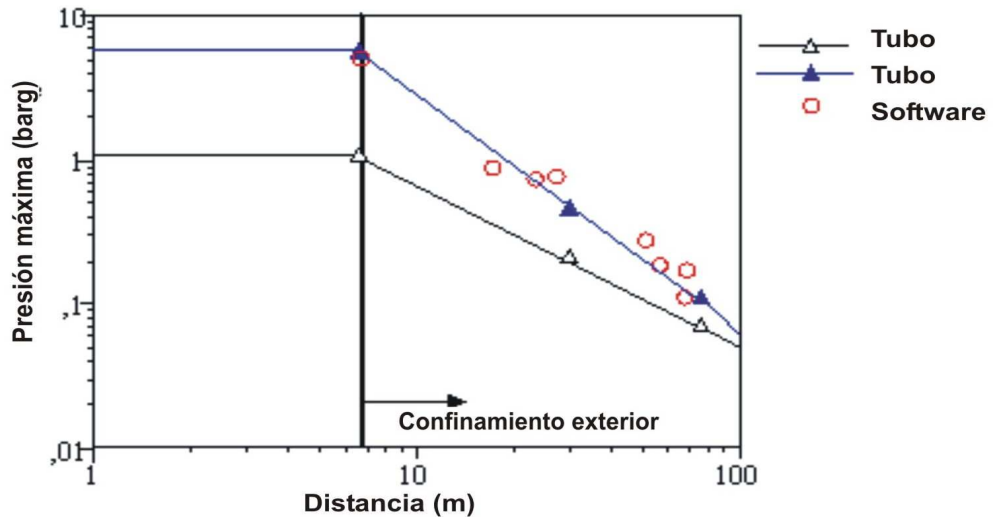


Figura 6.9. Comparación del comportamiento simulado con experimentos para una nube de gas de 600 m³.



6.6 REFLEXIÓN DE ONDAS DE LA EXPLOSIÓN EN CAMPO LIBRE

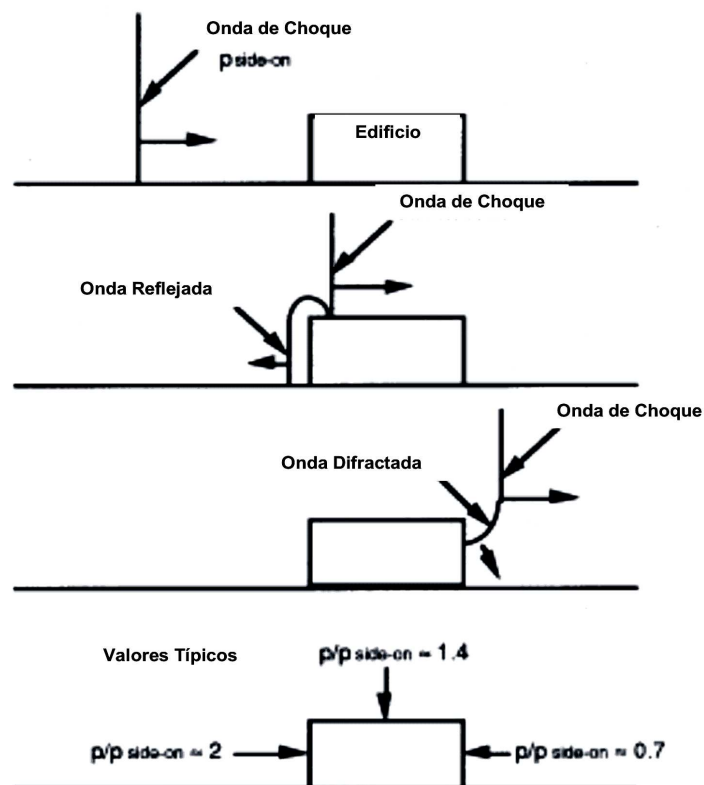
La carga en una construcción golpeada por una onda de la explosión es un fenómeno bastante complejo. (Baker, 1983).

Cuando una onda de explosión de campo libre se encuentra con un objeto como un edificio, la onda se reflejará. La Figura 6.10 muestra cómo una onda de choque se refleja fuera de un edificio. Debido a la reflexión y la difracción, la onda se recarga en las paredes y el tejado caerá. La carga máxima será sobre la pared frente a la explosión. A esta pared la onda de choque se reflejará y la presión aumentará típicamente por un factor de dos. (depende de la fuerza de choque.).

Cuando se propaga la onda de choque en un campo libre, el gas detrás de la onda de choque tendrá una velocidad en la misma dirección como se propaga la onda. Cuando las ondas de choque golpean la pared, el gas deberá detenerse y la presión dinámica (es decir $0.5 \rho v^2$) es transformada para presionar. Esto se debe a que la presión aumenta debido a la reflexión de onda de explosión.

En la pared opuesta (Ver Figura 6.10) la onda de choque será difractada, y eso reducirá la presión sobre el edificio.

Figura 6.10. Reflexión de la explosión fuera de un edificio.



6.7 RESPUESTA ESTRUCTURAL

Predecir la presión de la explosión es un paso en un análisis consecuente. El próximo paso es estimar la respuesta estructural sujeta a la carga de la explosión de gas. El conocimiento sobre la respuesta estructural es por lo tanto muy importante en las investigaciones de accidentes.

La respuesta estructural es una actividad de investigación propia de la Ingeniería Civil. Sin embargo, el área de las cargas que actúan en las estructuras está bajo investigación. Hay poca información disponible sobre cargas y la respuesta estructural de las explosiones de gas. Hoy, la fuente principal de información en este campo, está en los efectos de explosión de las pruebas de armas militares. Estos datos no siempre son directamente aplicables para las explosiones de gas accidentales.

Los objetivos de este capítulo son:

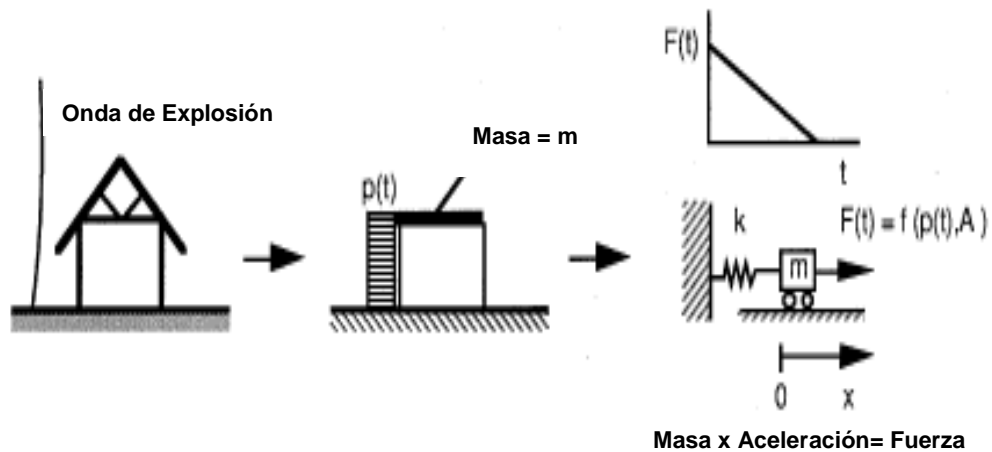
- Describir la diferencia entre una carga estática y una carga dinámica, actuando sobre una estructura.
- Explicar cómo la carga de una explosión de gas actúa sobre una estructura.
- Describir el típico daño, la respuesta del equipo, y los edificios sujetos a las cargas de presión de la explosión.

6.8 RESPUESTA DINÁMICA

Una explosión de gas es un evento muy rápido. En una explosión de gas grande, la duración de la sobrepresión típicamente será de 100-200 m / seg. La carga de

una explosión de gas es por consiguiente una carga dinámica. Para ilustrar la diferencia entre una carga estática y una carga dinámica se usará como un ejemplo un sistema de *un solo grado de libertad*. Una casa sujeta a una onda de explosión puede reducirse a un sistema de *un solo grado de libertad*. Esto se muestra en la Figura 6.11.

Figura 6.11. Una casa sujeta a una onda de explosión puede ser reducida a un sistema de un solo grado de libertad.

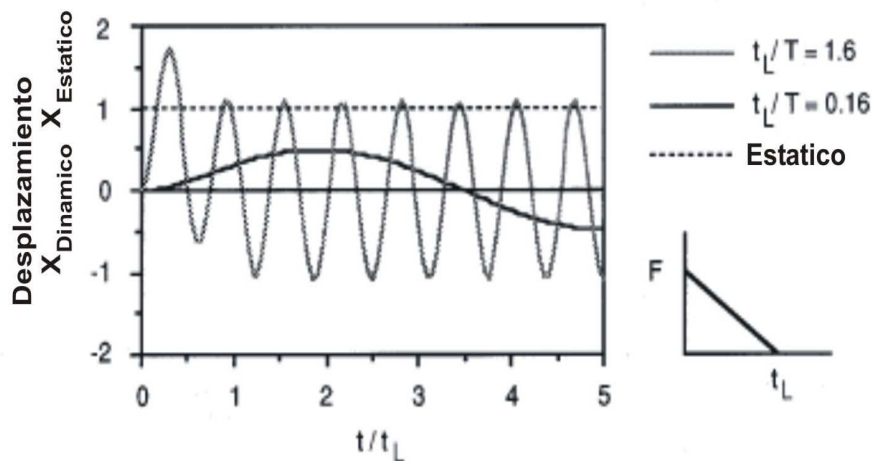


El techo inclinado es reducido a una viga rígida y las paredes son tratadas como vigas verticales. Esto puede reducirse más allá como a un sistema simple de masa. La carga, es decir, el área de tiempo-presión, es simplificada por un pulso triangular. La respuesta x , es decir, el desplazamiento de la masa m , dependerá

de la fuerza máxima, la frecuencia natural del sistema, $T = 2\pi (m/k)^{1/2}$, y la masa m .

El desplazamiento puede predecirse por la segunda ley de Newton: la masa \times aceleración = fuerza. El resultado es semejante al cálculo que se muestra en la Figura 6.12.

Figura 6.12. El desplazamiento de un solo grado de libertad como la función de tiempo, t , cuando es sujeta a un pulso triangular.

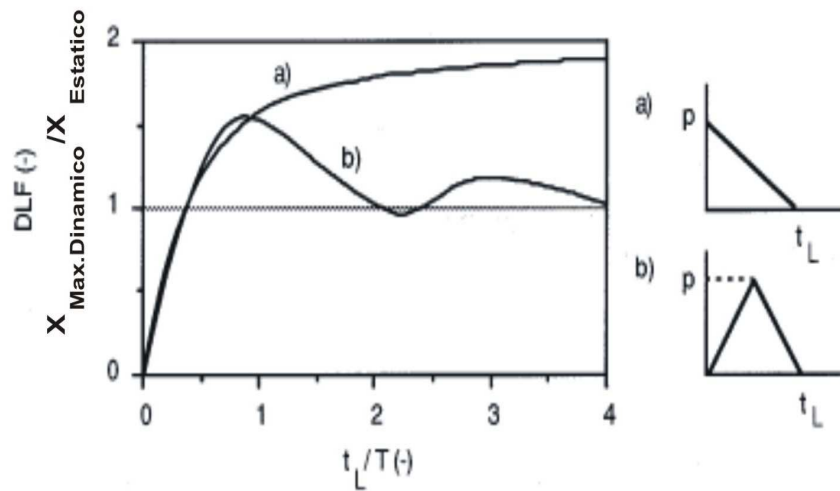


En este sistema no hay amortiguación. La masa por consiguiente, continúa oscilando. En las situaciones reales habrá siempre algunas amortiguaciones y la masa llegará después a ser un soporte.

Sin embargo, esto es importante para reconocer que el desplazamiento máximo de la masa, X_{max} dinámico, dependerá de la relación de carga de la duración, t_L , y la frecuencia natural del sistema, T . Para una t_L relación / baja de T , el X_{max} dinámico es más pequeño que el desplazamiento para la carga estática ($X_{estática} = F/K$). Para relaciones t_L/T - más grandes, X_{max} dinámico puede ser más grande que el desplazamiento para cargas estáticas.

En la Figura 6.13 se muestra la relación de $X_{\text{max}} \text{ dinámico} / X \text{ estática}$ [también llamado factor de carga dinámica (FCD)] contra el t_L/T para dos tipos diferentes de cargas triangulares.

Figura 6.13. El Factor de Carga dinámica (FCD)



Las estructuras reales pueden tener muchos grados de libertad y la predicción de su comportamiento necesitará un análisis detallado. Un sistema de un solo grado de libertad es muy simplificado, pero ilustra el comportamiento básico de las estructuras sujetas a una carga dinámica.

La respuesta estructural y el nivel de daño dependerán de la carga (es decir del arrastre y/o la presión) como una función de tiempo y las características propias de la estructura.

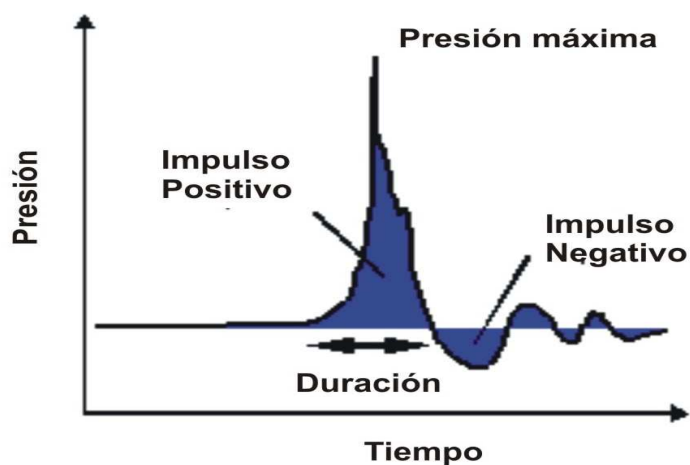
6.9 CARGAS DE LAS EXPLOSIONES DE GAS

Una explosión de gas generará altas presiones y a menudo también altas velocidades de flujo. La presión y el flujo causan la carga dinámica en las estructuras, y por consiguiente causan el daño. Dentro de una nube de gas desplazado el tipo de carga que es generada por una simulación de la explosión de gas y dependerá del tamaño de la estructura.

Una pared puede reducirse espacialmente por medio del código de simulación. La carga principal de la explosión, la presión, por consiguiente, será calculada directamente por el código. Una tubería pequeña que está de pie cerca a la explosión, sin embargo, no será resuelta por el código y el diferencial de la presión no podrá directamente ser calculado. La carga tendrá que calcularse por la referencia a las condiciones de flujo (la densidad y la velocidad) usando una fórmula de arrastre.

Una curva de tiempo-presión para una explosión de gas en un compartimento se muestra en la Figura 6.14.

Figura 6.14. La curva de tiempo-presión



La presión se reducirá a cero en la fase inicial de la explosión cuando la tasa de quemado sea baja. Cuando la llama empieza a acelerar la presión sube rápidamente y se alcanzará la máxima presión. La presión decaerá entonces así como disminuya la tasa de quemado y el gas sea liberado a través de las aperturas del venteo.

Debido a la inercia del flujo la presión del gas quemado caerá por debajo de la presión ambiente. Los parámetros principales que influirán en la respuesta estructural son: la presión máxima, el incremento de tiempo de la presión (el dp/dt), el impulso positivo y el impulso negativo. El impulso es el tiempo integral de la presión que tienen las dos, la presión y la duración del pulso.

La importancia del impulso negativo dependerá mucho más de la frecuencia natural de la estructura. Si la presión negativa está en la fase con la vibración de la estructura, la fase negativa puede tener una contribución significativa. El impulso negativo puede ser aproximadamente de 1/3 de la fase de impulso positivo, pero esta relación dependerá del diseño de la geometría donde ocurra la explosión.

Los análisis de los resultados que se realizan sobre explosiones de gas o los resultados experimentales son a menudo reportados como presión máxima. La presión máxima es un parámetro muy importante, pero el incremento del tiempo, el impulso y la duración también pueden ser importantes. También debe ser mencionado, que los valores exactos para la presión máxima no son siempre fáciles de leer desde un registro debido a menudo a la naturaleza aguda de las señales de presión.

Los picos altos que se observan en experimentos y las simulaciones del software pueden ser importantes en la estimación de la respuesta estructural. La topología de la carga de presión (la distribución en el espacio y el tiempo), también puede ser importante. Estas áreas están todavía bajo investigación. No es muy claro que nivel de información es requerido para realizar un análisis más detallado.

Como lo explicamos mas adelante, los objetos más pequeños son similares a las tuberías que están dentro de una nube de gas desplazado, será sujeto a la fuerza de arrastre. En las dinámicas de fluido la fuerza de arrastre es estimada a menudo desde la fórmula:

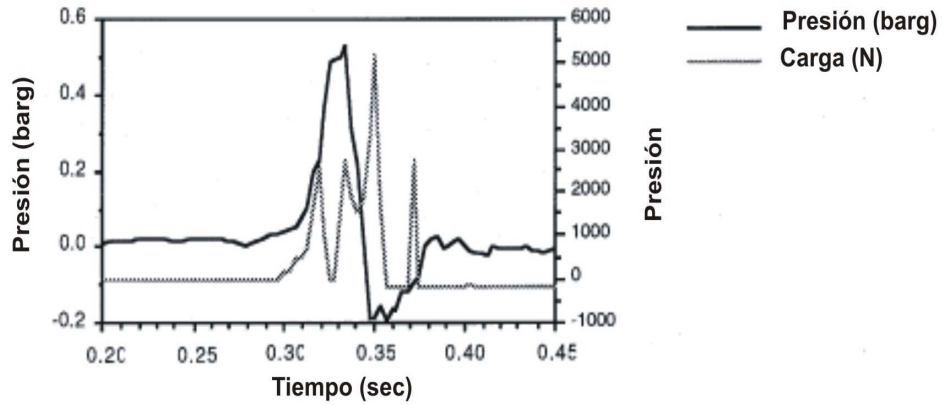
$$F_{Drag} = C_D A \cdot 0.5 \rho^2$$

C_D es el coeficiente de arrastre, A [el m²] es el área proyectada de la normalidad del objeto para la dirección de flujo y $0.5 \rho^2$ es la presión dinámica. Para los objetos bastante grandes será resuelto por el código de simulación usado para predecir explosiones de gas, el diferencial de la presión es directamente calculado.

Para las cargas no estacionarias de las explosiones de gas hay todavía incertidumbres con respecto a la estimación de arrastre de las cargas. El coeficiente de arrastre probablemente dependerá de varios factores como el nivel de la turbulencia, el tiempo, el incremento del tiempo de presión etc.

