



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería en Ciencias de la
Tierra

“EL FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO”

Tesis para obtener el título de Ingeniero Petrolero

Presenta

Gerardo Velázquez Becerra

Director de Tesis

Ing. Ramón Edgar Domínguez Betancourt



México Distrito Federal, Ciudad Universitaria, 2013

Facultad de Ingeniería

Jurado Asignado

Titulación mediante tesis y examen profesional

Tema de Tesis: “El fenómeno de Espumación Desbordante en Tanques de Almacenamiento de Crudo”

Sinodales

Presidente:	Ing. Manuel Juan Villamar Viguera
Vocal:	Ing. Ramón Edgar Domínguez Betancourt
Secretario:	M.I. Mario Becerra Zepeda
1er suplente:	M.I. Felipe de Jesús Lucero Aranda
2do suplente:	Ing. Francisco Castellanos Páez

Asesor del tema

Ing. Ramón Edgar Domínguez Betancourt

Sustentante

Gerardo Velázquez Becerra

Facultad de Ingeniería. Ciudad Universitaria, 2013.

Agradecimientos

“Si tú dispusieras tu corazón y extendieras a Dios tus manos, si alguna inquietud hubiese en tu manos y la echases de ti y no consintieras que more en tu casa la injusticia. Entonces levantarás tu rostro limpio de mancha y serás fuerte y nada temerás y olvidarás tu miseria o te acordaras de ella como aguas que pasaron.”

Gracias Dios por permitirme seguir de pie, por cobijarme en tu regazo y por las lecciones aprendidas.

Mamá: Te agradezco por todos los esfuerzos hechos, hoy ya puedes los frutos de todos y cada uno de ellos. Siempre estaré en deuda contigo. Te amo.

Papá: Gracias por darme la vida y por mostrarme que soy capaz de valerme por mi mismo.

Pau: Gracias hermanita por todo tu apoyo y por estar ahí cuando cuándo lo necesito, gran parte de este logro también es tuyo.

Paco: Hermano se que siempre estaremos juntos y apoyándonos gracias a ti también por complementar mi vida.

Familia Becerra: Todos ustedes fueron en su momento grandes pilares donde sostenerme; tíos, abuelos y primos, gracias por creer y confiar en mí, espero disfruten este logro tanto como yo. Los amo.

Ale: Gracias por llegar a mi vida y compartir conmigo grandes momentos, gracias por tu apoyo, sin ti esta etapa de mi vida no hubiese sido la misma.

Amigos: A todos ustedes por las maravillosas experiencias, por sus consejos por su ayuda pero sobre todo por su amistad incondicional, gracias por hacer divertido este tramo en mi camino, gracias: Yushet, Josué (Roa), César, Miguel (Mike), José Carlos, Tere, Juan (jonk), Gabriel (Gabo), Ricardo (choco), Memo, Hegel, Misael, Stephni, Ale, Mauricio, Edgar (ronko), Edgar (balu), Hernan Josué Salazar, André, Perla en fin y a todos aquellos que han estado en mi vida por causalidad y que de todos debí haber aprendido algo.

A todos mis profesores que dedicaron su tiempo para la formación de ingenieros capaces, confiables y comprometidos, mi más sincero agradecimiento y respeto para todos ustedes.

Al Ing. Ramón Domínguez Betancourt por su dirección en este trabajo, por compartir sus conocimientos y por su dedicación en la formación de buenos profesionistas.

Todos ustedes fueron testigos del esfuerzo y del tiempo invertido en este proyecto que es mi persona, dedico en gran parte a ustedes este logro.

CONTENIDO

CONTENIDO	4
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
INDICE DE ECUACIONES	9
Acrónimos	10
1. INTRODUCCIÓN	11
ABSTRACT	13
2. EL PETROLEO CRUDO Y SUS CARACTERÍSTICAS	14
2.1 El Petróleo en la Humanidad.....	14
2.1.1 Definición	15
2.2 Características	15
2.3 Clasificación del Petróleo Crudo	18
2.4 Producción de Petróleo Crudo	20
3. TANQUES ATMOSFERICOS DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO	22
3.1 Tanques de Almacenamiento.....	23
3.2 Tanques Atmosféricos de Almacenamiento	25
3.2.1 Tanques de Almacenamiento de Techo Fijo	25
3.2.2 Tanques de Almacenamiento de Techo Flotante.....	27
3.2.3 Tanques de Techo Flotante con Domo Autosoportado	29
3.2.4 Tanques de Diafragma Flotante Interno	30
3.3 Sello Perimetral de Techos Flotantes	32
3.3.1 Sello Perimetral de Zapata Mecánica.....	33
3.3.2 Sello Perimetral Relleno de Líquido	34
3.3.3 Sello Perimetral con Relleno Elástico	34
3.3.4 Accesorios para Techos Flotantes	35
3.3.5 Accesorios para Diafragmas Flotantes Internos.....	39
3.4 Almacenamiento de Líquidos Inflamables y Combustibles.....	40
3.5 Pruebas para Tanques	41
3.6 Fallas en los Tanques de Almacenamiento	42
3.6.1 Falla en la Base y la Pared del Tanque	42
3.6.2 Falla por Colapso	42
3.6.3 Falla por Pandeo.....	43
3.6.4 Colapso del Anillo Superior del Tanque	44
3.6.5 Falla por Asentamiento del Suelo	44
3.6.6 Falla en la junta Techo-Envolvente	45
3.7 NORMATIVIDAD	45
3.7.1 NORMA API-650	45
4. TEORIA DEL FUEGO	47
4.1 ¿Que es el Fuego?	47

4.2. Teorías del Fuego	47
4.3. Clasificación de los Fuegos	49
4.3.1 Líquidos combustibles.....	51
4.3.2 Líquidos Inflamables.....	51
4.4 Como evitar que comience el fuego	51
4.4.1. Eliminación del combustible	51
4.4.2. Eliminación del oxígeno	52
4.4.3. Eliminación del calor y fuentes de ignición.....	52
4.5 Incendios de tanques de almacenamiento en la industria petrolera	53
4.6 Escenarios de incendios en los tanques de almacenamiento.....	53
4.7 Explosión	56
5. EL COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO.....	57
5.1 Introducción	57
5.2 Localización de Tanques Atmosféricos de Almacenamiento	57
5.2.1 Distancias Mínimas entre Tanques de Almacenamiento.....	58
5.2.2 Control de Derrames en Tanques de Almacenamiento.....	59
5.2.3 Frentes de Ataque	62
5.3 Explosiones en tanques de almacenamiento.....	63
5.4 Protección contra incendio de tanques atmosféricos de almacenamiento	64
5.4.1 Riesgos de Incendio.....	65
5.4.2 Causas de Incendios en Instalaciones Petroleras.....	66
5.4.3 Sistemas Fijos Contra incendio.....	67
5.4.4 Sistemas Semifijos Contra incendio	68
5.4.5 Detección de Incendios y Alarmas	68
5.4.6 Protección Contra incendio a Base de Inyección de Espuma	70
5.4.6.1 Espuma	71
5.4.6.1.1 Concentrado de Espuma	71
5.4.6.1.2 Concentrado de Espuma Resistente al Alcohol.....	72
5.4.6.1.3 Concentrado de Espuma Productor de Película Acuosa (AFFF).....	72
5.4.6.1.4 Concentrado de Espuma Proteica Formadora de Película Acuosa (FFFP)	73
5.4.6.1.5 Concentrado de Espuma Fluoroproteínica	73
5.4.6.1.6 Concentrado de Espuma de Media y Alta Expansión.....	73
5.4.6.2 Aplicación Superficial de Espuma.....	74
5.4.6.3 Aplicación Subsuperficial de Espuma.....	76
5.4.6.3.1 Producción de Espuma a Presión (Tipo alta contrapresión o forzada).....	77
5.4.6.4 Métodos de Producción de Espuma.	78
5.4.6.4.1 Generadores de Espuma - Tipo Aspirador	78
5.4.6.4.2 Generadores de Espuma- Tipo Ventilador	78
5.4.6.5 Aplicación de Espuma Mecánica por medio de Monitores Móviles.....	78
5.4.6.6 Método de Dosificación para Sistemas de Espuma de Aire.....	79
5.4.6.6.1 Bomba de Espuma Acoplada a un Motor de Agua.	80
5.4.6.6.2 Eductor de espuma de boquilla.	80

5.4.6.6.3 Dosificación Regulada	80
5.4.6.6.4 Tanque Proporcionador a presión.	80
5.4.6.6.5 Dosificador alrededor de la Bomba.....	80
5.4.7 Protección Contra incendios por Enfriamiento de Agua.....	80
5.5 Venteo en Tanques Atmosféricos de Almacenamiento	83
6 FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE	85
6.1 Espumación desbordante “boilover”	87
6.1.1 Hot Zone Boilover.....	87
6.1.2 Hot Zone	90
6.1.3 Thin Layer Boilover	90
6.2 Velocidad de Combustión	92
6.2.1 Velocidad del viento.....	97
6.3 Geometría de la Llama	99
6.3.1 Longitud de la Llama	99
6.4 Hot Zone Boilover.....	103
6.5 Modelo Teórico Hot Zone Boilover	111
7. MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO ...	117
7.1 Causas de Incendio.....	117
7.1.1 Apoyos inadecuados	117
7.1.2 Mala Ventilación.....	118
7.1.3 Mantenimiento Inadecuado del Tanque.....	118
7.1.4 Fractura de Tuberías y Válvulas	118
7.1.4.1 Cargas Estáticas	118
7.1.4.2 Riesgos de Rayos	119
7.1.5 Propagación de incendios	120
7.1.6 Otros Riesgos.....	120
7.2 Evaluación del Riesgo.	121
7.3. Análisis de Riesgos para la Seguridad del Proceso	122
7.3.1 Toma de decisiones.....	123
7.4. Análisis de Riesgos para Tanques de Almacenamiento	124
7.5 Medidas Preventivas	124
7.5.1 Color exterior en tanques de almacenamiento	124
7.5.2 Señalizaciones para la Identificación de Riesgos de Productos Almacenados.....	127
7.6 Capacitación para Emergencias	130
7.7 Áreas Peligrosas en Tanques de Almacenamiento Atmosférico.....	131
7.8 Prevención de Incendios y Explosiones.....	134
7.9 Reducción de Riesgos	134
7.10 Inspección y Mantenimiento en Tanques de Almacenamiento Atmosférico	137
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	140
8.1 Conclusiones.....	140
8.2 Recomendaciones	142
9. BIBLIOGRAFÍA	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Corte Transversal de un Yacimiento Petrolero	16
Figura 2. Trampa estructural mixta, en anticlinal (derecha) y una falla normal (izquierda).....	17
Figura 3. Esquema de la toma de Registros en un Pozo Petrolero	18
Figura 4. Esquema de Separación de Crudo y llenado de Tanque de Almacenamiento.....	21
Figura 5. Instalaciones de Almacenamiento	23
Figura 6. Selección Preliminar del tipo de Tanque de Almacenamiento y su Código de Construcción.	24
Figura 7. Clasificación general de los Tanques Atmosféricos de Almacenamiento.	25
Figura 8. Tanque de almacenamiento de Techo Fijo.	26
Figura 9. Tanque Atmosférico de Almacenamiento de Techo Fijo	27
Figura 10. Sello tipo metálico.....	28
Figura 11. Tanque de Almacenamiento de Techo Flotante tipo Pontón.	29
Figura 12. Tanque de Techo Flotante tipo Doble Cubierta.	29
Figura 13. Estructura de domo.....	30
Figura 14. Interior de tanque de techo flotante con domo	30
Figura 15. Tanque de almacenamiento soportado por columnas internas.....	31
Figura 16. Tanque de Diafragma Flotante Interno.....	32
Figura 17. Sello Perimetral de Zapata Mecánica.....	33
Figura 18. Sello Primario Montado en Líquido.....	34
Figura 19. Sello Primario Montado en Vapor.....	34
Figura 20. Escotilla de Acceso.	35
Figura 21. Flotador de Medición	36
Figura 22. Puerto de Muestreo.	36
Figura 23. Venteo Perimetral.	37
Figura 24. Drenajes de la Cubierta.	37
Figura 25. Pata de Soporte.....	38
Figura 26. Poste Guía Solido.....	38
Figura 27. Rompe Vacío.....	39
Figura 28. Columna de Soporte.....	39
Figura 29. Escalera.....	40
Figura 30. Desprendimiento de la base y la envolvente del tanque.....	42
Figura 31. Colapso en Tanque Atmosférico de Almacenamiento.....	43
Figura 32. Pandeo “Pata de Elefante”	43
Figura 33. Colapso Anillo superior y Desprendimiento del Techo y la Envolvente.....	44
Figura 34. Asentamiento del Suelo.	44
Figura 35. Desprendimiento Techo- Envolvente.....	45
Figura 36. Triangulo del Fuego.....	47
Figura 37. Tetraedro de Fuego.....	49

Figura 38. Clasificación de Fuego Tipo A.	49
Figura 39. Clasificación de Fuego Tipo B.	50
Figura 40. Clasificación de Fuego Tipo C.	50
Figura 41. Incendio por Fallas en el Sello del Tanque.	54
Figura 42. Incendio por Hundimiento de Techo.....	55
Figura 43. Incendio en tanque de almacenamiento con desprendimiento de techo.	56
Figura 44. Detalles del Muro de Contención de Concreto.	61
Figura 45. Diques Intermedios y Drenajes para Tanques de Almacenamiento Atmosférico.	61
Figura 46. Incendio en Tanque Atmosférico de Almacenamiento.....	65
Figura 47. Ubicación de la Cámara de Espuma en Tanques de Techo Fijo con o sin Membrana Interna.	75
Figura 48. Ubicación de la Cámara de Espuma en Tanques de Techo Fijo con o sin Membrana Interna.	75
Figura 49. Ubicación de la Cámara de Espuma en Tanques de Techo Flotante.....	76
Figura 50. Aplicación Subsuperficial de Espuma Mecánica en Tanque de Almacenamiento.	77
Figura 51. Aplicación de Espuma Tipo III. Técnica de Huellas.....	79
Figura 52. Protección Contra incendio en Tanque Atmosférico de Almacenamiento.....	82
Figura 53. Combustibles que no generan (a) y que generan (b) hot zone.....	88
Figura 54. Velocidad de Combustión en relación al Diámetro del Contenedor o depósito (Hottel 1959).	92
Figura 55. Velocidad de combustión en función del diámetro del contenedor.	97
Figura 56. Propagación de la onda de calor hacia el fondo del tanque.	106
Figura 57. Dependencia de la velocidad de propagación de la onda de calor y la velocidad de combustión con respecto al diámetro del tanque.....	107
Figura 58. Comportamiento del sonido en incendios donde se produce Boilover.....	108
Figura 59. Instalación Experimental del CERTEC.....	110
Figura 60. Variación de la densidad del combustible.....	112
Figura 61. Variación de la Velocidad de las corrientes convectivas con el espesor inicial del combustible (a).....	113
Figura 62. Variación de la Velocidad de las corrientes convectivas con el espesor inicial del combustible (b)	113
Figura 63. Variación de la Velocidad de las corrientes convectivas con el espesor inicial del combustible (c).....	113
Figura 64. Número de Fourier vs Número de Reynolds.....	116
Figura 65. Propagación de Incendio.....	120
Figura 66. Tanques de almacenamiento que requieren radiación solar (negro).....	125
Figura 67. Tanque de almacenamiento que requiere reflejar la radiación solar (blanco).....	125
Figura 68. Placa de identificación de Tanque de Almacenamiento.	126
Figura 69. Rombo de señalización de Riesgos.....	128
Figura 70. Dimensiones Rombo de Identificación de Riesgos.....	128
Figura 71. Áreas Peligrosas en Tanque de Almacenamiento de Techo Fijo.....	133
Figura 72. Áreas Peligrosas en Tanques de Almacenamiento de Techo Flotante.	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del Aceite Crudo según API.....	20
Tabla 2. Clasificación de Tanques de Almacenamiento por su Presión de Operación	24
Tabla 3. Dimensiones de Tanques Atmosféricos de Almacenamiento.....	40
Tabla 4. Localización de Tanques que Almacenan Líquidos que Producen Boil-Over.....	58
Tabla 5. Distancias Mínimas entre Tanques de Almacenamiento	58
Tabla 6. Causas de Incendio según su frecuencia de Riesgos.....	66
Tabla 7. Protección Contra incendio a Tanques de Almacenamiento de acuerdo al producto o contenido.....	70
Tabla 8. Proporción de Concentrados de Espumantes diluidos con Agua.....	73
Tabla 9. Capacidad de Venteo Normal.....	84
Tabla 10. Mecanismo de transferencia dominante en función del diámetro del contenedor.....	95
Tabla 11. Coeficientes de extinción para algunos combustibles.....	95
Tabla 12. Dimensiones del rombo de señalización de riesgos en tanques de almacenamiento....	129
Tabla 13. Escala de Grado de Riesgo.....	129

INDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Gravedad API</i>	19
<i>Ecuación 2 . Velocidad de combustión durante el Boilover.....</i>	87
<i>Ecuación 3. Mecanismo de transferencia de calor.....</i>	93
<i>Ecuación 4. Pérdida de masa del combustible por unidad de área.....</i>	93
<i>Ecuación 5. Velocidad de combustión</i>	94
<i>Ecuación 6. Velocidad de combustión de la zona de transferencia de calor.....</i>	95
<i>Ecuación 7. Velocidad de combustión a diferentes condiciones de viento</i>	98
<i>Ecuación 8. Altura de la llama.....</i>	100
<i>Ecuación 9. Altura de la llama.....</i>	101
<i>Ecuación 10. Efectos del viento sobre la geometría de la llama.....</i>	101
<i>Ecuación 11. Efectos del viento sobre la geometría de la llama.**</i>	101
<i>Ecuación 12. Espesor de la onda de calor en función del tiempo.....</i>	104
<i>Ecuación 13. Espesor de la onda de calor al aparecer Boilover</i>	105
<i>Ecuación 14. Velocidad de corrientes convectivas</i>	111
<i>Ecuación 15. Tiempo característico del boilover</i>	114
<i>Ecuación 16. Número de Prandlt.....</i>	114
<i>Ecuación 17. Número de Fourier</i>	115
<i>Ecuación 18. Número de Reynolds</i>	115

Acrónimos

API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
NFPA	National Fire Protection Association
NRF	Normas de Referencia de Pemex
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
TAA	Tanques Atmosféricos de Almacenamiento
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte

1. INTRODUCCIÓN

Los tanques de almacenamiento son parte fundamental en toda instalación industrial. Las cantidades de líquidos inflamables y combustibles que pueden almacenar, el valor económico tanto del tanque como de su contenido, hacen que en estas áreas se concentre una gran cantidad de energía, de tal manera que los accidentes que puedan ocurrir en estas generan las mayores pérdidas económicas, materiales e incluso humanas que pueden existir en la industria.

Como sabemos, un accidente en tanques de almacenamiento no se limita solo a pérdidas económicas, que causa la pérdida del tanque y su contenido. Existe otro factor de suma importancia y este comienza desde el momento en que se prepara el terreno para la instalación de los tanques de almacenamiento, es decir el impacto ambiental. Las emisiones durante operaciones normales, así como durante un incendio contribuyen a la contaminación atmosférica. Aunque no es tema principal de este trabajo hacer énfasis en el impacto ambiental, se debe tener en cuenta que todo proceso industrial tiene consecuencias ambientales, económicas y humanas.

El fenómeno de espumación desbordante, mejor conocido como “**Boilover**”, es un hecho que puede ocurrir en incendios de tanques de almacenamiento, en el cual el combustible se quema sobre una capa de agua, este hecho puede traer consigo consecuencias trágicas, como ha ocurrido a lo largo de la historia, pero de ellas quizá la más impresionante hasta hoy en día debido a la magnitud de los daños, es la que ocurrió en diciembre de 1982 en Tocoa, Venezuela. Este incendio acabó con todo cuanto estuvo a su alcance, causando la muerte de unas doscientas personas, entre ellos 72 bomberos.

El **boilover** ocurre a consecuencia de un incendio de larga duración en un tanque de almacenamiento, después de cierto tiempo de quemarse el combustible, llega el momento en que se produce un rebosamiento violento por debajo de este, formando una especie de espuma que surge de la mezcla del agua con el hidrocarburo, expandiéndose rápidamente.

Existen dos tipologías de dicho fenómeno, la primera es conocida como **thin layer boilover** o boilover de capa fina y, en el segundo caso tenemos el **hot zone boilover**.

El **thin layer boilover**, se refiere al caso en que el combustible que quema sobre una capa de agua es de espesor pequeño, el estudio de esta tipología de boilover está enfocado principalmente a situaciones en donde se vierte accidentalmente hidrocarburos sobre superficies de agua. La otra posibilidad de que este fenómeno ocurra es durante el combate de incendios de hidrocarburos, ya que al intentar extinguirlos con agua, ésta se acumula por debajo del combustible, existiendo el riesgo potencial de que se produzca boilover.

Por otro lado el **hot zone boilover**, se caracteriza por el gran espesor de combustible que se quema sobre una capa de agua, como es el caso de incendios en los tanques de almacenamiento, este tipo de incendios puede ser de larga duración en depósitos de almacenamiento de crudo que

INTRODUCCIÓN: EL FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

contiene agua, esta agua viene mezclada con los hidrocarburos desde la producción y es en esta primera etapa en donde coexisten los diferentes fluidos. Debido a la diferencia de densidades, el agua se acumula en el fondo del tanque, haciendo posible la existencia de un sistema capaz de desarrollar Boilover si ocurre un incendio. Cuando el fenómeno se manifiesta lo hace con una expulsión violenta de agua y combustible en forma de espuma inflamada hacia el exterior del tanque, pero también se hace acompañar con una fuerte radiación de la llama.

En este trabajo se explica la diferencia entre ambas tipologías, así como las condiciones necesarias para que cada una de ellas pueda ocurrir. Se estudian los casos que ya han sido analizados por diferentes autores, con experimentos realizados para cada una de estas tipologías, para conocer las condiciones necesarias para la existencia de dicho fenómeno.

Se detalla también las condiciones mínimas necesarias para la seguridad de las instalaciones de almacenamiento, de esta manera se pretende tener un trabajo lo más completo posible analizando las causas y las consecuencias de dicho fenómeno, pero al mismo tiempo tener conciencia de las medidas preventivas y correctivas para evitar y combatir los incendios en tanques de almacenamiento, pero poniendo especial atención en el Boilover que generalmente es de consecuencias catastróficas.

ABSTRACT

Storage tanks are fundamental in an industrial plant. The quantities of flammable and combustible liquids that can be stored, the economic value both the tank and its contents, cause these areas to concentrate a large amount of energy, so that accidents may occur in these areas are of the major economic losses, and even human materials that may exist in the industry.

As we know an accident in storage tanks is not limited to economic loss, which causes loss of the tank and its contents. There is another important factor, and this starts from the time they are preparing the ground for the installation of storage tanks, that is to say, the environmental impact. Emissions during normal operations and during a fire contribute to air pollution. Although not the main theme of this paper to emphasize the environmental impact, it should be noted that the process has environmental, economic and human.

The overflowing foaming phenomenon, better known as "boilover" is a fact that fires can occur in storage tanks, in which the fuel burns on a layer of water; this may entail tragic consequences, as has happened to throughout history.

The boilover occurs as a result of long-term fire in a storage tank, after a certain time to burn the fuel, the moment in which an overflow occurs under the violent fuel, forming foam that comes from the mixing water with the oil, expanding rapidly.

There are two types of this phenomenon, the first known as thin layer boilover and in the second case we have the hot zone boilover.

In this thesis we explain the difference between the two types, and the conditions necessary for each to occur. We will study the cases that have already been analyzed by different authors, with experiments performed for each of these types, to meet the necessary conditions for the existence of this phenomenon.

It also outlines the minimum conditions necessary for the safe storage facilities, so it is intended to have a job as complete as possible by analyzing the causes and consequences of this phenomenon, but at the same time being aware of preventive measures and corrective to prevent and fight fires in storage tanks. But paying special attention to the boilover is usually catastrophic.

2. EL PETROLEO CRUDO Y SUS CARACTERÍSTICAS

2.1 El Petróleo en la Humanidad

Actualmente el petróleo es el medio que hace mover al mundo, ya que del petróleo crudo se obtienen combustibles, hules, lubricantes, fertilizantes, medicinas, entre otros. La sociedad del mundo globalizado ha llevado a un crecimiento exponencial el uso de los combustibles derivados del llamado oro negro. Aunque hoy en día se utilizan recursos que son de origen orgánico como los biocombustibles; las llamadas energías renovables, como el sol, el viento, por mencionar algunas, estas quizá nunca lograrán desplazar el uso de los hidrocarburos¹. Por otra parte se realizan investigaciones para desarrollar y fomentar el uso de nuevas alternativas energéticas para disminuir el uso de los combustibles derivados del petróleo, pero la realidad es que aun con todas estas iniciativas de cambio y transformaciones aun no es posible sustituir el uso de los hidrocarburos de manera radical en la humanidad, una de las razones y quizá la más importante son los costos, es decir, no es rentable el uso de energías alternas. Por ejemplo, el uso de los biocombustibles implica la siembra y cosecha de grandes cantidades de caña, jatropha o girasoles para la producción de bioetanol o biodiesel, pero a su vez para poder producir combustibles orgánicos es necesario la disposición de grandes hectáreas de tierra para la siembra lo que provocaría la sustitución de tierra que estaba destinada para la producción de alimentos. Por tal razón el petróleo crudo, así como sus derivados siguen siendo la materia prima que hace mover a la humanidad.

