

**APROXIMACION AL ESTUDIO DEL RIESGO
DEL BLEVE Y SUS EFECTOS EN LOS
GENERADORES MARINOS DE VAPOR Y LOS
TANQUES DE CARGA DE LOS BUQUES LNG-
LPG. APLICACION COMPARATIVA DE LAS
NORMAS QUE LO REGULAN Y PREVIENEN.**

Autor: German de Melo Rodriguez
Director: Emilio Eguia López

Barcelona, mayo de 1994

5.- Resultados.

5.1.- Análisis de la posibilidad de la expansión explosiva del vapor de un líquido hirviendo en los buques de transporte de LNG-LPG.

En el anexo n° 8, se contienen los resultados de los efectos del calor transmitido a la carga transportada por buques LNG-LPG, en el caso de un incendio por hidrocarburos en un costado del mismo, para buques de transporte de gases licuados del tipo refrigerado, semirrefrigerado y presurizado, con tanques del tipo membrana, independientes con aislamiento e independientes sin aislamiento.

Tanque tipo membrana

De acuerdo con los valores obtenidos, el calor que pasa al aislamiento a través del casco interno, produce en un tiempo relativamente pequeño el deterioro total o parcial del aislamiento, ayudado por la presión hidrostática de la carga, esto permite que el calor pase a través del aislamiento quemado o "nuevo aislamiento", que ha quedado, y caliente a la carga aumentando la temperatura y la presión, hasta la presión de tarado de las válvulas de seguridad, que al estar el tanque en condición de lleno, comenzará a evacuar vapor de título muy bajo, debido a que la dilatación del líquido como consecuencia del

aumento de temperatura, ha ocupado la cámara de vapor, todo ello acompañado de el pequeño volumen del vapor a vacuar, hace que la válvulas de seguridad evacuen gran cantidad de producto en muy poco tiempo y sin necesidad de gran cantidad de calor, lo que creará una gran cámara de vapor en poco tiempo, que al no estar protegida por la refrigeración del líquido se verán expuestas a la acción directa del calor aumentando su temperatura y disminuyendo su resistencia mecánica, lo que provocará la ruina del tanque.

No obstante a lo anterior los buques con tanques del tipo de membrana, son de tanques de gran capacidad por lo que el efecto del gran volumen del tanque retarda el aumento de la temperatura y por tanto el tiempo de apertura de la válvulas de seguridad.

En este tipo de tanques la presión no superará nunca los 2 kg/cm², presión esta muy distante -en cualquier gas licuado a transportar-, de la correspondiente a la temperatura de la línea límite superior, pero ello no evita la rotura del tanque, la fuga del gas y la correspondiente bola de fuego posterior.

No obstante a lo anterior este tipo de tanque es de gran seguridad para el transporte de gases licuados en términos generales e imposible de que en ellos se produzca un BLEVE con cualquier tipo de carga.

Tanques independientes con aislamiento externo
(semirrefrigerado).

En este tipo de tanque el aislamiento sólo se verá afectado por la acción de calor del tanque interior que lo quemará también en un breve período de tiempo, dejando al tanque desprovisto del mismo y con un "nuevo aislamiento" que es el resultado del poliuretano quemado, esto permitirá que pase gran parte del calor a la carga, la cual experimentará el correspondiente aumento de presión y de temperatura. Como este tipo de tanques pueden alcanzar hasta la presión de 8 kg/cm², los cálculos realizados con los distintos productos a transportar, nos indican que el aumento de presión provocará que la válvula de seguridad abra y evacue gran cantidad de vapor de pequeño título, y que producirá una importante cámara de vapor en el tanque, si esta válvula de seguridad está mal diseñada y no evacua la cantidad de vapor que se produce, el calor se seguirá invirtiendo en aumentar la presión del tanque y con la posibilidad de en el caso del Propano, Butano y Propileno, de alcanzar la presión correspondiente a la temperatura de la línea límite de sobrecalentamiento, y que si la resistencia mecánica del tanque se mantiene hasta alcanzar esta presión, cuando se produzca la rotura del tanque por falta de resistencia mecánica, se producirá un BLEVE. En el caso de que el tanque rompa antes de que se alcance la mencionada presión no se producirá un BLEVE propiamente dicho pero la nucleación que se producirá estará

próxima a los efectos del BLEVE, esto último también sucederá en el caso de que la válvula de seguridad esté bien diseñada, y evacue todo el vapor producido, aumentando la cámara de vapor que queda desprovista de refrigeración, la cual se va calentando y perdiendo su resistencia mecánica hasta su rotura.