CMR (Chr. Michelsen Research) recientemente ha realizado algunas pruebas piloto con una tubería que tiene de diámetro en el venteo 0.168 m de un vaso con forma de cuña. (Sand, 1992). La presión de la explosión y la carga se muestran en la Figura 6.15.

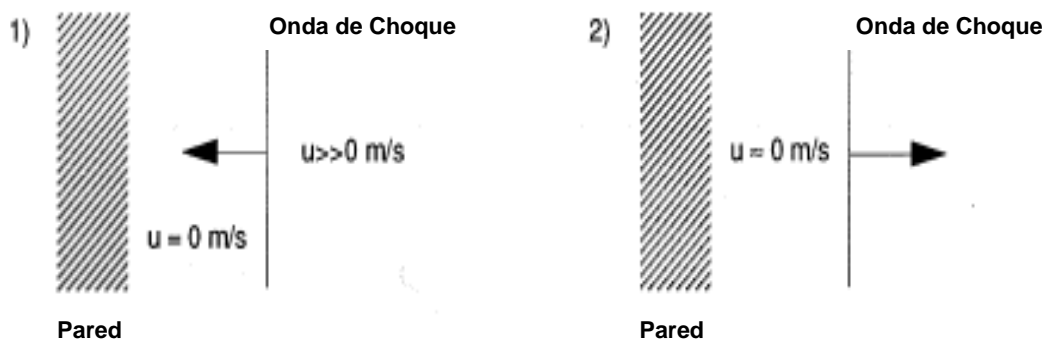
Figura 6.15. Los resultados experimentales de la prueba con cargas en una tubería.



Como lo discutido anteriormente, una explosión causará una onda de explosión que se propagará fuera del área de explosión. Se llama a esta onda de explosión que está fuera del área de la explosión, *el campo libre de explosión*.

Cuando la onda golpea en un edificio u otro objeto, la onda y el objeto actuarán recíprocamente. Un efecto de esto es que la onda de choque (es decir el frente de una onda de explosión fuerte) se reflejará, como lo mostrado en la Figura 6.16.

Figura 6.16. La reflexión de una onda de choque cuando golpea de frente una pared.



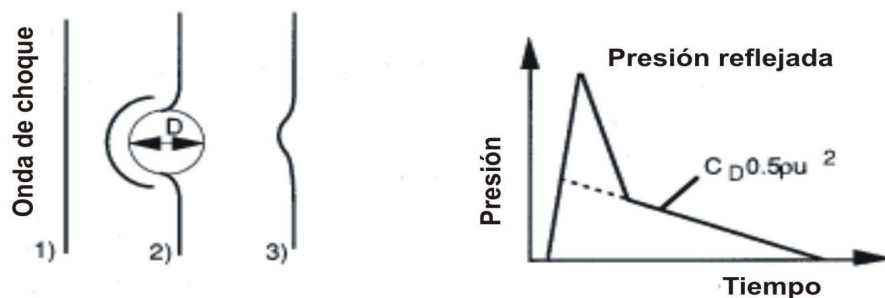
Cuando una onda de choque golpea la pared, el gas detrás de la onda de choque vendrá a apoyarse (es decir $u = 0$ m/s) en las condiciones satisfactorias de límite. La presión actual (reflejada) consistirá entonces de la suma de la presión de la explosión incidente y la presión dinámica (es decir $0.5 \rho u^2$).

Para una onda de choque con la presión incidente de 1 barg, la presión reflejada será aproximadamente de 2.7 barg. Para la presión incidente de unos pocos cientos de millibars, la presión reflejada es aproximadamente dos veces la presión incidente

Si un objeto pequeño es sujeto a una explosión de campo libre con un frente de choque, la primera fase de la carga se deberá a la presión reflejada. La duración de esta fase es el tiempo que la onda de choque toma para pasar el objeto (es decir la dimensión del objeto / la velocidad de choque).

Cuando la onda de choque ha pasado el objeto, el objeto sentirá la carga del viento (es decir el arrastre) de la onda de la explosión (Ver Figura 6.17).

Figura 6.17. La interacción de una onda de explosión con un objeto pequeño. La historia del tiempo-carga que consiste en una fase reflejada y una fase de arrastre. (Baker. 1983)



Los detalles extensos sobre la reflexión de choque y el arrastre de las ondas de la explosión puede encontrarse en Baker, (1983).

6.10 NIVEL DE DAÑO

El objetivo de esta sección es listar algunos datos disponibles sobre los niveles de daños para el típico equipo de proceso. Los datos incluidos aquí son generales y no deben usarse como valores exactos, pero si como indicaciones de Nivel de Daño.

Muchos de los datos disponibles vienen de fuentes militares y están basados en la experiencia de las ondas de explosión para explosivos de alto poder y explosiones nucleares. Para nuestro conocimiento, hay datos limitados disponibles sobre la respuesta estructural para las explosiones de gas actuales. Sin embargo, se espera que se obtengan datos más exactos. Incluyendo información acerca del impulso y la presión que es necesaria.

Stephens (1970) presentó el nivel de daño a las partes vulnerables de una refinería. Estos datos se dan en la Tabla 6.1. En esta figura se observa que el daño comienza alrededor de 100 m barg y el daño llega a ser muy serio de 0.5 - 1.0 barg.

Tabla 6.1. Los efectos de la sobrepresión de la explosión en las partes vulnerables de una refinería. (Stephens 1970).

Equipo \ Sobrepresión (psig/barg)	0,5/0,03	1,0/0,07	1,6/0,10	2,0/0,14	2,5/0,17	3,0/0,20	3,5/0,24	4,0/0,27	4,5/0,30	5,0/0,34	5,5/0,37	6,0/0,41	6,5/0,44	7,0/0,48	7,5/0,51	8,0/0,54	8,5/0,60	9,0/0,61	9,5/0,65	10,0/0,68	12,0/0,82	14,0/0,95	16,0/1,09	18,0/1,22	20,0/1,36	>20,0/>1,36
Cuarto de control piso metálico	a	c	d			n																				
Cuarto de control piso en concreto	a	e	p	d		n																				
Torre enfriadora	b		l			c																				
Tanque, piso cónico	d					k									u											
Instrumento cúbico	a					m									t											
Calentador			g	i											t											
Reactor			a												p											
Filtro																										
Regenerador																										
Tanque de piso flotante																										
Reactor de craking																										
Tubería																										
Medidor de gas																										
Transformador eléctrico																										
Motor eléctrico																										
Ventilador																										
Columna de fraccionamiento																										
Vasija de presión horizontal																										
Regulador de gas																										
Columna de extracción																										
Turbina de vapor																										
Intercambiador de calor																										
Tanque esférico																										
Vasija de presión vertical																										
Bomba																										

Código:

- a) Ventanas rotas.
- b) Caída de las persianas de 0.3/0.5 psi
- c) El mecanismo de control es averiado por el derrumbamiento del techo
- d) El derrumbamiento del techo
- e) Son dañados los instrumentos
- f) Se dañan las partes internas
- g) Las grietas de los ladrillos
- h) Ocurren daños de misil que producen escombros
- i) Se mueve la Unidad y se rompen las tuberías
- j) Fuertes fallas
- k) Subpresión de la unidad (a medio-rellenar)
- l) Se cortan las líneas de Potencia
- m) Se dañan los controles
- n) Se derrumban las paredes de Bloque
- o) Se derrumban los marcos)
- p) Se deforman los Marcos
- q) Se daña la caja
- r) Se agrieta el pórtico
- s) Se rompen las tuberías
- t) Se voltea o se destruye la unidad
- u) Subpresión de la unidad (llenada al 0.9)
- v) Se mueven los cimientos.

6.11 DAÑO A LOS EDIFICIOS

La Figura 6.18 muestra los niveles de daño para edificios en ladrillo contra la máxima presión e impulso de la onda de la explosión con explosivos de alto poder. Estos datos se obtuvieron en Londres al final de la Segunda Guerra Mundial. Baker, (1983) afirma que este diagrama también puede usarse para otro tipo de viviendas, pequeños edificios de oficinas y edificios industriales de elementos livianos.

Figura 6.18. Las curvas del Iso-daño. (Baker, 1983)

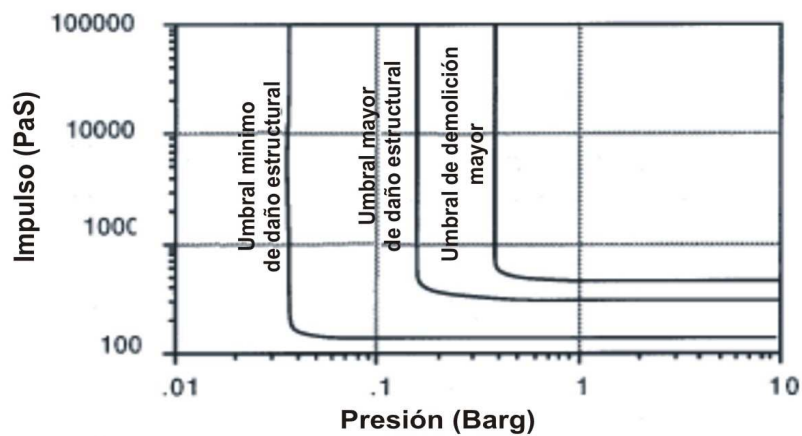


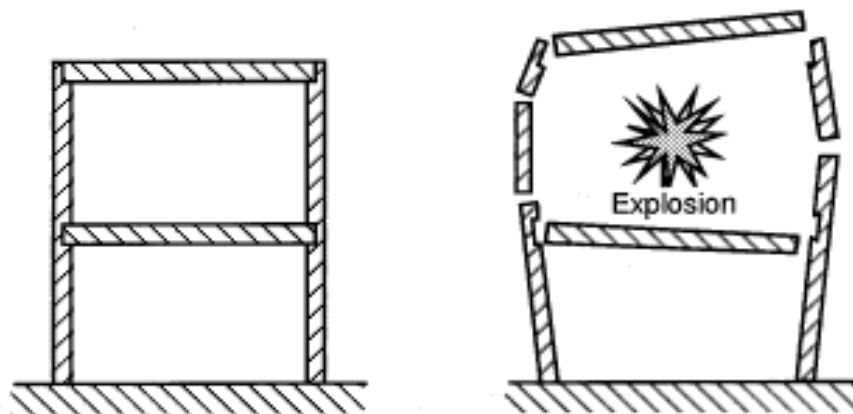
Tabla 6.2. Fallas de presión típicas de algunos elementos de edificios estructurales bajo las condiciones de una explosión de gas (Harris 1983)

<i>Elementos Estructurales</i>	<i>Fallas Típicas de Presión (m/barg)</i>
<i>Ventanas de Vidrio</i>	<i>20-70</i>
<i>Puertas</i>	<i>20-30</i>
<i>Paredes Livianas</i>	<i>20-50</i>
<i>Paredes de Bloque de grosor de 50 mm</i>	<i>40-50</i>
<i>Paredes en Ladrillo sin obstruir</i>	<i>70-150</i>

Un aspecto importante de daños a los edificios es si sobrevive la integridad de los edificios. El daño a un edificio en caso de una explosión de gas accidental no es un problema serio con tal de que el edificio no esté derrumbándose o se generen fragmentos peligrosos al interior del edificio. Esto es igualmente importante para los edificios sujetos a cargas de explosión externas, así como los edificios con posibilidades de explosiones internas.

La Figura 6.19 muestra el plano de un edificio donde una explosión interna, causará el derrumbamiento del edificio. Los edificios se hicieron de paredes prefabricadas y el techo se derrumbará cuando esté sujeto a las cargas de la explosión. Como lo mostrado en la Tabla 6.2 las paredes del ladrillo ordinario son débiles también. En caso de una explosión interna la pared de ladrillo se desintegrará y causará fragmentos peligrosos.

Figura 6.19. La sobrepresión debido a una explosión interna causará el derrumbamiento del edificio (Eckhoff, 1991).



Típicamente un vaso de ventana fallará de 20 a 70 m barg, causando los fragmentos volátiles peligrosos. Como lo mostrado por Harris (1983), los fragmentos del vaso pueden volar más de 20 m cuando la ruptura de la presión sea aproximadamente de 0.25 barg. La velocidad de estos fragmentos será cerca de 30 a 40 m/s. (~ 100 km/h). Es mejor usar un vidrio a prueba de explosiones y tratar de construir las ventanas lo más pequeñas posibles.

Los marcos de la ventana deben ser más fuertes como la misma ventana. Si las ventanas ordinarias son reemplazadas por ventanas resistentes a la explosión, el marco también tiene que ser cambiado. Si el marco es más débil que la ventana, la ventana volará fuera como una sola pieza. Algunos criterios sobre diseños para edificios puede encontrarse en la Figura 6.18.

Las pautas para diseñar edificios son:

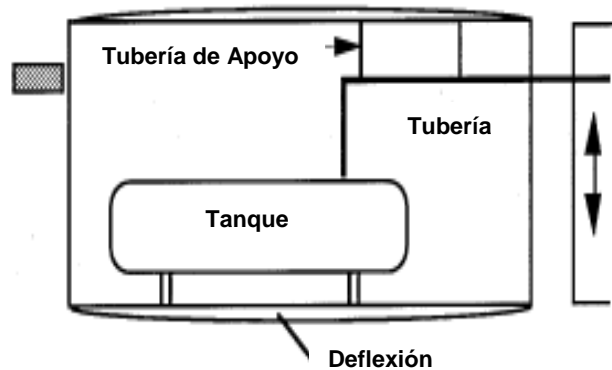
Posiblemente los edificios estén sujetos a ondas de explosión externas, debe hacerse de concreto reforzado. Las ventanas deben ser pequeñas y hechas de vaso resistente a la explosión con un marco fuerte. Las tomas aéreas no deberán situarse al nivel del terreno, para impedir la entrada de gas combustible denso en los edificios.

Los Edificios que estén sujetos a posibles explosiones internas deberán tener una estructura del marco fuerte, soportando el techo y los suelos del intermedio. Las paredes deben estar abiertas, en lo posible. Si una pared sólida se necesita, es conveniente usar tableros para paredes de bajo peso para facilitar la abertura rápida de la explosión.

6.12 EFECTO DOMINÓ

Como resultado de una violenta explosión de gas las paredes o cubiertas se pueden empezar a mover o incluso romperse y fragmentarse. Las tuberías que están adosadas a una pared en movimiento se cortan (cizallamiento), como resultado del movimiento relativo de los puntos de suspensión. Las tuberías de un módulo a otro módulo pueden responder a movimientos relativos de la estructura. También pueden dañarse los cables y líneas del mando debido a este tipo de movimiento relativo. La Figura 6.20 ilustra cómo la deflexión y el movimiento debido a las explosiones pueden causar daños a las tuberías.

Figura 6.20. Las deformaciones o movimientos debido a las explosiones, pueden causar nuevas descargas e incendios.



6.13 EFECTO EN LAS PERSONAS

Las personas pueden sobrevivir a fuertes ondas de explosión. Los datos por lesiones pulmonares (Baker, 1983), muestra que el 1% de supervivencia por las presiones de choque es aproximadamente de 3.5 barg y un 99% de supervivencia para las presiones de choque es aproximadamente de 2 barg para una explosión de larga duración. El límite del umbral es aproximadamente de 0.7 barg.

Los datos por lesiones de ruptura del tímpano muestran 10% de las rupturas para máxima presión es de aproximadamente de 0.25 barg.

En las explosiones accidentales de gas hay muy pocos casos dónde la explosión ha matado directamente a las personas. El incidente de Sarnia (Londres, 1984), dónde murieron dos personas debido a una nube de aire-hidrógeno que detonó, es uno de estos casos. Cuando se mueren las personas o se lesionan en explosiones de gas, las lesiones son causadas típicamente por:

- Quemaduras.
- Fragmentos que golpean a las personas.
- Edificios u otra estructura que se cae o es desintegrada.
- Las personas que se caen o "vuelan" y como consecuencia se golpean con un objeto sólido.

Para proteger a las personas de las lesiones, es por consiguiente, vincularlas a las estructuras diseñadas. Las estructuras deben diseñarse para cargas de resistencia sin crear fragmentos peligrosos o derrumbarse.

7. EXPLOSIONES DE GAS EN VASIJAS, TUBERÍAS Y CANALES

Cuando se analiza una explosión interna, se encuentra que el tamaño de la nube de gas es el parámetro principal que determina el aumento de la presión. Casi siempre, las condiciones geométricas soportan la aceleración de la llama y el aumento de la presión. Así, si se forma una nube grande dentro del equipo, y se enciende, es muy probable que haya una explosión severa.

Una explosión interna puede resultar en pérdidas de contención. El evento subsiguiente puede ser que las fuertes ondas de explosión causen, desde depósitos de alta presión, hasta incendios ó descargas tóxicas.

En las industrias de proceso de hidrocarburos, se encuentra una gran variedad de casos dónde han ocurrido explosiones de gas internas. Dichas explosiones pueden ser causadas por goteras sin control, o simplemente una purga accidental con el aire (y por eso la formación de mezclas de aire-combustible).

Hay limitada información disponible en la literatura, sobre estos aspectos de explosiones de gas. Está fuera del alcance de este capítulo presentar métodos más detallados para analizar las explosiones de gas en sistemas de este tipo.

7.1 VASIJAS CERRADAS

Una vasija cerrada es a menudo un venteo muy pequeño, como las tuberías conectadas, los discos rotos ó las válvulas de alivio a través del cuál la presión puede aliviarse durante una explosión de gas. En este caso, el proceso de alivio es a menudo lento frente al rápido incremento de la presión, y la vasija puede comportarse como una vasija cerrada totalmente con respecto al aumento de la

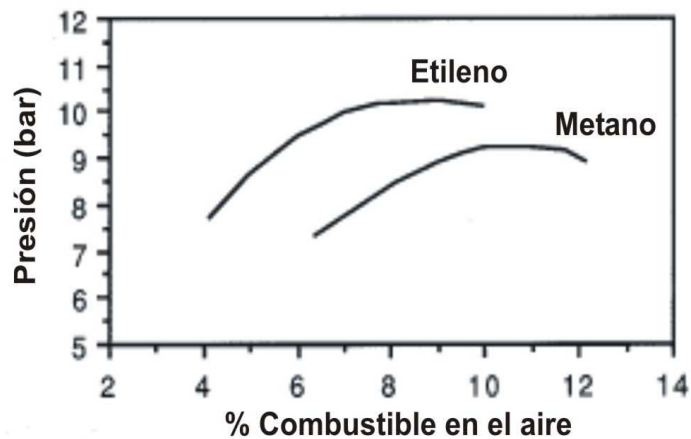
presión. El aumento de la presión dependerá principalmente del tipo y la concentración del combustible, la presión inicial, la relación de relleno en la vasija, la tasa de quemado, el venteo y la oxidación.