El petróleo es el producto más importante en la dinámica económica de la humanidad y de las industrias de todo el mundo, como ya se mencionó antes, de él se obtienen los productos derivados para el consumo humano, ya que proporcionan calor, luz, así como medicinas, vestido, plásticos, materias primas para construcción, pinturas, gasolinas, lubricantes para maquinaria, por mencionar algunos ejemplos.

Es tan radical la importancia de este recurso no renovable que también ha sido objeto de guerra y desigualdad debido a los inmensos intereses que giran alrededor de este energético, los grandes conflictos bélicos actuales (Estados Unidos, Irak, Irán Libia) son el más claro ejemplo de querer el dominio de este producto.

Por otra parte, en México el petróleo es sumamente importante ya que cerca del 88% de la energía primaria proviene de éste², es la fuente principal de insumos para generar energía eléctrica, así como también permite la producción de combustibles para los sectores de la

¹ Basado en la experiencia internacional, un programa de etanol como combustible puede ser ideado como parte de una transición hacia sistemas de transporte sustentables. No se espera que el combustible etanol desplace completamente a la gasolina del mercado en ningún momento. Por el contrario, el etanol puede alargar los recursos petrolíferos logrando una moderada cuota de mercado y ahorrando gasolina para el futuro.

<http://www.bioenergéticos.gob.mx/descargas/SENER-BID-GTZ-Biocombustibles-en-Mexico-Estudio-completo.pdf>

² <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/petroleo/default.aspx?tema=S>

industria y el transporte. México es un país exportador del petróleo miembro de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), exporta petróleo crudo principalmente a Estados Unidos³, que también es su principal socio comercial debido al TLCAN (Tratado de libre comercio de América del norte) e importamos gasolinas caras debido a la falta de infraestructura para la refinación del crudo en nuestro país y debido también al régimen fiscal al cual es sometido Pemex.

2.1.1 Definición

La palabra “crudo” para la industria petrolera se entiende como el petróleo en su forma natural, es decir que no está refinado o ha pasado por procesos donde se manipule. La palabra petróleo proviene del latín “petra” (piedra) y “óleo” (aceite) que significa aceite de piedra. El petróleo se presenta en la naturaleza en los tres estados de la materia: sólido (bitumen), líquido (crudo) y gaseoso (gas natural).

2.2 Características

El petróleo se forma bajo la superficie terrestre por la descomposición de organismos marinos y en menor medida por organismos terrestres que fueron arrastrados al mar mediante corrientes de los ríos, estos restos de organismos se mezclan con arenas y limos en el fondo de las cuencas marinas. Estos depósitos que son altamente ricos en materia orgánica se convierten en rocas generadoras de hidrocarburos a condiciones de presión y temperatura.

Este proceso comenzó hace millones de años cuando la aparición de organismos vivos en grandes cantidades fue posible, actualmente este proceso se sigue dando y continuará mientras exista materia orgánica que haga posible la formación de hidrocarburos.

A medida que se van acumulando cada vez más sedimentos y materia orgánica en los depósitos la presión y la temperatura sobre los que se encuentran subyacentes va aumentando, además en combinación con precipitados de carbonato, sílice y otros agentes cementantes hacen posible la litificación de las rocas almacenadoras de hidrocarburos. Para que sea posible la existencia de petróleo es necesario tener completo todo un sistema, es decir que existan rocas generadoras, rocas almacenadoras y rocas sello (Figura 1).

- *Rocas Generadoras*: estas son las que contienen la materia orgánica que a condiciones de presión y temperatura transforman la materia orgánica en petróleo.
- *Rocas Almacenadoras*: deben ser porosas y permeables, además de tener continuidad lateral y vertical que permita la movilidad de los hidrocarburos a través de los poros.
- *Rocas sello*: son aquellas que debido a su escasa permeabilidad no permiten la migración o desplazamiento del hidrocarburo, sirviendo como barrera, este tipo de rocas deben tener

³ http://cuentame.inegi.gob.mx/economia/petroleo/exp_imp.aspx?tema=E

PETRÓLEO CRUDO Y SUS CARACTERÍSTICAS

un comportamiento plástico de manera que respondan a los esfuerzos de manera dúctil, esto para evitar que se formen fracturas y estas a su vez puedan ser el medio para que el hidrocarburo pueda migrar.

Figura 1. Corte Transversal de un Yacimiento Petrolero



Fuente: tomada de Inegi⁴

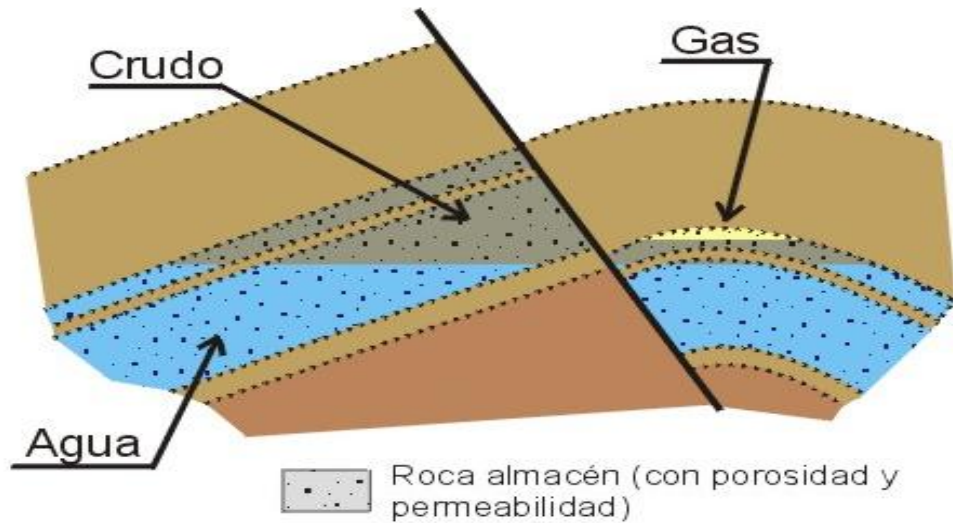
De manera general estos tres elementos en conjunto forman los yacimientos petroleros, los cuales deben ser capaces de formar trampas petroleras (Figura 2) que tienen una determinada forma, tamaño, geometría y cierre al área de drenaje, que permita la acumulación de los hidrocarburos evitando su migración hasta ser explotados.

Los aspectos geológicos (sedimentológicos, estratigráficos y estructurales) definidos para la roca almacenadora son los que se utilizan para determinar las características geológicas de los yacimientos. Todos los trabajos realizados en las etapas de explotación de los yacimientos deben apoyarse en toda la información geológica recabada para poder determinar:

- Tipo de Trampa
- Litología
- Geometría de los Yacimientos
- Límites de los yacimientos
- Heterogeneidad
- Distribución de los Fluidos en el Yacimiento

⁴ <http://cuentame.inegi.gob.mx/economia/petroleo/comoseformo.aspx?tema=E>

Figura 2. Trampa estructural mixta, en anticlinal (derecha) y una falla normal (izquierda).



Fuente: Recursos energéticos de origen orgánico⁵

Otra de las herramientas que son de suma importancia para caracterizar los yacimientos son los registros geofísicos, ya que son una herramienta útil y poderosa empleada para la obtención de información petrofísica de los yacimientos (Figura 3). Los parámetros más importantes obtenidos por medio de registros geofísicos de pozos son: la porosidad, la saturación de hidrocarburos, la permeabilidad, los espesores de las capas permeables y la amplitud de fracturas, estos parámetros pueden ser obtenidos de los registros electrónicos, nucleares y acústicos.

Las propiedades físicas de las rocas son obtenidas con los registros antes mencionados, esto es posible ya que un registro es la representación digital o analógica de dichas propiedades. Un registro de pozo se hace al correr una sonda en la trayectoria del pozo perforado, esta sonda manda la información a través de un cable a un equipo en superficie que es capaz de traducir la información y la registra en una cinta magnética o una película fotográfica.

Una vez descubierto y desarrollado el yacimiento es posible llevarlo a la siguiente etapa que es la "explotación" que prácticamente se refiere a:

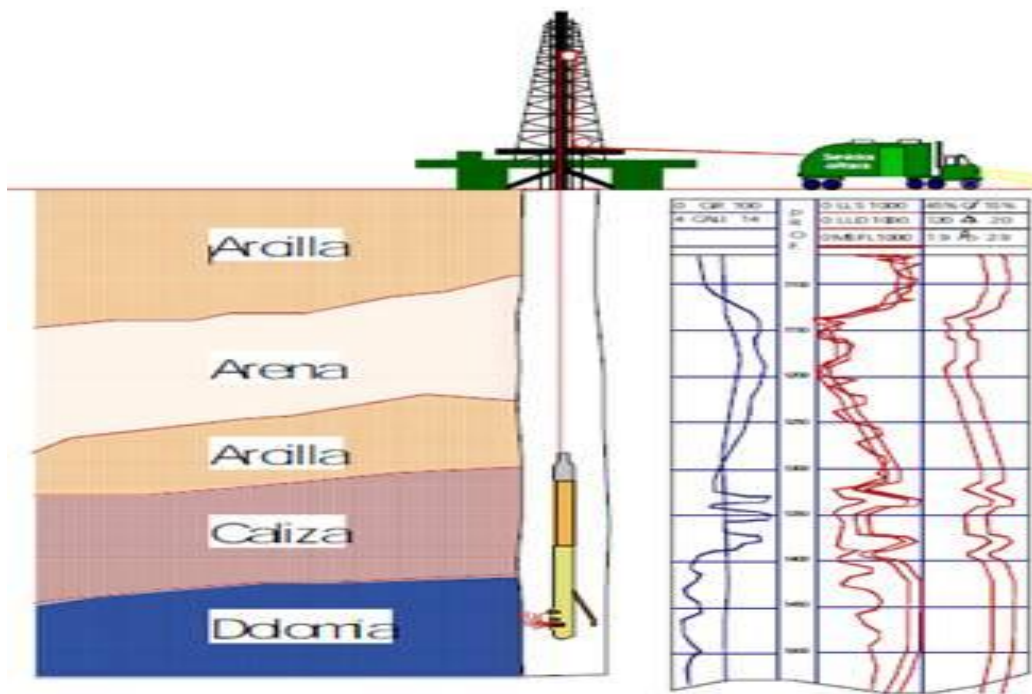
- La evaluación tanto en magnitud como económica de los yacimientos, determinar las reservas de hidrocarburos y los métodos de explotación de los mismos.

⁵ <http://www.uclm.es/users/higueras/yyymm/YM9.html>

PETRÓLEO CRUDO Y SUS CARACTERÍSTICAS

- La planeación del tiempo de explotación de los yacimientos, que nos permita la extracción razonada de los hidrocarburos para poder obtener la mayor cantidad posible, optimizando costos, tiempo y recursos.
- De ser necesario implementar el uso de sistemas artificiales de producción, para estimular la recuperación.
- Diseñar métodos de recuperación secundaria y terciaria o mejorada para lograr el máximo factor de recuperación del yacimiento.
- Diseñar y operar de manera optima las instalaciones de transporte, recolección y tratamiento de los hidrocarburos.

Figura 3. Esquema de la toma de Registros en un Pozo Petrolero



Fuente: Perforación de Pozos⁶

2.3 Clasificación del Petróleo Crudo

La clasificación del petróleo se basa en sus características generales, que pueden ser indicativos de los elementos que lo constituyen, por ejemplo, del número de átomos de carbono o hidrógeno y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo. Existen propiedades que lo caracterizan y determinan al petróleo como combustible, lubricante, ceras o solventes. Uno de los sistemas más utilizados es la gravedad específica o grados API.

⁶ <http://www.monografias.com/trabajos92/registros-geofisicos-aplicados-estratigrafia-secuencias/registros-geofisicos-aplicados-estratigrafia-secuencias.shtml>

Algunos de los conceptos que pueden ayudarnos a comprender mejor de lo que se está hablando son los siguientes:

Densidad (ρ): En una sustancia la densidad está definida como la masa por unidad de volumen y se expresa en gr/cm^3 ó lb/ft^3 .

Densidad específica (G): La densidad específica de una sustancia es la relación de la densidad (ρ) de una sustancia con la densidad de una sustancia de referencia (ρ_{ref}) a condiciones específicas. La sustancia de referencia es generalmente el agua.

Gravedad API ($^{\circ}\text{API}$): La gravedad API en términos de grados API está definida por:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{G} - 131.5$$

Ecuación 1. Gravedad API

Donde:

G: gravedad específica del líquido a 60°F con referencia al agua a la misma temperatura.

Además;

10°API corresponden a G=1

En la siguiente Tabla 1 se muestra la clasificación del Aceite Crudo según el API, donde se ve en forma más concreta las densidades y el ° API.

Tabla 1. Clasificación del Aceite Crudo según API

Aceite Crudo	Densidad (gr/cm ³)	Densidad (grados API)
Extrapesado	>1.0	10
Pesado	1.0 - 0.92	10.0 - 22.3
Mediano	0.92 - 0.87	22.3 - 31.1
Ligero	0.87 - 0.83	31.1 - 39.0
Superligero	<0.83	>39

Para el caso de México tenemos tres tipos de crudo que se producen: el **Maya-22** es un crudo pesado con 22 °API y un peso específico de 0.9199, este constituye casi la mitad del total de la producción de todo el país. El **Istmo-34**, es un crudo ligero con bajo contenido de azufre con una densidad API de 33.6 °API y un peso específico de 0.8535 y este representa casi un tercio de la producción del país. Por último tenemos al **Olmecca-39** es un crudo extra ligero con una densidad de 39.3 °API y un peso específico de 0.8261 y representa aproximadamente la quinta parte de la producción del país.

2.4 Producción de Petróleo Crudo

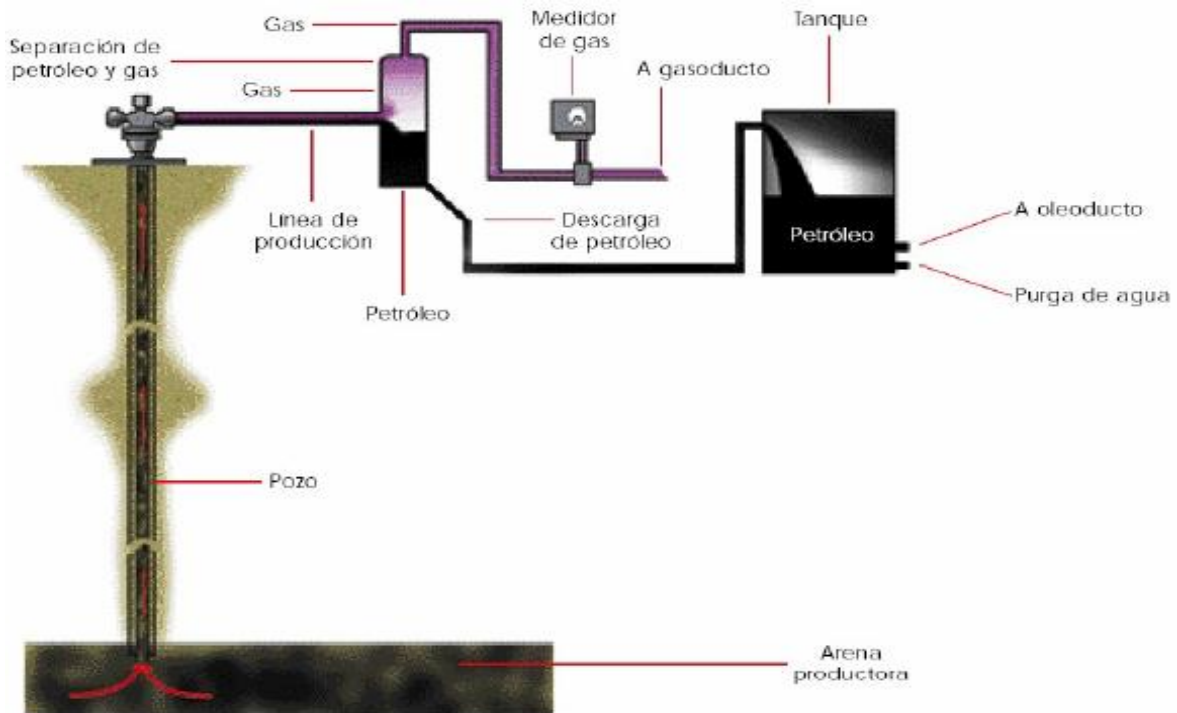
Una vez que un pozo petrolero ha alcanzado la zona de interés en el yacimiento, ya sea en tierra o plataforma marina, se procede a la extracción del crudo y se pone en servicio el pozo. Es en este momento el petróleo es enviado a una batería de separación con la finalidad de separar gases, agua y sólidos producidos. Dichas baterías están formadas por un conjunto de tanques de almacenamiento, tuberías, dispositivos y accesorios que permiten la separación, control, medición y almacenaje temporal los fluidos producidos.

El proceso de separación (Figura 4) consiste en verter los fluidos en un contenedor de cierta capacidad que cuenta con cuatro secciones que son: sección de separación primaria, sección de separación secundaria, sección de separación de niebla y la última que es la sección de almacenamiento del líquido.

En la primera sección se aplica al fluido un cambio en la dirección del flujo, esto puede lograrse instalando una placa desviadora a la entrada, de esta manera es posible separar un gran volumen del líquido. Al someterse a la sección secundaria se logra la separación de gotas de líquido de la corriente de gas mediante la acción de gravedad y la reducción en el diámetro de la de turbulencia.

PETRÓLEO CRUDO Y SUS CARACTERÍSTICAS

Figura 4. Esquema de Separación de Crudo y llenado de Tanque de Almacenamiento



En la sección de extracción de niebla se separan las gotas de líquido que no lograron separarse en las primeras dos secciones, esto se hace mediante el efecto de choque o la fuerza centrífuga, se acumulan gotas de líquido más pequeñas que en conjunto forman gotas más grandes que son drenadas a través de un conducto en la sección de acumulación de líquido, el dispositivo utilizado para este fin se llama extractor de niebla que está constituido por un conjunto de aspas, alambre entrelazado o por tubos ciclónicos. En la última sección se almacena y descarga el líquido, además esta sección debe ser capaz de manejar baches de líquido.

El almacenamiento de los diferentes tipos de crudo, gases, aceites, agua y sólidos se efectúa generalmente en tanques de almacenamiento cilíndricos de fondo plano y techo abovedado que son conocidos como Tanques Atmosféricos de Almacenamiento.

3. TANQUES ATMOSFERICOS DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO

El almacenamiento de hidrocarburos, es una actividad de suma importancia en el manejo y transporte de los mismos, ya que a partir de la extracción de crudo, éste se envía desde el pozo por medio de bombas hasta las baterías de separación. Debido a que el crudo viene mezclado o emulsionado con agua, materias en suspensión y sales inorgánicas, entre otras, el proceso de separación permite que algunos sólidos se puedan decantar debido a su mayor peso específico, el agua acumulada o líquidos acumulados son drenados según su tasa de acumulación.

Las baterías de separación se localizan cerca del cabezal de pozo, o en algún sitio donde sea posible tratar la producción de varios pozos al mismo tiempo, una batería cuanta con colectores para la entrada del hidrocarburo (en ocasiones puede tener hasta 10 colectores), separador de gas, calentadores, tanques de producción general y, tanques de control y medición, bombas, separadores de líquidos, por mencionar algunos. Sin embargo hay otros equipos que no forman parte del **equipo de proceso** (arreglo de toda la batería) y que su función es el almacenamiento de sustancias en grandes cantidades, siendo parte fundamental de toda instalación industrial y, estos son los **tanques de almacenamiento**. En este capítulo se explican las características, usos e importancia de los tanques de almacenamiento.

El almacenamiento es por lo general temporal y de corta duración, durante este periodo el crudo, el agua y el gas natural que fluyen al tanque, dando como resultado una mezcla lodosa en el interior del mismo.

Las cantidades de líquidos inflamables y combustibles que pueden almacenar los tanques, el valor económico de los mismos y de su contenido, hacen que en las áreas donde se encuentran los tanques de almacenamiento, se concentre una enorme cantidad de energía, siendo en éstas áreas los accidentes con mayor impacto en cuanto a pérdidas económicas, materiales y humanas, ya que el valor conjunto de un arreglo de tanques de almacenamiento y su contenido puede llegar a ser superior a la de una planta de proceso completa.

El almacenamiento se puede realizar en tres tipos de instalaciones: superficiales, subterráneas y en buque tanque, la capacidad de cada una de estas instalaciones pueden variar desde unos cuantos metros cúbicos de capacidad hasta miles de ellos.

Existe una gran variedad de tanques y su capacidad es igualmente amplia, hay tanques para almacenamiento de productos líquidos y gaseosos. Las formas también han sido variadas, aunque predominan las formas cilíndricas para el almacenamiento de grandes volúmenes. En cuanto a sus dimensiones, si es posible, los tanques son prefabricados en un taller y posteriormente llevados e instalados en el lugar donde harán su función, mientras que los tanques de mayor capacidad que no pueden ser transportados son armados en el sitio donde permanecerán.

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

El almacenamiento es una actividad de suma importancia para la industria petrolera, y en general las instalaciones de almacenamiento (Figura 5) llegan a ocupar la mayor parte del terreno destinado a las instalaciones de todo el complejo.

Figura 5. Instalaciones de Almacenamiento



Fuente: Instalación de almacenamiento hidrocarburo Barcelona⁷

3.1 Tanques de Almacenamiento

El tipo de tanque que debe utilizarse depende básicamente de la presión de vapor del líquido que se va a almacenar, para ello existen dos grandes clases de tanques de almacenamiento: **atmosféricos y presurizados**, éstos últimos se dividen a su vez en tanques de baja presión cuya presión va de 1 a 15 [psi] y de alta presión de operación mayor a 15 [psi] medidas en el espacio vapor. Los tanques de alta presión almacenan gases y líquidos con altas presiones de vapor, que en condiciones ambientales existen como vapor o gas.

En resumen la clasificación de los tanques de almacenamiento de acuerdo a su presión son: Atmosféricos, de Baja Presión y de Alta Presión, sus características se muestran en la siguiente Tabla 2.

⁷ <http://wikimapia.org/11119704/es/Instalaci%C3%B3n-de-almacenamiento-hidrocarburos-CLH>

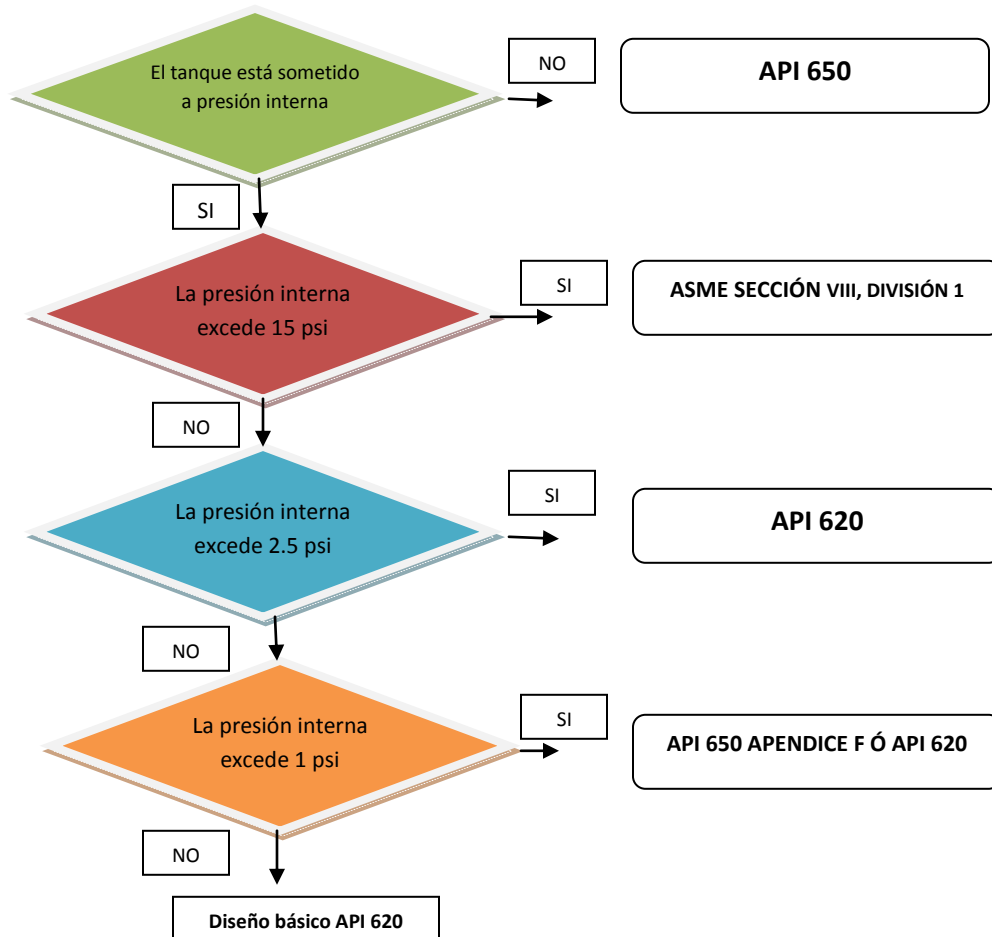
TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

Tabla 2. Clasificación de Tanques de Almacenamiento por su Presión de Operación

Atmosféricos		Presurizados			
Pop= 0 a0.5 psig (0 a 3.5 kPa)		Baja Presión 1 a 15 psig (6.9 a 103.4 kPa)	Alta presión Pop > 15 psig (103.4 kPa)		
Fabricados en Taller	Construidos en Campo	API 620 Cilíndricos Verticales	ASME Sección VIII Div.1		
API 12F UL142 API 650 (Apéndice J hasta 6m de D)	API 650 - De techo fijo - De techo flotante - De diafragma flotante interno		Esféricos	Cilíndricos	
			Horizontales		Verticales
No se pueden utilizarse como tanques presurizados		Pueden utilizarse como tanques de baja presión			
		Pueden utilizarse como tanques atmosféricos			

El siguiente diagrama de flujo (Figura 6) es utilizado como uno de los primeros pasos para la selección adecuada del tanque de almacenamiento, que debe estar construido de acuerdo a los requerimientos de operación y condiciones a las que será sometido. Este diagrama también presenta las reglas y normas para el diseño mecánico del tanque, así como de sus componentes.