Tanques independientes sin aislamiento

Este tipo de tanques está limitado sólo a aquellos productos que pueden ser transportados a la temperatura ambiente -Propano, Butano, etc.-, y por lo tanto lo serán a su presión de vapor a esta temperatura, que en el caso del Propano o del propileno, puede estar próxima o por encima de esta temperatura.

Al no existir aislamiento en el tanque el calor del casco exterior pasará directamente a las paredes de este y seguidamente al líquido, que aumentará su temperatura y presión hasta abrir las válvulas de seguridad y evacuar gran cantidad de fluido, produciendo la tan perjudicial cámara de vapor que al calentarse en muy poco tiempo disminuirá su resistencia mecánica por debajo de los esfuerzos sometidos, provocando su ruina y el fenómeno BLEVE.

En el caso de que la válvula de seguridad esté mal diseñada y no evacue la cantidad de fluido que le corresponde, el calor restante se invertirá en aumentar la presión en el interior del

tanque, pudiendose alcanzar la correspondiente a la temperatura de la línea límite de sobrecalentamiento, con el consiguiente peligro de BLEVE en caso de rotura del tanque.

En el caso de productos como el Propano que a la temperatura ambiente puede alcanzar la presión correspondiente a la temperatura de la línea límite de sobrecalentamiento, no necesita de un incendio para provocar un BLEVE, sólo es suficiente una colisión entre buques con tal desprendimiento de energía que rompa el tanque y comunique el fluido con la atmósfera provocando un BLEVE.

5.2.- Expansión explosiva del vapor de un líquido hirviendo en calderas marinas.

5.2.1.- Análisis de los parámetros de funcionamiento de las válvulas de seguridad impuestos por las Sociedades de Clasificación para las calderas marinas, y comportamiento ante la posibilidad de una expansión explosiva del vapor de un líquido hirviendo.

Las Sociedades de Clasificación y el gobierno de la bandera del buque (ver anexo n° 6), obligan a que en las calderas de vapor se monten válvulas de seguridad con el único objetivo de proteger de sobrepresiones a la caldera. Las válvulas de seguridad han de cumplir las condiciones siguientes:

- 1° Abrir a la presión de tarado tal que $\Delta p \leq 0,03 P_t$.
- 2° Evacuar la cantidad máxima de vapor que la caldera puede producir en una hora. Esta cantidad nunca será menor de la correspondiente a 29 Kg/ m² h.
- 3° Han de cerrar cuando la presión en el interior de la caldera sea inferior a la de tarado, tal que $\Delta p \leq P_t$.

Se considera que se ha producido un "blackout", debido a un incendio en la sala de calderas, se tiene que no hay producción de vapor en condiciones normales de funcionamiento, pero sí debido al incendio, ni tampoco suministro de agua de alimentación

en la caldera.

Si la superficie de calefacción de la caldera es

$$S_c = \frac{G_v \cdot r}{I_c \cdot P_c \cdot \eta} \quad (103)$$

y

$$G_v = \frac{S_c \cdot I_c \cdot P_c \cdot \eta}{r} \quad (104)$$

La cantidad máxima de vapor que la caldera puede producir, viene dado por la superficie de calefacción S_c , y por la intensidad de combustión máxima $I_{c \text{ máx.}}$ para un combustible dado, así como por su rendimiento.

En el caso de un incendio en la cámara de calderas, el calor lo recibe el agua desde la superficie exterior de la caldera por lo que ésta se convierte en éste caso en la superficie de calefacción de la caldera, por lo tanto, si se cumple que

$$S_c = S_{ce}$$

sin tener en cuenta la resistencia térmica del aislamiento, el calor máximo que se le comunicaría al agua de la caldera, sería igual al que se le comunicaba a través de los quemadores con su máxima intensidad, y por tanto, con este calor sólo se puede producir una cantidad de vapor igual a la máxima que las válvulas de seguridad pueden evacuar en el mismo tiempo. En este caso en el que no se estaría alimentando con agua a la caldera, se produciría un continuo descenso de nivel que haría peligrar los materiales de la misma por falta de refrigeración, como consecuencia del aumento de temperatura en ellos, ningún aumento de presión se producira como consecuencia de ello.