En la primera parte de esta discusión se asumirá que la llama es una deflagración lenta con una velocidad de menos del 20% de la velocidad inicial del sonido (es decir una mezcla de aire-combustible a 1 atm. y 25°C menos de 70 m/s), de las altas presiones locales debido a una alta tasa de quemado que es despreciable. Para una deflagración lenta en una mezcla de gas homogénea, la presión en la vasija aumentará gradualmente como se consume la llama de la mezcla de gas. Como es mostrado en la Figura 3.6 la máxima presión se alcanzará cuando sea completa la combustión.

Para la mayoría de combustibles de hidrocarburos, una mezcla estequiométrica de aire- combustible con una presión inicial de una atmósfera, dará una presión de 8-10 bar (Ver la Tabla 2.5), cuando se queme bajo condiciones de volumen constante. En la Figura 7.1 se muestra la presión para una combustión a volumen constante como función del porcentaje de combustible en el aire para mezclas homogéneas de aire-metano y aire-etileno.

La presión más alta se encuentra para mezclas ligeramente ricas, es decir, una concentración ligeramente más alta que la mezcla estequiométrica que es de 9.5% para el metano y 6.54% para el etileno. Cuando la concentración de combustible se acerca a los límites de inflamabilidad, se reducirá la presión de la explosión, incluso cerca de los límites de inflamabilidad, los valores teóricos para la combustión de volumen constante estarán en el rango de 4-5 bar. Incluso una nube cerca del límite de inflamabilidad, en una explosión, puede causar un aumento de presión significativo en una vasija cerrada.

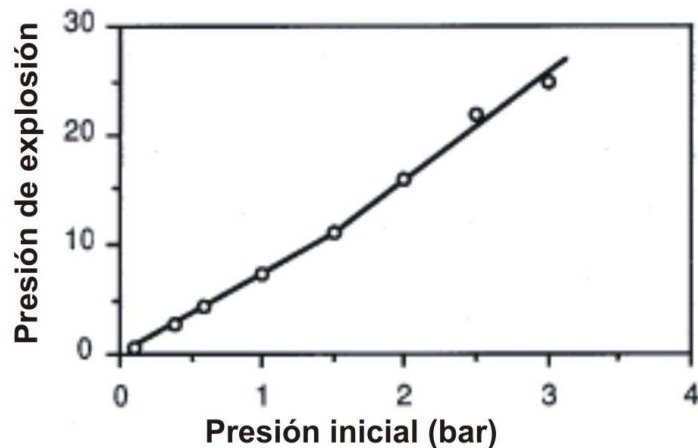
Figura 7.1. Presión de la explosión para la combustión de volumen constante de aire-etileno y aire-metano a 1 bar y 25°C predicho por STANJAN (Salater, 1991).



La presión inicial es un parámetro que influye en la presión de la explosión a las condiciones de volumen constantes. Incrementando la presión inicial, el contenido de energía, es decir, el calor de la combustión, aumentará por el volumen de la unidad. Bartknecht (1981) ha dado algunas medidas de presión de la explosión para deflagraciones lentas por propano en una vasija esférica de 7 litros.

Estos resultados se muestran en la Figura 7.2. Hay una relación casi lineal entre la presión inicial y la presión de la explosión. Para el aire-combustible estequiométrico, el aumento de la presión como el volumen constante será aproximadamente 8 veces la presión inicial. Para otros oxidantes que el aire, como el oxígeno puro, el aire enriquecido de oxígeno o cloro, un volumen constante mas alto que las presiones de las explosiones puede esperarse. Para estimar el volumen constante de la presión de la explosión para especificar las mezclas de aire-combustible ó combustible / mezclas de oxidantes a las condiciones iniciales dadas, pueden usarse de nuevo programas como STANJAN.

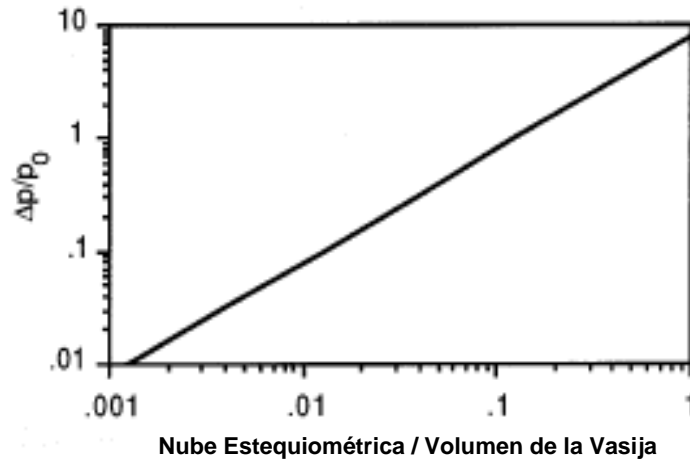
Figura 7.2. La presión de la explosión contra la presión inicial para el aire-propano estequiométrico en una vasija de 7 litros (Bartknecht 1981)



En muchas situaciones sólo una porción de la vasija se llenará de gas combustible. Se muestra la presión de la explosión para una vasija en parte llena en la Figura 7.3. Nótese que en esta figura, asumimos que la nube tiene una composición estequiométrica aunque ocupa sólo parte de la vasija. Si aproximadamente el 15% de la vasija cerrada es llenada con una nube estequiométrica y ésta quema la nube, se doblará la presión en la vasija.

Incluso llenándose en relación 1-2% pueden causar problemas para vasijas grandes u operando tanques en condiciones atmosféricas. Ellos son muy débiles a menudo y pueden romperse por la sobrepresión unos cientos de m bar. Esto muestra que la relación del relleno es baja y puede causar un aumento significativo de la presión en las vasijas cerradas. Para evitar este problema, es recomendado controlar el venteo como un dispositivo de mitigación.

Figura 7.3. Los valores aproximados para el aumento de presión contra el radio lleno en una vasija cerrada.



Less (1980) afirma que las detonaciones que ocurren en las tuberías, y en las vasijas son muy improbables. En un vasija vacía no hay ninguna obstrucción que cause turbulencia y aceleración de la llama. La transición para la detonación no es por consiguiente probable en las vasijas, a menos que sea muy detonable el gas (el tamaño de la celda es pequeño), la nube de gas es grande, la nube se dispare encendida o contenga obstáculos la vasija.

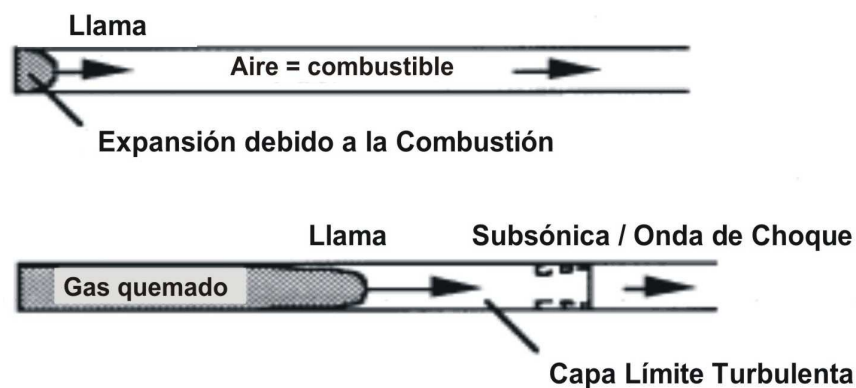
7.2 TUBERÍAS

Además de las vasijas cerradas, las tuberías (incluyendo los canales y los túneles), es típico además de las geometrías simples, que las explosiones internas puedan ocurrir. En las tuberías, la presión generada por la llama tiene la posibilidad de propagarse fuera del frente de combustión.

Para las tuberías largas ó abiertas y limitadas, una alta velocidad de llama se requiere para generar una alta presión de explosión. La Figura 3.5 muestra la relación entre la velocidad de la llama y la presión de la explosión. Para las tuberías, es aplicable el método planar.

El mecanismo principal que causa la aceleración de la llama en las tuberías, es la turbulencia. Cuando se quema, éste es empujado y extendido al gas quemado delante del frente de la llama. El flujo delante de la llama causará una capa-límite turbulenta para expandirse y la turbulencia por la rata de quemado que será reforzada. Esto se ilustra en la Figura 2.4.

Figura 7.4. La aceleración de la llama en una tubería, canal o túnel.

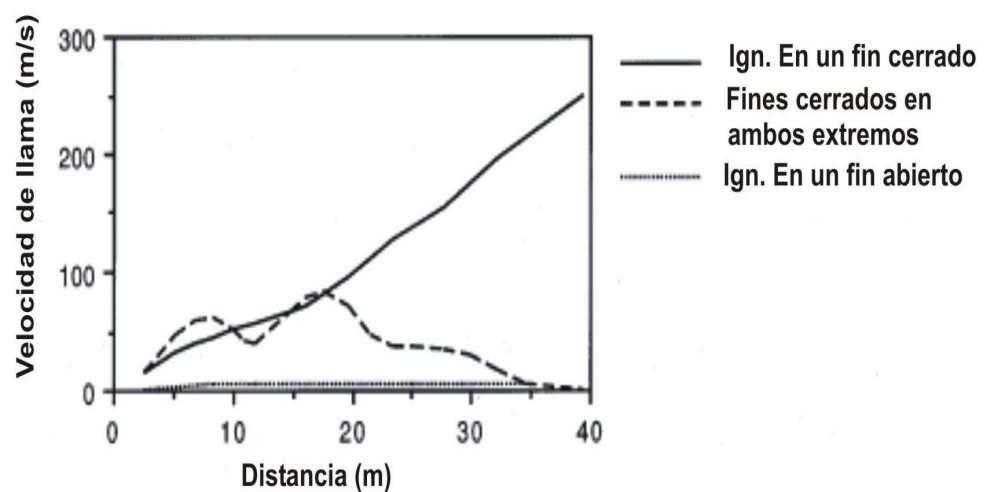


Bartknecht (1971), ha medido las velocidades de llama en una tubería de 1.4 m de diámetro con aire-metano a 1 atm. La tubería era de 40 m de largo y el extremo podría estar abierto o cerrado. Los resultados se muestran en la Figura 7.5. Se observó que la velocidad de llama fue más alta cuando el gas se encendió en el extremo cerrado y el otro extremo estaba abierto. En este caso el gas fue empujado delante de la llama a través de la tubería y se generó una parte de turbulencia.

Cuando la tubería fue cerrada en ambos extremos, la llama aceleró rápidamente al principio, pero después de 15-20 min, la llama empezó a disminuir la velocidad, porque fue obstruido por un extremo cerrado el flujo delante de la llama. Desde que la tubería esté cerrada en ambos extremos, en una vasija cerrada la presión aumentará. En el tercer caso la ignición es en un extremo abierto y el otro extremo está cerrado.

Aquí, son muy bajos, la velocidad de flujo y el nivel de turbulencia delante de la llama, y la llama a través de la tubería se propaga a bajas velocidades. Estos experimentos muestran la importancia de las condiciones de límite para la aceleración de la llama en una tubería. Las condiciones de límite en una tubería pueden ser similares a las de la ignición, en el extremo cerrado de una tubería, si en el centro de la nube, es encendida la nube de gas. En este caso se propagará la llama en ambas direcciones y allí habrá una velocidad de flujo de cero dónde tuvo lugar la ignición (es decir el plano de simetría).

Figura 7.5. La velocidad de llama en una tubería de diámetro 1.4 m con aire-metano. (Bartknecht 1971)



En una tubería la llama puede continuar acelerando hasta volverse una detonación (una onda de combustión supersónica que se propaga de 1500-2000 m/s en aire-combustible). Como lo discutimos anteriormente sólo se tiene una comprensión cualitativa del mecanismo de transición de la deflagración para la detonación. Por consiguiente, no somos aún capaces de predecir este fenómeno.

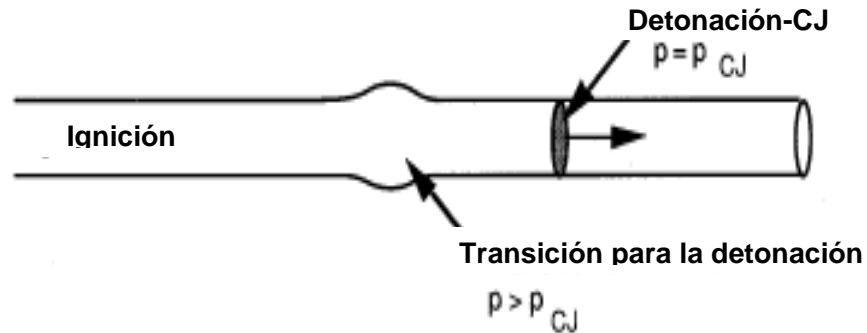
Es toda la información experimental que está disponible. El fenómeno de la transición se caracteriza por presiones locales altas, presiones de 50 veces la presión inicial que ha sido moderada, cuando ha ocurrido la transición para la detonación.

En las situaciones accidentales, puede ser observado un daño muy fuerte en el lugar de la transición para la detonación. Un caso de una explosión de gas en una tubería es ilustrada en la Figura 7.6.

En un lugar particular la tubería se extendió radialmente. Ese fue el lugar dónde tuvo lugar la transición para la detonación. Cuando se propagó mas lejos la detonación, ésta se estabilizó en una condición llamada CJ, que da la más baja presión.

En la historia del caso, no se rompió la tubería. Si se hubiera roto la tubería, se habría escapado un depósito de alta presión. Esto demuestra que en la transición para la detonación en tuberías, canales y túneles son un fenómeno arriesgado que como sea posible debe reconocerse.

Figura 7.6. La transición para la detonación de una tubería deformada.



La distancia de acumulación, es decir, la distancia desde la ignición a la transición para la detonación en las tuberías es un valor experimental dando algunas indicaciones de la probabilidad de la transición para la detonación. Steen y Schampel (1983) han revisado las investigaciones experimentales sobre la distancia de acumulación de las detonaciones gaseosas en tuberías grandes.

Las condiciones experimentales, es decir la temperatura, la presión, y la mezcla de gas, son limitadas comparadas con las condiciones actuales en la industria. Los datos presentados por Steen y Schampel son para 1 atm principalmente, y las mezclas de aire-combustible.

La Figura 7.7 muestra la distancia de acumulación para el etileno estequiométrico y aire-propano contra el diámetro de la tubería. Aumenta la distancia de acumulación conforme crece el diámetro de la tubería. La capa-límite turbulenta delante de la llama relativamente está llenando una porción más grande del tubo en tuberías pequeñas que en tuberías grandes.

La concentración de combustible también es un factor importante para la distancia de acumulación. Esto puede ser visto en la Figura 8.8. Algunos factores que también influirían en la distancia de acumulación. Los Experimentos muestran que esto decrece con:

- la creciente presión inicial,
- la decreciente temperatura inicial, y
- la creciente turbulencia en la tubería (es decir las obstrucciones en la tubería).

En general, nosotros podemos decir que la distancia de acumulación depende del tamaño de la celda y de la reactividad, y la mezcla más reactiva, el tamaño de la celda es más pequeño, y la mezcla más reactiva (velocidad de quemado), la distancia de acumulación es la más corta.

Figura 7.7. La distancia de acumulación para la detonación contra el diámetro de la tubería. (Steen y Schampel, 1983).

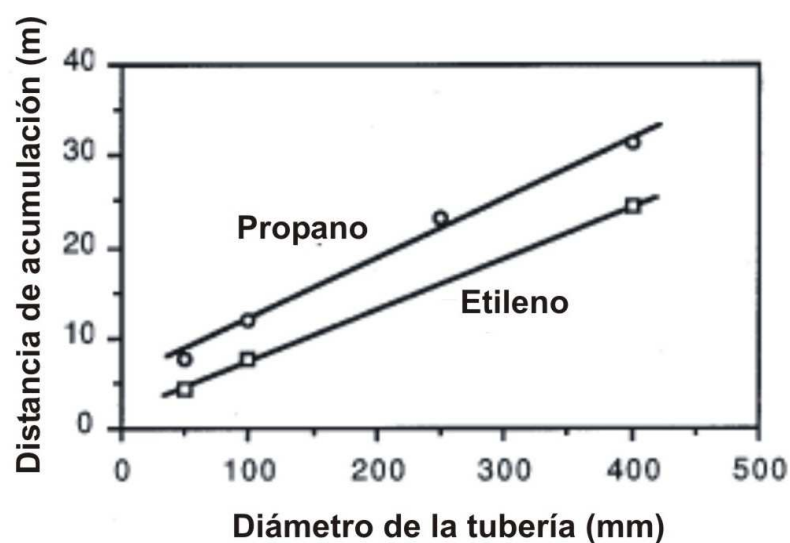
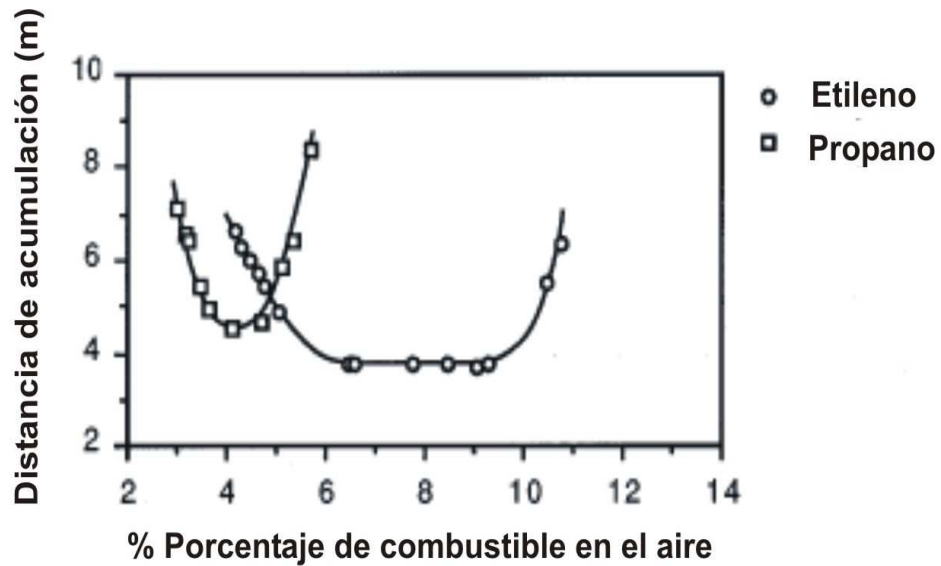


Figura 7.8. La distancia de acumulación para el etileno y el aire-propano. Tuberías de diámetro de 50 mm. (Steen y Schampel, 1983).