Figura 6. Selección Preliminar del tipo de Tanque de Almacenamiento y su Código de Construcción.

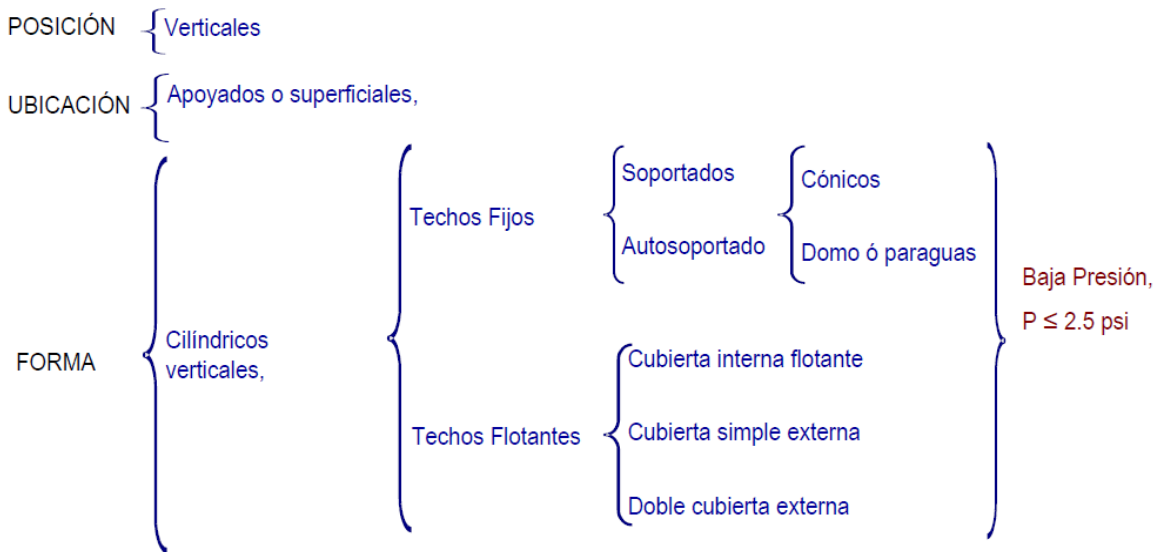


3.2 Tanques Atmosféricos de Almacenamiento

La norma API-650 es utilizada para el diseño y construcción de tanques cilíndricos verticales de acero no refrigerado, soldados en campo, con el fondo uniformemente soportado sobre el suelo para almacenar líquidos que no ebulen a temperatura ambiente ó a presiones de hasta 1psi (6.89 kPa) en el espacio vapor y, a temperaturas de hasta 200°F (93°C); El Apéndice F de la Norma API-650 permite una presión de diseño máxima de 2.5 psi (17.24 kPa); y el Apéndice M permite operar a temperaturas de hasta 500 °F (260°C). Los Tanques de Almacenamiento API-650 se caracterizan por contar un una junta frágil en la unión de la pared del tanque con el techo fijo (cuando tiene), de tal manera que esta unión es la primera que falla en caso de una sobrepresión interna que generalmente es ocasionada por una evento de fuego externo.

La clasificación general de Tanques Atmosféricos de Almacenamiento (TAA) se puede hacer de la siguiente manera:

Figura 7. Clasificación general de los Tanques Atmosféricos de Almacenamiento.



3.2.1 Tanques de Almacenamiento de Techo Fijo

Los tanques de almacenamiento de techo fijo (Figura 8) son utilizados para almacenar líquidos con una presión de vapor menor a 1.5 psi (10.34 kPa). Consisten en una pared cilíndrica de acero, con un techo de forma cónica, plana o de domo. Se pueden fabricar prácticamente en cualquier tamaño, aunque los costos de la estructura aumenta conforme al diámetro, por esta razón el volumen de estos tanques normalmente no excede los 200,000 bbl (31,800 m³) en México.

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

Figura 8. Tanque de almacenamiento de Techo Fijo.

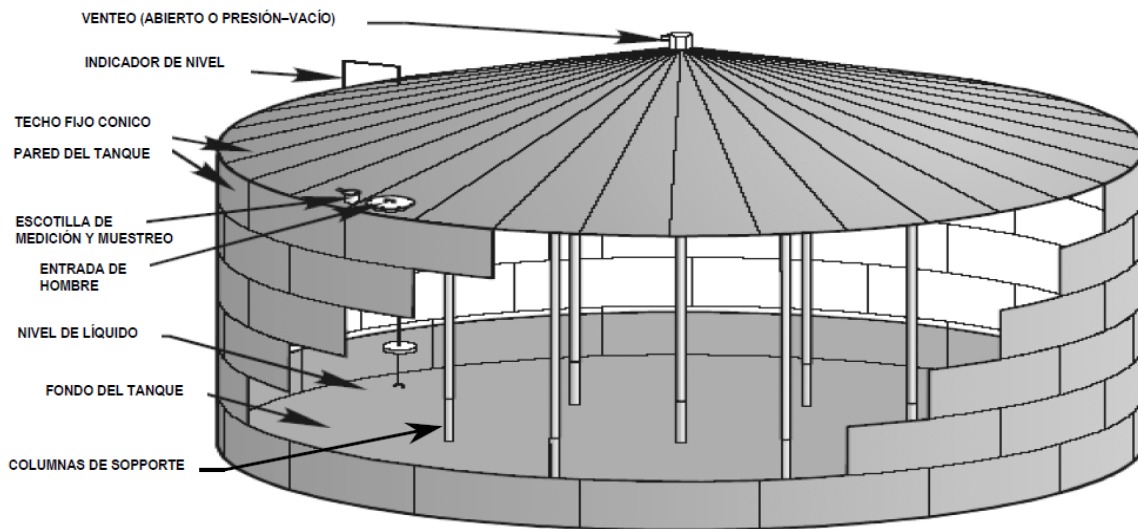


Fuente: Tomada de <http://www.imasa.com/es/porta1.do?IDM=93&NM=3>

El techo fijo no tiene ninguna posibilidad de movimiento, el fondo plano del tanque se encuentra descansando sobre una base cimentada de arena o grava triturada, este tipo de tanque de almacenamiento posee varias válvulas de venteo, las cuales permiten la salida de los vapores que se forman continuamente en su interior, estas válvulas de alivio son esenciales ya que este tipo de tanques de techo fijo no están diseñados para soportar sobrepresiones.

Estos tanques son contruidos con placas de acero, las cuales están unidas entre sí por medio de soldadura. Éste tipo de tanques puede contar con venteo atmosférico o a presión –vacío, este ultimo permite que el tanque opere ligeramente a presión o vacío interno, lo cual permite la emisión de vapores ante cambios pequeños de presión, temperatura o nivel del líquido. Este diseño es el mínimo aceptable para el almacenamiento de líquidos.

Figura 9. Tanque Atmosférico de Almacenamiento de Techo Fijo



3.2.2 Tanques de Almacenamiento de Techo Flotante

Consisten en una pared de acero cilíndrica, con un techo que flota sobre la superficie del líquido almacenado y que consiste de una cubierta, accesorios y un sistema de sellos perimetral. Son utilizados para almacenar líquidos en los cuales las temperaturas de los vapores van desde 1.5 hasta 44 psi ($0.105 - 3.09 \text{ kg/cm}^2$) con capacidades de hasta 500,000 bbl (79,500 m³) en México. En la norma API-650 se hace referencia a los requerimientos de diseño y materiales para la construcción de estos tanques.

Los tanques de techo flotante tienen gran aceptación debido a que reducen las pérdidas por vaciado y llenado, esto se logra ya sea eliminando o manteniendo constante el espacio destinado a vapores, arriba del nivel del líquido. Los techos flotantes se desarrollan como una opción efectiva, durable y de diseño ligero para el control de emisiones. En este tipo de tanques la cubierta sube y baja con el nivel del líquido y como ya se mencionó están equipados con un sello perimetral que está unido al perímetro de la cubierta y que hace contacto con la pared del tanque, con el propósito de reducir las pérdidas por evaporación de líquido almacenado, sin embargo hay ocasiones en que quedan espacios anulares entre el sello perimetral y la pared del tanque, ya que existen deslizamientos del sello contra la pared cuando hay cambios en el nivel del líquido.

El sello entre la pared y el techo móvil (Figura 10) se logra con unas zapatas que están presionadas contra la pared por medio de resortes o contrapesos con una membrana flexible atada entre la zapata y la cubierta del techo. Actualmente las compañías petroleras establecen estos dispositivos como equipo estándar para el diseño, construcción, reparación o conversión de tanques existentes, ya que las exigencias ambientales indican la reducción de emisiones de vapores a la

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

atmósfera, es por esta razón la importancia de los tanques de almacenamiento de techo flotante, debido a su alta eficiencia en la disminución de pérdida de vapores.

Figura 10. Sello tipo metálico

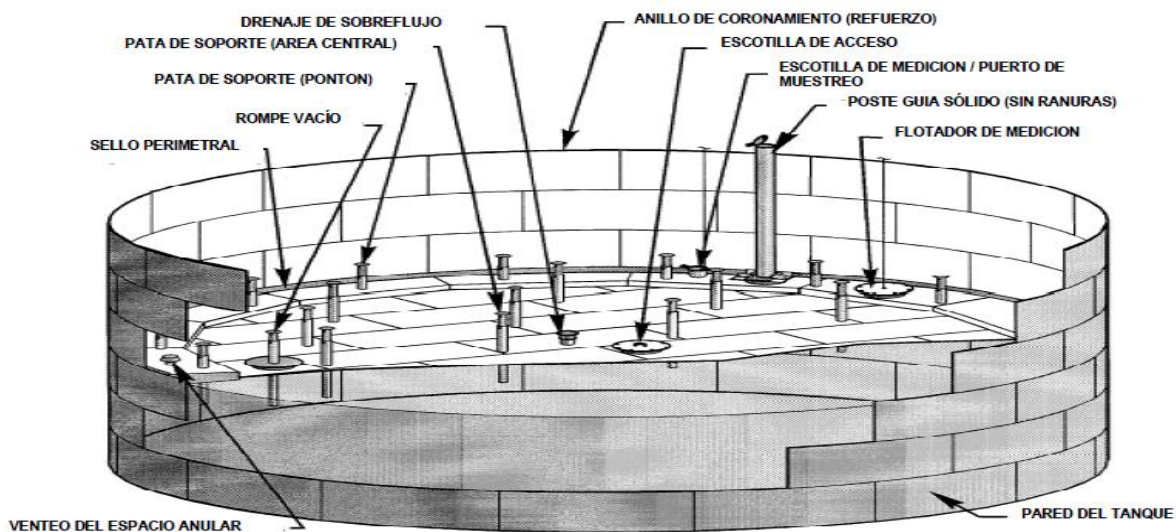


Fuente: Tomada de <http://isiven.exalcor.com/default4d52.html?caso=11&idrev=24&idsec=248&idart=653>

Los techos flotantes son equipos con accesorios que penetran la cubierta y desempeñan funciones operacionales. Los techos flotantes son diseñados de tal manera que las pérdidas por evaporación se limiten a las emisiones en el sello perimetral, a las causadas en los accesorios en la cubierta y al líquido expuesto en las paredes del tanque. En las siguientes figuras (Figura 11 y Figura 12) muestran los techos flotantes más utilizados en la industria

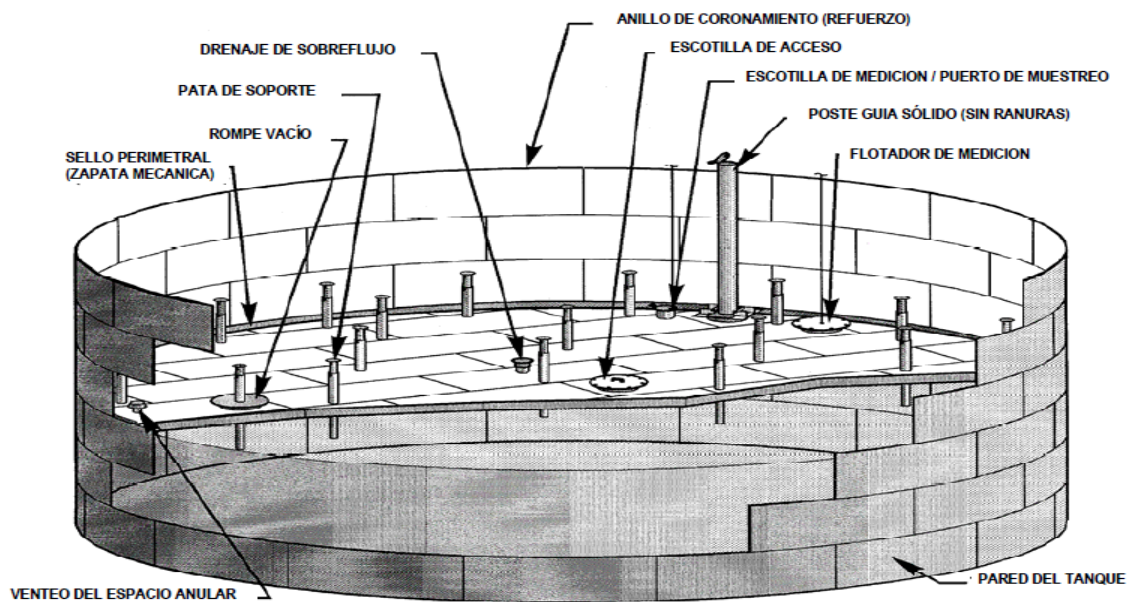
TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

Figura 11. Tanque de Almacenamiento de Techo Flotante tipo Pontón.



Los tanques tipo Pontón son algunas variantes de los tanques de techo flotante.

Figura 12. Tanque de Techo Flotante tipo Doble Cubierta.



3.2.3 Tanques de Techo Flotante con Domo Autoportado

Estos tanques, además de contar con techo flotante, tienen también un techo fijo en forma de domo, esta variante de tanque es el resultado de adicionar un domo a un tanque de techo

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

flotante, la función del domo es únicamente evitar el efecto del viento. El tipo de domo más utilizado es el de aluminio auto-soportado remachado.

Figura 13. Estructura de domo



Figura 14. Interior de tanque de techo flotante con domo



Fuente: Tomada de http://www.hmttank.com/es/Products_Floating%20Roofs_Aluminator%20RC.htm

Estos tanques tienen venteo libre en la parte superior del domo, sin embargo, los accesorios y funciones del tanque son exactamente iguales a los tanques de techo flotante.

Existen casos en donde el techo flotante es remplazado por un diafragma flotante, éste dispositivo es mucho más ligero, en este caso, el tanque se considera como **Tanque con Diafragma Flotante Interno** y se explica a continuación.

3.2.4 Tanques de Diafragma Flotante Interno

Son tanques de techo fijo con un diafragma flotante en su interior, existen dos tipos básicos: los primeros son tanques soportados con columnas internas (Figura 15 y Figura 16) y los otros son tanques con techo fijo auto-soportado. En operación el diafragma se mueve verticalmente sobre el nivel del líquido, es decir conforme el nivel del líquido incrementa o disminuye este diafragma se moverá a la par con el líquido, también existe otra variante y son los llamados sobre pontones

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

que son del tipo no contacto. Los diafragmas de tipo no contacto son los más comunes, su construcción consiste en una cubierta y un armazón de aluminio, soportados sobre el líquido por pontones tubulares de aluminio, este tipo de cubiertas usualmente tienen uniones soldadas por lo cual no presentan uniones en la cubierta flotante.

Figura 15. Tanque de almacenamiento soportado por columnas internas

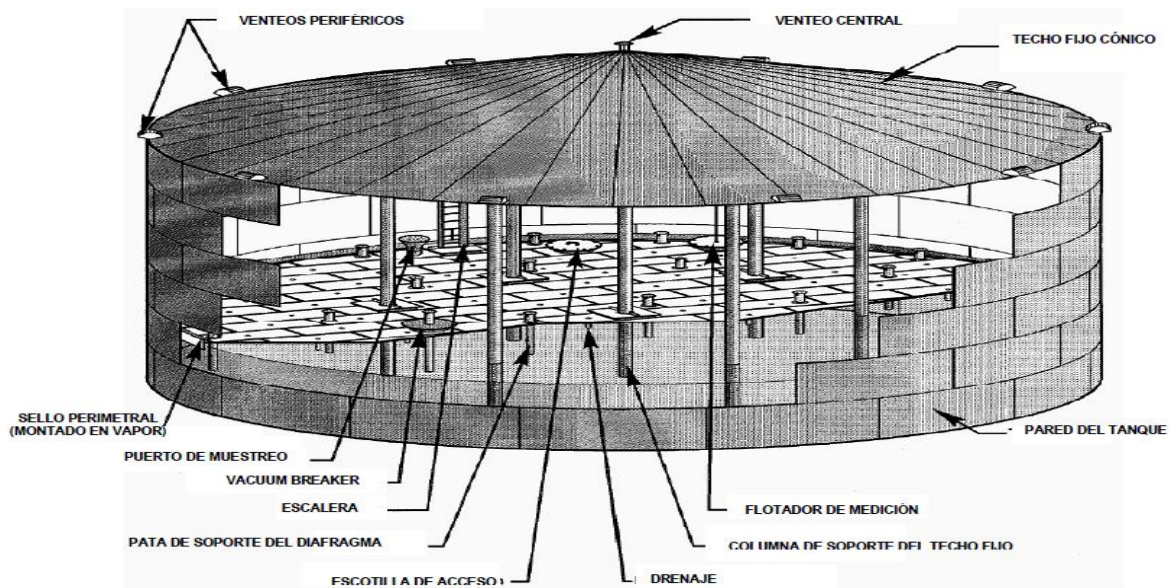


Fuente: Tomada de <http://www.baillietank.com/IFR.htm>

La instalación de venteos minimiza la acumulación de vapores en concentraciones que se aproximen a la inflamabilidad, sin embargo, un tanque con diafragma flotante interno que no está libremente venteado, es considerado un tanque de baja presión, debido a que existe continuamente sobrepresión o vacío interno por ligero que éste sea.

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

Figura 16. Tanque de Diafragma Flotante Interno.



La construcción de Tanques de Almacenamiento debe estar estrictamente apegada a las normas establecidas por el API. El material con el cual están contruidos debe tener características tales que resistan a: la corrosión, el intemperismo, la tensión y la presión. En la industria se han fabricado tanques de diferentes materiales que van desde madera, plástico, concreto, aluminio y los de acero inoxidable. Se han construido de capacidades diferentes, y su fabricación esta en base a: el tipo de fluido que van a almacenar y a los volúmenes que manejaran, entre otros aspectos. Los tanques de mayor uso son los contruidos de acero inoxidable, la coraza de estos tanques se construye con láminas de acero, que puede ser atornilladas, soldadas o remachadas. La construcción del techo es similar al de la coraza. Las laminas pueden ser unidas de tres formas: a plomo, con soldadura y tornillos con traslape telescopiado. La soldadura puede ser de dos tipos: vertical para resistir la presión hidrostática del tanque y horizontal para soportar la compresión del mismo peso del tanque.

Las paredes del tanque deben ser perfectamente herméticas de tal forma que se impida la formación de bolsas y acumulación de líquido en su interior. Deben tener destinado un volumen para líquido y otro para vapores, éste último no debe exceder el 20% de la capacidad total del tanque, deben considerarse un nivel máximo de llenado y un nivel mínimo de vaciado. La capacidad del tanque depende de la cantidad y tipo de fluido que se va a almacenar, así como de su volatilidad y su presión de vapor.

3.3 Sello Perimetral de Techos Flotantes

El sello perimetral es un dispositivo colocado entre la pared del tanque y el perímetro del **techo flotante**, puede ser del tipo primario (Figura 18) o secundario (colocado sobre el primario), este

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

Este sistema permite el libre movimiento del techo flotante dentro del tanque cuando cambia el nivel del líquido. Los diseños básicos del sello perimetral para tanques de techo flotante son de zapata mecánica, tubo elástico relleno de líquido o relleno de espuma elástica.

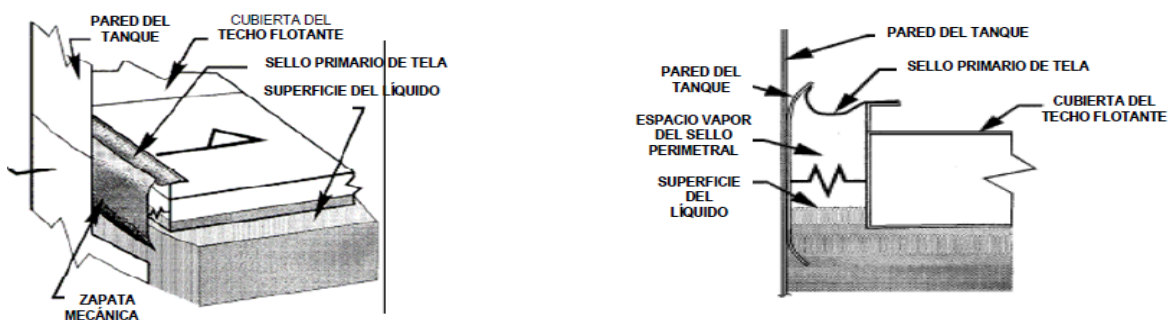
Algunos sellos de los techos flotantes se instalan con protección a la intemperie, lo cual alarga su vida de uso ya que los protegen de los rayos del sol, viento y el polvo. Los sellos perimetrales se diferencian en su diseño por su posición con respecto a la superficie del líquido. Por ejemplo el sello relleno de líquido o de espuma elástica se clasifican como montado en líquido o montado en vapor, dependiendo de su posición, mientras que el sello de zapata mecánica no puede clasificarse como tal ya que parte de la zapata tiene contacto con el líquido y existe un pequeño espacio vapor entre la zapata. Sin embargo las emisiones de vapor a través de la zapata mecánica son muy parecidas a las del sello montado en líquido.

3.3.1 Sello Perimetral de Zapata Mecánica

Este tipo de sello utiliza una banda metálica formada por una serie de hojas de lámina galvanizada ASTM A 924, de calibre 16 (1.5 mm), de 3 a 5 ft (0.91 a 1.52 m) de ancho, que unidas forman un aro que se mantiene firmemente contra la pared del tanque por medio de resortes o contrapesos, este aro constituye el elemento deslizable contra la pared del tanque (Figura 17).

La expansión o contracción del aro ocurre cuando este pasa sobre irregularidades como soldadura o remaches, o cuando el anillo se comprime a intervalos regulares. La parte inferior del anillo se extiende por debajo de la superficie del líquido para confinar el espacio vapor anular entre la zapata y el perímetro del techo flotante.

Figura 17. Sello Perimetral de Zapata Mecánica.

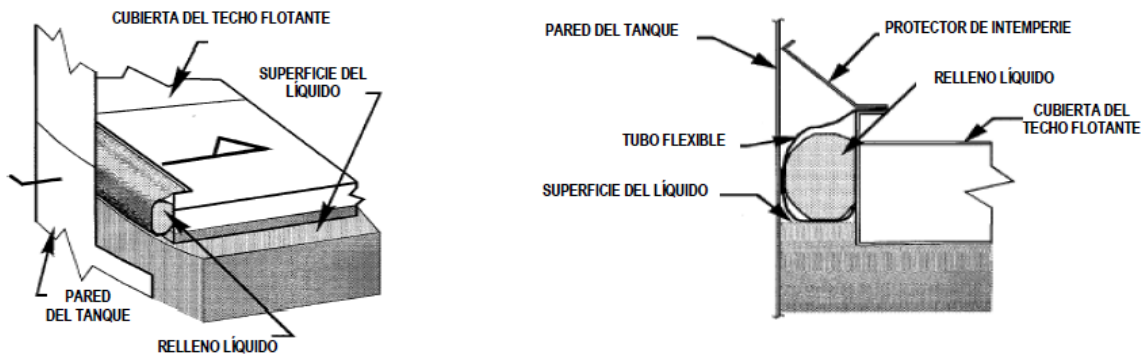


El espacio vapor anular, limitado por la zapata, el perímetro del techo flotante y la superficie del líquido es aislado de la atmósfera uniendo por medio de remaches, tornillos o abrazaderas una tela revestida de material resistente al contenido del tanque, llamada tela de sello primario que se extiende del techo flotante a la zapata mecánica hasta formar una envoltura. Esta tela se instala en la parte superior de la zapata y del techo flotante.