Si se cumple que

$$S_c > S_{ce}$$

En este caso el calor aportado a través de la envolvente de la caldera, sin tener en cuenta la resistencia térmica del aislamiento, es mucho menor que el máximo que la caldera puede recibir a través de su superficie de calefacción, por lo que, al no estar alimentada con agua la caldera, y no existir ningún consumo de vapor, se producirán pequeñas sobrepresiones que periódicamente abrirán las válvulas de seguridad y evacuaran el vapor extra que elevaba la presión volviéndose a cerrar las válvulas. En este caso no se producirá tampoco una elevación de la presión que haga peligrar a la misma.

En las calderas descritas en el capítulo 4, tanto la de tipo acuatubular como la cilíndrica o de tubos de humos, tienen una superficie de calefacción superior a la de la envolvente en una proporción de 6,5 en las primeras y de 3,7 en las segundas, esto sumado a la resistencia térmica del aislamiento, hace que el calor que se aporta desde el exterior -como consecuencia de un incendio- al agua de la caldera, no será nunca superior al que se le puede dar a través de su superficie de calefacción, y aún en las peores condiciones de funcionamiento, el vapor producido por el calor exterior suministrado, será evacuado por las válvulas de seguridad.

Si se considera una condición extrema de funcionamiento de la caldera en la que el consumo de vapor y la alimentación de agua de la caldera son nulos, y teniendo los quemadores a la máxima potencia de funcionamiento o lo que es lo mismo a la máxima intensidad de combustión $I_c \text{ máx.}$, se tendría lo siguiente: en el caso de calderas de tubos de agua, el vapor producido será evacuado por las válvulas de seguridad, descendiendo el nivel de la caldera hasta que se vaporice todo el agua del colector de vapor, y comience a descender el nivel de agua de los tubos vaporizadores, momento en el que al quedarse estos sin refrigeración se quemaran y fundirán comunicando el interior de la caldera con el exterior, y saliendo el agua del interior de los tubos con lo que la presión descendería a través de cada uno de ellos de una forma brusca, pero con poca masa de agua puesto

que la mayor cantidad de ella ha sido evacuada por las válvulas de seguridad y el resto a través de cada uno de los tubos quemados. Todo lo anterior se produce en un espacio de tiempo pequeño, debido a que la relación peso de agua contenida, producción de vapor es muy pequeña, lo que hace que el agua contenida se vaporice en un corto espacio de tiempo.

Si se consideran las condiciones anteriores en una caldera fumitubular, el vapor producido, es evacuado por las válvulas de seguridad, y el nivel de la caldera irá disminuyendo progresivamente conforme el vapor es evacuado, de forma que los tubos altos de fuego quedarán sin refrigeración y adquirirán la temperatura de los gases de la combustión perdiendo su resistencia mecánica y rompiendo de forma longitudinal, lo que comunica al interior de la caldera con el exterior de forma brusca e instantánea. Teniendo en cuenta que en éste tipo de calderas la relación peso de agua contenida, producción de vapor, es grande (bastante mayor que en la caldera de tubos de agua), la masa de agua que permanece en el interior de la caldera en el momento de producirse la rotura de los tubos es bastante grande, lo que permitiría la producción de un BLEVE, -siempre y cuando concurren las circunstancias ya explicadas.

De las averías explicadas en el epígrafe 4.2.11, sólo las debidas a grietas en el colector pueden producir la rotura del mismo y comunicación con el exterior provocando un BLEVE, si se

reunen las condiciones del mismo.

También en las calderas cilíndricas la rotura del horno por corrosión interna o externa puede provocar una explosión de vapor ya que generalmente estas calderas trabajan a presiones muy inferiores a las necesarias para que se produzca un BLEVE.

De los cálculos (anexo n° 8) realizados para ambas calderas en el caso de un incendio en la cámara de máquinas, se comprueba que debido al aislamiento externo de la caldera y su resistencia y su buen comportamiento al fuego hacen que el calor que se le suministre a la misma sólo sirva para producir vapor y evacuarlo a través de las válvulas de seguridad, que de prolongarse el incendio dejaría a esta sin agua, lo que produciría su destrucción pero sin explosión de vapor y mucho menos BLEVE.