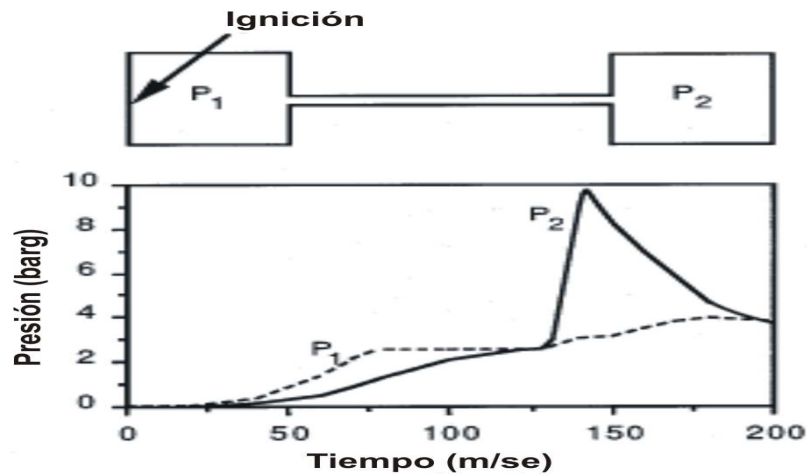


7.3 PRESIÓN ACUMULADA

En una unidad de proceso o un sistema subterráneo, nosotros encontraremos que los volúmenes grandes (es decir los tanques, los cuartos y el funcionamiento de la unidad) son interconectados por las tuberías y canales.

En caso de una explosión en un interior, pueden causar un aumento de presión muy fuerte si son interconectados. Este fenómeno es a menudo llamado precompresión ó presión acumulada. La presión acumulada es un efecto dinámico local que puede causar altas presiones de explosión locales.

Figura 7.9. Los experimentos de Presión Acumulada (Heinrich, 1988).



En la Figura 7.9 se ilustra una situación similar. Los volúmenes 1 y 2 son interconectados por una tubería. Heinrich (1988) realizó algunas pruebas del laboratorio con la geometría mostrada en la Figura 8.9. El volumen de los tanques era de 12 l y la tubería tenía 50 centímetros de largo. Cuando se enciende la nube en el Volumen 1, aumentará gradualmente la presión y fluirán algunos gases quemados del Volumen 1 dentro del Volumen 2.

Cuando entre la llama en el Volumen 2, el gas es pre-comprimado. La llama será un disparo a chorro de llama dentro del Volumen 2, un disparo a chorro de llama semejante, causará un aumento rápido de la presión.

Si regresa el alivio de la presión dentro del volumen 1 no es suficiente a través de la tubería, se volverá mucho más alta la presión en el Volumen 2 que en el Volumen 1, debido a que la presión se acumula y se forma un chorro de llama. En el experimento de Heinrich la máxima presión era un 30% más alta que esta precedida de las condiciones de volumen constante.

8. EXPLOSIONES DE GAS EN COMPARTIMIENTOS, EDIFICIOS Y MODULOS COSTA FUERA

Si dentro de un área parcialmente confinada se escapa accidentalmente el combustible ó si está flotando dentro de un área semejante, las consecuencias de dichas explosiones dependerán de varios parámetros, como por ejemplo, el tipo de combustible, la concentración de la nube de gas, el tamaño, la ignición y el diseño geométrico, es decir, la obstrucción de los objetos y el confinamiento. En consecuencia, se deben tener en cuenta todos estos factores. Las variaciones de estos parámetros pueden producir grandes cambios, en la máxima presión de la explosión.

Como se mencionó anteriormente, el confinamiento y la obstrucción de los objetos son factores claves para el desarrollo de las presiones en la explosión en accidentes. En los edificios, módulos costa fuera y áreas parcialmente confinadas que contienen equipo de proceso, habrá obstáculos y confinamiento. En paredes, techos, pisos y cubiertas, la nube de gas se confinará. Las tuberías y el equipo de proceso confinados por la nube durante una explosión actuará obstruyendo los objetos. Siguiendo pautas simples aunque modificando ó diseñando los compartimientos, se puede reducir el riesgo potencial de manera significativa.

8.1 EXPLOSIONES DE GAS Y VENTEO

De esta sección el objetivo es ilustrar cómo las condiciones geométricas como los obstáculos, el confinamiento, y el venteo, influyen en la presión de la explosión.

Las explosiones de gas son el resultado de la liberación de energía química debido a la propagación de la llama (es decir la combustión) a través de nubes premezcladas de aire-combustible. En una nube premezclada la llama se propagará de dos modos distintos; la deflagración y la detonación. Las velocidades de la llama en el rango de deflagraciones es de unos pocos m/s a 500 a 1000 m/s, produciéndose una sobrepresión hasta cerrarse a cero en varios bar (ver la Figura 3.5). La detonación es una onda de combustión supersónica que causa en el rango de 20 bar la presión de la explosión. Se discutirá en este capítulo, las explosiones de gas y la propagación de la llama.

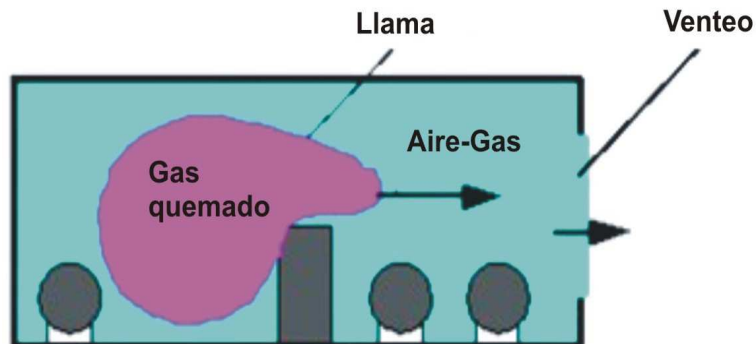
El aumento de la presión durante una explosión de gas es determinada por el equilibrio entre la generación de presión por la llama, y el alivio de la presión a través del venteo. En una situación de confinamiento ó en un compartimiento con áreas de venteo de explosión grandes, se requiere una velocidad de llama de más de 100 m/s para obtener perjudiciales ondas de presión.

Sin embargo, si se quema una nube de aire-combustible, y explota dentro de un compartimiento ó el área de venteo es muy pequeña, se quemará lentamente, incluso puede causar el aumento de la presión. En casos extremos, en un compartimiento, una llama lenta puede causar más de 8 bar, si el compartimiento no se desintegra.

Normalmente, en una explosión de gas accidental, la llama empezará como una llama laminar lenta con una velocidad del orden de unos pocos m/s. Si la nube inconfina es verdaderamente inobstruida (es decir que ningún equipo u otras estructuras son concentradas por la nube) no es probable que acelere la llama a velocidades de más de 20-25 m/s, y la sobrepresión será despreciable.

En un área con obstáculos y en parte confinada como lo mostrado en la Figura 8.1, la llama puede acelerar a varios cientos de metros por segundo. El mecanismo principal de aceleración de la llama bajo dichas condiciones, es una mezcla turbulenta debido a la generación de campos de flujo turbulentos delante de la llama.

Figura 8.1. Explosiones de gas en un área parcialmente confinada que contiene equipo de proceso



La Figura 8.1 muestra como un compartimento que es llenado con una nube premezclada de aire-combustible, y la nube se enciende en el centro del compartimento. Cuando la nube de aire-combustible consume la llama, el gas se extiende. Esta expansión puede llegar a ser de 8-9 veces más del volumen inicial. Debido a la expansión, el gas quemado es empujado delante de la llama, y se genera un flujo en el compartimento.

Algunos de los gases quemados en la fase temprana de la explosión serán empujados fuera del compartimento a través del venteo (es decir las partes abiertas del compartimento). Dentro del compartimento el gas fluirá alrededor del equipo de proceso, las tuberías etc. El equipo del proceso y las tuberías pueden obstruir el flujo y generarán turbulencia delante de la llama.

En la Figura 8.1 empieza la explosión en el centro de un compartimiento. Desde entonces, es localizada el área de venteo en el lado derecho del compartimiento, la dirección dominante de la propagación de la llama y el flujo debido a los efectos de obstrucción del equipo de proceso será turbulenta y esta turbulencia apoyará la aceleración de la llama. Es relativa la localización del punto de ignición al venteo, ya que es un factor importante para el campo de flujo ó la aceleración turbulenta de la llama se desarrollan durante una explosión de gas.

Una consecuencia de esta posición, es que es relativa la localización del punto de ignición al lugar del punto del venteo, también es muy importante para la efectividad del venteo. Cuando alcanza a llegar la llama al frente abriendo el venteo, empezarán los productos de la combustión a fluir fuera del venteo.

Desde que los productos calientes de la combustión tengan una velocidad mucho más alta que la del sonido (~900 m/s) que la mezcla de aire-combustible quemado (~340 m/s), aumentará la velocidad de flujo a través del venteo cuando empiecen a salir los productos calientes de la combustión. En experimentos y simulaciones se ha visto a menudo que la presión empieza a caer después de que los productos de combustión han alcanzado un área mayor de venteo.

En adición al venteo aumentado, el venteo de los productos calientes de combustión influirá también en la aceleración de la llama y la generación de turbulencia. Si los productos calientes de combustión son venteados fuera de un compartimiento, será aliviado el manejo de la presión y puede reducirse delante de la llama, y sería empujado menos gas.

El venteo de los productos de combustión, como una manera de minimizar el mecanismo positivo de retroalimentación, que causa la aceleración de la llama, se ilustra en las Figuras 3.7 y 3.9. Sin embargo, en algunos casos encontramos que la presión continuará subiendo, aun si son venteados los productos de combustión. Para los compartimientos con áreas de venteo pequeñas, alta densidad del equipo de proceso, tuberías etc. Esto es típico, cuando las explosiones de gas explosión alcancen altas presiones antes que empiecen a salir los productos de la combustión. Por muy alta velocidad de las deflagraciones, no pueden ser del todo efectivas.

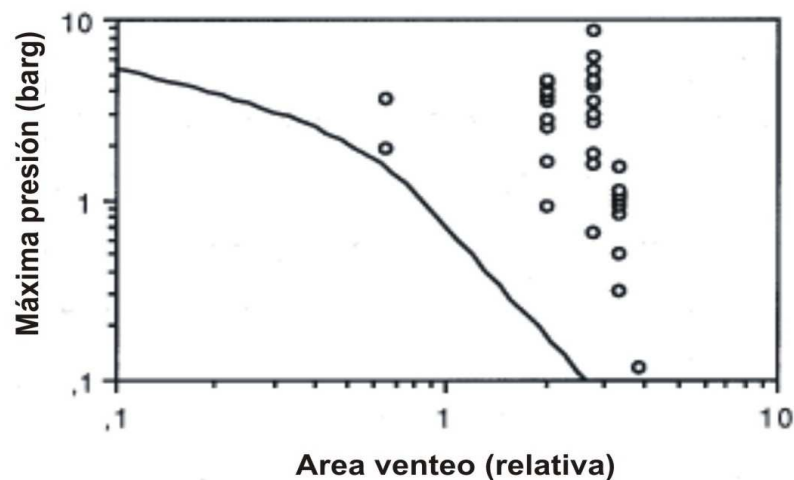
Muchos estudios han apuntado a identificar que el área de venteo es necesaria para aliviar la sobrepresión para un volumen confinado. Desafortunadamente, entre las predicciones de los modelos simples y los resultados experimentales hay una extensa diferencia. Harrison y Eyre (1987), afirman que los modelos no pueden dar cuenta propiamente de:

- la turbulencia dentro del confinamiento.
- la resonancia acústica dentro del confinamiento, y
- la combustión de gas fuera del confinamiento.

En la Figura 8.2 se muestra una comparación entre la sobrepresión máxima de los experimentos CMR (Moen, 1982) y el normalmente usado por Bradley y Mitcheson que recomendaban la seguridad del área de venteo (Bradley y Mitcheson, 1978). Los experimentos de CMR se realizaron en una vasija de un diámetro de 50 m3 (un tubo de 2.5m y 10m, de longitud que abre en un extremo

con obstáculos espaciados regularmente en forma de platos del orificio. La mezcla de gas era aire-metano

Figura 8.2. La sobrepresión máxima observada en un tubo de 50 m³, Moen, (1982), comparado con la presión superior límite (la curva sólida), basada en las áreas de venteo para la ignición central en las vasijas casi esféricas como lo propuesto por Bradley y Mitcheson (1978).



La variación en los resultados experimentales para un área de venteo constante corresponde a las diferentes geometrías internas del tubo. Pueden encontrarse mas detalles de estos experimentos, se muestran los resultados experimentales, que son inadecuados modelos simples para tales condiciones.

Esto esta aún más lejano de lo confirmado en el reporte de revisión de Gas británico por el Departamento de Energía (1989). *“Revisión de la Aplicabilidad de Métodos de Predicción para las Explosiones de Gas en Módulos costa fuera.”* Una explosión de gas en un compartimiento es un proceso fuertemente complejo que depende de varios parámetros. En las siguientes secciones discutiremos por separado estos parámetros.

8.2 FORMAS DE COMPARTIMIENTO

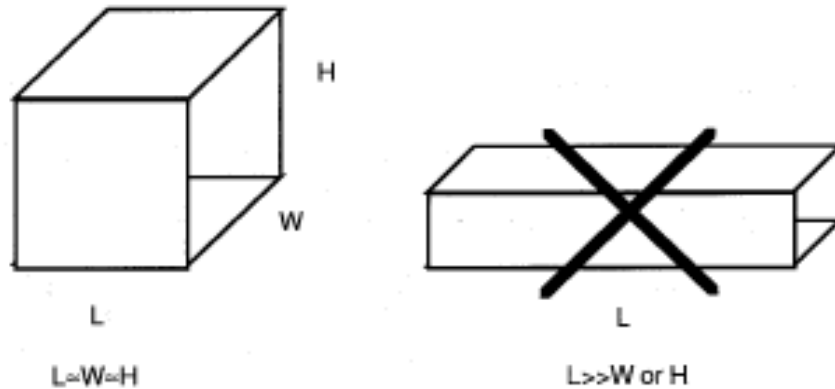
En esta sección, El objetivo es el de discutir la influencia de la forma del compartimiento en la aceleración de la llama y el aumento de la presión, y para señalar cual es la forma óptima del compartimiento para guardar la presión de la explosión tan baja como sea posible. La situación del área de venteo y la forma del compartimiento estrechamente se unen y por consiguiente, dependerá de nosotros.

Aquí hay principalmente tres principios para aplicar cuando la forma de un compartimiento es óptima:

- La llama debe poder propagarse en un modo esférico lo mas grande que le sea posible desde el punto de ignición (Ver la Figura 5.5).
- En cualquier parte del compartimiento un punto de ignición debe cerrarse como sea posible, en las áreas de mayor venteo, de esta manera pueden ventearse fuera los productos calientes de la combustión en una fase temprana de la explosión.
- Evitar una fuerte turbulencia en el gas quemado delante de la llama y las distancias largas de la llama.

En la Figura 8.3 se muestra como para un compartimiento con un venteo de explosión sobre dos paredes finales, la forma ideal es una caja cúbica. En una configuración semejante, puede esperarse una presión de explosión relativamente baja.

Figura 8.3. Para un volumen cúbico, el mejor venteo de explosión en el caso de las áreas de venteo, será sobre dos paredes finales.



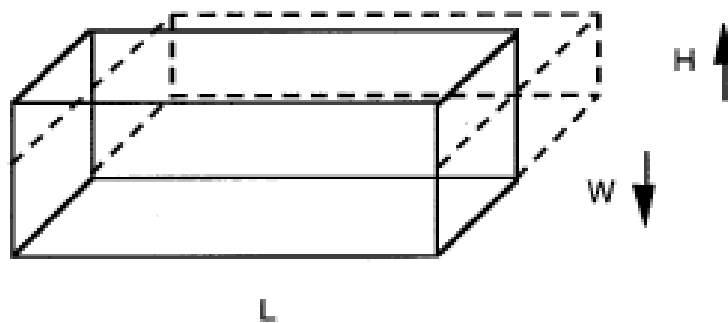
Si es largo el módulo y sólo se localizan las áreas de venteo abiertas en los dos extremos, se darán altas presiones en más escenarios de la explosión. La situación es en principio igual en un canal, cómo en un módulo largo. La llama viajará sobre una distancia larga y las condiciones, es decir un venteo limitado, apoyarán la aceleración de la llama. Se propagará la llama en un modo de propagación planar (la propagación unidimensional), en la parte principal del módulo.

Para el módulo cúbico, la llama se propagará en un modo esférico. Un modo de propagación esférico requiere de una velocidad más alta de la llama que un modo planar para generar la misma presión de explosión. La onda se extenderá de la presión más "libremente" en el modo esférico (la propagación tridimensional).

Si en uno de los lados de la pared, el compartimiento solo tiene un área de venteo abierta, es aún más importante evitar una forma alargada. En caso de la ignición de una pared con un extremo cerrado, la llama se acelerará sobre una distancia larga y el venteo no tendrá un efecto beneficioso desde que se guíe solo para hacer fluir los obstáculos pasados y por consiguiente, la generación de la

turbulencia. Como lo ilustrado en la Figura 8.4, en este trabajo hemos visto que, es muy importante a menudo la altura del compartimiento. Aumentando la altura del módulo, la presión de explosión puede ser reducida en algunos casos.

Figura 8.4. La altura del módulo puede ser importante.



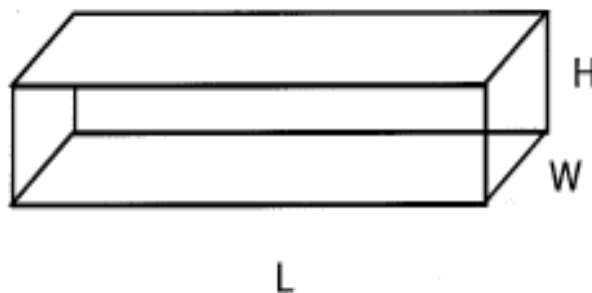
Sin embargo, la ventaja de aumentar la altura de un compartimiento o el lado más pequeño del compartimiento, dependerá sobre cómo sea llenado densamente el compartimiento, con obstrucción de los objetos (es decir las tuberías y el equipo de proceso). En los compartimientos con una parte de objetos obstruyendo, puede haber o no, una pequeña ventaja en el aumento de la altura.