3.3.2 Sello Perimetral Relleno de Líquido

Consiste en una banda de tela resistente, una envoltura rellena de líquido o bien un tubo de polímero flexible de 8 a 10 [in] de diámetro relleno de un líquido, forrada con una tela resistente al desgaste. El líquido utilizado generalmente es un destilado de petróleo u otro que no contamine el contenido del tanque en caso de ruptura, este sello es colocado directamente sobre la superficie del líquido, de esta manera no permite la existencia de un espacio vapor en el área del sello.

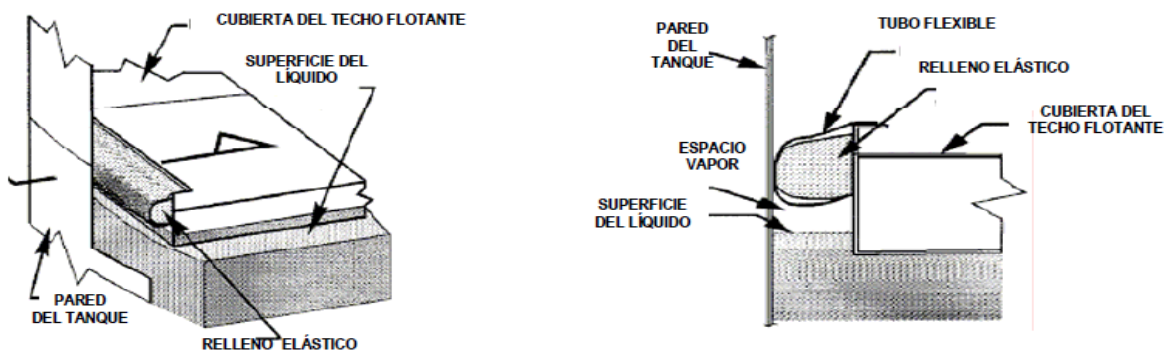
Figura 18. Sello Primario Montado en Líquido.



3.3.3 Sello Perimetral con Relleno Elástico

Es similar al sello relleno de líquido solo que en este caso se utiliza un relleno de una espuma de poliuretano, encapsulada dentro de un tubo de tela de nylon recubierta de poliuretano, la elasticidad de la espuma permite al sello adaptarse a la mas mínima imperfección en las paredes del tanque, este tipo de sello puede ser montado en vapor o en líquido (Figura 19). Estos sellos son instalados en un montaje sobre el perímetro del techo flotante y se extiende alrededor de la circunferencia de la cubierta.

Figura 19. Sello Primario Montado en Vapor.



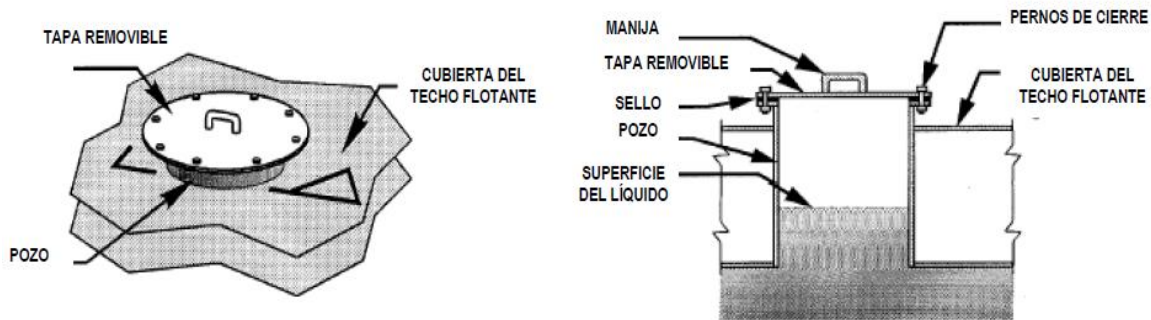
3.3.4 Accesorios para Techos Flotantes

Se instalan accesorios en la cubierta flotante para permitir funciones operacionales y proporcionar soporte estructural. Cuando los accesorios requieren de aberturas en la cubierta representan fuentes de pérdida por evaporación, aunque hay accesorios que no penetran la cubierta. Los accesorios más comunes en los techos flotantes son:

Escotilla de Acceso

Esta permite el paso al personal y materiales a través de la cubierta, tiene una pared vertical sobre el perímetro de la escotilla, sobre la cual descansa una tapa removible que se encuentra remachada con un sello para disminuir las pérdidas por evaporación; para los techos flotantes internos del tipo no contacto, la pared vertical de la escotilla se prolonga sobre la superficie del líquido para sellar el espacio vapor dentro de la cubierta (Figura 20).

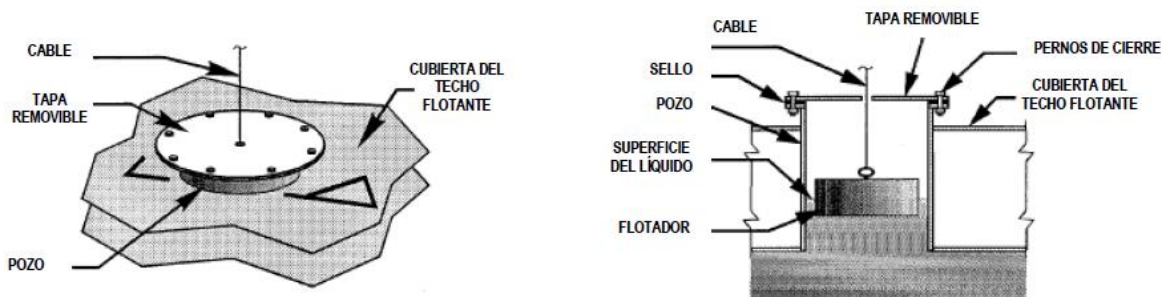
Figura 20. Escotilla de Acceso.



Flotador de Medición

Sirve para indicar el nivel de líquido dentro del tanque, este accesorio permanece sobre la superficie del líquido dentro de un pozo cerrado con una tapa atornillada o con un sello para reducir las pérdidas por evaporación. El flotador se conecta a un indicador en el exterior por medio de un cable guía (Figura 21).

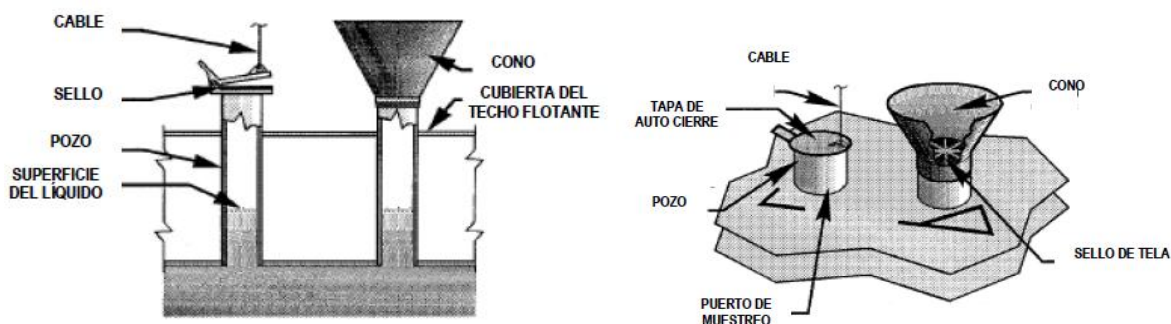
Figura 21. Flotador de Medición



Puerto de Muestreo

El puerto de muestreo, también llamado escotilla de medición consiste en una camisa tubular que está equipada con una cubierta de auto cierre, lo cual permite tomar muestras o mediciones manuales de líquido, es posible colocar un cable en la tapa de auto cierre para poder abrirla desde la plataforma donde se localiza normalmente el puerto de muestreo (Figura 22).

Figura 22. Puerto de Muestreo.

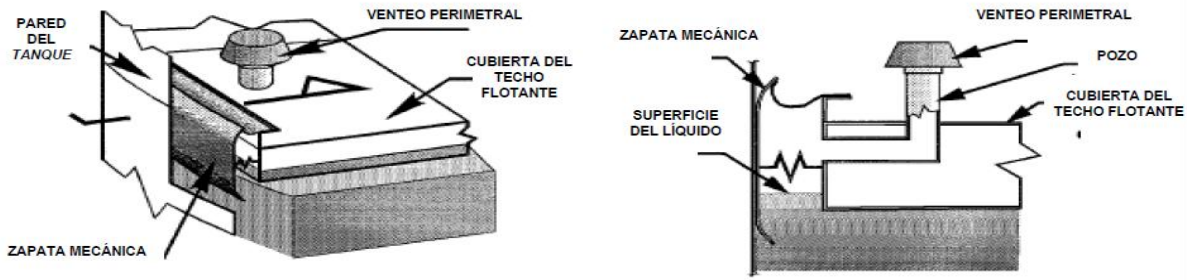


Venteo Perimetral

Este dispositivo (Figura 23) es utilizado en diseños de techo flotante del tipo no contacto y con zapata mecánica, ya que este diseño de techo flotante permite un espacio vapor anular en el perímetro de la cubierta. Este venteo está comunicado con un tubo al espacio vapor para aliviar cualquier sobrepresión o vacío en el espacio anular. Consiste en un tapa con contrapeso sobre una superficie con empaque para prevenir las pérdidas por evaporación por el venteo.

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

Figura 23. Venteo Perimetral.

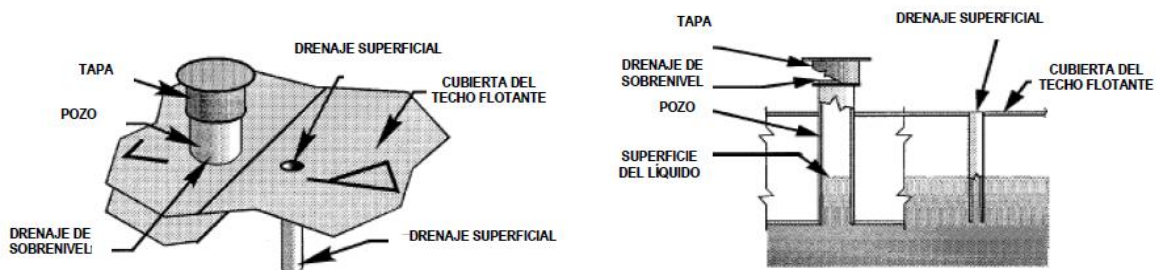


Drenajes de Cubierta

Se utilizan dos tipos (abierto y cerrado) para remover de la cubierta el agua de la lluvia. Los drenajes abiertos pueden estar al ras de la cubierta, o bien contar con una extensión sobre la misma para limitar la cantidad de agua de lluvia que puede soportar el techo flotante. Ambos consisten en tubos que se extienden por debajo de la cubierta, para permitir que el agua se drene través del líquido almacenado, provocando de esta manera que ocurran pérdidas por evaporación (Figura 24).

Por el contrario los drenajes cerrados llevan el agua de lluvia de la cubierta por de una manguera flexible o tubería articulada a través del líquido almacenado hacia el exterior del tanque, lo que no representa emisiones considerables de vapores, en la industria los drenajes se utilizan en combinación (cerrados y abiertos) para drenar el agua de lluvia de la cubierta del techo flotante.

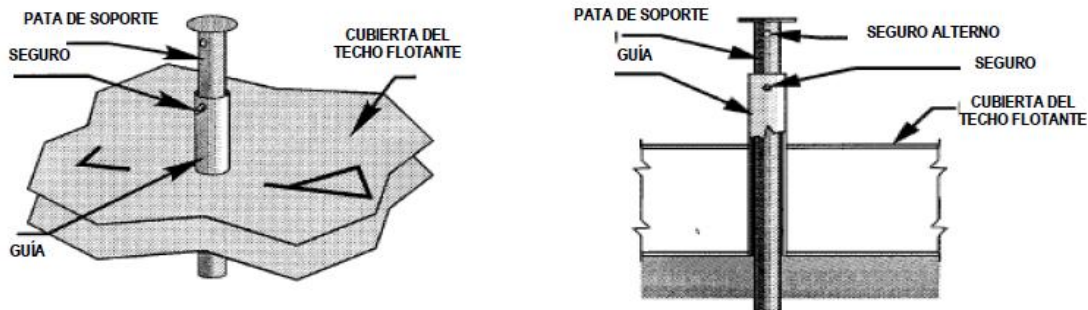
Figura 24. Drenajes de la Cubierta.



Pata de Soporte

Este dispositivo (Figura 25) previene el daño a los accesorios que están por debajo de la cubierta y permite el mantenimiento o limpieza del tanque, manteniendo el techo flotante a una distancia definida con respecto al nivel del piso. Estas patas pueden ser insertadas en la cubierta del techo o bien, pueden estar sostenidas por medio de cables suspendidos del techo fijo.

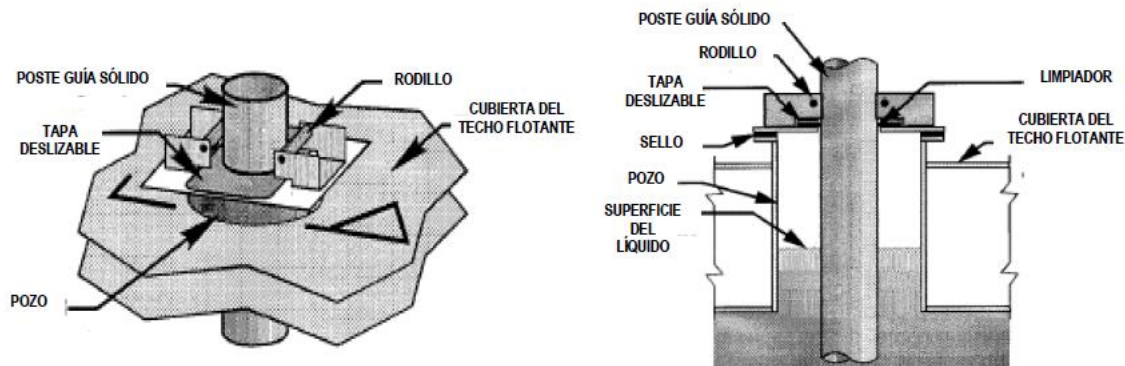
Figura 25. Pata de Soporte



Poste Guía Sólido

Es un dispositivo anti-rotación que está fijo al techo y fondo del tanque, que pasa a través de la cubierta, es utilizado para prevenir movimientos horizontales del techo flotante, así como, proteger los dispositivos que están sobre la cubierta del techo y el sello perimetral. Se puede utilizar para medir, aunque no es muy recomendable ya que presenta diferencias en la presión, nivel y composición del líquido dentro y fuera del poste guía (Figura 26).

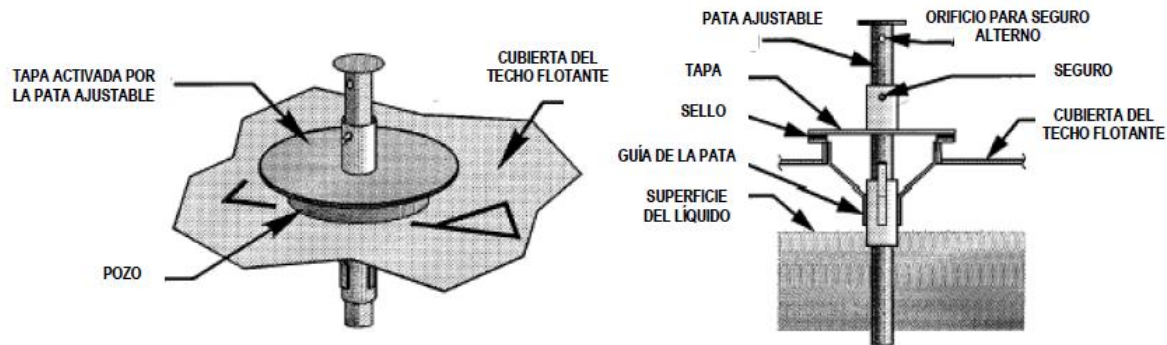
Figura 26. Poste Guía Sólido.



Rompe Vacío

Este dispositivo equilibra la presión del espacio vapor mientras la cubierta del techo flotante baja o sube dependiendo del nivel del líquido del tanque, consiste de un pozo con una cubierta, la cual tiene una pata guiada que llega hasta el fondo mientras el techo flotante baja, cuando hace contacto con el fondo la pata actúa mecánicamente para levantar el techo flotante y de esta manera aliviar el vacío generado por la succión del líquido hacia afuera del tanque (Figura 27).

Figura 27. Rompe Vacío.



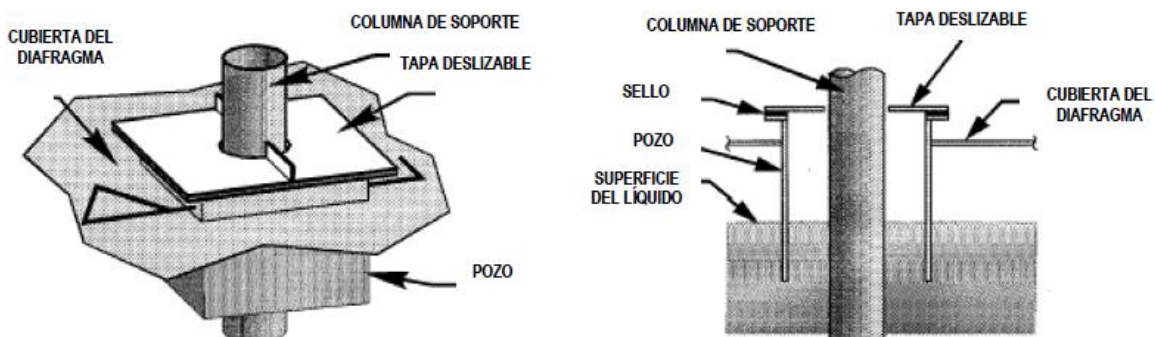
3.3.5 Accesorios para Diafragmas Flotantes Internos

Para los diafragmas flotantes internos muchos de los dispositivos son similares a los utilizados en los techos flotantes, por ejemplo: escotilla de acceso, pata de soporte, rompe vacio y flotadores; sin embargo existen accesorios que son utilizados únicamente en tanques con diafragma flotante interno como son:

Columna de Soporte

Las columnas pasan a través de la cubierta flotante, en diafragmas de tipo no contacto, el pozo se prolonga hasta el líquido: generalmente existe un dispositivo de cierre entre el pozo y la columna de tapa deslizante sobre el pozo o de la camisa de tela, que se adapta a los movimientos de la cubierta sobre el nivel del líquido. Esta tapa deslizante cubre el espacio entre la cubierta y la columna, deslizándose verticalmente cuando la cubierta sube y baja y horizontalmente sobre el perímetro de la pared del pozo, los sellos de camisa de tela se ajustan a los movimientos del techo flotante respecto a la columna (Figura 28).

Figura 28. Columna de Soporte.

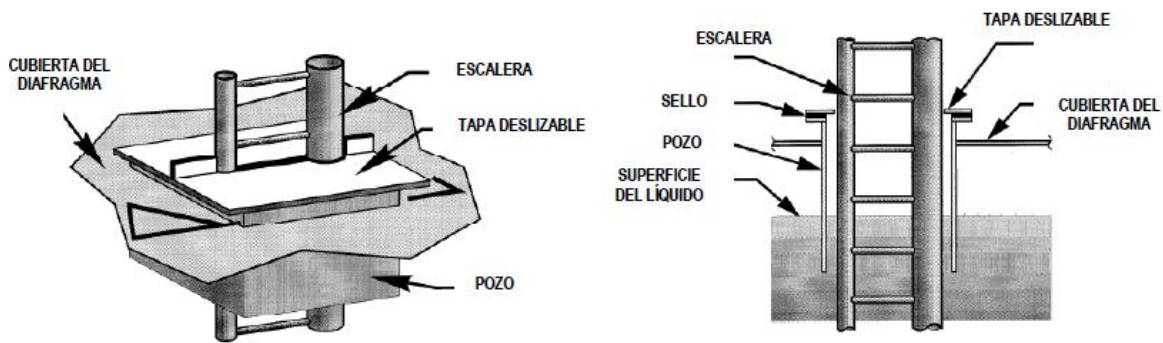


TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

Escalera

Muchos de los tanques son equipados con escaleras que van hasta el fondo del mismo, esto para darle mantenimiento al tanque, la abertura en la cubierta a través de la cual pasa la escalera es de construcción similar a las columnas de soporte de techo fijo (Figura 29).

Figura 29. Escalera



3.4 Almacenamiento de Líquidos Inflamables y Combustibles

Los líquidos inflamables se deben almacenar en tanques atmosféricos verticales de techo fijo con membrana interna flotante, o bien, en tanques atmosféricos verticales de techo flotante. Los líquidos combustibles se deben almacenar en tanques atmosféricos verticales de techo fijo (según recomendaciones de NRF-010-PEMEX-2004). Las dimensiones típicas de los tanques atmosféricos de almacenamiento son indicadas en la siguiente Tabla 3

Tabla 3. Dimensiones de Tanques Atmosféricos de Almacenamiento.

Capacidad del Tanque [Mbbl]	Diámetro [m]	Altura [m]	Perímetro [m]	Superficie del Tanque [m ²]
500	85.344	14.63	268.12	5 720.35
200	54.864	14.63	172.35	2 364.02
150	45.72	14.63	143,63	1 641.68
100	40.843	12.192	128.31	1 310.13
80	36.576	12.192	114.9	1 050.67
55	30.48	12.192	95.75	729.63
30	22.352	12.192	70.22	392.34
20	18.288	12.192	57.45	262.66

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

15	17.678	9.754	55.53	245.44
10	12.954	12.192	40.69	131.79
5	9.652	10.973	30.32	73.13
3	9.144	7.315	28.72	65.66

Las siguientes normas son aplicables para la construcción, diseño, materiales utilizados, mantenimiento y buen funcionamiento de los tanques atmosféricos de almacenamiento.

ASTM	American Society for Testing Materials
API	American Petroleum Institute
NFPA	National Fire Protection Association
STI	Steel Tank Institute
UL	Underwriters Laboratories Inc. (U.S.A)
ULC	Underwriters Laboratories of Canada

En nuestro país se diseña comúnmente bajo las normas API que hacen referencia a los materiales fijados por las normas ASTM, y se siguen las normas de seguridad dadas por la NFPA.

3.5 Pruebas para Tanques

La práctica de pruebas a los Tanques de Almacenamiento antes de comenzar a operar son necesarias, esto ayudara a detectar deformaciones y fugas que se pueden corregir de acuerdo a normas.

La prueba inicial como se conoce en la industria, se realiza al tanque y a sus conexiones después de su instalación y enseguida de ponerse en servicio, con el fin de identificar la hermeticidad, dicho estudio recibe el nombre de “**prueba de hermeticidad**” y se realiza con aire a una presión manométrica de entre 1.5 y 2.5 [psi]. El espacio anular también debe ser sometido a esta prueba con los mismos rangos de presión. Una vez hecha ésta, se determina si el tanque cumple con los requerimientos conforme a la norma para ponerlo en servicio, posteriormente se realizaran pruebas con cierta periodicidad para verificar la integridad del tanque y de las instalaciones.

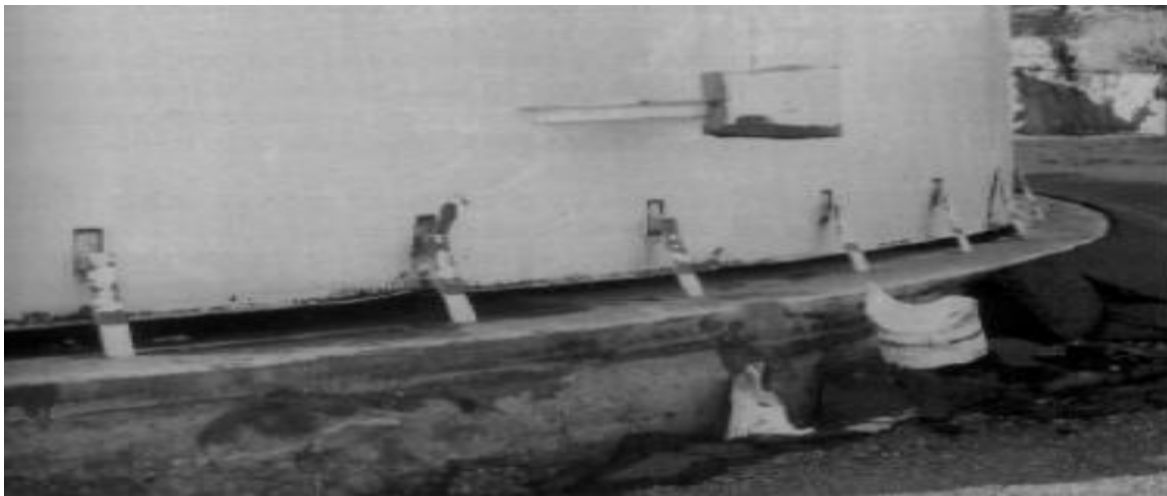
3.6 Fallas en los Tanques de Almacenamiento

Existen diversos factores que causan fallas en los tanques de almacenamiento, que van desde causas debidas a desastres naturales (huracanes, ciclones, sismos, etc.) hasta errores humanos ya sea por mal diseño, construcción inadecuada, mal mantenimiento y operaciones inadecuadas. Las fallas no solo producen pérdidas económicas y daños a las instalaciones, lo más grave es tener que lamentar accidentes a los trabajadores, o incluso pérdidas humanas.

3.6.1 Falla en la Base y la Pared del Tanque

Estas fallas ocurren cuando los vapores o líquidos inflamables que se encuentran en los Tanques Atmosféricos de Almacenamiento explotan, lo que tiene como consecuencia el desprendimiento de la placa del fondo y la envolvente del tanque (Figura 30).