5.3.- Efectos producidos en el entorno por una expansión explosiva del vapor de un líquido hirviendo.

5.3.1.- Caso de producirse en un buque de transporte de gases licuados, navegando, fondeado o en puerto.

Teniendo en cuenta que la BLEVE es la explosión mecánica de un recipiente, si el contenido del mismo es un líquido o gas inflamable, es probable que seguido a la rotura del recipiente le acompañe un incendio, por lo que las consecuencias de una explosión BLEVE, las podemos cifrar en tres tipos:

- Radiación térmica.
- Sobrepresiones por la onda expansiva.
- Proyecciones de fragmentos metálicos.

De los tres tipos de consecuencias que las explosiones BLEVE pueden producir, nos vamos a centrar por su importancia en las dos primeras -la radiación térmica y las sobrepresiones de la onda expansiva-.

Al objeto de cuantificar las consecuencias, se han desarrollado diferentes modelos empíricos de análisis que han recogido la experiencia de accidentes sucedidos.

El efecto más importante por su poder destructivo de una explosión BLEVE, es el debido a la radiación térmica, ya que afectará a todas los seres vivos, y a todas las instalaciones que

le rodeen, pudiendo provocar el efecto dominó. Existiendo gran cantidad de modelos para calcularlo, se ha optado por utilizar el de la TNO (Organización holandesa para la investigación científica).

Con el modelo de la TNO, se ha calculado, para distintas cantidades de productos inflamable transportados, el diámetro de la bola de fuego y la energía térmica irradiada a distintas distancias de la misma, así como el tiempo de duración.

La tabla 14 (fuente: programa Toccata-Italia) contiene la máxima radiación tolerable, tanto por los materiales generalmente utilizados, y por las personas.

A través de la cantidad de radiación calculada, podemos determinar la distancia dentro de la cual su efecto es totalmente destructivo para materiales y personas, a partir de esta distancia los efectos disminuyen para ciertos tipos de materiales, pero continúan siendo destructivo para las personas, hasta llegar a un valor máximo de 4 kW/m^2 , en el que puede ser soportado por personas desprotegidas.

La tabla 15 (Notas técnicas de prevención n° 291, Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores), contiene los efectos de las sobrepresiones debido a la onda

Tabla 14

| MAXIMA RADIACION TOLERABLE | | IRRADIACION TERMICA (kW/m ²) |
|----------------------------|--|--|
| POR MATERIALES | POR PERSONAS | |
| -Pared de ladrillos | | 400 |
| -Hormigon armado | | 200 |
| -Cemento | | 60 |
| -Acero | | 40 |
| -Madera | | 10 |
| | -Durante 20 segundos sin quemaduras. | 6,5 |
| | -Bomberos y personas protegidas. | 4,7 |
| | -Personas desprotegidas. | 4,0 |

Tabla 15

| EFECTOS DE LAS SOBREPRESIONES | | SOBREPRESION (Atm.) |
|---|--|------------------------|
| DAÑOS EN INSTALACIONES | DAÑOS A PERSONAS | |
| -Vidrios rotos en un 50%. | | 0,01 |
| -Vidrios rotos en un 90%. | | 0,04 |
| | -Rotura de timpano | |
| -Daños graves en estructuras de construcción. | -Probabilidad 10% | 0,02 |
| -Daños irrecuperables en estructuras. | -Probabilidad 50% | 0,40 |
| | -Valor umbral de muerte por lesiones pulmonares. | 0,70 |
| -Demolición total. | | 0,80 |

expansiva, y que se han calculado también a través de los modelos

empíricos de la TNO, para la explosión de una nube de vapor de cualquiera de los productos inflamables calculados.

Los resultados se encuentran en el anexo n° 9, en el que tenemos la cantidad de radiación y la presión producida en el caso de explosión BLEVE para distintos productos y distintas cantidades.

CAPÍTULO V

Símbolos:

G: Peso horario de vapor, kg/h.
 I_c : Intensidad de combustión, kg/m² h.
 P_c : Poder calorífico del combustible, kJ/kg.
r: Calor latente del vapor, kJ/kg.
 S_c : Superficie, m.

Caracteres griegos:

η : Rendimiento de la caldera.