En dichas situaciones, la obstrucción de objetos está controlando la propagación de la llama y es menos importante la forma del compartimiento. En los compartimientos con objetos obstruidos y una baja densidad, puede ser beneficioso reemplazar las cubiertas sólidas, por cubiertas enrejadas y por consiguiente se crea una forma de confinamiento cúbico. La misma situación puede ser vista en relación a la dispersión de gas y riesgos de fuego.

Para un compartimiento alargado es necesario abrir por lo menos uno de los lados largos para ventear, si nosotros queremos tener un área de venteo cerrada, el punto de ignición debe ser escogido fortuitamente. En un edificio puede existir la posibilidad de ventear a través del techo.

La aceleración de la llama apuntaba fuera del cierre de ignición a un área de venteo, que causará en la fase temprana de la explosión el venteo de los productos calientes de la combustión. Ésta es una manera efectiva de minimizar la aceleración de la llama y las altas presiones de explosión. Este efecto puede ser utilizado para ventear tres paredes a través del módulo como se muestra en la Figura 8.5.

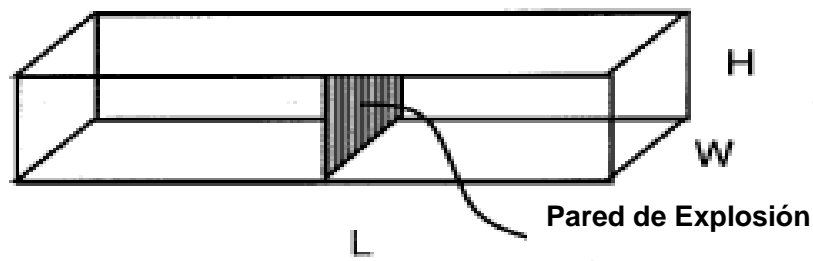
Figura 8.5. Módulo alargado con venteo de explosión en tres lados.



En algunos experimentos y simulaciones del software, se observa que un factor de reducción de 10 en la presión de explosión, abrirá en un módulo una de las paredes largas. Deben ser consideradas como posibles áreas de venteo, El techo, la cubierta ó una pared. Desgraciadamente, se han visto también ejemplos de llamas que se han podido acelerar y causar altas presiones de explosión, venteando igualmente en los tres lados.

Éstos son casos dónde hay muchos objetos obstruidos y el compartimiento es grande. En estos casos, una manera de mitigar las consecuencias de las explosiones de gas puede ser introducir una pared sólida de explosión en la parte central del compartimiento como se muestra en la Figura 8.6.

Figura 8.6. Módulo alargado con tres lados de venteo y una pared sólida en la parte central del compartimiento.



La pared sólida prohibirá un fuerte flujo turbulento delante de la llama y guiará fuera del compartimiento el flujo. La longitud de viaje de la llama será reducida. La desventaja de introducir una pared sólida es la reducción de la ventilación natural. El aumento de grandes nubes de gas homogéneas es más probable por consiguiente, con una pared sólida. Este concepto será investigado más adelante.

8.3 TIPOS DE ÁREAS DE VENDEO

Se quiere decir que, durante una explosión de gas, con áreas de venteo abiertas, el gas puede ser relevado del compartimiento (el alivio de presión). Los factores importantes para un venteo efectivo son:

- El tamaño del área de venteo.
- Cómo está distribuida el área de venteo
- La dirección del alivio de la explosión.
- Para los tableros de alivio de la explosión: ¿cómo se activan ellos rápidamente?

Hacer las pautas para el tamaño del área de venteo es muy simple. El área de venteo debe ser tan grande como sea posible.

Algunos resultados experimentales de CMR de los 10 m, se presenta la vasija en forma de cuña larga. Para distribuir en la parte superior del plato el área de venteo (es decir delante del lado largo de la pared) la presión de explosión era baja, y donde abría la parte superior del plato que era del 50% y del 80%. Sin embargo, la presión de la explosión aumentó de unos mbar a más de 1 bar donde se localizó la misma área de venteo en el extremo lejano de la vasija con respecto al punto de ignición.

Las consecuencias de una explosión de gas son fuertemente enlazadas al tamaño y la distribución del área de venteo. Cuando aún normalmente no se sabe donde localizar el punto de ignición, la recomendación para localizar las áreas de venteo, es distribuir las áreas de venteo alrededor de los lados de la pared del compartimiento. Es importante que las áreas de venteo quíen fuera de los obstáculos el flujo delante de la llama.

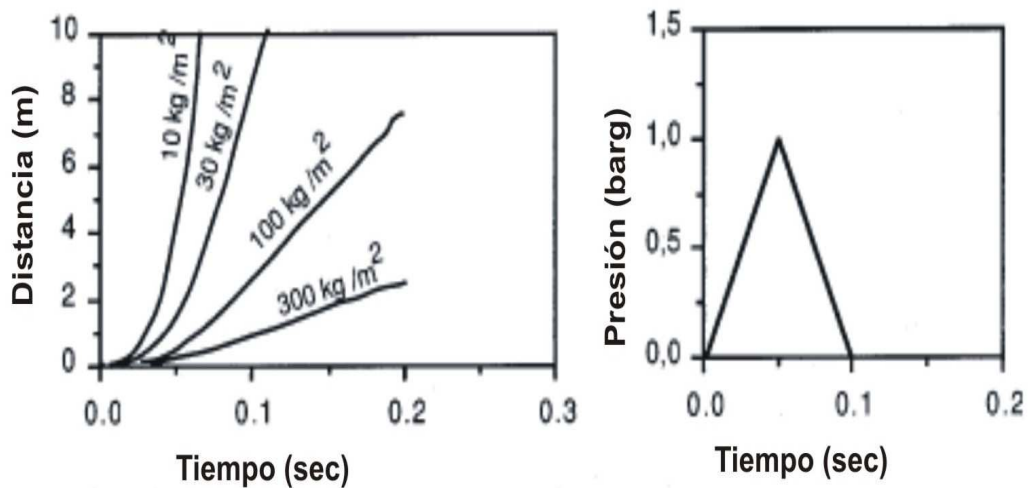
Como principio general, el venteo de las explosiones de gas debe dirigirse con un mínimo de obstrucciones dentro de las áreas abiertas. Si se está venteando en un área congestionada ó en otro compartimiento, pueden empujarse las nubes de gas

combustible dentro de esta área y así ocurrir una explosión violenta del multi-compartimiento.

No es práctico en muchas situaciones tener las paredes abiertas. Las condiciones del tiempo, la reducción del ruido, y la protección del fuego, pueden requerir de paredes cerradas ó en parte cerradas. Si esas paredes inicialmente son cerradas, actuarán durante una explosión como áreas de venteo, ellas deben ser más livianas y deben ser diseñadas para abrirse rápidamente.

La Figura 8.7 muestra el desplazamiento contra la distancia para los elementos de la pared de 10 kg/m^2 a 300 kg/m^2 cuando están sujetas a un pulso triangular de presión con una duración de 100 m/sec y una presión máxima de 1 barg.

Figura 8.7. La distancia del desplazamiento para los elementos de una pared sujeta a un pulso triangular de 1 barg, una presión máxima y una duración de 100 m/sec.



Las paredes de 100 kg/m^2 y de 300 kg/m^2 se moverán a distancias muy cortas dentro de la duración del pulso de presión. En este rango de peso las paredes no

actuarán eficazmente como los tableros de venteo. Ellos empiezan a moverse después de la explosión y su única contribución será actuar como proyectiles peligrosos.

El tablero de 10 kg/m² se mueve rápidamente. Los tableros de este peso ó más ligeros, los tableros serán normalmente efectivos si se construye cuidadosamente el mecanismo de apertura. Nuestra experiencia es que los tableros de 30 - 50 kg/m² son demasiado pesados para tener un efecto significativo en la máxima presión. Pero, algunas reducciones pueden esperarse, en la duración de la presión de explosión. Las áreas de venteo que fueron inicialmente cerradas no deben ser más pesadas que 10 kg/m², para ser efectivas preferentemente más ligeras.

En la última parte de esta sección, se discutirán los diferentes tipos de venteo de la explosión usados comúnmente. Ellos pueden listarse de la siguiente forma:

- las paredes abiertas,
- las paredes de persiana,
- la pared sólida / cubierta,
- las paredes de alivio (llamadas también paredes de viento) abiertas durante una explosión.
- las ventanas de vidrio.

Desde un punto de vista, normalmente la pared abierta es la mejor solución de la explosión. Si una gran parte del módulo está abierto será buena la ventilación natural y será probablemente menor la formación de la nube explosiva. Si debe

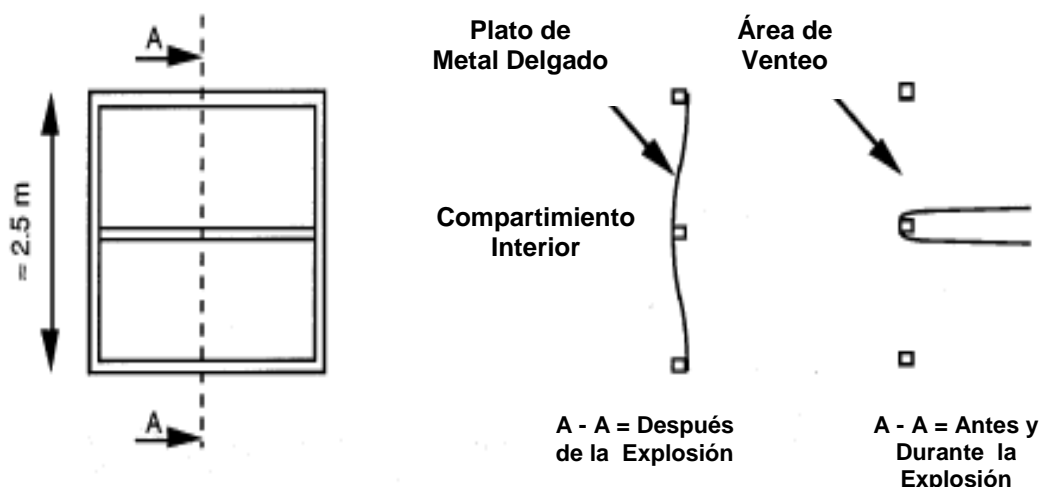
ocurrir una explosión, se aliviará la presión de la explosión de la pared abierta como bien sea posible.

Sin embargo, debido a las condiciones del tiempo, la protección del fuego y de reducción de ruido, las paredes totalmente abiertas son a menudo imprácticas e inaceptables. Una pared de persiana actuará también como un área de venteo, pero la efectividad de las áreas de venteo será sobre la mitad que lo que abre la pared. Para aplicaciones costa fuera, las paredes de persiana pesan típicamente de 40-50 kg/m².

Aunque estas paredes pueden diseñarse para abrirse durante una explosión, es decir, que escapa el alivio a la sobrepresión, ellas normalmente no se abrirán rápido para mejorar el venteo. Bjørkhaug (1988) probó experimentalmente el comportamiento de los tableros de persiana. Las simulaciones de explosiones del software en módulos costa fuera son aproximadamente de 10,000 m³ con las persianas en los tres lados, indicando que el venteo de la pared de persiana no reduce la máxima presión, pero puede reducir la duración de la presión positiva de la fase.

Una pared de alivio, llamada también pared de viento, es una combinación alternativa de los requisitos para trabajar en un medio ambiente aceptable y la seguridad de la explosión de gas. Una pared de alivio es principalmente un marco con un plato de metal delgado cubriendo la estructura. Si debe ocurrir una explosión, se romperá el plato de metal suelto en el borde y se caerá. El principio de una pared de alivio se muestra en la Figura 8.8. Este tablero se abre como a 50 mbar de sobrepresión y es completamente abierto después de 40 m/sec aproximadamente.

Figura 8.8. Tipo de tablero de alivio Stord Industrier AS



Los parámetros críticos para seleccionar las paredes de alivio deben ser:

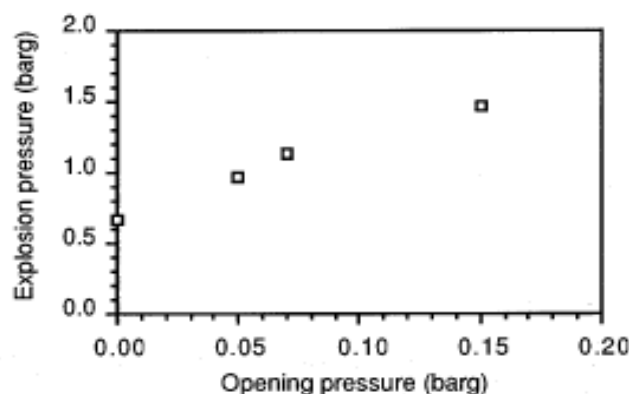
- Debe ser garantizada y aceptable la ventilación natural.
- El mecanismo abierto debe permitir la descarga rápida.
- El peso del tablero debe ser bajo (kg/m^2).
- Deben evitarse los fragmentos peligrosos (los proyectiles)

Debe limitarse el uso de las paredes de alivio (paredes de viento), para que sea obtenida la ventilación natural bajo un funcionamiento normal. Incluso sin la ventilación natural una pequeña gotera de gas pequeña puede aumentarse a una peligrosa nube de gas (a menos que se obtenga ventilación forzada).

Durante una explosión, una pared de alivio debe abrir lo más pronto posible, pero no abrir debido al viento. Nuestra experiencia es que el plan del mecanismo de venteo no es sincero. La comprobación experimental con las cargas dinámicas (es decir pruebas de explosión) parece ser requerido. La comprobación estática del mecanismo de apertura no puede producir la información pertinente.

Un tablero que tiene una presión estática abierta de 50 mbar, no puede abrir antes la presión, que alcanza de 100-200 mbar, si la carga es una carga dinámica de una explosión de gas. La Figura 8.9 muestra algunos resultados de las simulaciones del software en un módulo costa fuera, con paredes de alivio en tres lados. Las simulaciones se realizaron abriendo las paredes de alivio con las presiones. En esta geometría, la presión de la explosión aumenta con un factor de dos, cuando la pared de alivio que abre la presión va desde cero (es decir la pared abierta) a 150 mbar. Para otras geometrías los resultados variarían.

Figura 8.9. Simulación de software de la presión de explosión contra la presión de apertura de las paredes de alivio.



El peso del tablero (kg/m^2) indicará cómo el tablero se moverá rápidamente después de que se ha empezado a abrir. Uno debe seleccionar las paredes de alivio con tableros de peso bajo. Las paredes de alivio con un peso de 5-10 kg/m^2 hoy están comercialmente disponibles.

Cuando los paneles se estallan por una explosión, ellos deben ser diseñados para que no se generen fragmentos peligrosos. Los fragmentos volátiles o incluso el disparo a chorro de la llama pueden causar daño a las tuberías ó equipo y herir al personal.

En los medios existentes, como las viejas plantas del proceso, los edificios etc. nosotros podemos encontrar áreas de ventana grandes que se pensaron, o actuarán durante una explosión como áreas de venteo. Las ventanas de vidrio se romperán cuando sean expuestas a presiones de explosión de 20-70 mbar (Harris 1983).

Pero donde las ventanas de vidrio se rompen, los fragmentos peligrosos generados, son un problema muy serio. Los accidentes, como en Flixborough en 1.974 y en Pernis en 1.968 muestran que, los fragmentos de las ventanas pueden causar lesiones serias y un gran número de daños (Lees, 1980). No es recomendado tener ventanas de vidrio ordinarias en áreas dónde pueden ocurrir explosiones de gas. Por consiguiente, emplear la información dada para determinar cómo reemplazar las ventanas pensadas para el alivio de la explosión con las paredes de alivio más apropiadas.

8.4 EL EFECTO DE CONGESTIÓN Y OBSTRUCCIONES

Un compartimiento contendrá equipo de proceso, tuberías, cuartos etc. Durante una explosión de gas estos objetos obstruirán el flujo y por consiguiente causarán la turbulencia.

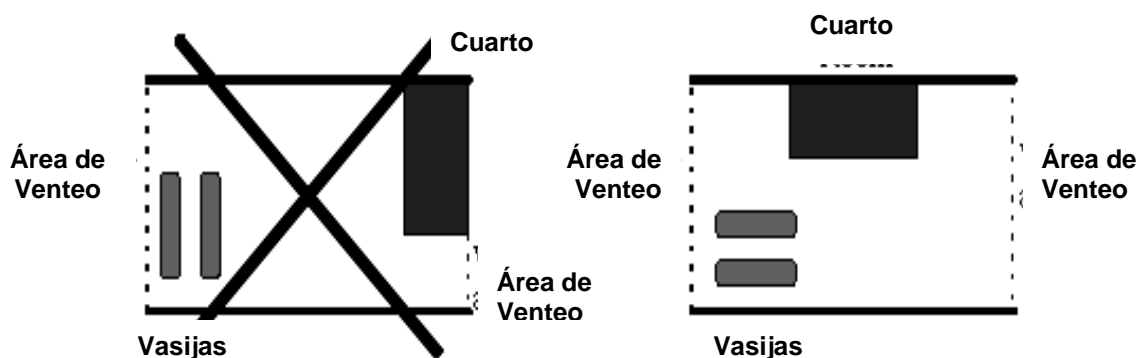
Estos objetos también interferirán con el venteo de la explosión. La turbulencia y el venteo son muy importantes para la aceleración de la llama y el aumento de presión en las explosiones de gas.

En este capítulo se discutirá cómo arreglar los objetos obstruidos en orden para guardar en un mínimo, la presión de la explosión. El principio central es colocar los objetos obstruidos de manera que:

- Se genere un mínimo de turbulencia y
- Que el venteo de la explosión no sea bloqueado.

La Figura 8.10 muestra la vista de la cubierta de dos arreglos del diseño diferentes en un compartimiento. El compartimiento tiene venteo en las dos paredes del extremo. Los objetos obstruidos consisten en dos vasijas y un cuarto.

Figura 8.10. Vista superior de dos compartimientos. En el diseño del lado izquierdo, el cuarto está bloqueando el área de venteo y las vasijas están generando la turbulencia actuando como obstáculos repetidos. El lado derecho muestra un diseño mejorado.



En el primer diseño, el cuarto está bloqueando las partes principales del área de venteo sobre el lado derecho y las vasijas en la parte izquierda del compartimiento causarán respectivamente la reducción del venteo y la aceleración de la llama.