Figura 30. Desprendimiento de la base y la envolvente del tanque



3.6.2 Falla por Colapso

Ésta se origina debido al pandeo de las paredes de la envolvente y por el levantamiento del anclaje, este último puede causar ruptura de las conexiones de las tuberías debido a que hay un desplazamiento del tanque, y puede provocar también la ruptura de la unión de la base y la envolvente del tanque (Figura 31).

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

Figura 31. Colapso en Tanque Atmosférico de Almacenamiento.



Fuente: Tomada de http://lef.uprm.edu/Tank%20failure%20under%20fire/pandeo_t.html

3.6.3 Falla por Pandeo

Este fenómeno es causado por grandes esfuerzos axiales de compresión en la pared del tanque, lo que ocasiona la falla por pandeo en la pared del tanque conocida como pata de elefante (elephant foot Figura 32), esto se debe a que parte del líquido en el tanque tiene un movimiento con un periodo largo, mientras que el resto se mueve rígidamente con el tanque.

Figura 32. Pandeo “Pata de Elefante”.



3.6.4 Colapso del Anillo Superior del Tanque

Se debe al efecto de un fenómeno en el líquido denominado sloshing (movimientos del líquido dentro del tanque debido a movimientos del tanque), lo que ocasiona daños al techo y al anillo superior del tanque. El líquido que se mueve dentro de la superficie libre es el que ocasiona el daño.

Figura 33. Colapso Anillo superior y Desprendimiento del Techo y la Envolvente.



Fuente: Tomada de <http://lef.uprm.edu/Tank%20failure%20under%20fire/reporte.html>

3.6.5 Falla por Asentamiento del Suelo

Este tipo de falla generalmente se presenta en tanques soportados por pilotes, lo que puede llegar a provocar un desprendimiento de la base del tanque con la envolvente del mismo, o incluso daños en el anillo inferior.

Figura 34. Asentamiento del Suelo.



3.6.6 Falla en la junta Techo-Envolvente

La separación de la unión techo-envolvente se origina por las operaciones de llenado y vaciado del tanque, ya que durante el llenado los vapores acumulados en el espacio libre en el interior del tanque son desalojados al ambiente, y con el vaciado se succiona aire hacia el interior del tanque, lo que propicia a una nueva evaporación. Pero no todos los vapores son desalojados, por lo que en cada llenado se genera una acumulación de vapores, que en un determinado tiempo pueden generar una sobrepresión en el techo y pueden llegar a provocar una explosión (Figura 35).

Figura 35. Desprendimiento Techo- Envolvente.



Fuente: Tomada de http://lef.uprm.edu/Tank%20failure%20under%20fire/pandeo_ttechado.html

3.7 NORMATIVIDAD

3.7.1 NORMA API-650

La Norma **API-650** es la norma que fija la construcción de tanques soldados para el almacenamiento de petróleo, se aplica en tanques verticales cilíndricos construidos e instalados a nivel del piso, ya sea con techo cerrado o a cielo abierto, con presiones que no sobrepasen las 2.5 [lb/in²]. Esta norma es para tanques de almacenamiento construidos con láminas de acero soldado para almacenar diferentes volúmenes de hidrocarburos.

La Norma "**Welded Steel Tank for Oil Storage, API Standard 650**" de la *American Petroleum Institute*, abarca desde el diseño, selección de materiales, fabricación, construcción y montaje así como los requerimientos de Tanques de Almacenamiento verticales, cilíndricos, enterrados, cerrados o abiertos del techo. Esta norma únicamente aplica a tanques en donde el fondo es uniformemente soportado y los tanques en servicio no refrigerados que tienen una temperatura

TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO

máxima de funcionamiento de 90°C (200 °F). Incluye también a los tanques donde la presión interna excede el peso de las placas del techo, pero que no rebasen los 18 kPa (2.5 lb/ in²).

Los siguientes apéndices están contenidos dentro de la Norma API-650 en ésta se pueden encontrar a detalle los requerimientos de materiales, diseño, construcción, e instalación para Tanques de Almacenamiento de Crudo (*dicha norma no está contenida en la presente tesis pero puede ser consultada en el American Petroleum Institute*⁸).

- Apéndice A** Bases de Diseño opcionales para Tanques Pequeños.
- Apéndice B** Cimentaciones.
- Apéndice C** Techos Flotantes.
- Apéndice D** Preguntas Técnicas relacionadas con la Norma.
- Apéndice E** Diseño Sísmico Para Tanques de Almacenamiento.
- Apéndice F** Diseño para Presiones Internas Pequeñas.
- Apéndice G** Techos Estructurales de Aluminio Tipo Domo.
- Apéndice H** Techos Flotantes Internos.
- Apéndice I** Protección.
- Apéndice J** Tanques de Almacenamiento Ensamblados en Taller.
- Apéndice K** Ejemplo del Procedimiento alternativo para Calcular el Espesor del Casco.
- Apéndice M** Tanques que operan a Temperaturas Elevadas.
- Apéndice N** Uso de materiales sin identificar.
- Apéndice O** Recomendaciones para Conexiones en las placas del piso.
- Apéndice P** Cargas Externas Permitidas en Tanques de Almacenamiento.
- Apéndice S** Tanques de Almacenamiento de Acero Austenítico.
- Apéndice T** Requerimientos.
- Apéndice T1** Respuestas Técnicas a Preguntas.

⁸ <http://www.api.org/events-and-training/api-u-training/api-u-calendar/2012-events/10-8-12-api-650-datanet>

4. TEORÍA DEL FUEGO

4.1 ¿Que es el Fuego?

El fuego es una reacción química sostenida con generación de luz y calor, en que se combinan materiales combustibles (agentes reductores) con el oxígeno del aire (agente oxidante) en presencia de calor. El fuego es el fenómeno energético cuyas aplicaciones son aprovechadas en todos los campos desde el doméstico hasta el industrial y en sus más variadas formas.

Para producir fuego se necesitan reunir simultáneamente diferentes elementos como oxígeno, materia combustible y suficiente calor para que la combustión se mantenga, la característica principal de estos elementos es que siempre están presentes en la vida cotidiana.

El oxígeno por ejemplo no presenta ni el más mínimo problema para poder tenerlo presente ya que se encuentra en el aire. Cuando un fuego se descontrola se transforma en incendio.

4.2. Teorías del Fuego

Existen dos tipos de teorías del fuego bien definidas que son:

El triángulo del Fuego: Sus tres elementos son el combustible, el oxígeno y el calor y no genera llamas sino solo brasas incandescentes. Se representa por una figura geométrica denominada triángulo del fuego (Figura 36).

Figura 36. Triangulo del Fuego.



Si el triángulo está incompleto no podrá producirse fuego. Para poder erradicar el fuego es necesario apoyarse sobre la base de prevención de incendios que es romper el triángulo del fuego.

En general la reacción de combustión reside en el oxígeno del aire para que exista la combustión, pero no es ésta la única fuente de oxígeno para quemarse sin que el aire ayude, a veces solo se requiere calor. Algunos ejemplos de materiales que solo necesitan calor para producir una combustión están: el celuloide, los explosivos denominados nitroglicerina y nitrocelulosa, la cordita y el nitrato de amoníaco. Por otra parte los materiales inflamables no necesitan reaccionar con el oxígeno para incendiarse, entre estos tenemos: el cloro que es un gas que puede contribuir a la combustión a semejanza del oxígeno que puede reaccionar con el hidrógeno y los compuestos orgánicos como trementina.

Los accidentes con frecuencia ocurren por una falta de atención o descuidos lo que provoca un riesgo de incendio, la posibilidad de que un material se queme depende de sus propiedades físicas y químicas, son pocos los materiales sólidos o líquidos que arden directamente, existe una regla general en que los materiales son inflamables solo en estado de vapor. La formación de vapor de sólidos o líquidos se puede controlar fácilmente con la temperatura de los mismos, para prevenir incendios es necesario conocer la capacidad de los sólidos y líquidos para formar vapores, así como la temperatura requerida para que de dichos vapores se inflamen.

Combustible: Éste puede ser cualquier material ya sea sólido, líquido o gas, la mayoría de los sólidos y líquidos se convierten en vapores o gas antes de entrar en combustión.

Oxígeno: El aire que respiramos está compuesto por un 21% de oxígeno. El fuego necesita una atmósfera de por lo menos 16% de oxígeno. El oxígeno es un comburente, es decir, que activa la combustión.

Calor: Es la energía requerida para elevar la temperatura del combustible hasta el punto en que se despiden suficientes vapores que permitan que ocurra la ignición.

La segunda teoría es **El Tetraedro del Fuego (Fig.4.2)**, sus componentes son: el combustible, el oxígeno, el calor y la reacción en cadena que es la que definitivamente genera y mantiene la llama.

Figura 37. Tetraedro de Fuego.



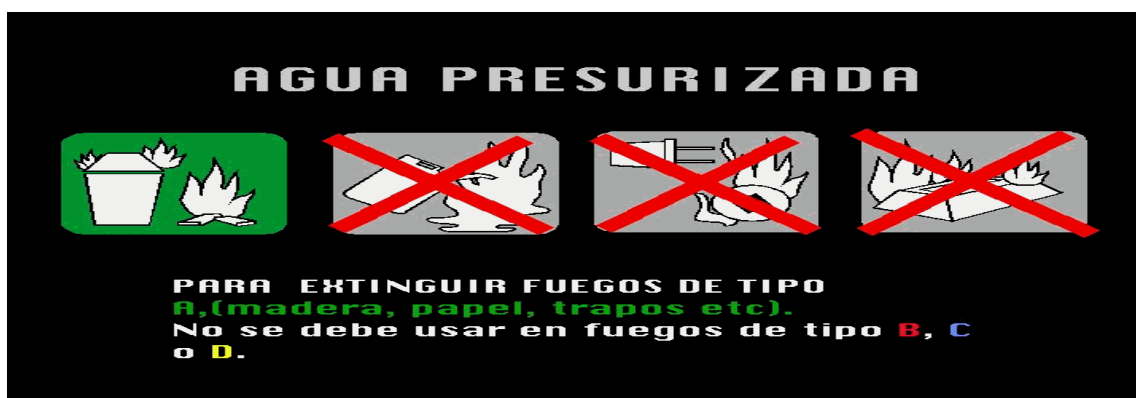
A los tres elementos ya conocidos como el combustible, el oxígeno y el calor se le adiciona la reacción en cadena. Esta hace las veces de un circuito cerrado ya que la combustión genera calor en mayor proporción que el calor disipado, retroalimentando la reacción en cadena con producción de llamas, estas llamas proporcionan una mayor liberación de energía térmica continuando con el ciclo.

Reacción Química (Reacción en cadena): Una reacción química puede ocurrir cuando los otros tres elementos están presentes en las condiciones y proporciones apropiadas, es entonces cuando el fuego ocurre ya que se lleva a cabo una rápida oxidación, es decir un incendio.

4.3. Clasificación de los Fuegos

Clase A. Son los fuegos que involucran a los materiales orgánicos sólidos y que pueden formar brasas, como son: la madera, el papel, la goma, los plásticos y los tejidos. Se apagan usando agua presurizada (Figura 38).

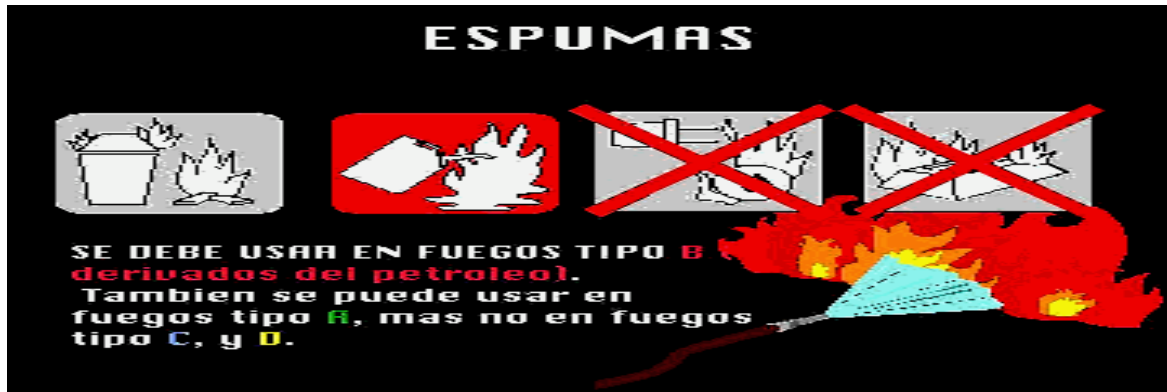
Figura 38. Clasificación de Fuego Tipo A.



TEORÍA DEL FUEGO

Clase B. Son los fuegos que involucran a líquidos derivados del petróleo y sólidos fácilmente fundibles (Figura 39), por ejemplo, el etano, el metano, gasolinas, parafinas y las ceras de parafina. Se apagan bloqueando el mecanismo de reacción, usando polvos químicos secos o CO_2 .

Figura 39. Clasificación de Fuego Tipo B.



Clase C. Son los fuegos que involucran los equipos eléctricos energizados, tales como los electrodomésticos, los interruptores y las cajas de fusibles y, las herramientas eléctricas, para apagarlos se requieren agentes extintores no conductores (Figura 40).

Figura 40. Clasificación de Fuego Tipo C.



Clase D. Involucran ciertos metales combustibles, tales como: el magnesio, el titanio, el potasio y el sodio. Estos metales arden a altas temperaturas y exhalan suficiente oxigeno para mantener la combustión, pueden reaccionar violentamente con el agua y otros químicos y deben ser manejados con cautela. Se apagan con polvos químicos secos especiales.

Para el caso de los tanques de almacenamiento, el fuego **Clase B** es el que puede llegar a existir, producido por la quema de líquidos almacenados. Estos líquidos almacenados pueden ser de dos tipos: líquidos combustibles y líquidos inflamables.

4.3.1 Líquidos combustibles.

Son líquidos con punto de inflamación mayor o igual a 37.8°C (100°F), subdivididos de la siguiente manera:

- **Clase II:** líquidos con punto de inflamación mayor o igual a 37.8°C (100°F) y menor que 60°C (140°F), entre los que podemos citar aceites lubricantes y aceites de proceso.
- **Clase IIIA:** líquidos con punto de inflamación mayor o igual a 60°C (140°F) y menor que 93.3°C (200°F), entre los que podemos citar acetona, alcohol y metanol.
- **Clase IIIB:** líquidos con punto de inflamación mayor a 93.3°C (200°F).

4.3.2 Líquidos Inflamables

Son líquidos con punto de inflamación inferior a 37.8°C (100°F) y una presión de vapor absoluta que no exceda 40 psi, subdivididos de la siguiente forma

- **Clase I:** Incluye los líquidos con punto de inflamación menor que 37.8°C (100°F).
- **Clase IA:** líquidos con punto de inflamación menor que 22°C (73°F) y punto de ebullición menor que 37.8°C (100°F).
- **Clase IB:** líquidos con punto de inflamación menor que 22°C (73°F) y punto de ebullición mayor o igual que 37.8°C (100°F).
- **Clase IC:** líquidos con punto de inflamación mayor o igual a 22°C (73°F) y menor que 37.8°C (100°F).

4.4 Como evitar que comience el fuego

4.4.1. Eliminación del combustible

Prácticamente la eliminación del combustible se hace imposible, debido al amplio uso de materiales inflamables en laboratorios, talleres o incluso en casa, es suficiente contar con 0.5 litros de algún solvente para que haya riesgo de fuego. La basura es otro claro ejemplo de material combustible, pero ésta puede ser eliminada de los lugares donde exista riesgo, por eso es tan

importante dejar limpias y libres de papel, pasticos y telas de las áreas de trabajo y/o zonas de almacenaje que son propensas a incendios.

4.4.2. Eliminación del oxígeno

La eliminación del oxígeno únicamente puede realizarse en circunstancias especiales, ya que el aire contiene suficiente oxígeno para iniciar un fuego. El oxígeno puede ser eliminado de las tuberías o del espacio situado sobre líquidos inflamables en los tanques de almacenamiento utilizando nitrógeno, Bióxido de Carbono y Argón. Esto vuelve el espacio inerte⁹.

Para evitar accidentes y posibilidades de un incendio es recomendable:

- No suministrar combustible a equipos que se encuentren en un espacio cerrado, especialmente si hay una llama abierta de algún horno o un calentador de agua.
- No suministrar combustible a los equipos que aun se encuentran calientes.
- Almacenar líquidos inflamables en recipientes herméticos y a prueba de goteo. Para el caso de Tanques de Almacenamiento, estos deben ser llenados únicamente hasta donde su capacidad máxima de seguridad lo permita.
- Almacenar líquidos inflamables y combustibles lejos de las fuentes de chispa.

4.4.3. Eliminación del calor y fuentes de ignición

La eliminación del calor es desde luego el aspecto más importante en la prevención de fuegos, debido a que el combustible y el oxígeno solo esperan la fuente de calor para comenzar un incendio.

Algunas consideraciones que debemos tomar para la eliminación del calor son:

- La reducción de las chispas eléctricas; estas se reducen utilizando equipo adecuando y accesorios a prueba de fuego.
- Eliminación de la electricidad. La electricidad estática se puede descargar con toda seguridad teniendo una conexión a tierra de todas las herramientas utilizadas o mediante el uso de ropa y calzado antiestático del personal.
- Evitar la eliminación descuidada de cerillos y cenizas incendiadas de los cigarrros o de las pipas en las zonas donde se permite fumar.

⁹ Espacio que no es químicamente reactivo.

4.5 Incendios de tanques de almacenamiento en la industria petrolera

En los inicios de la industria petrolera, los incendios en tanques de almacenamiento eran muy comunes. Conforme la industria evoluciona, la demanda de mejores diseños, construcciones, protección contra incendios y mejoras de varios códigos han sido requeridas. Construir bajo normas del American Petroleum Institute (API) y la National Fire Protection Association (NFPA) son exigencias para los tanques de almacenamiento de crudo. Esto trae como resultado mucho menos incendios en los tanques hoy en día, comparados con los ocurridos en el pasado.

Es interesante notar que aunque la frecuencia de incendios en los tanques de almacenamiento ha disminuido, el tamaño de los tanques ha incrementado, esto significa por tanto una mayor gravedad en caso de que un incendio se presente, los incendios que involucran grandes tanques de almacenamiento pueden ser muy costosos en términos de daño a la propiedad, interrupción de negocios, daños al medio ambiente y la opinión pública. Además el control y la extinción del fuego requiere de una gran cantidad de recursos tanto humanos como herramientas y equipo para acabar con el siniestro. Debido a la posibilidad de pérdida en la industria, se manejan técnicas efectivas para el control y extinción de incendios en tanques de almacenamiento. Esas técnicas deben ser actualizadas continuamente.

Los líquidos inflamables y combustibles se encuentran en diferentes industrias como las refinerías, plantas petroquímicas, plantas de almacenamiento de combustibles, terminales marinas, plantas atómicas, aeropuertos, gasolineras y grandes industrias manufactureras como la automotriz y plantas de acero, todas estas pueden tener también tanques de almacenamiento que contengan líquidos inflamables y/o combustibles, lo cual representa un riesgo potencial de incendio.

Los Tanques Atmosféricos de Almacenamiento son utilizados para almacenar o mezclar líquidos inflamables y combustibles de distintas maneras dependiendo de las instalaciones. Estos tanques tienen un rango de entre 10 a 350 [ft] de diámetro y tienen un promedio de altura de 45 [ft]. Los tanques pueden conservar hasta 1.5 millones de barriles (6 millones de galones, 1 barril = 42 galones) de líquido inflamable o combustibles. Las instalaciones muy grandes pueden tener más de 100 tanques de almacenamiento que pueden variar en cuanto a volumen y tipo de líquido almacenado.

4.6 Escenarios de incendios en los tanques de almacenamiento

Existe cierta relación de riesgo de incendio entre los distintos tipos de tanques de almacenamiento. Estos riesgos varían dependiendo el escenario, que va desde un venteo con fuego hasta un incendio en la superficie del líquido en el tanque de almacenamiento, los incidentes más comunes son: los incendios a causa del sobrellenado (overfill ground fire), incendios por venteo (a vent fire), incendio en el borde del sello (a rim-seal fire), incendio en la superficie del líquido con obstrucción (an obstructed full liquid surface fire), incendios en toda la superficie del líquido sin obstrucción (an unobstructed full liquid surface fire).

Incendios por sobre llenado: Estos incendios resultan por el sobrellenado del tanque, el líquido derramado llega hasta un dique donde puede ser manejado con cierta seguridad, también puede ocurrir por fugas en las tuberías. Algunas veces estas son el resultado de otras causas, como un error del operador o un mal funcionamiento del equipo y son consideradas como las causas menos graves de incidentes. Si la fuga ocurre sin incendio, se debe actuar con precaución y aislar todas las fuentes de ignición. Si se produce incendio, entonces se tratará al fuego como un gran incendio. Los incendios por sobrellenado son comunes en tanques con techo fijo, tanques con techo fijo y diafragma flotante interno y en tanques con techo flotante.

Incendios por venteo: Los incendios por venteo están típicamente asociados con los tanques de techo fijo, como son el de techo cónico y los tanques de techo fijo con diafragma flotante interno. La principal causa es la salida rápida que incendia los vapores que escapan del tanque lo que produce un venteo. Este es el menos grave de los incidentes y puede ser extinguido generalmente con polvos químicos o reduciendo la presión en el tanque.

Incendios en los sellos del tanque: Los incendios en los sellos (Figura 41) constituyen la mayoría de incidentes en tanques de almacenamiento con techo flotante, pero pueden ocurrir en tanques con diafragma flotante Interno. En muchos de estos incendios la principal causa son los rayos, ya que con tanques de techo flotante una carga eléctrica inducida sin dirección puede producir que el rayo golpee la cubierta del techo y se incendien los sellos. Debido a que este tipo de incendios son los más comunes, existe una gran tasa de éxito en su extinción asumiendo que no existe daño colateral tales como una explosión o hundimiento del techo flotante como resultado de la supresión provocada por el incendio. El éxito de la extinción de incendios en los sellos de los tanques, se debe en gran parte gracias a las instalaciones de los sistemas de protección contra incendios, como son las cámaras de espuma. Estos sistemas de protección contra incendios tienen una buena historia en la extinción de incendios, asumiendo un apropiado diseño, instalación y mantenimiento.

Figura 41. Incendio por Fallas en el Sello del Tanque.



Incendio en la superficie del líquido con obstrucción: Pueden ocurrir en tanques con techo fijo, tanques con techo fijo y diafragma interna flotante y techo flotante con domo. Estos tienden a ser un gran reto debido a que el techo o la cubierta no permiten los accesos hacia la superficie que se está quemando. El techo o la cubierta del tanque se pueden hundir por varias razones, como es un incremento en la presión de vapor en el interior del tanque lo cual puede causar que la envolvente del tanque se dañe. Las fallas en los tanques tipo pontón con techo flotante, son generalmente causadas por una obstrucción en las válvulas de drene durante las lluvias o por fallas mecánicas en el cierre del sello, causando que el techo se hunda (Figura 42).

Figura 42. Incendio por Hundimiento de Techo.



Fuente: Tomada de <http://lef.uprm.edu/Tank%20failure%20under%20fire/combustible.html>

Incendios en toda la superficie del líquido sin obstrucción: Este tipo de incendios son relativamente sencillos de extinguir, cuando el diámetro del tanque es relativamente pequeño (menor a 150 ft) y hay suficientes recursos y personal entrenado disponible para combatirlo. El mayor reto en este tipo de incendios involucra tanques de mayor tamaño con diámetros mayores a los 150 ft, debido a que el área de la superficie del incendio requiere de una gran cantidad de recursos y personal disponible capacitado para hacer frente al incendio. Estos incendios pueden ocurrir en tanques con techo fijo, donde la parte frágil es la unión de la cubierta y el techo haciendo que éste se rompa teniendo como resultado de una explosión o cualquier otro evento que provoque sobrepresión, dejando al tanque sin techo. Los tanques con techo flotante también son propensos a este tipo eventos durante condiciones de lluvia extrema, ya que si los drenes del techo se encuentran cerrados esto puede provocar el rápido hundimiento del techo del tanque, dejando al líquido del tanque expuesto en la superficie (Figura 43).

Figura 43. Incendio en tanque de almacenamiento con desprendimiento de techo.



Fuente: Tomada de <http://diariodecoro.blogspot.mx/2012/08/un-fuerte-sismo-de-magnitud-74-sacudio.html>

4.7 Explosión

La explosión puede ocurrir bajo ciertas circunstancias como: una chispa, una flama o el aumento en la temperatura de la envolvente del tanque, combinado con un gas que haya rebasado su nivel de inflamabilidad y que se encuentre mezclado con el aire. Si el gas no ha rebasado esos niveles de inflamabilidad entonces será un incendio. La explosión es un factor que hay que cuidar para evitar que ocurra en los tanques de almacenamiento de petróleo.

La principal diferencia entre el incendio y la explosión es la velocidad con la que se libera la energía, en una explosión esta energía se libera de manera tal que puede llegar a causar daños irreparables en instalaciones cercanas, e incluso causar la muerte de personas que se encuentran cerca del lugar. Cuando se producen explosiones de gases es debido a la acumulación de grandes cantidades de material inflamable que se mezcla con el aire, esta acumulación genera una nube de vapor que solo necesitará de una fuente de ignición para que explote.

5. EL COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO

5.1 Introducción

La protección contra incendios que debe tener una empresa está en virtud del grado de riesgo que representa ésta. El grado de riesgo es determinado en función del número de personas en el lugar, área de las instalaciones, cantidad de sólidos combustibles, así como, líquidos combustibles y líquidos inflamables almacenados. Teniendo conocimiento de todos estos factores es posible determinar un grado de riesgo.

Una vez que se ha determinado el grado de riesgo, es posible establecer un sistema de protección contra incendios, que comienza desde la instalación de extintores, alarmas contra incendios hasta la instalación de un sistema fijo contra incendios. La industria petrolera dentro de su diversidad de instalaciones, contempla a los tanques de almacenamiento de productos inflamables y combustibles, haciendo necesario la seguridad y protección contra incendios de estos contenedores.

Con la aplicación de las nuevas tecnologías en la construcción de tanques de almacenamiento, se ha logrado reducir en gran medida la probabilidad de incendio en estos contenedores, además cuando el tanque es instalado debidamente el riesgo de incendio es casi nulo. Para la protección contra incendio o explosión de los tanques de almacenamiento es necesario implementar medidas preventivas, así como métodos de acción en caso de que ocurra algún incidente.

5.2 Localización de Tanques Atmosféricos de Almacenamiento

Para la localización y distribución de los tanques de almacenamiento y sus sistemas de protección contra incendio, es necesario tomar en cuenta factores como: material almacenado, las instalaciones de los tanques y la dirección de los vientos dominantes, de manera que los tanques que contienen líquidos inflamables queden localizados corriente abajo con relación a la dirección de los vientos dominantes, en tanto que los que contengan líquidos combustibles queden localizados corriente arriba, esto para evitar que los vapores que se emanan de los tanques puedan llegar a áreas donde se encuentra localizados quemadores o lugares donde haya flamas abiertas, así como, zonas ocupadas por personal (oficinas y áreas habitacionales).

En la siguiente Tabla 4 se muestra la localización y distribución de los Tanques de Almacenamiento de líquidos que pueden producir Boilover. Estos líquidos no se deben almacenar en tanques de techo fijo cuyo diámetro sea mayor a 150 [ft] (45 m) si no cuentan con un sistema de inertizado¹⁰ cuya localización está indicada en la tabla siguiente (Tabla 4). Se muestra únicamente la

¹⁰ minimizar o inactivar su potencial naturaleza química

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

distribución de estos tanques con líquidos que pueden producir Boilover ya que es el tema de interés en este trabajo.

Tabla 4. Localización de Tanques que Almacenan Líquidos que Producen Boil-Over.

Tipo de Tanque	Protección	Desde el límite de propiedad, incluyendo el lado opuesto de vías públicas	Desde el lado más Próximo a una vía pública o Edificio importante más cercano en la misma propiedad
De Techo Flotante	Protección Contraincendio	1/2 Diámetro del Tanque	1/6 Diámetro del Tanque
	Ninguna	1 Diámetro del Tanque	1/6 Diámetro del Tanque
De Techo Fijo con Junta Frágil en la unión con la pared	Espuma Mecánica para $D \leq 150$ ft	1 Diámetro del Tanque	1/3 Diámetro del Tanque
	Protección Contraincendio	2 Diámetros del Tanque	2/3 Diámetro del Tanque
	Ninguna	4 Diámetros del Tanque sin exceder 350 ft (106 m)	2/3 Diámetro del Tanque

Fuente: NRF-010-PEMEX-2004. Espaciamientos mínimos y criterios para la distribución de instalaciones industriales en centros de trabajo de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios.

5.2.1 Distancias Mínimas entre Tanques de Almacenamiento

Los tanques de producción que almacenan petróleo crudo, cuya capacidad individual no exceda 3000 bbl (480m³), no necesitan estar separados más de 3 [ft] (0.9 m). El mismo criterio aplica para aquellos tanques que almacenan solamente líquidos **Clase IIIB** (*líquidos con punto de inflamación de 200° F (93°C) o mayores*) siempre que no se encuentren en el mismo dique o en la ruta de drenaje de tanques que almacenan líquidos **Clase I y II** (*líquidos inflamables con punto de inflamación menor a 100 °F (37.8°C)*) y una presión de vapor no mayor de 39.8 psi (274.4 kPa). Para todos los demás casos es necesario considerar las especificaciones como se muestra a continuación (Tabla 5).

Tabla 5. Distancias Mínimas entre Tanques de Almacenamiento

Díámetro del Tanque	Tanques de Techo Flotante	Líquidos Clase I o II	Líquidos Clase III
---------------------	---------------------------	-----------------------	--------------------

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

D ≤ 150 ft (45 m)			
Todos	$(D_1 + D_2) / 6$ Pero no menor de 3[ft] (0.9 m)		
D > 150 ft (45 m)			
Si cuenta con Contención Remota	$(D_1 + D_2) / 6$	$(D_1 + D_2) / 4$	$(D_1 + D_2) / 6$
Si cuenta con Dique de Contención	$(D_1 + D_2) / 4$	$(D_1 + D_2) / 3$	$(D_1 + D_2) / 4$

Los tanques que almacenan líquidos **Clase I, II y III** deben estar separados de aquellos que almacenan líquidos inestables, por una distancia no menor a la semisuma de sus diámetros.

5.2.2 Control de Derrames en Tanques de Almacenamiento

Se deben tomar en cuenta algunas medidas de control de derrames que pueden ocurrir en tanques de almacenamiento de líquidos, estas consideraciones se deben llevar de manera paralela al diseño del tanque de almacenamiento, para ello se cuenta con tres sistemas de control de derrames: Contención Remota, Diques de Contención y Contención Secundaria.

Contención Remota

Se utiliza para controlar derrames eventuales de los Tanques de Almacenamiento que almacenan líquidos inflamables y combustibles, por medio de un sistema de drenaje que lleva el líquido derramado a un cárcamo o contenedor ubicado en una zona segura. Este sistema reduce considerablemente el riesgo de incendio del producto que se ha derramado y minimiza el riesgo de daño de los equipos e instalaciones adyacentes. Para poder instalar este sistema es necesario contar mínimo con los siguientes requerimientos:

- Proveer una pendiente mínimo de 1% en una distancia de 15m hacia la zona del cárcamo.
- El Cárcamo de contención remota debe tener la capacidad del tanque más grande que puede derramarse. Cuando esto no es posible el volumen excedente puede contenerse en un dique de contención.
- La ruta del drenaje debe planearse y ubicarse en una zona en donde en caso de incendio del líquido derramado no afecte de manera seria las instalaciones y equipos adyacentes.

- Los límites del área de contención remota deben localizarse de modo que estando llenas el nivel del líquido se encuentre alejado por lo menos 15 m del límite de propiedad más cercano incluyendo equipos e instalaciones.

Diques de Contención

Se utiliza este sistema cuando no es posible la contención remota, así como para proteger cuerpos de agua o propiedades adyacentes. Las paredes del dique pueden ser de tierra acero concreto o mampostería sólida diseñada para ser impermeable al líquido almacenado y resistir la carga hidrostática estando lleno con una altura promedio en el interior del dique de 1.8 m.

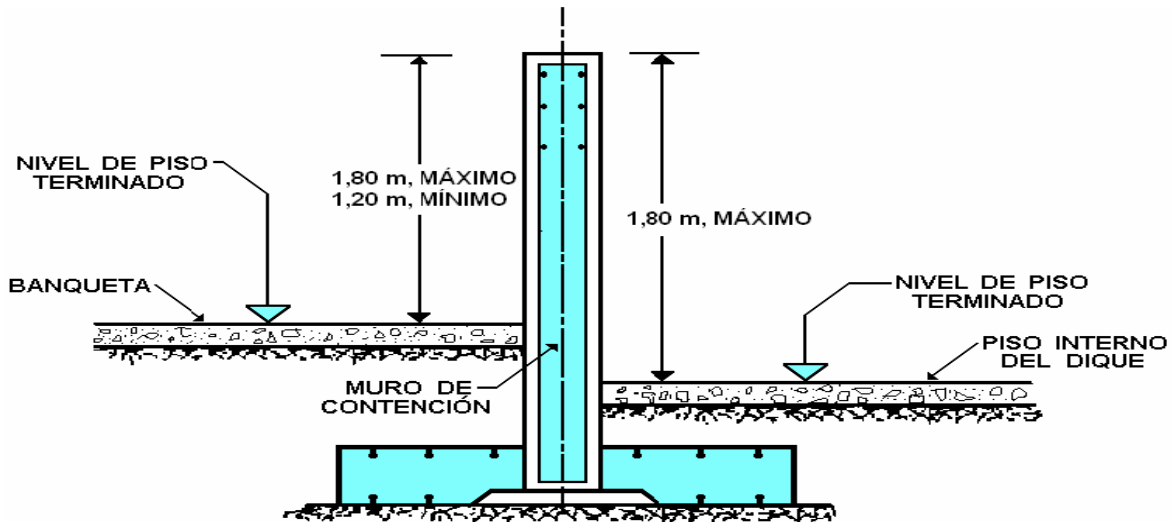
El dique de contención debe tener la capacidad nominal del Tanque de Almacenamiento más grande y una pendiente de por lo menos 1% en la longitud de 15 m. Para varios Tanques Atmosféricos de Almacenamiento, la capacidad volumétrica del dique debe ser igual a la capacidad nominal del tanque mayor, mas el volumen que los otros tanques ocupen hasta la altura que tenga el dique en su parte interior, mas el volumen de otros elementos que ocupe espacio dentro del dique de contención. Se recomienda que la distancia entre la tangente de los tanques de almacenamiento y el muro de contención sea como mínimo de 1.5 m o si es posible igual a la altura del tanque.

En caso de que sea necesario una altura mayor a 1.8 m del muro de contención por la parte interna del dique (Figura 44), deben construirse escalones empotrados a la parte interior del muro para la salida del personal en caso de emergencias.

Las tuberías que pasan a través de las paredes de los diques deben diseñarse para prevenir esfuerzos excesivos provocados por asentamientos o exposición al fuego. Se debe evitar además que las tuberías ajenas a los tanques de almacenamiento pasen a través del patio interior del dique de contención.

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

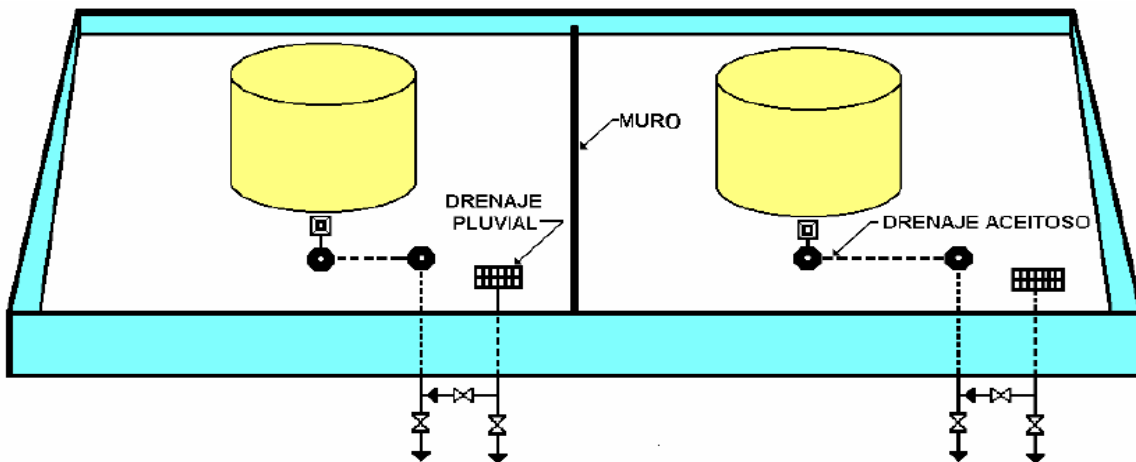
Figura 44. Detalles del Muro de Contención de Concreto.



Cuando se requiera que un dique contenga dos o más tanques, el dique de contención debe ser subdividido por canales de drenaje o por diques intermedios para prevenir posibles derrames que pongan en riesgo al personal, las instalaciones y los tanques adyacentes.

Cada una de las subdivisiones debe contar con sistemas de drenaje pluvial y aceitoso independientes y una pendiente de 0.3048 m en la longitud de 15 m, lo cual permitirá el libre escurrimiento de los líquidos hacia los registros del drenaje, mediante los cuales se posible el manejo selectivo de los líquidos derramado ya sea agua o aceite y en caso de derrames sea posible su contención segura sin riesgo de contaminación ambiental (Figura 45).

Figura 45. Diques Intermedios y Drenajes para Tanques de Almacenamiento Atmosférico.



Los tanques que contienen líquidos que pueden producir **boilover** cuya capacidad colectiva no excede 15 000 bbl y los tanques cuya capacidad colectiva no exceda los 75 000 bbl para líquidos inflamables y 120 000 bbl para líquidos combustibles, pueden localizarse dentro de un mismo dique de contención.

Contención Secundaria

Son barreras construidas alrededor del tanque para contener productos que escapen debido a fugas, derrames u otros eventos indeseables, esta barrera es capaz de contener el líquido derramado el tiempo suficiente para detectar la causa del derrame. La contención secundaria es un sistema de control de fugas que puede utilizarse en tanques con las siguientes características:

- Capacidad del tanque menor a 286 bbl (45.4 m³).
- El diseño del tanque debe evitar que la fuga del líquido provoque flujo tipo sifón.
- El tanque debe estar provisto de medición de nivel accesible al operador.
- El espaciamiento de este tipo de tanques debe ser de 3 [ft] (0.9m).
- La prevención de sobrellenado debe efectuarse por medio de alarmas sonoras cuando el nivel del líquido alcance el 90% de su capacidad.
- La contención secundaria debe diseñarse para resistir la carga hidrostática del contenido del tanque lleno.

Las tuberías que pueden estar expuestas al fuego en el área de diques o área de contención remota son aquellas que transportan producto hacia o desde el tanque, tuberías de servicios auxiliares o tuberías para servicio contra incendio.

5.2.3 Frentes de Ataque

Para proteger al tanque contra incendios o explosiones se deben proporcionar equipo y herramientas para el combate del siniestro, así como adoptar métodos de diseño y construcción efectivos que nos permitan minimizar la posibilidad de incendio, contar con medidas preventivas eficaces y que además nos permitan identificar las posibles causas de incendio y estar preparados con métodos y técnicas para hacer frente a los incendios.

Los tanques verticales no deben estar dispuestos en más de dos filas y de acuerdo a su capacidad deben contar con frentes de ataque, que permitan la libre intervención de vehículos móviles para el combate de incendios, además deben contar con accesos peatonales protegidos con barandales y las vías de acceso destinadas al ataque de emergencia deben ser diseñadas libres de obstáculos.

Las calles que circundan los tanques de almacenamiento deben tener como mínimo 7 m de ancho. Los tanques de almacenamiento con capacidades mayores a 200 000 bbl deben tener acceso vehicular por calles pavimentadas por los cuatro costados (cuatro frentes de ataque).

Los Tanque de Almacenamiento con capacidades menores a los 200 000 bbl deben tener accesos vehicular cuando menos por tres de sus costados es decir tres frentes de ataque, además de calles pavimentadas. Los Tanques de Almacenamiento con capacidades inferiores a los 100 000 bbl y mayor a 55 000 bbl deben contar con por lo menos dos frentes de ataque y calles pavimentadas y por último los tanques con capacidades menor a los 55 000 bbl deben tener mínimo un frente de ataque por calle pavimentada, por el lado donde se ubiquen las tomas de espuma para la protección contra incendio.

5.3 Explosiones en tanques de almacenamiento

La explosión en tanques de almacenamiento puede surgir bajo ciertas circunstancias como una chispa, una flama o un aumento en la temperatura de la envoltura del tanque. Los tanques de techo flotante ofrecen mayor seguridad porque reducen el espacio disponible para la formación de vapores, reduciendo así la posibilidad de que se mezcle el vapor con el aire. Las explosiones en estos tanques pueden ocurrir cuando éste está completamente vacío o cuando el techo se encuentra descansando sobre sus topes (los que evitan el contacto del techo con el fondo del tanque), es entonces cuando las condiciones permiten la formación de vapores inflamables en el espacio que hay entre el techo y el tanque.

Otra situación es cuando el tanque esta sobrellenado o hay hundimiento del techo, pero si los gases hidrocarburos se conservan dentro del tanque sin que exista contacto con el aire, con flamas o chispas lo suficientemente calientes los riesgos de incendio o explosión son mínimos. Esto es posible lograrlo si en los techos flotantes se adapta una superficie de agua y los sellos herméticos para vapores funcionan correctamente, además de conectar las válvulas de venteo a tuberías con el fin de llevar los vapores a un lugar seguro.

5.4 Protección contraincendio de tanques atmosféricos de almacenamiento

La Seguridad Industrial se ocupa de dar lineamientos generales para el manejo de los riesgos en la industria. Las instalaciones industriales incluyen una gran variedad de operaciones, el objetivo de la Seguridad Industrial es la protección a riesgos latentes como son: personas ajenas, empleados, instalaciones y equipo de la empresa, así como la economía de la misma.

Los riesgos a considerar en instalaciones de tanques atmosféricos de almacenamiento son:

- Factores Humanos (falta de capacidad, sabotaje, enfermedad y negligencia).
- Fallas en el equipo, instalaciones y sus componentes.
- Fenómenos Meteorológicos (lluvias, ciclones, huracanes, sismos, tormentas eléctricas, etc.).
- Incendios.

Para los Tanques Atmosféricos de Almacenamiento (TAA) el riesgo más importante son los incendios, ya que los factores humanos, instalaciones y economía de la empresa son los que sufren las consecuencias. Identificar el riesgo es parte esencial para garantizar las condiciones de seguridad y nos permite evaluar las medidas necesarias para poder disminuirlo.

En las instalaciones donde se encuentran los Tanques de almacenamiento, se encuentra también el mayor riesgo, ya que es donde se concentra la mayor cantidad de líquidos combustibles e inflamables. Por esta razón es necesario seleccionar sistemas que garanticen la protección contraincendios así como la integridad de zonas que pueden resultar afectadas por el siniestro.

El área de Tanques de almacenamiento es especialmente riesgosa debido a la forma en que puede evolucionar de un incendio, pues cuando una mezcla inflamable vapor-aire se encuentra sobre el líquido almacenado, alcanza una fuente de ignición. La flama es capaz de transportarse a través de la mezcla (*vapor-aire*) hasta el lugar de almacenamiento donde la temperatura de la superficie del líquido se incrementa generando vapores cada vez más rápido y produciendo cantidades de calor cada vez mayores a medida que el fuego es alimentado por estos vapores.

Debe proveerse protección contraincendio a tanques de techo fijo que almacenan líquidos **Clase I** con capacidad mayor a 1190 bbl. Para tanques de techo fijo que almacenan líquidos **Clase II y III** a temperaturas por debajo de su punto de inflamación y tanques de techo flotante que almacenan cualquier clase de líquido, no necesitan protección cuando se encuentra ubicados de acuerdo a las distancias mínimas correspondientes (Tabla 5).

Figura 46. Incendio en Tanque Atmosférico de Almacenamiento



Fuente: Tomada de <http://america.infobae.com/notas/58368-Otro-incendio-en-una-refinera-de-Venezuela-->

5.4.1 Riesgos de Incendio

Es la evaluación de la posibilidad de que exista incendio y/o explosión en función de la combustión de los materiales almacenados, exposición a la ignición, facilidades de propagación del incendio y la colocación de los materiales dentro de una instalación o parte de la misma. También es posible definir el riesgo como la probabilidad de ocurrencia de un evento, impacto o consecuencia de un hecho. Según el grado de afectación, es posible clasificar a los riesgos de incendio como:

Riesgos Leves

Este tipo de riesgos lo encontramos en instalaciones o áreas donde los materiales almacenados tienen una baja combustibilidad y no es fácil una propagación en caso de fuego. Las instalaciones que entran dentro de esta clasificación son: oficinas, bibliotecas, escuelas y prisiones, sin embargo dentro de las mismas instalaciones, existen ciertas zonas que son clasificadas de riesgo moderado.

Riesgos Moderados

Se presentan en instalaciones o áreas donde se encuentran materiales que puedan arder con relativa rapidez o que produzcan gran cantidad de humo. Se subdividen en grupos que son mencionados posteriormente.

Grupo I: trabajos de cemento, fabrica de joyas, mataderos, cervecerías, restaurantes y cafés.

Grupo II: trabajos químicos, trabajos de ingeniería, fabricas embotelladoras y fabricas de confección.

Grupo III: fabricas de vidrio, aviones, vehículos de motor, aparatos electrónicos, garajes y estacionamientos de autos.

Grupo IIIS: fabrica de fósforo, destilerías, teatros, estudios de cine y televisión.

Riesgos Altos

Están presentes en instalaciones donde se encuentran materiales que puedan arder con rapidez o donde se produzcan vapores tóxicos y exista la posibilidad de explosión. A este tipo de riesgo se le relaciona el almacenamiento de líquidos combustibles e inflamables.

5.4.2 Causas de Incendios en Instalaciones Petroleras

Debido al manejo de grandes cantidades de material combustible e inflamable que la industria petrolera tiene que manejar, los riesgos de incendio en sus plantas de proceso y áreas de tanques de almacenamiento siempre están latentes y es necesario evitarlos. La capacidad de los trabajadores, así como la implementación de todas las medidas preventivas y de control que se exigen para los incendios, son el elemento medular para garantizar la seguridad e integridad del personal e instalaciones, así como la economía de la empresa.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, los incendios son causados por la acción de un fuente de calor suficiente para comenzar una combustión, por esta razón es importante hacer mención de los factores principales que son considerados como riesgo para comenzar un incendio. En la siguiente Tabla 6 se describen algunos factores causantes de incendios, así como sus medidas de prevención.

Tabla 6. Causas de Incendio según su frecuencia de Riesgos.

FACTOR	RIESGO %	ORIGEN	MEDIDAS PREVENTIVAS
Fumar	18	Desobediencia y falta de concientización de las normas de seguridad.	Prohibir fumar en zonas de alto riesgo, donde se encuentren los líquidos combustibles o inflamables.
Fricción	10	Recalentamiento por roce.	Ejecución de programas de inspección regulares, y un buen plan de mantenimiento.
Recalentamiento de Materiales	8	Temperaturas anormales en procesos con líquidos inflamables calientes y materiales en secadores.	Supervisión cuidadosa y cumplimiento de los actos y condiciones seguras.

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Superficies Calientes	7	Calor proveniente de calderas, hornos, motores, así como metales en procesos calientes que encienden líquidos inflamables y materiales combustibles.	Ventilación adecuada y un buen mantenimiento de las cañerías de líquidos inflamables, dando amplitud de espacio de aislamiento y circulación de aire.
Llamas quemadoras	7	Uso indebido de lámparas de soldar, defectos de quemadores de calderas, secadores, hornos y calefactores portátiles.	Diseño correcto, buen funcionamiento y buena ventilación de los dispositivos de control para las llamas.
Cortes y Soldaduras	4	Por chispas, arcos provenientes de cortes y soldaduras.	Aislar zonas de riesgo que estén en contacto con las chispas por la soldadura.
Exposición a incendios adyacentes	3	Producidos por intrusos, trabajadores descontentos o pirómanos.	Se evita con vigilancia, instalando vallas y medidas de prevención.
Incendios premeditados	3	Producidos por intrusos, trabajadores descontentos o pirómanos.	Se evita con vigilancia, instalando vallas y medidas de prevención.
Chispas mecánicas	2	Se originan por chispas de metales en las maquinas como en operaciones de esmerilado y trituración.	Se evita limpiando la materia prima y retirando los materiales extraños con separadores magnéticos.
Causa eléctrica	2	Corto circuito, sobrecalentamiento de instalaciones eléctricas.	Inspección continua de contactos y aparatos eléctricos.
Electricidad estática	1	Generada por sistemas que impliquen frotamiento.	Sistemas a tierra correctamente instalados.
Rayos	1	Debido a tormentas eléctricas, chispas inducidas por elevación de tensión y por rayos que caen en las líneas de transmisión eléctrica.	Se evita instalando pararrayos y conexiones a tierra.

Fuente: Departamento de Seguridad Sipetrol.

5.4.3 Sistemas Fijos Contra incendio

Son aquellos que se componen de una instalación completa que no requiere de una fuente externa para su funcionamiento.

Agua Contra incendio

Generalmente el sistema de agua contra incendio es un sistema fijo. Se compone de fuentes de abastecimiento primaria como son: ríos, lagunas, presas, mares; ó fuentes secundarias como son: tanques, cisternas, cárcamos, por ejemplo. Además de equipo y herramientas como bombas contra incendio, hidrantes, monitores, anillos de tuberías y válvulas, así como válvulas de seccionamiento que permitirán desviar el flujo hacia el área de ataque.

5.4.4 Sistemas Semifijos Contraincendio

Son los que requieren una fuente complementaria para su funcionamiento, generalmente corresponde a la aplicación de espuma mecánica:

Sistema de Espuma

Se compone de tuberías que parten del dique del tanque, con conexiones hembra giratorias para inyección de la solución espumante a las cámaras de espuma o los dispositivos de inyección subsuperficial. Este sistema es empleado en áreas de almacenamiento de refinerías, complejos petroquímicos y donde debido a la capacidad de tanques la instalación de un sistema fijo sería muy costosa. Este tipo de instalaciones cuenta con centrales contraincendio equipadas con carros y personal capacitado para el combate de emergencias.