Es discutido el efecto de obstáculos repetidos, las vasijas colocadas en el lado izquierdo en la Figura 8.10 actuarán como los obstáculos repetidos para una explosión centralmente encendida. En una turbulencia se generará la explosión siguiendo a los obstáculos. En la estela turbulenta, la llama quemará muy rápido y se activará el mecanismo de retroacción positiva para la aceleración de la llama. El resultado puede ser la alta presión de la explosión.

La aceleración de la llama debido a la turbulencia dependerá del arreglo del equipo y sobre el nivel de la turbulencia en el campo de flujo. Es muy importante colocar el equipo de tal manera que se genere un mínimo de turbulencia durante una explosión.

Esto normalmente se obtiene cuando el lado más largo / la dimensión del equipo es paralela con la dirección de flujo durante una explosión, es decir apuntando en dirección del área de la abertura. En la Figura 8.10, el lado derecho muestra los vasos apuntando en la dirección del área de la abertura. Éste es un arreglo más apropiado que el diseño del lado izquierdo.

El diseño de diferentes tipos de equipo no debe verse aisladamente. Se puede encontrar situaciones dónde relocalizando la mayoría del equipo, se agregará a las tuberías, por lo tanto, la presión puede subir a un nivel más alto con el nuevo diseño del equipo, aunque la situación para el equipo mayor parece ser mejorada. Es importante evitar la sub-optimización.

En la Figura 8.10 el cuarto bloquea el área del venteo en el lado derecho. En este caso, una mejor solución sería girar el cuarto 90° y si es posible moverse a la parte central del compartimiento.

9. EXPLOSIONES DE GAS EN ÁREAS DE PROCESO Y ÁREAS INCONFINADAS

En Flixborough en 1974, se presentó una fuga de 60 toneladas de ciclohexano dentro de la planta de proceso. Se formó una nube grande, densa, e inflamable y cuando esta nube explotó, la planta fue totalmente destruida. La onda destructiva de la explosión fue equivalente a 15 toneladas de TNT. En este accidente murieron 29 personas. En el evento de Puerto Hudson, se fugó propano desde una tubería subterránea. La descarga llenó un valle con la mezcla de aire-propano.

La explosión empezó como una explosión interna en una casa-bombas y esto activó las nubes inconfiadas para detonar. Estos dos casos son ejemplos de grandes explosiones de gas en las áreas de proceso y en situaciones inconfiadas. Otros accidentes pueden ser causados, por descargas mucho más pequeñas de gas combustible, como el incidente de Sarnia. En Sarnia (Londres, 1984) se fugaron de 10 a 20 kg de hidrógeno. La nube detonó y dos personas murieron.

Los objetivos de este capítulo son:

- Describir el comportamiento típico para explosiones de gas en las áreas de proceso y áreas inconfiadas y qué factores determinan la presión de explosión.
- Describir en que áreas una explosión de gas causará alta presión y cómo evitar esta situación.

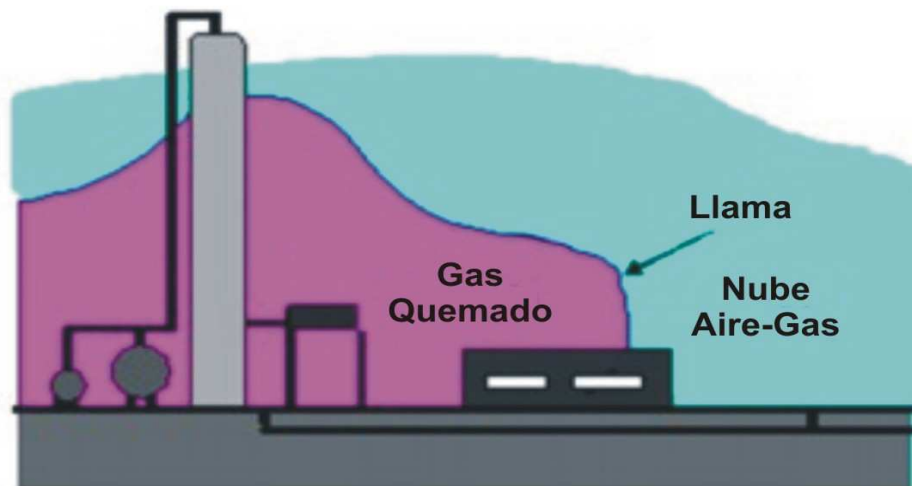
- Describir cómo estimar bajo estas condiciones la presión de explosión.

9.1 CONFINAMIENTO

La Figura 9.1 muestra una ilustración de una explosión en una planta de proceso dónde la llama se propaga a través de una nube de aire-combustible. Si la explosión es una deflagración, se generarán altas presiones de explosión cuando la nube de gas esté confinada dentro ó en áreas parcialmente confinadas, ó, bloqueada por obstáculos, como las tuberías y el equipo de proceso.

En las áreas de una planta de proceso, se pueden generar altas presiones por una deflagración, principalmente dentro de edificios, y arreglos de tuberías. En un área de proceso abierta, la tubería y el equipo del proceso son densamente llenados, en túneles y alcantarillas. Sin embargo, si la nube detona como resultado de una fuerte aceleración de la llama, la detonación se propagará a través de la nube sin ningún confinamiento u obstrucción de los objetos.

Figura 9.1. Ilustración de una planta de proceso. Una deflagración se causará solo por la alta presión de la explosión, en áreas confinadas o en áreas llenas equipos de proceso.



9.2 COMBUSTIBLE

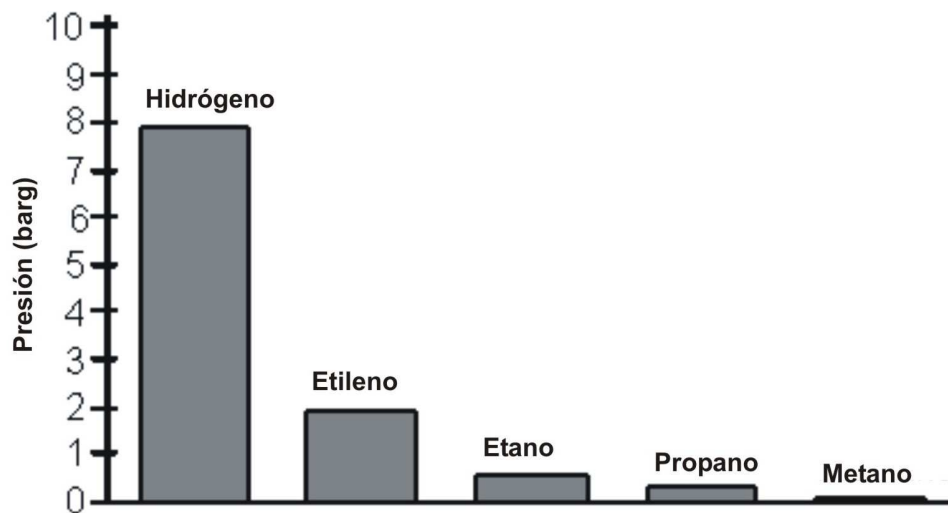
Cuando se escapa accidentalmente un combustible, la densidad es un parámetro importante para la formación de una nube de combustible. Cuando el gas es más liviano que el aire, como el hidrógeno, la flotación hará subir la nube. En una situación abierta, subirá el gas y se dispersará relativamente rápido.

Un gas denso flotará a lo largo de la tierra, y no se dispersará tan rápido como un gas liviano. El gas denso puede flotar en edificios, túneles, alcantarillas u otras áreas confinadas. Una descarga de un gas denso tiene un potencial más alto de formar nubes más grandes de aire-combustible, que una descarga de un gas liviano.

En este capítulo se discute la aceleración de la llama y la detonación de los diferentes tipos de combustibles. Por otra parte, en condiciones iguales, los diferentes combustibles mezclados con el aire, generarán diferentes presiones de explosión. La Figura 9.2 muestra algunos resultados experimentales con diferentes mezclas aire-combustible en un aparato específico.

Aunque en otras situaciones, la presión será diferente, el rango relativo del combustible, como se muestra en la Figura 9.2, parece constituir una tendencia general. En una situación accidental, nosotros podemos esperar, que el hidrógeno y el etileno den una presión de explosión más alta que combustibles como el propano y el metano para el mismo tamaño de nube de gas y con condiciones similares también.

Figura 9.2. Comparación de la presión de explosión para varias mezclas estequiométricas de aire-combustible en una vasija en forma de cuña de 10 m (Bjørkhaug, 1988).



El hidrógeno es un combustible que es más liviano que el aire, se dispersa relativamente rápido, y causa altas presiones de explosión. Si nosotros revisamos

la experiencia con el hidrógeno, encontramos que son muy limitados los tamaños de las explosiones.

Las explosiones mas grandes de hidrógeno son típicamente equivalentes a unos cientos de kg de TNT, que es significativamente menor, que los accidentes como el de Flixborough, que fue equivalente a 15 toneladas de TNT. Aunque el tamaño de la explosión de hidrógeno es limitado, el daño local en el área dónde tuvo lugar la explosión es muy severo.

El hidrógeno es muy reactivo y puede acelerar muy rápido una deflagración y facilitar el tránsito en una detonación. Se han informado varios accidentes donde probablemente habrán detonado las nubes de hidrógeno. Sarnia definitivamente fue una detonación de una nube de hidrógeno no confinada.

Nosotros discutiremos en esta sección, el tipo de combustible como un parámetro importante, caracterizando las consecuencias de una explosión de gas.

9.3 LLAMARADA

El término "*llamarada*" se usa a menudo para una deflagración que produce una sobrepresión despreciable.

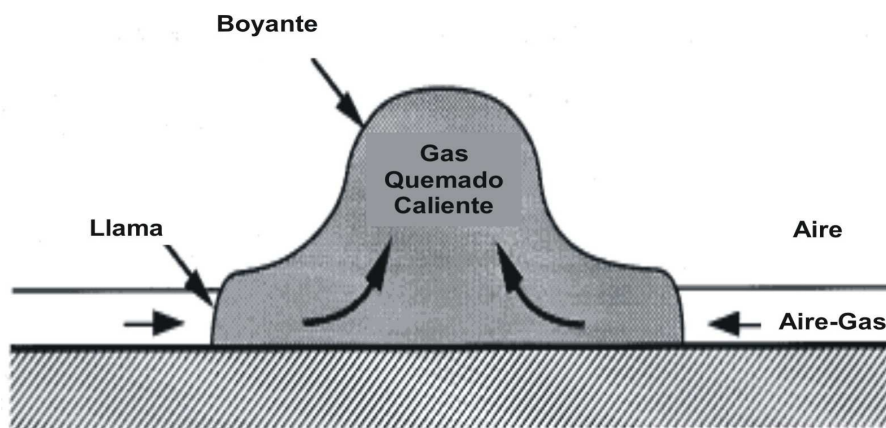
Varias escalas de grandes pruebas (Lind y Whitson, 1977; Hirst y Eyre, 1983; Zeeuwen, 1983; Harrison y Eyre, 1987) han demostrado que el inconfiamiento de una nube de gas inobstruida, encendida por una fuente de ignición débil sólo producirá pequeñas sobrepresiones mientras se está quemando. No hay ningún mecanismo que pueda acelerar la llama (es decir una deflagración) bajo estas condiciones más que unos pocas decenas de metros por segundo. La combustión es tan lenta que el gas quemado se extenderá antes de que pueda aumentar

cualquier presión significativa. El efecto térmico es realmente el riesgo principal de una nube inconfiada deflagrándose

Sin embargo, si la misma nube se detona libre, debido a la transición a la detonación en un área confinada, el resultado será una muy fuerte onda de explosión.

Cuando se quema una nube de aire-combustible, los productos calientes de la combustión subirán debido a la flotabilidad. Para una nube grande puede ser muy fuerte esta flotabilidad y puede invertirse incluso el flujo delante de la llama, como se muestra en la Figura 9.3. En el accidente en Ufa en 1.988, donde el choque de un tren con una tubería de LPG encendió una gran nube de gas, la fuerza del viento causada por la flotabilidad era tan fuerte que los árboles se inclinaron. (Borisov, 1989.) Este evento de Ufa en que la nube era sumamente grande es un caso extremo.

Figura 9.3. La flotación puede generar un viento fuerte.



9.4 EDIFICIOS Y OTRAS ÁREAS EN PARTE CONFINADAS

En capítulos anteriores se discutieron las explosiones de gas en los compartimientos y módulos costa afuera. En una planta de proceso se formó el gas combustible como resultado de una gotera dentro del edificio ó de un gas desplazado dentro del mismo.

Las consecuencias de una explosión de gas dentro de un edificio dependerán principalmente de la concentración de la nube de gas, del tamaño y el tipo de combustible; la ignición y el diseño geométrico, es decir, de la obstrucción de objetos, el venteo y el confinamiento.

En un edificio con un venteo de pequeño, la explosión se confinará en el edificio y se generarán altas presiones de explosión. Son muy importantes las aperturas del venteo para controlar la presión de la explosión.

En el período de 1965-1975 había un número grande de explosiones de gas en edificios, (Kletz, 1987). Para este gran número de explosiones una razón era el diseño de los edificios. Debido a las condiciones del tiempo, como al ruido, los edificios son cerrados.

En un edificio cerrado una descarga de unos pocos kilogramos de combustible puede causar una seria explosión. Incluso, fácilmente puede generarse una nube de gas inflamable con ventilación forzada. Refiriéndonos de nuevo a Trevor Kletz (1987) cabe mencionar: "El mejor edificio no tiene paredes."

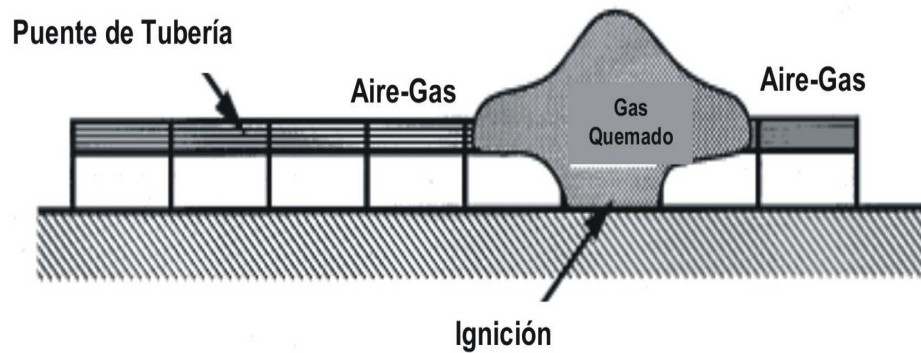
9.5 ARREGLOS DE TUBERÍA

En una planta de proceso un arreglo de tubería puede congestionarse, apoyar la aceleración de la llama y por consiguiente, causar altas presiones de explosión. La Figura 9.4 ilustra a través de un arreglo de tubería la propagación de la llama (Bjerketvedt y Nornes, 1989). En la simulación del software, la nube de aire-combustible se encendió al nivel del piso.

Por consiguiente, la llama se propagó en un modo esférico hasta que alcanzó el arreglo de la tubería. El flujo delante de la llama era turbulento en el arreglo de la tubería, y por consiguiente, la llama se estaba acelerando. En la Figura 9.4, se puede ver que la llama se ha propagado a una distancia más larga y a una velocidad más alta en el arreglo de la tubería que a nivel del piso. En la simulación numérica, fue predicha la presión de la explosión aproximadamente de 200 mbar. Este valor era de seguro válido para esta geometría particular.

En los experimentos de Gas británico, en una escala de 1:5 la geometría de los arreglos de tubería con aire-propano, se observó que donde la fuente de la ignición era un fuerte disparo a chorro de la llama, la transición es igual para la detonación

Figura 9.4. Explosión de gas en un arreglo de tubería.



9.6 ÁREAS DE PROCESO ABIERTAS

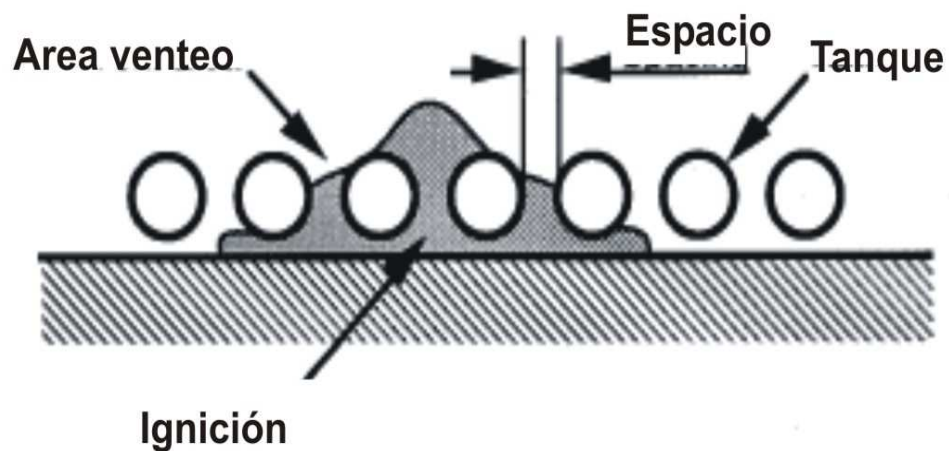
Una planta de área de proceso abierta puede también congestionarse bastante, .la tubería, el equipo de proceso, los tanques etc. Contribuirán a la generación de turbulencia durante una explosión. Los resultados experimentales muestran que en un área muy obstruida, una explosión de gas esférica, la llama sólo necesita de unos pocos metros de viaje antes de que la presión de explosión alcance niveles que pueden causar daños severos.

Para evitar que la sobrepresión sea perjudicial es muy importante guardar a un mínimo la congestión y no hacer que las áreas grandes también sean congestionadas. Se debe anotar que un estado de obstrucción extensivo también puede actuar como un confinamiento

No deben localizarse tan cerca del personal, los tanques y vasijas de proceso. La Figura 9.5 muestra una fila de tanques. Durante una explosión de gas, la llama se propagará bajo los tanques y actuarán los tanques como los obstáculos repetidos y la llama se acelerará.

En este caso, es el área de venteo, dependiente principalmente sobre el espacio entre los tanques y su longitud. El espaciamiento más largo, y más apropiado es el venteo. Para evitar la fuerte aceleración de la llama, es muy importante asegurar satisfactoriamente que exista espaciamiento entre equipos. Van Wingerden y Zeeuwen (1986) han realizado pruebas en las geometrías pertinentes, los resultados apoyan esta declaración. El óptimo espaciamiento del equipo es el escenario dependiente que puede estimarse para realizar las simulaciones de una explosión de gas con el software.