5.4.5 Detección de Incendios y Alarmas

En base a un análisis del tipo de riesgo que podría presentarse en el tanque de almacenamiento, es como se realiza la colocación, localización y cantidad de los detectores, para esto es necesario tomar en cuenta el tipo de fuego que puede presentarse en los tanques. En las áreas de almacenamiento es fuego clase B.

Debe usarse detección automática para sistemas fijos. Se permite omitir la detección automática solo cuando la autoridad competente lo apruebe. La detección automática debe hacerse por métodos aprobados y con dispositivos capaces de detectar una indicación de calor, humo, llama, vapores combustibles o cualquier condición anormal de riesgo.

Debe usarse una fuente confiable de energía en los sistemas de detección automática y debe ser independiente al suministro de energía para área protegida. Cuando el suministro de energía para el sistema de detección no es independiente del suministro del área protegida, debe proveerse un suministro de emergencia de batería con conmutación automática por si falla el suministro primario. La alimentación es a 220V/110V dependiendo del país, además deben tener baterías para que la central siga trabajando en caso de una falla en la alimentación principal.

Una central de detección y alarma de incendios consiste en tableros de control diseñados exclusivamente para el control de incendios. Estas centrales supervisan los detectores de humo, temperatura, gas y otros. Cuentan con pulsadores manuales, realizan maniobras con módulos de la central de incendios y activan las sirenas siguiendo el plan de evacuación.

Estas centrales son exclusivas para incendio por que están diseñadas para actuar siguiendo la normativa de incendios en Europa con la normativa EN 54 y la normativa de Estados Unidos NFPA. Están diseñadas para monitorear con la máxima seguridad todos los elementos del sistema, activa

las sirenas y maniobras en caso de incendio o emergencia, siguiendo el plan de evacuación de la edificación.

Las centrales de detección de alarmas de incendios, existen en **sistema convencional y sistema digital**. Las centrales convencionales tienen zonas que conectan por cable desde 1 a 2.5 mm a los detectores y pulsadores. Generalmente el cableado puede extenderse hasta 800 o 1200 m dependiendo del tipo de cable y tienen una resistencia al final de la zona. Las centrales más usadas son de 1, 2, 4, 8, 12, 16, 32 zonas. En la actualidad hay centrales hasta de 128 zonas o incluso más dependiendo del fabricante. Cada ZONA tiene una capacidad entre 15 y 35 puntos entre detectores y pulsadores (dependiendo del fabricante). Usualmente las ZONAS trabajan a 24 V, pero puede encontrarse algunas marcas que trabajan a 12 V.

Cuando una ZONA es activada por un detector o un pulsador, toda la ZONA se activa y queda en ALARMA. Esta información se puede ver en la central de incendios pero no se puede saber exactamente cual detector o pulsador fue activado.

Por otro lado las centrales digitales son las más avanzadas en la actualidad. Igualmente son centrales diseñadas exclusivamente para el control de incendios y siguen normativas internacionales para su funcionamiento.

Estas centrales tienen BUCLES. En el mercado se encuentran Centrales direccionables o digitales de 2, 4,8 y expandibles hasta 20 BUCLES o más dependiendo del fabricante. Los BUCLES tienen mayor capacidad de puntos que las ZONAS en los sistemas convencionales. Un BUCLE puede tener entre 99 y 250 puntos. Usualmente los BUCLES utilizan cable de 1.5 mm o 2.5 mm a 24 V con los que pueden extender el cable 700 o 1200 m dependiendo del tipo de cable escogido.

Se dice BUCLE porque los cables salen de la Central de incendios y vuelven a la misma. No tienen final de línea como ocurre con el sistema Convencional.

Aunque los BUCLES tienen una mayor capacidad de puntos. También tienen mayor control sobre cada punto (detector, pulsador, modulo o sirena). Esta es la gran diferencia entre el sistema Convencional y Direccionable. El sistema Direccionable o Digital se comunica por sistema binario con cada punto. En caso de activación. La central sabe exactamente cuál es el punto (detector, pulsador, modulo, sirena) que se ha activado. Los detectores, pulsadores, módulos y sirenas tienen un número de programación único que los diferencia de los demás elementos

Otro recurso que no debe ser menos importante para la detección de derrames y condiciones que puedan ocasionar incendios, es el patrullaje o vigilancia que el personal en turno debe efectuar en las áreas de tanques. Se debe proveer y disponer supervisión del equipo de detección automática y la operación de manera que haya indicación inmediata de falla, preferible en un lugar permanentemente atendido.

Se deben instalar alarmas audibles para indicar la operación del sistema, para alertar al personal y para indicar la falla de cualquier equipo o dispositivo supervisado. Debe proveerse una alarma

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

para indicar que el sistema ha operado. Debe proveerse alarmas para dar amplia advertencia de descarga donde pudieran existir riesgos para el personal.

Las alarmas indicadoras de fallas de los dispositivos o equipos supervisados deben dar indicación pronta y positiva de cualquier falla y deben distinguirse de las alarmas indicadoras de condiciones de operación o riesgo.

5.4.6 Protección Contra incendio a Base de Inyección de Espuma

En base al estudio de riesgo para la protección contra incendio en tanques de almacenamiento que contienen material combustible o inflamable, es necesario también conocer las propiedades fisicoquímicas de los productos almacenados, así como las características del tanque, además de su ubicación respecto a otras instalaciones. Todos estos requerimientos deben ser incluidos en el diseño para la instalación de un sistema contra incendios. En la siguiente Tabla 7 se muestran los sistemas para la extinción de incendios con aplicación superficial y subsuperficial de espuma mecánica, dependiendo del producto contenido.

Tabla 7. Protección Contra incendio a Tanques de Almacenamiento de acuerdo al producto o contenido.

	Líquidos Inflamables		Líquidos Combustibles	
Producto	<ul style="list-style-type: none"> • Gasolina • Crudo • Recuperado de trampas 	<ul style="list-style-type: none"> • Polares¹¹ 	<ul style="list-style-type: none"> • Diesel • Diáfano • Turbosina 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustóleo • Asfalto • Residuos pesados calientes
Tipo de Tanque	Atmosférico vertical de techo fijo con o sin membrana interna flotante	Atmosférico vertical de techo fijo con membrana interna flotante	Atmosférico vertical de Techo Fijo	Atmosférico Vertical de Techo Fijo
	Atmosférico vertical de Techo Flotante	Atmosférico Vertical de Techo	Atmosférico Vertical de	

¹¹ Una molécula es polar cuando un extremo de ella tiene carga positiva (+) y el otro extremo tiene carga negativa (-). Por ejemplo, las moléculas del agua, H₂O, son polares; la zona donde está el oxígeno (O) es negativa y donde van los hidrógenos (H) es positiva. El agua, por lo tanto, es un líquido polar; también es polar el alcohol etílico. La mayoría de los combustibles y líquidos inflamables son no-polares, es decir no hay zonas con carga en sus moléculas. Por ejemplo: la gasolina (bencina), el queroseno (parafina), el benzol, el petróleo, etc. Sólo se mezclan con el agua los combustibles polares, como el alcohol etílico.

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

		Flotante	Techo Flotante	
Inyección Superficial	Si	Si	Si	Si
Inyección Subsuperficial	Si para atmosférico vertical de techo fijo con o sin membrana interna flotante. No para atmosférico vertical de techo flotante	No	Si	No

5.4.6.1 Espuma

La espuma para combate de incendios es un agregado estable de pequeñas burbujas de densidad más baja que la del aceite y la del agua, que muestra tenacidad para cubrir superficies horizontales. La espuma se hace mezclando el aire en una solución de agua que contiene un concentrado de espuma, por medio de un equipo diseñado adecuadamente. La espuma fluye libremente sobre una superficie de líquido incendiado y forma una fuerte manta continua que excluye el aire y sella los vapores de combustible volátil no permitiendo el acceso al aire.

Resiste la ruptura por viento o corrientes de aire o el calor del tanque y las llamas y es capaz de resellarse en caso de rotura mecánica. Las espumas para combate de incendios retienen estas propiedades por periodos de tiempo relativamente largos.

Las espumas también se definen por expansión y se dividen arbitrariamente en tres campos, estos campos corresponden generalmente a ciertos tipos de uso. Los tres campos son los siguientes: **a)** Espuma de baja expansión: expansión hasta 20:1; **b)** Espuma de expansión media: expansión de 20:1 a 200:1; **c)** Espuma de alta expansión: expansión de 200:1 y hasta 1000:1.

5.4.6.1.1 Concentrado de Espuma

El concentrado de espuma es un agente líquido espumoso concentrado. La concentración es el porcentaje de concentrado de espuma contenido en una solución de espuma. El tipo de concentrado que se usa determina el porcentaje de concentración requerido. Por ejemplo un concentrado de espuma de 3 por ciento se mezcla en la proporción de 97 partes de agua a 3 partes de concentrado para hacer la solución de espuma.

Existen diferentes tipos de concentrados de espuma. El concentrado de espuma utilizado en un sistema de generación de espuma debe estar listado para su uso sobre el líquido combustible o inflamable a proteger. Deben seguirse las limitaciones y especificaciones del fabricante.

Los concentrados de espuma para la protección de combustibles hidrocarburos deben ser uno de los siguientes tipos:

- a) Proteína
- b) Fluoroproteica
- c) Espuma formadora de película acuosa
- d) Espuma Fluoroproteica formadora de película acuosa FFFP
- e) Resistente al Alcohol

Los líquidos polares inflamables miscibles en agua o combustibles deben estar protegidos por concentrados resistentes al alcohol.

5.4.6.1.2 Concentrado de Espuma Resistente al Alcohol

Se usa para combatir incendios en materiales solubles en agua y otros combustibles destructores de espumas regulares (AFFF y FFFP), lo mismo que para incendios que involucran hidrocarburos. Hay tres tipos generales, uno se basa en polímeros naturales solubles en agua como concentrados de proteína o fluoroproteína y también contiene materiales insolubles en alcohol que se precipitan como barrera insoluble en la estructura de burbujas.

El segundo tipo está basado en concentrados sintéticos y contiene un agente gelificante que rodea las burbujas de espuma y forma una masa protectora flotante sobre la superficie de los combustibles solubles en agua; estas espumas también pueden tener propiedades de formación de película sobre combustibles hidrocarburos.

El tercer tipo se basa tanto en polímeros naturales solubles en agua, como proteína fluorada, y contiene un agente gelificante que protege la espuma de combustibles solubles en agua, también puede tener características de formación de película y proteína fluorada sobre combustibles hidrocarburos. Los concentrados de espuma resistentes al alcohol se usan generalmente en concentraciones de soluciones de 3 a 10 por ciento, dependiendo de la naturaleza del riesgo a proteger y el tipo de concentrado.

5.4.6.1.3 Concentrado de Espuma Productor de Película Acuosa (AFFF)

Este concentrado se basa en surfactantes fluorados y estabilizadores de espuma y generalmente se diluyen con agua a una solución de 1, 3 o 6 por ciento. La espuma que se forma actúa como barrera tanto para excluir aire u oxígeno como para desarrollar una película acuosa sobre la superficie del combustible, capaz de suprimir el desarrollo de vapores del combustible. La espuma producida con concentrado AFFF es compatible con químicos secos y por lo tanto es adecuada para usarse en combinaciones con estos.

5.4.6.1.4 Concentrado de Espuma Proteica Formadora de Película Acuosa (FFFP)

Este concentrado se basa en surfactantes fluorados para producir una película acuosa fluida para suprimir vapores de hidrocarburos. Este tipo de espuma utiliza una base de proteína, más aditivos e inhibidores estabilizantes para proteger contra congelación corrosión y descomposición bacteriana y también resiste la absorción del combustible. Generalmente se diluye en agua a una solución de 3 a 6 por ciento y es compatible con químicos secos.

5.4.6.1.5 Concentrado de Espuma Fluoroproteínica

El concentrado de esta espuma es muy similar al concentrado de espuma de proteína, pero tiene un aditivo surfactante fluorado sintético. Además de un manto de espuma que excluye al aire, también puede depositar una película que previene la vaporización del combustible líquido. Se diluye en agua en con soluciones de 3 a 6 por ciento dependiendo del tipo, este concentrado es compatible con ciertos químicos secos.

5.4.6.1.6 Concentrado de Espuma de Media y Alta Expansión

Este concentrado generalmente se deriva de hidrocarburos surfactantes, se usa en equipos especialmente diseñados para producir espumas con proporciones de volumen de espuma a volumen de solución de 20: 1 hasta aproximadamente 1000: 1. Estos equipos pueden ser del tipo de aspiración de aire o ventilador.

La espuma de media y alta expansión extinguen los incendios al reducir la concentración de oxígeno en el lugar del incendio, por enfriamiento al detener la convección y radiación excluyendo al aire adicional y retardando la liberación de vapores inflamables.

Cada tipo de riesgos debe evaluarse específicamente para verificar la aplicabilidad de la espuma de media y alta expansión como un agente de control de incendios. Algunos tipos importantes de riesgos que está permitido proteger con este tipo de espumas incluyen los siguientes:

- (1) Combustibles ordinarios
- (2) Líquidos inflamables y combustibles
- (3) Combinaciones de (1) y (2)
- (4) Gas Natural Licuado (espuma de alta expansión únicamente).

Tabla 8. Proporción de Concentrados de Espumantes diluidos con Agua.

TIPO	CONCENTRACIÓN DE VOLUMEN [%]
FFFP Fluoroprotéico (Film-Forming Fluoroprotein Foam Concentrates)	3 ó 6
AFFF (Aqueous Film Forming Foam)	3 ó 6

AR AFFF Tipo Alcohol. (Alcohol Resistant)	3 ó 6
3 x 3 por ciento AR AFFF Tipo Alcohol. (Alcohol Resistant)	3
1 x 3 por ciento AR AFFF Tipo Alcohol. (Alcohol Resistant)	1

5.4.6.2 Aplicación Superficial de Espuma

Es la descarga de espuma en la superficie del líquido contenido en un tanque de almacenamiento desde una manguera que se eleva desde un recipiente entubado cerca del fondo del tanque.

Para la aplicación superficial de espuma en tanques atmosféricos de almacenamiento de techo flotante y techo fijo con o sin membrana interna flotante, que contengan productos inflamables o combustibles, se deben utilizar cámaras formadoras de espuma **Tipo II**¹² que cumplan con la **NRF-125-PEMEX-2005**, instaladas en la parte superior y por la parte externa de la envolvente de los tanques, equidistantes y con un distanciamiento entre ellas, no mayor a 24.40 m (80 pies) alcance máximo de la cámara de espuma según fabricantes. Para los tanques de techo fijo, adicionalmente se debe incluir un sello que garantice su ruptura a una presión de 276 kPa (40 lb/pulg²), destinado a impedir que los vapores de hidrocarburos se introduzcan y condensen en el interior de la tubería de alimentación de solución espumante.

La proporción volumétrica de concentrado de agua para formación de espuma mecánica depende del tipo de concentrado utilizado.

En los *tanques* atmosféricos de almacenamiento de *techo fijo* con o sin membrana interna flotante y en los tanques de techo flotante, la alimentación de la solución espumante se debe llevar a cabo por medio de tuberías independientes, que van desde el dique hasta el tanque, para cada una de las cámaras formadoras de espuma y que además van conectadas a sistemas fijos o semifijos de generación de espuma. Las tuberías deben tener una pendiente de 1% hacia el muro de contención y una purga localizada en su parte más baja, que permita el vaciado total del sistema localizada fuera del dique de contención que permita el drenado de la tubería (Figura 47 y Figura 48)

¹² La espuma es el producto final de la mezcla de líquido espumante, agua y aire formado en las cámaras de espuma en las boquillas para espuma mecánica. Para la aplicación superficial de la espuma en tanques de almacenamiento que contengan productos inflamables y combustibles, se debe emplear cámaras formadoras de espuma **Tipo II**, estas son instaladas en la parte superior y externa de la envolvente del tanque, además de contar con un sello que garantice su ruptura a una presión menor de 274.58 [kPa] (2.8 kg/cm²), impidiendo que los vapores de los hidrocarburos se introduzcan y se condensen en el interior de la tubería de alimentación de la solución espumante.

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Figura 47. Ubicación de la Cámara de Espuma en Tanques de Techo Fijo con o sin Membrana Interna.

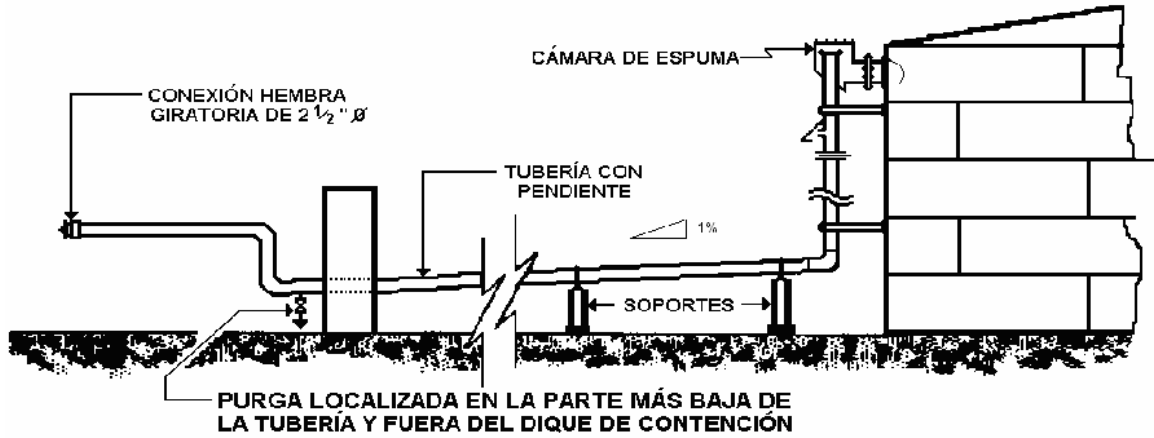
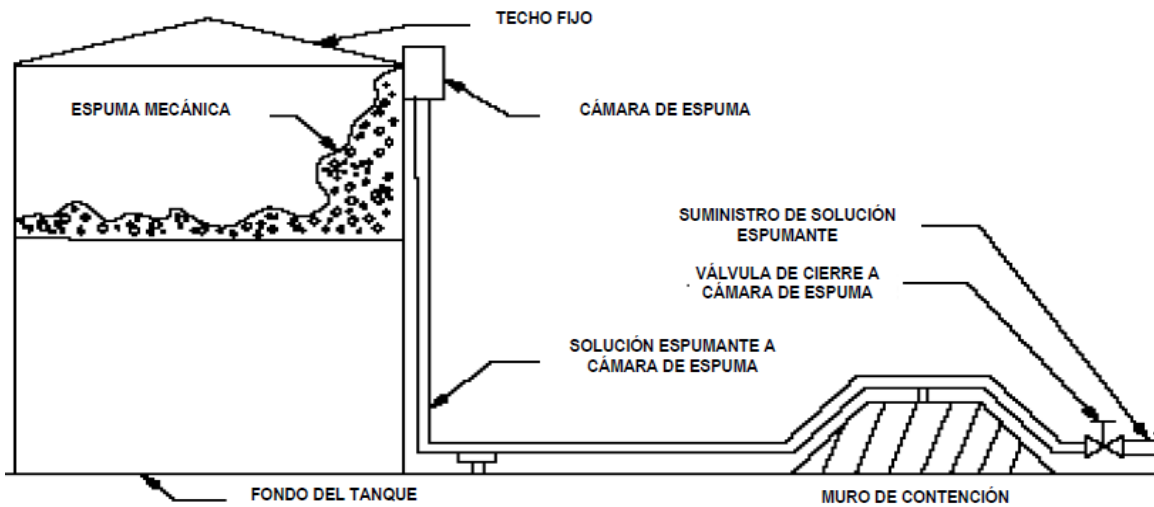
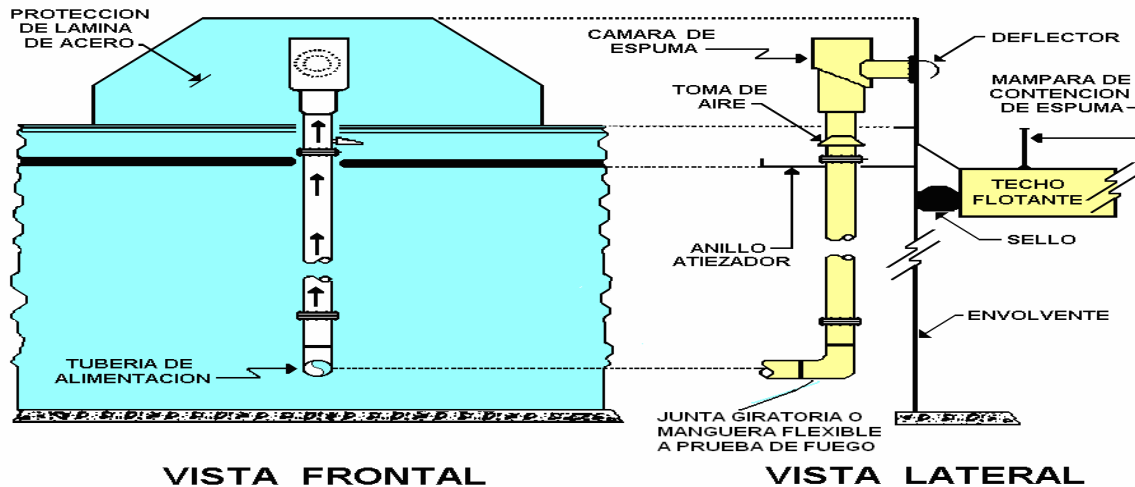


Figura 48. Ubicación de la Cámara de Espuma en Tanques de Techo Fijo con o sin Membrana Interna.



Para la protección contra incendio en *Tanques de Techo Flotante*, la aplicación de la espuma debe calcularse para cubrir únicamente el área perimetral al sello. En este tipo de tanques las cámaras de espuma Tipo II se deben instalar sobre una lámina de acero, la cual debe estar sobre el ángulo de coronamiento de la envolvente del tanque. Al igual que en los tanques de techo fijo la solución espumante debe dirigirse por tuberías individuales para cada cámara de espuma (Figura 49).

Figura 49. Ubicación de la Cámara de Espuma en Tanques de Techo Flotante.



Para dar mantenimiento a cada cámara de espuma en el tanque, se debe instalar una canastilla fija a la pared del tanque. En caso de que el acceso a la canastilla sea por la escalera de acceso al techo del tanque, se deberá instalar un barandal en toda la periferia del tanque para permitir el paso seguro del personal a la canastilla.

5.4.6.3 Aplicación Subsuperficial de Espuma

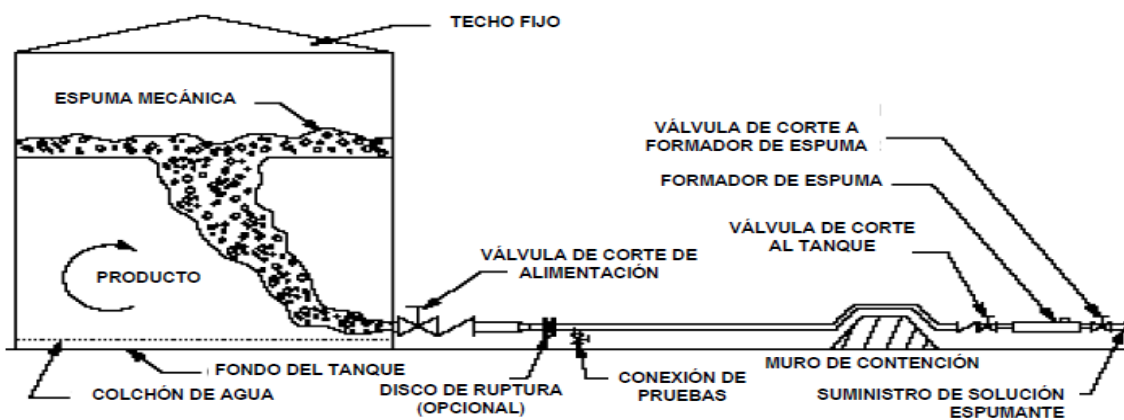
La inyección subsuperficial de espuma es la descarga de la misma dentro del tanque de almacenamiento desde una salida cerca del fondo del tanque. Para la aplicación subsuperficial se deben utilizar únicamente formadores de espuma de alta contrapresión, estos formadores deben cumplir con las especificaciones del diseño y el gasto de solución espumante requerido. Para el cálculo de contrapresión de diseño se debe sumar el valor de las pérdidas de presión que se generan en la tubería por el flujo de la espuma expandida (*para esto debe considerarse una relación de expansión de 4:1*), mas la presión de la columna hidrostática ejercida por el producto almacenado en el tanque a su nivel máximo de operación. La contrapresión máxima permisible debe ser 25 % de la presión de entrada al formador de espuma. Y si a la presión de entrada se le resta el de la columna hidrostática ejercida por el producto, el resultado será la máxima pérdida por fricción permisible para el flujo de la espuma.

En los tanques atmosféricos de almacenamiento que contengan líquidos polares no se debe instalar la inyección subsuperficial de espuma.

En cuanto a tuberías de alimentación subsuperficial, cada una debe poseer un formador de espuma independiente.

La instalación de las tuberías debe efectuarse sobre un punto de la envolvente que se encuentre por encima de la altura máxima esperada del colchón de agua en el fondo del tanque, lo cual es necesario debido a la importancia de evitar la dilución de la espuma cuando se está inyectando en el tanque (Figura 50).

Figura 50. Aplicación Subsuperficial de Espuma Mecánica en Tanque de Almacenamiento.