Figura 9.5. Vista Lateral de una fila de tanques.



9.7 TÚNELES Y ALCANTARILLAS

En una descarga accidental en un área de proceso ó en un área abierta, las nubes de gas denso tienen tendencia de fluir en sistemas subterráneos como en las cloacas, las alcantarillas, los túneles etc. Si una nube de gas entra en dichas áreas y se enciende, la explosión será una explosión interna.

Otro evento (o fenómeno) que causará altas presiones de explosión y la transición para la detonación posiblemente (Moen. 1989) es la ignición del disparo a chorro de la llama. La Figura 9.1, muestra un ejemplo de la ignición del disparo de llama de una nube inconfiada, en un sistema de cloacas, debido a una explosión confinada. Un disparo a chorro de llama semejante, que se dispara fuera de una región confinada, es una fuerte fuente de ignición que podrá causar explosiones de alta presión.

9.8 EXPLOSIONES MÚLTIPLES Y ONDAS DE EXPLOSIÓN

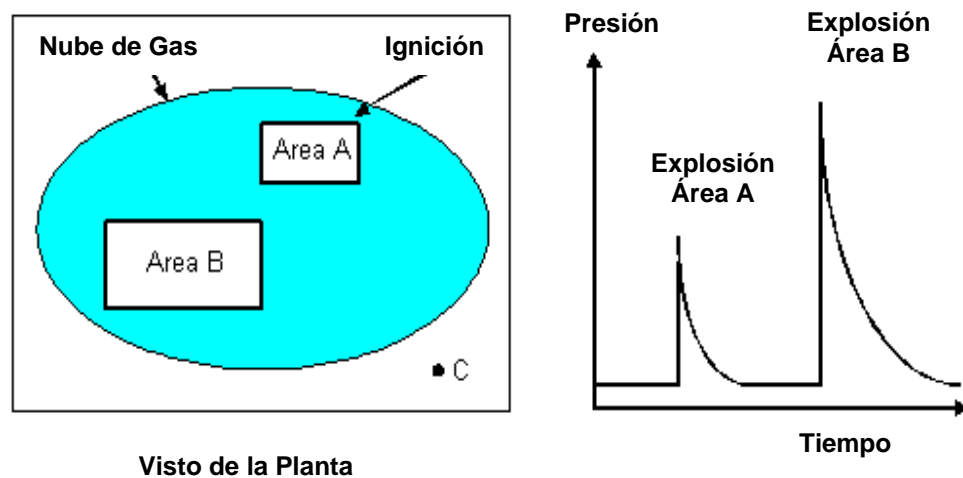
Una descarga grande puede formar una nube grande explosiva que puede llegar a cubrir muchas áreas confinadas y/o áreas congestionadas. En la Figura 9.6 nosotros hemos ilustrado la situación. Si nosotros asumimos la ignición cerca del Área A, nosotros conseguiremos una aceleración de la llama, es decir una explosión dentro de esta área.

Si la explosión no hace tránsito dentro de una detonación en el Área A, decaerá la velocidad de la llama como si se propagara dentro del área abierta entre las Áreas A y la B. Los resultados de los experimentos muestran la desaceleración en la

llama que termina de un área que contiene obstáculos repetidos dentro de un área inobstruida.

En el área abierta, entre las Áreas A y B, la llama puede propagarse a unas pocas decenas de metros por segundo. El tiempo para la propagación del Área A al Área B será justamente comparado al tiempo de quemado de las nubes dentro de estas áreas. Cuando la llama alcanza el Área B, puede haber una nueva explosión. Como lo mostramos en la figura, al localizar el área C nosotros podemos conseguir dos ondas de explosión. Esto muestra que una nube de gas puede causar varias explosiones locales.

Figura 9.6. Explosiones múltiples en un área de proceso.



El efecto de explosiones localizadas puede en algunas situaciones no sólo causar altas presiones localmente, sino también causar alta velocidad de la llama para propagarse en un confinamiento menor, pero en regiones obstruidas donde la alta velocidad de la llama puede sostenerse.

Algunos datos recientemente publicados por Harris y Wickens (1989) muestra ejemplos de un efecto que fue observado, cuando la propagación de la llama en los obstáculos repetidos es estudiada. Ellos mostraron que si una llama entra en una serie de obstáculos inconfiados a una alta velocidad, la llama se puede estabilizar a una alta velocidad y a una alta presión de explosión. Sin embargo, si al principio de la serie la llama tenía una baja velocidad, esta no podrá acelerar a altas velocidades y la correspondiente presión de explosión será baja.

9.9 SIMULACIONES CON EL SOFTWARE

El código del software (STANJAN, FLACS, BREEZE HAZ/FIRE) originalmente fue desarrollado para la simulación de las explosiones de gas en módulos costa afuera. Un escenario de una explosión de gas en una planta de área de proceso, involucrará una gran variedad de parámetros que para un módulo costa afuera.

El combustible en una planta del proceso puede ser muy reactivo como el hidrógeno y el etileno, esta puede ser una mezcla de combustibles ó cualquier tipo de combustible simple. El diseño geométrico variará bastante de caso a caso. En una planta del proceso la física de las explosiones de gas es la misma que en un módulo costa afuera.

Los modelos del software son también capaces de manejar explosiones de gas en las plantas de proceso. Bjerketvedt y Nornes (1989), Savvides y Tam (1991) y Salvesen y Van Wingerden (1993) han usado los códigos del software para la simulación de explosiones de gas en las plantas de proceso.

Las simulaciones realizadas por Salvesen y Van Wingerden (1993) considerada una planta de proceso grande en Beek en los Países Bajos, como fue involucrada

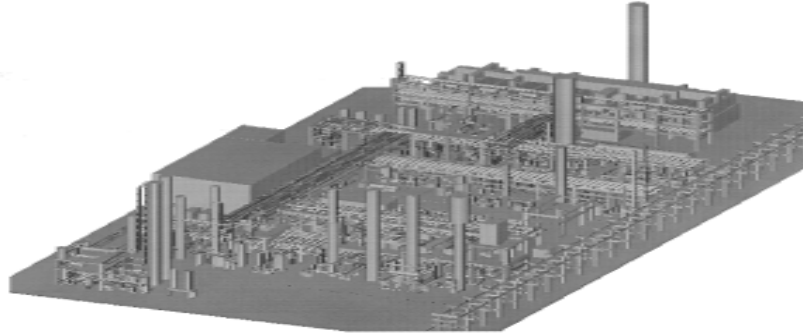
la fuerte explosión de una nube grande de vapor en 1975. La planta del proceso involucrada era una planta de nafta (Naphtha Cracker II) (las dimensiones: 160 m x 70 m x 40 m).

Después una descarga mayor de lo que según el informe oficial debe de haber sido los hidrocarburos C3-C4 (el propileno, el butano) ocurrió la ignición, dando como resultado la muerte de 14 personas, 107 personas heridas y extensos daños a la planta. La investigación realizada después del incidente reveló basada en los cálculos de los daños, las presiones de la explosión, (localmente a 1 bar), el tamaño, el punto de ignición y la localización de la nube inflamable.

Revelan las simulaciones, que el gas que en el accidente estaba involucrado no era propileno como fue afirmado por algunas de las fuentes usadas en el informe oficial, etileno más probablemente, butano, ó una mezcla de etileno y propileno. Las presiones generadas por el propileno fueron del orden de 14-15 mbar, considerando que para la presión generada del etileno fue del orden de 10-14 bar.

Factores desconocidos como la composición de la mezcla y el perfil de concentración en la nube, hacen más o menos imposible simular en detalle la explosión. No obstante, las simulaciones también mostraron las posibilidades del software para las plantas de proceso. La Figura 9.7 muestra como era representada la planta por el software.

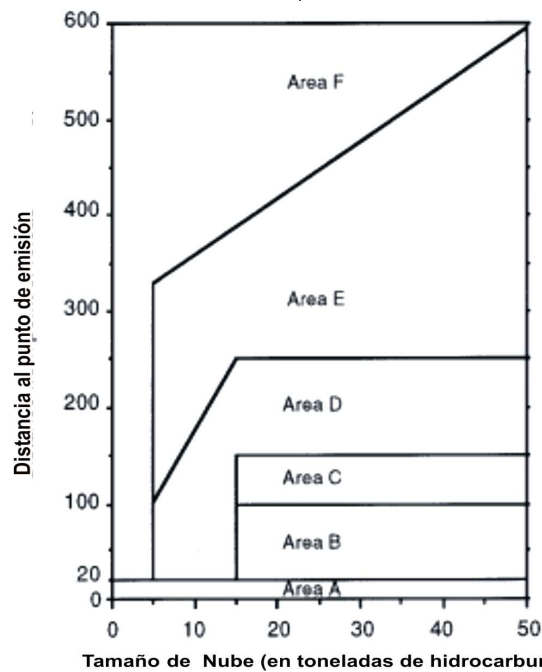
Figura 9.7. La Planta Naptha Cracker II en Beek en Los Países Bajos que fue involucrada en una explosión de una nube de vapor en 1975, como fue representado por el código del software.



9.10 DISEÑO DE LA PLANTA

Para guardar el bajo potencial de pérdida, es importante separar las diferentes unidades y los edificios. Las diferentes áreas de proceso deberán guardarse en orden y por separado para evitar el efecto dominó. También es muy importante guardar a un mínimo la congestión. Todas las actividades para el funcionamiento de la planta no son absolutamente necesarias, las áreas potencialmente riesgosas deben ser situadas lejos. Los edificios, los cuales pueden ser sujetos a efectos explosivos, deberán ser resistentes a la explosión. La Figura 9.8 como lo sugerido por Kletz (1988) muestra un ejemplo de las restricciones en el plan y diseño de una planta de proceso

Figura 9.8. El resumen de las restricciones principales impuestas en el plan contra las explosiones de gas. Nota: Las limitaciones del área E aplican en las áreas E-A y así sucesivamente. (Kletz, 1988)



Área F:
No hay limitaciones en el diseño.

Área E:
No tiene viviendas

Área D:
Edificios diseñados para un calibre de presión máxima entre 0.1 y 0.2 barg (1.5 y 3 psi) Techo sostenido independientemente y ventanas protegidas.

Área C:
Edificios diseñados para un calibre de presión máxima entre 0.2 y 0.7 barg (3 y 10 psi). No tienen baja presión para almacenamiento de tanques.

Área B:
Diseño de una presión máxima incidental de 0.7 barg (10 psi) para 20 ms. Otras plantas no riesgosas (efecto dominó).

Área A:
Edificios no ocupados.

10. ALGUNOS CASOS DE EXPLOSIONES

Garrison (1998), efectuó una revisión de los accidentes en la industria de los hidrocarburos desde 1957 hasta 1998, y encontró que el 42% de los accidentes se debió a la explosión de nubes de vapor. En esta clasificación, se incluyen las explosiones de nubes de gas combustible dentro y fuera de áreas de proceso (áreas confinadas). Los eventos clasificados como explosiones correspondieron al 22%. Estas explosiones fueron probablemente explosiones de sólidos, BLEVES, pérdidas de confinamiento en áreas de proceso y explosiones internas de gases de equipos de proceso.

Cuando revisamos en la literatura los detalles de cada una de las explosiones de gas en la industria, podemos observar y aprender que las explosiones de gas tienden a repetirse en condiciones similares. Es importante investigar las causas de los accidentes, buscar similitudes en la literatura y tomar acciones correctivas.

10.1 FLIXBOROUGH, 1974

La catástrofe de la planta de Flixboroguh el primero de Junio de 1974, debido a la explosión de una nube de gas causada por la liberación de 50 toneladas de ciclohexano a raíz de la falla de una tubería fue uno de los accidentes más graves en los últimos años en Europa, con un balance trágico de 28 muertos, 36 heridos en la planta y 53 en las afueras, 1.821 viviendas y 167 locales comerciales sufrieron daños en sus instalaciones. El costo de los daños ascendió a más de 100 millones de dólares. La onda explosiva fue equivalente a una explosión de 16 toneladas de TNT.

Una de las causas que condujo al aumento de la presión de explosión, fue el confinamiento de la nube en las áreas de proceso. Las lecciones aprendidas fueron:

- Si el inventario de ciclohexano necesario en proceso fuera menor, las consecuencias del accidente también lo hubiesen sido.
- El diseño de los cuartos y facilidades de proceso no era el más conveniente para un evento de explosión.

10.2 BERGE ISTRA

En Diciembre 30 de 1975, el buque tanquero *Berge Istra* encalló en las costas del Mar de las Molucas. Sólo dos miembros de la tripulación fueron rescatados. Se reportó una serie de explosiones seguida del hundimiento del barco. En Octubre de 1979 el buque banquero "*Berge Vanga*" desapareció en las aguas del océano atlántico. No hubo sobrevivientes.

10.3 PIPER ALPHA, 1988

Piper Alpha es el "Flixborough" de la industria costa fuera. Una pequeña explosión de gas en un módulo de compresores que causó una deflagración que terminó en el colapso total de la plataforma, hubieron 167 muertos. Del accidente de *Piper Alpha*, se aprende, que una explosión de gas puede desencadenar un efecto dominó y pérdida de las instalaciones. Deben diseñarse facilidades de proceso para evitar el efecto dominó.

10.4 PORT HUDSON, MISSOURI, 1970

En este incidente, se liberó GLP (gas licuado del petróleo) de una tubería, La nube de gas afloró en un valle y 20 minutos después de la fuga de producto la nube de gas explotó violentamente. La explosión probablemente fue una detonación. La explosión inició como una explosión interna en un cuarto de bombeo y condujo a la nube inconfiada a detonar. De Port Hudson podemos aprender que las explosiones en áreas confinadas pueden iniciar fuertes detonaciones en áreas inconfiadas.

10.5 RAFNES, 1998

El incidente en Rafnes, Noruega, en 1988 es conocido como un evento de fuego considerable. Sin embargo, el primer incidente fue una explosión de gas. El personal que se encontraba en los cuartos de control sintió que todo el edificio se agitaba. No hubo daños considerables debido a la explosión y no hubo pérdidas humanas. La presión de la explosión fue del orden de 100 mbar o más. Del incidente de Rafnes se puede aprender:

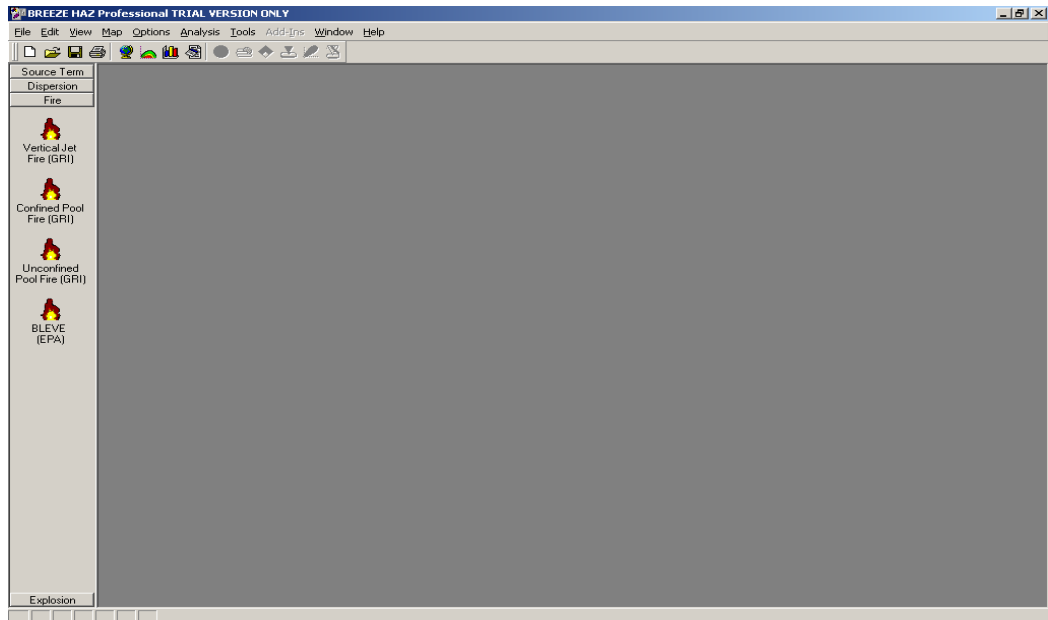
- Los cuartos de control y de proceso deben diseñarse a prueba de explosiones.
- El fuego es común después de un evento de explosión.
- Es posible construir barreras de explosión que puedan mitigar y proteger las estructuras contra los efectos de una explosión de gas.

11. SIMULACION DE EXPOSIONES CON MODELOS DE SOFTWARE

Hoy en día, gracias al modelamiento numérico y a las herramientas de software, se puede predecir de una manera muy aproximada a las condiciones reales, el comportamiento de una explosión de gas en los escenarios expuestos en los capítulos anteriores.

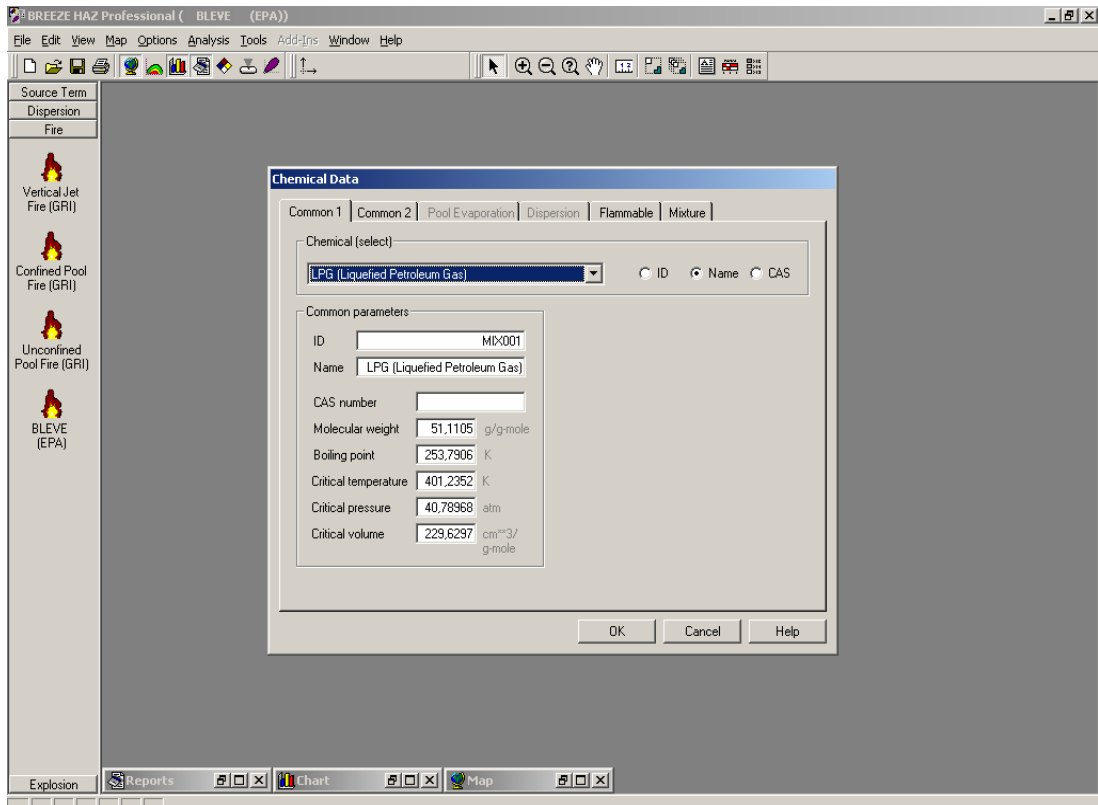
Para llevar a cabo la simulación de los modelos de explosión confinada, inconfiada, fuego a chorro (jet fire) y BLEVE, se utilizará el software BREEZE HAZ FIRE/EXPLOSION, de la firma americana Trinity Consultants, la cual presenta una interfaz de entrada muy amigable para el entorno de usuario. Cabe anotar que el software BREEZE utiliza códigos de simulación de la EPA (Environmental Protection Agency), pero la matriz de resultados es muy similar a la formulación planteada a lo largo de esta monografía. La figura 11.1 muestra la interfaz de entrada de datos del software.

Figura 11.1 Interfaz de entrada del software BREEZE HAZ/FIRE



En la barra vertical de la izquierda se aprecia el modelo que se quiere simular, en el caso de explosiones, es posible modelar un fuego a chorro, fuego en áreas confinadas e inconfinadas y BLEVE (los cuales son los modelos de explosión a comparar). La figura 11.2. ilustra las condiciones de entrada de datos y condiciones atmosféricas para proceder a un eficaz modelamiento de los sucesos de explosión.

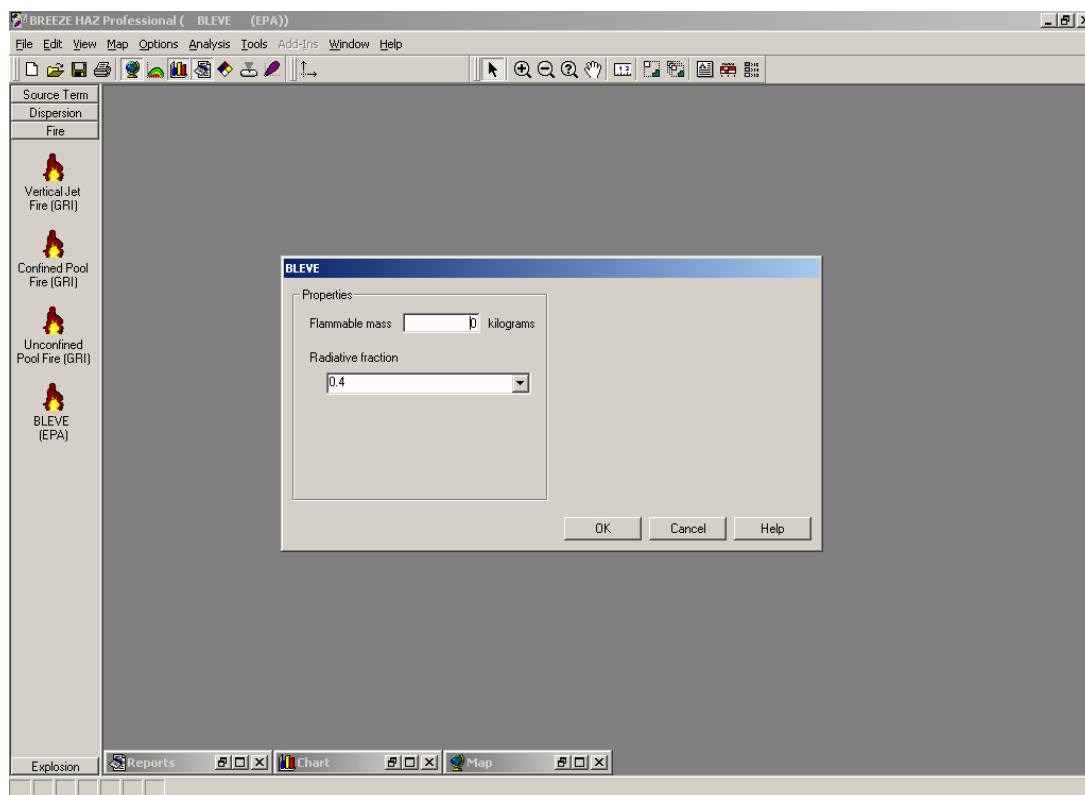
Figura 11.2. Cuadro de diálogo de entrada de datos de producto.



Para el ejemplo, se introdujo el producto gas licuado del petróleo (GLP), en un suceso de BLEVE. El software automáticamente introduce las propiedades termodinámicas del producto escogido.

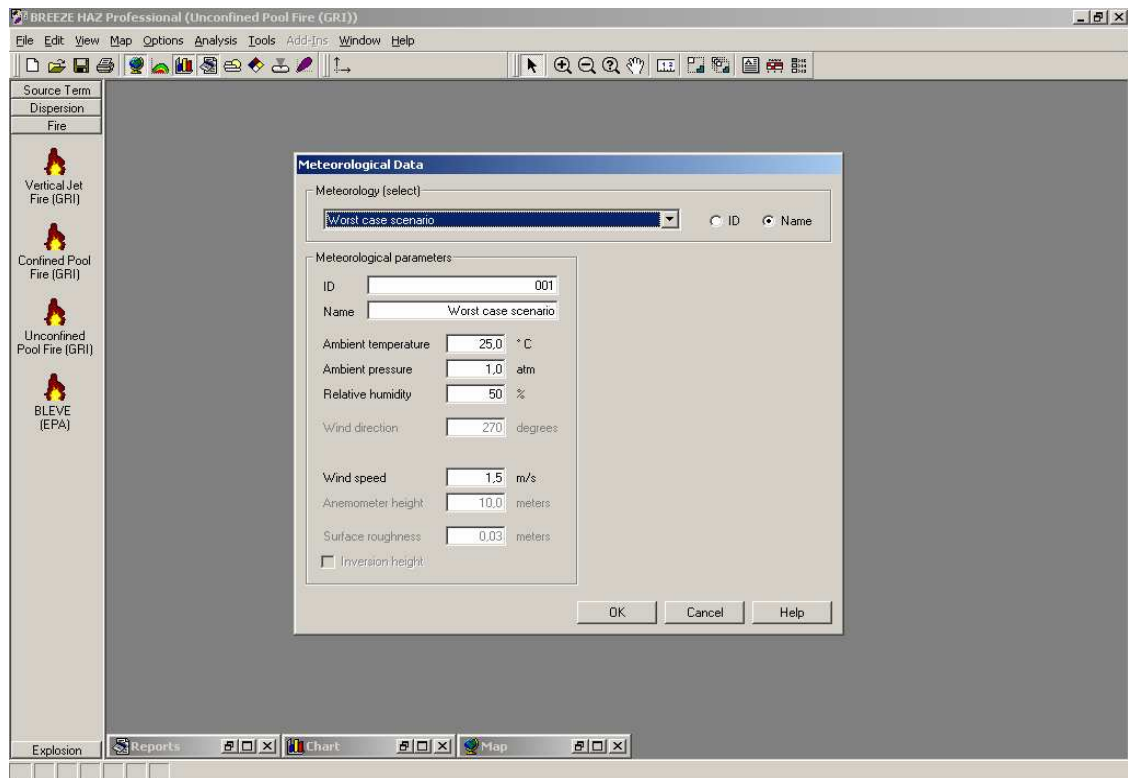
Una vez se introducen los datos del producto, se prosigue introduciendo los datos de la masa del producto objeto del análisis, en este caso en kilogramos, como se muestra en la figura 11.3, aunque el software tiene la capacidad de cambiar las unidades de masa de kilogramos a libras, según sea el caso.

Figura 11.3. Datos de entrada de la masa de producto a analizar.



Una vez se ha introducido la cantidad de masa a evaluar por el modelo, en este caso un BLEVE de GLP, se determinan los rangos de colores de la interfaz gráfica de salida de datos, para determinar gráficamente el mapa de radiación de la explosión. Para el caso de explosiones confinadas, inconfiadas y fuego a chorro, se deben introducir las condiciones meteorológicas del entorno a evaluar, pues es un factor importante en la predicción del comportamiento de la nube de gas. La figura 11.4 muestra la interfaz de entrada de las condiciones meteorológicas del modelo de simulación.

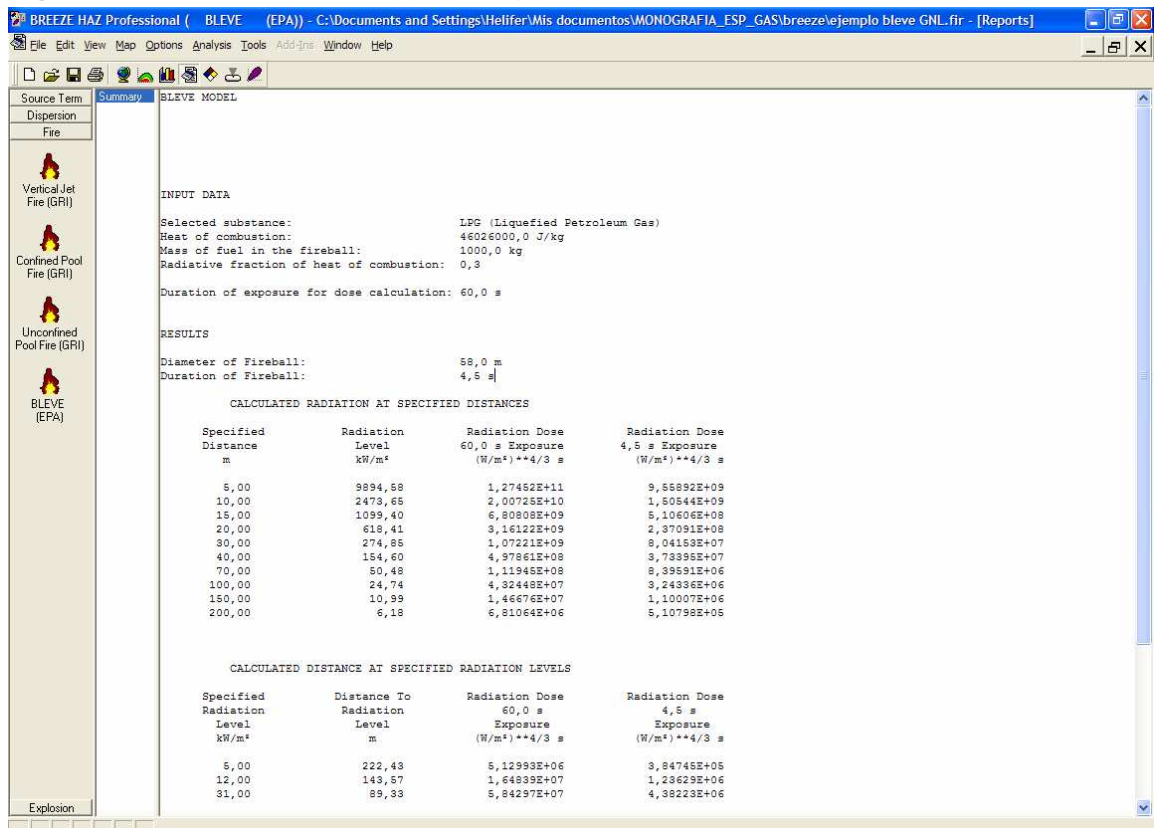
Figura 11.4 Entrada de datos de condiciones meteorológicas al modelo de simulación.



Para el ejemplo se utilizó la condición “*worst case scenario*”, el cual representa las peores condiciones meteorológicas para efectuar la simulación del modelo.

Una vez se han introducido los datos de entrada y las condiciones meteorológicas del modelo a evaluar, se procede a correr la simulación, presionando *model run* en la ventana análisis de la barra de estado. La matriz de resultados se presenta en la figura 11.5

Figura 11.5 Matriz de resultados del ejemplo de BLEVE para el propano



En la matriz de resultados se presentan el diámetro de la bola de fuego y la duración de la misma, así como las distancias de los diversos niveles de radiación de la bola de fuego.

Con los resultados obtenidos en las simulaciones de software para los diversos sucesos de explosión de gas (explosión confinada, inconfiada, chorro de fuego, BLEVE), se puede apreciar lo siguiente:

- En el caso de las explosiones inconfiadas, el software BREEZE determina el grado de dispersión atmosférica antes de la ignición de la nube de gas, se presume que el aumento de la presión será despreciable y se obtienen

resultados de la magnitud de la nube de dispersión y de la radiación de la nube quemándose.

- Para el caso de las explosiones confinadas, es más importante determinar el aumento de la presión en la detonación de la nube de gas, el software no puede predecir la transición de la deflagración a detonación, por lo cual es muy conservador estimar dicha condición en el modelamiento del suceso.
- Cuando se procede al modelamiento del chorro de fuego (jet fire), se debe precisar el evento de fuga antes de la explosión, si es debido a una ruptura o debilitamiento de la tubería y el software determina los niveles de radiación y la distancia de cada uno de ellos.
- Para el BLEVE el software determina una vez más los niveles de radiación y así se puede determinar las distancias de seguridad en el diseño de tanques y áreas de proceso.

Es muy importante destacar que el software BREEZE HAZ/FIRE únicamente presenta resultados de niveles de radiación y velocidades de quemado de los gases y mezclas gaseosas, pero los anteriores parámetros son puntos de partida muy importantes en el diseño de áreas de proceso y en la prevención de accidentes en las mismas.

Para una mejor comprensión de las características de los diferentes modelos de explosión evaluados, en la tabla 11.1 se presenta un cuadro comparativo de cada uno de los modelos de explosión bajo parámetros como el incremento de la presión, el tamaño de la nube de gas, el confinamiento y los obstáculos.

Tabla 11.1 Cuadro comparativo de los modelos de explosión bajo parámetros comunes.

Modelo de explosión	Explosión Confinada	Explosión inconfiada	Chorro de fuego (Jet fire)	BLEVE
Incremento de la presión	Muy rápida y se acelera aún mas debido a la presencia de obstáculos	Baja, no hay confinamiento que ocasione aceleración de la presión	Muy alto debido a la geometría de la falla (tanque, tubería, equipos de proceso)	Muy alto, debido al aumento de la temperatura del líquido hirviendo.
Tipo de la nube de dispersión	Concentrada debido al confinamiento	Poco concentrada, los factores meteorológicos afectan su comportamiento	Muy pequeña, si hay ignición.	Muy concentrada, confinada por el recipiente que contiene el líquido
Velocidad de la llama	Alta, se aumenta proporcionalmente de acuerdo al número de obstáculos	Baja, presenta velocidades subsónicas (deflagraciones)	Muy alta, el orificio de salida del gas acelera la llama.	Baja, velocidades subsónicas.
Alcance de la onda de choque	Fuerte en zonas aledañas, proporcional a la cantidad de energía liberada.	Fuerte, si hay obstáculos se aumenta el daño ocasionado	Muy poco alcance debido a la ignición de la nube a la salida de la fuga.	Alto, debido al alto confinamiento de la nube de gas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En una situación de accidente de explosiones de gas se pueden presentar diversas situaciones como los son detonaciones y deflagraciones, en espacios confinados o inconfiados, BLEVE,(cuando hay hidrocarburos líquidos hirviendo) con consecuencias variables de acuerdo al entorno en cual se presente el evento.

Es importante determinar las variables que conducen a las mezclas de aire-gas, para lo cual es conveniente ayudarse con simulaciones de software para estimar el comportamiento de la dispersión de la nube, y así predecir y evitar deflagraciones y detonaciones.

Se requiere controlar las variables de los límites de inflamabilidad inferior y superior de las mezclas de gas, para evitar el riesgo de explosión.

La presencia de obstáculos en el frente de llama producirá la aceleración de la misma, generando posibles transiciones de deflagraciones a detonaciones, con consecuencias funestas para el medio en el cual se desarrolla la situación de explosión.

Experimentos como el tubo de explosión, la vasija en forma de cuña y el recipiente esférico, sirven para estimar el comportamiento de los obstáculos en las explosiones de gas y definir pautas para el diseño de facilidades de proceso en tierra y costa fuera.

Conociendo el comportamiento de las estructuras antes los diversos eventos de explosión, se pueden mejorar las condiciones de diseño estructural y conjugarlas con las normas vigentes en el país (NSR-98), logrando establecer parámetros de diseño específicos para la industria química y de los hidrocarburos en Colombia.

Al conocer el comportamiento de un evento de explosión como el BLEVE, se pueden diseñar estrategias encaminadas a mitigar la posibilidad de ocurrencia de este tipo de situaciones catastróficas.

Modelos de software como STANJAN, BREEZE HAZ/FIRE, FLACS, etc, permiten aproximar con mucha precisión las consecuencias de los eventos de explosión y estimar, dentro del análisis e investigación de accidentes, los costos en términos económicos y de vidas humanas en las explosiones de gas.

Se recomienda tomar esta monografía como un punto de partida para análisis e investigaciones a través de tesis y monografías en tópicos tales como el comportamiento de las nubes de dispersión de gas en la atmósfera, la evaluación y predicción del daño en personal e instalaciones y el control de los factores que inciden en la ocurrencia de accidentes que desembocan en las deflagraciones y explosiones de gas

BIBLIOGRAFIA

CASAL, Joaquim, MONTIEL, Helena, PLANAS, Eulalia, VILCHEZ Juan. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. Barcelona: Alfaomega, 2001. 361 p.

CMR Consultants, Gas explosion handbook, Bergen, Norway. 2003. Also available from internet:

<URL:http://www.gexcon.com/index.php?src=gas/gas_explosions.html>.

TRINITY CONSULTANTS. Breeze HAZ/FIRE Explosion software. 2006. Also available from internet:

[URL:<http://www.breezesoftware.com/prod/brzSoftware.asp?P=FIREEXP>](http://www.breezesoftware.com/prod/brzSoftware.asp?P=FIREEXP)