Por ningún motivo, las descargas de espuma en el interior del tanque de almacenamiento se deben localizar cercanas a la tubería de succión.

Para los sistemas semifijos de inyección subsuperficial, se necesita contar con un número adecuado de hidrantes y tomas para camión, que cubran el gasto demandado para los formadores de espuma. Se puede determinar la necesidad de equipos adicionales para el combate de incendios, esto de acuerdo a un análisis de riesgo previo para las áreas de almacenamiento atmosférico.

5.4.6.3.1 Producción de Espuma a Presión (Tipo alta contrapresión o forzada).

Es un productor de espuma que utiliza el principio de Venturi, aspirando aire dentro de un chorro de solución de espuma para formar espuma a presión. En este dispositivo se conserva suficiente energía de velocidad, de manera que la espuma resultante puede ser conducida a través de tuberías o mangueras hasta el riesgo que se protege.

5.4.6.4 Métodos de Producción de Espuma.

Incluyen chorro de manguera, boquilla de espuma y generadores de media y alta expansión, productor de espuma, productor de espuma a alta presión o monitor de espuma.

5.4.6.4.1 Generadores de Espuma -Tipo Aspirador.

Pueden ser fijos o portátiles. Las corrientes de chorro de la solución de espuma aspiran suficientes cantidades de aire que son entonces arrastradas sobre los tamices o mallas para producir espuma. Estos generadores producen espuma con proporciones de expansión no mayor a 250:1.

5.4.6.4.2 Generadores de Espuma-Tipo Ventilador.

La solución de espuma se descarga como un rocío sobre mallas o tamices a través de los cuales pasa una corriente de aire producido por un abanico o ventilador. El ventilador puede ser propulsado por motores eléctricos, maquinas de combustión interna, aire, gas o motores hidráulicos o de agua, los motores de agua son generalmente propulsados por la misma solución de espuma.

5.4.6.5 Aplicación de Espuma Mecánica por medio de Monitores Móviles.

Un monitor móvil o portátil es un dispositivo que suministra un chorro monitor de espuma (que es un chorro de espuma de gran capacidad de una boquilla asegurada en posición y que puede ser dirigido por una persona), y está montado sobre un soporte móvil sobre ruedas para poder ser transportado al lugar del incendio.

Para la protección contra incendio de tanques de almacenamiento de techo fijo, se considera la aplicación de espuma **Tipo II**¹³ y espuma **Tipo III**¹⁴. Se utiliza una técnica que consiste en depositar la espuma directamente sobre la superficie del material incendiado, mediante chorros con una densidad de aplicación de entre 8.1 lpm/m² (0.20 a 0.25 gpm/ft²) con una presión de 8.78 kg/cm² (125 lb/in²) a la descarga de la boquilla.

Para el combate de incendios se pueden utilizar varios monitores móviles de alto gasto, siempre y cuando la distancia entre cualquier punto límite de las huellas y la envolvente del tanque, no sea mayor a 80 [ft]. Es prudente seleccionar el monitor que sea capaz de aplicar la mayor cantidad de espuma al centro del tanque formando así una huella más uniforme y completa (Figura 51).

¹³ cámaras de espuma

¹⁴ monitores móviles de alto

Figura 51. Aplicación de Espuma Tipo III. Técnica de Huellas.



Los monitores de alto gasto deben localizarse dentro del dique de contención, deben de contar con plataformas y rampas de igual altura a la del muro de contención y deben orientarse a favor de los vientos dominantes además de contar con protección para el personal como barandales y tener ubicados los monitores necesarios sobre las rampas para hacer frente a los posibles siniestros.

Los monitores son dispositivos que permiten la aplicación de agua o espuma para combate de incendios, que pueden ser puestos rápidamente en operación sin necesidad de conectar mangueras, ni estar constantemente supervisión.

Por estas razones, en las instalaciones se las consideran dispositivos básicos de protección. Estos monitores se ubicaran estratégicamente de forma tal que faciliten y hagan efectivas las labores de combate de incendio y enfriamiento de la envolvente de tanques de almacenamiento involucrados.

5.4.6.6 Método de Dosificación para Sistemas de Espuma de Aire.

La dosificación es la introducción continua de concentrado de espuma en la proporción recomendada dentro del chorro de agua para formar solución de espuma.

Los sistemas de dosificación para crear una solución adecuada de agua y concentrado de líquido de espuma reconocido por la norma **NFPA-11**¹⁵ incluyen: Bomba acoplada de motor de agua, eductor de espuma de boquilla, dosificación regulada, tanque de dosificación a presión y dosificador alrededor de la bomba.

¹⁵ <http://es.scribd.com/doc/38536957/NFPA-11-2005-Espanol>

5.4.6.6.1 Bomba de Espuma Acoplada a un Motor de Agua.

Un motor de desplazamiento positivo de diseño apropiado en la línea de suministro de agua que se acopla a una segunda bomba, más pequeña, de concentrado de espuma de desplazamiento positivo, para proveer un flujo de concentrado.

5.4.6.6.2 Eductor de espuma de boquilla.

Un Venturi de diseño adecuado con el tubo de succión que se incluye en la construcción de la boquilla de espuma de manera que el concentrado líquido de espuma sea extraído a través de un corto tramo de tubería o tubo flexible que conecte la boquilla de espuma con el recipiente de concentrado de espuma. De esta manera se mezcla en concentrado automáticamente con el agua en las proporciones recomendadas.

5.4.6.6.3 Dosificación Regulada.

Se utiliza una bomba de concentrado separada para inyectar concentrado de espuma al chorro de agua. Orificios o venturis o ambos controlan o miden la proporción de agua a concentrado de espuma. Puede utilizarse ya sea ajuste manual o automático de inyección a presión del concentrado de espuma o control de flujo. Otro tipo de dosificación usa una bomba o tanque de diafragma para equilibrar la presión del agua y del concentrado.

5.4.6.6.4 Tanque Proporcionador a presión.

Se provee un método para desplazar por agua concentrado de espuma de un tanque cerrado (con o sin separador de diafragma), usando flujo de agua a través de un orificio.

5.4.6.6.5 Dosificador alrededor de la Bomba.

La caída de presión entre el lado de descarga y la succión de la bomba de agua del sistema se usa para inducir concentrado de espuma al agua a través de orificios adecuados, variables o fijos. La caída de presión se produce al pasar el agua por un inductor Venturi en una derivación entre la succión y la descarga de la bomba.

5.4.7 Protección Contra incendios por Enfriamiento de Agua

El agua como mecanismo de protección contra incendio, se utiliza como medida para la protección de los tanques expuestos a tanques adyacentes y para el enfriamiento de las paredes del tanque incendiado. El enfriamiento por agua es uno de los más eficaces para combatir incendios en tanques de almacenamiento. Los componentes básicos de un sistema de agua contra incendios que sirven de protección a las instalaciones petroleras son:

- Fuentes de suministro de agua.

- Sistemas de bombeo de agua.
- Red de distribución.

Las Fuentes de Suministro de Agua; pueden ser de carácter ilimitado, cuando provienen de fuentes naturales tales como: lagos, mares y ríos. Por otro lado tenemos a los de carácter limitado, por lo cual se deberá disponer de un estanque o depósito construido de acuerdo a prácticas de ingeniería aprobadas, que garanticen la capacidad requerida. Las redes de agua para los sistemas contra incendios no pueden estar conectadas a otros sistemas o que desvíen el uso del agua con otro propósito.

Cuando la fuente de suministro de agua es limitada se requiere una capacidad de almacenamiento mínima que dependerá del diseño y requerimientos de las instalaciones. El suministro de agua debe ser suficiente para proteger simultáneamente todas las superficies que se requieran de la envolvente de los tanques involucrados directa o indirectamente en un incendio.

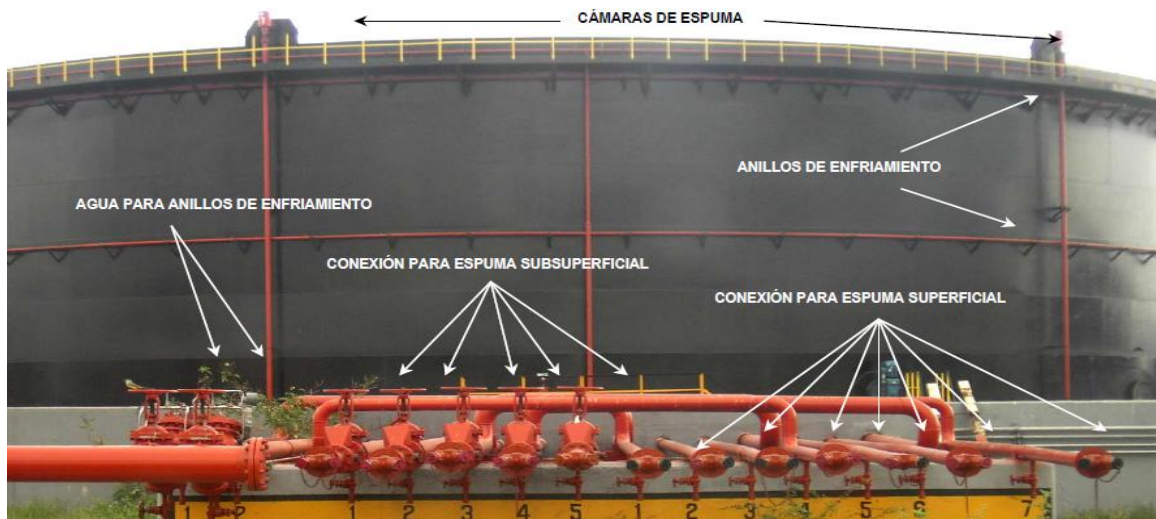
Las bombas de agua contra incendio deben ser capaces de manejar la suma de los siguientes gastos:

- a) El gasto para la extinción del riesgo mayor (generación de espuma por la aplicación superficial o subsuperficial).
- b) El gasto requerido para el enfriamiento de la totalidad de la envolvente del tanque considerado como riesgo mayor.
- c) El gasto requerido para el enfriamiento de las paredes expuestas de todos los tanques que colindan con el tanque incendiado.
- d) El gasto requerido para la operación de cuatro mangueras de 1.5 pulgadas de diámetro y con capacidad de 500 galones por minuto entre las cuatro, para el enfriamiento del personal, del equipo contra incendio y de las tuberías de proceso.

En función de su capacidad y el riesgo que representa tener grandes volúmenes de líquidos inflamables o combustibles almacenados, es necesario instalar anillos de enfriamiento a los tanques atmosféricos con capacidades mayores de 5000 bbl. Por ejemplo, los tanques atmosféricos de almacenamiento de techo fijo, con altura mayor a los 32 [ft] (9.78 m) deben contar mínimo con dos anillos de enfriamiento, uno debe ser ubicado en la parte media del tanque y otro en la parte superior como se muestra a continuación (Figura 52).

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Figura 52. Protección Contra incendio en Tanque Atmosférico de Almacenamiento



En cuanto al **sistema de bombeo de agua**. Las bombas contra incendio deben ubicarse en lugares accesibles pero fuera de lugares expuestos al fuego. Las características principales que deben cumplir las bombas son: presentar una curva vs caudal relativamente plana, para garantizar el bombeo a una presión estable para diferentes caudales de operación, facilitando el uso de varias bombas en paralelo.

Conforme al tipo y capacidad de almacenamiento, los anillos de enfriamiento tendrán el siguiente arreglo:

- Los tanques atmosféricos de techo fijo con una altura menor de 9.75 m (32 ft) solo requieren un anillo de enfriamiento y este será ubicado en su parte superior. Para aquellos tanques con una altura mayor a los 32 [ft] se deberá instalar dos anillos de enfriamiento como se mencionó anteriormente.
- En los tanques de techo flotante con más de un anillo atiesador, deben instalarse tres anillos de enfriamiento debajo de cada uno de ellos diseñado para que la suma de los volúmenes manejados de dichos anillos, cumplan con la densidad de aplicación.

Para la **red de distribución del agua contra incendios**, las tuberías se tendrán al nivel del terreno, convenientemente soportado o anclado de acuerdo a normas y prácticas aprobadas. Las tuberías principales deberán ser enterradas únicamente en puntos críticos, como son cruces carreteros o vías de acceso.

La red de distribución debe contar además con subcomponentes como son los hidrantes y los monitores. El número de hidrantes a instalarse dependerá de los requerimientos de diseño en las instalaciones de almacenamiento. Por ejemplo en los patios de tanques de almacenamiento, los hidrantes deberán ubicarse fuera de los muros de contención. En tanques dotados con sistema de

espuma deberán localizarse en relación con las terminales del sistema de espuma de manera que la longitud entre el hidrante y el camión de bomberos no exceda 7.5 metros.

Las especificaciones técnicas, materiales de construcción, accesorios, distanciamientos entre tuberías y demás características relacionadas para la inyección superficial, subsuperficial y enfriamiento de agua, son detalladas puntualmente en la norma **NRF-015-PEMEX-2003**.¹⁶ “Protección de aéreas y tanques de almacenamiento de productos inflamables y combustibles”.

Además los distanciamientos entre tuberías, densidades de las espumas mecánicas contraincendios, la presión necesaria y otros aspectos relacionados se encuentran también en la **NRF-010-PEMEX-2004**.¹⁷ “Espaciamientos mínimos y criterios para la distribución de instalaciones industriales en centros de trabajo de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios.”

5.5 Venteo en Tanques Atmosféricos de Almacenamiento

El venteo es una forma de respiración mediante una abertura, la cual permite que el tanque respire. Este fenómeno ocurre por la generación de presión y vacío internos debido a cambios de nivel de líquidos dentro del tanque y también a los cambios de temperatura en el exterior. Es de suma importancia que los Tanques Atmosféricos de Almacenamiento (TAA) estén provistos por venteos tanto para condiciones normales (cambios atmosféricos y operaciones comunes) así como para condiciones de emergencia (exposición a fuego externo).

Los tanques que almacenan líquidos **Clase IA, IB y IC** deben contar con venteos que actúen cuando exista sobrepresión interna o vacío, para el caso de los líquidos **Clase IB y IC** además de los venteos pueden contar alternativamente con arrestadores de flama¹⁸.

El venteo para condiciones normales, debe ser capaz de evitar que la presión interna o externa exceda la presión de diseño del tanque. Cuando se diseña y especifica el venteo de un tanque, este debe actuar tanto como un dispositivo de seguridad y un dispositivo de conservación.

¹⁶ <http://www.pemex.com.mx/files/standards/definitivas/NFR-015-PEMEX-2003.pdf>

¹⁷ <http://cnpmos.pemex.com/index.php/normas/nrf/nrfv>

¹⁸ Los arrestadores de flama son una opción para la protección del tanque contra fuego o explosión, cuando son utilizados se acompañan de venteos a presión – vacío para generar el relevo de la presión o vacío generado por la operación del tanque. Los arrestadores de flama solo deben utilizarse para las condiciones a las que fueron diseñados y probados, debido a que la profundidad de diseño del arrestador se diseña para determinadas condiciones, los cambios en la temperatura, presión o composición de los gases con los que está en contacto, pueden causar que la llama aumente su velocidad haciendo que la profundidad del elemento del arrestador sea insuficiente para detener el frente de la flama.

COMBATE DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Para el diseño y selección de un venteo para un tanque de almacenamiento es necesario contar con la siguiente información:

- Capacidad y diseño del tanque atmosférico de almacenamiento.
- Presión y vacío que debe soportar el tanque.
- Producto almacenado, así como, su punto de inflamación.
- Velocidades máximas de llenado y vaciado del tanque.
- Diámetros de las líneas de alimentación y succión del tanque.

Conociendo el punto de inflamación, capacidad del tanque y la velocidad de llenado y vaciado del mismo se establece en el API 2000 ¹⁹(Venting Atmospheric and Low – Pressure Storage Tank) los requerimientos de venteos para condiciones normales. Estas condiciones o requerimientos son resumidas en la siguiente tabla.

Tabla 9. Capacidad de Venteo Normal.

Condición		Presión	Vacío
Líquidos Clase I	$T_F < 100\text{ °F (37.8 °C)}$	$SCFH = \frac{GPM \cdot 60}{3.5} + T_{PB}$	$SCFH = \frac{GPM \cdot 60}{7.5} + T_V$
Líquidos Clase II y III	$T_F \geq 100\text{ °F (37.8 °C)}$	$SCFH = \frac{GPM \cdot 60}{7.0} + T_{PA}$	$SCFH = \frac{GPM \cdot 60}{7.5} + T_V$

En los sistemas de protección contra incendios, se debe disponer de una fuente confiable de abastecimiento de agua u otros agentes, apropiados para el control de incendios como la espuma y el dióxido de carbono, que brinden la presión y cantidad para cubrir las demandas del incendio, indicadas por los riesgos específicos de las operaciones del proceso, almacenamiento o exposición de líquidos.

Donde se tienen sistemas de control contra incendios, se deben diseñar, instalar y mantener, en concordancia con las normas siguientes, dentro de las cuales se menciona el material y de los sistemas contra incendios que deben utilizarse de acuerdo a las condiciones y requerimientos de las instalaciones.

- **NFPA-11** Espumas de alta, mediana y baja expansión.
- **NFPA-12** Sistemas de dióxido de carbono.
- **NFPA-13** Instalación de Rociadores.
- **NFPA-15** Sistemas de aspersión de agua para la protección de fuego.
- **NFPA-16** Instalación de aspersores de espuma y agua, y sistemas rociadores de espuma y agua.
- **NFPA-17** Sistemas de Secado Químico.

¹⁹ <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.2000.1998.pdf>

6 FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, para que ocurra un incendio, es necesario que exista un contacto de los líquidos inflamables o combustibles con el aire, y que además, exista una elevación en la temperatura de la mezcla por medio de una fuente de ignición, que sea capaz de producir un incendio. Entre los diferentes tipos de incendios que pueden presentarse en los tanques de almacenamiento, y que resultan de suma importancia, debido a los daños que puedan ocasionar tanto en el personal como en las instalaciones, están los siguientes: *Rebosamiento por ebullición o Espumación desbordante (Boilover)*, rebosamiento superficial de residuos (*Slopoover*) y rebosamiento espumoso (*Frothover*).

Rebosamiento superficial de residuos (Slopoover). Este fenómeno ocurre cuando se aplican chorros de agua en una superficie caliente del aceite que se está incendiando, causando que el aceite incendiado se derrame por las paredes del tanque. En este fenómeno solo se involucra el aceite que se está quemando en la superficie, por esta razón podemos clasificar a este tipo incendios de relativa importancia menor.

Rebosamiento espumoso (Frothover). Es el derramamiento de un contenedor, pero no está incendiado el producto que contiene, este fenómeno ocurre cuando los tanques contienen aceites minerales muy viscosos a altas temperaturas, el agua situada bajo la superficie de estos aceites entra en ebullición. Un ejemplo de este hecho, es cuando se vierte asfalto en un contenedor que tiene agua, cuando entran en contacto el asfalto y el agua, ésta última comienza a hervir, y mientras más asfalto sea vertido llegara el momento en que ocurrirá un burbujeo provocado por la ebullición del agua, y el asfalto se derramara del contenedor.

Rebosamiento por ebullición o Espumación desbordante (Boilover). Comparado este fenómeno con los anteriores, este suele ser mucho muy peligroso, debido a la violenta y repentina expulsión de aceite crudo u otros líquidos combustibles del tanque de almacenamiento, este es el resultado de una reacción en la que se involucran la quema de la capa combustible y la acumulación de agua en el fondo del tanque. El ***boilover*** ocurre cuando los residuos de la quema del aceite ²⁰en la superficie comienzan a ser más densos que el aceite que los rodea, los residuos se hunden desde la superficie hacia el fondo del tanque. A medida que la capa de hidrocarburos se quema se hace más densa, el aceite quemado se mueve hacia abajo debido a la diferencia de densidades, provocando así una onda de calor, esta ***onda de calor*** alcanzara eventualmente al agua que se encuentra en el fondo del tanque. Cuando entran en contacto la onda de calor y el agua, esta última es sobrecalentada y subsecuentemente bullirá y se expandirá explosivamente causando una violenta expulsión del contenido del tanque. Aunque la expansión normal del vapor de agua es de 1700:1 a una temperatura de 212 °F (100°C), a temperaturas más altas la expansión de vapor de agua puede ser incluso a razón de 2300:1 a una temperatura de 500°F (260°C).

²⁰ partículas pesadas remanentes después de la combustión

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

Con la ebullición del agua, se forma una especie de espuma de petróleo y vapor que se expande rápidamente, esta combinación provoca la espumación desbordante.

Existen tres condiciones necesarias para que dicho fenómeno tenga lugar, estas condiciones son:

- 1- El tanque de almacenamiento debe contener agua libre o una emulsión de agua y aceite, esta característica se presenta en los depósitos de derivados de petróleo.
- 2- El aceite almacenado debe contener componentes cuyos puntos de ebullición sean muy dispares, esto es, que los componentes más ligeros desaparezcan por destilación y combustión debido a la quema del combustible, de esta manera el residuo superficial pasara a ser más denso y se hundirá por debajo de la superficie en combustión y es entonces donde se inicia la llamada onda de calor.
- 3- El aceite debe contener una gran cantidad de componentes pesados para que se pueda formar la espuma compuesta de aceite y vapor de agua.

Si el **boilover** ocurre, la regla de dedo dice que el aceite crudo expulsado puede viajar hasta 10 veces el diámetro del tanque, alrededor del perímetro del tanque. Por ejemplo si el tanque de almacenamiento crudo tiene un diámetro de 250 [ft] (76.2 m), se espera que el aceite cubra un área de 2500 [ft] (760.2m) desde el tanque. Esta aseveración nunca ha sido comprobada en tanques atmosféricos de almacenamiento de 300 [ft]) de diámetro o mayores, debido a que en tanques de estas dimensiones, la distancia de 10 veces al diámetro del tanque puede incluso incrementarse. Por lo tanto, se debe considerar cuidadosamente la ubicación del puesto de mando para control de incidentes, los equipos de seguridad, el equipo de primeros auxilios y las zonas seguras.

El fenómeno de **boilover** puede traer consigo consecuencias trágicas, como ha ocurrido a lo largo de la historia, de ellas quizá la más impresionante debido a la magnitud de los daños, es la ocurrida en diciembre de 1982 en Tocoa, Venezuela. Después de 6 horas de lucha contra el fuego se produjo dicho fenómeno, que proyectó el contenido del tanque a centenas de metros en todas direcciones. Este hecho provocó una onda expansiva de aproximadamente mil metros alrededor del lugar de los hechos y acabó con todo cuanto estuvo a su alcance, causando la muerte de casi doscientas personas, entre ellos 72 bomberos, así como, periodistas y voluntarios que se encontraban en el lugar. Esta es la tragedia más grande considerada hasta hoy causada por este fenómeno, en especial porque nunca se habían tenido tantas muertes de bomberos en un mismo incendio. Los equipos e instalaciones fueron destruidos en su totalidad. Es con este hecho que es posible darnos cuenta de la gravedad de los daños, si este fenómeno ocurre.

El boilover se puede dar como consecuencia de un incendio de larga duración en un Tanque de Almacenamiento o también puede producirse en un depósito abierto que contenga crudo, productos derivados de petróleo, aceites minerales o combustibles pesados.

Una manera en la cual puede ocurrir este fenómeno es, por ejemplo, cuando el techo del tanque de almacenamiento ha sido desprendido por algún tipo de explosión, esto puede ser por la caída de un rayo por ejemplo, en este caso el techo es desprendido del tanque y la superficie del líquido queda expuesta y en contacto con el oxígeno del aire, y solo bastara una fuente de calor para que comience un incendio. Si el incendio ocurre después de un largo periodo de combustión, llegara el momento en que se producira un rebosamiento violento por debajo del combustible, formando una especie de espuma que surge de la mezcla del agua con el hidrocarburo, expandiéndose rápidamente.

6.1 Espumación desbordante “boilover”

Como se ha venido mencionando a lo largo del capítulo, el boilover es el fenómeno de mayor importancia, debido al grado peligrosidad que éste implica, ocurre cuando el combustible líquido del tanque de almacenamiento se está quemando sobre una capa de agua que se encuentra en el fondo del mismo tanque, en determinado momento comienza la ebullición del agua que se encontraba en el fondo, hasta el punto en que las burbujas de vapor se expanden violentamente provocando que el líquido combustible salga de manera incontrolable del tanque. Este hecho ocurre debido a la transferencia de calor que procede de la llama (*heat feedback*) que está consumiendo el combustible en la superficie. Existen dos clasificaciones de dicho fenómeno y estas son:

- Hot Zone Boilover
- Thin Layer Boilover

Para ambos casos se utiliza un término llamado **intensidad de ebullición**²¹, (*Ecuación 2*) este parámetro determina el incremento o disminución de la velocidad de combustión, respecto al periodo estacionario del incendio.

$$I_b = \left(\frac{\dot{m}_b - \dot{m}_s}{\dot{m}_s} \right) 100$$

Ecuación 2 . Velocidad de combustión durante el Boilover

6.1.1 Hot Zone Boilover

Este tipo de boilover se produce en incendios de hidrocarburos en tanques de almacenamiento, se caracteriza por el gran espesor de combustible que se quema sobre una capa de agua. Debido al gran espesor de combustible, este tipo de incendio puede ser de larga duración en depósitos de almacenamiento de crudo que contienen agua, esta agua puede venir mezclada con los

²¹ Incremento porcentual de la velocidad de combustión durante el boilover, respecto al valor medio del periodo estacionario.

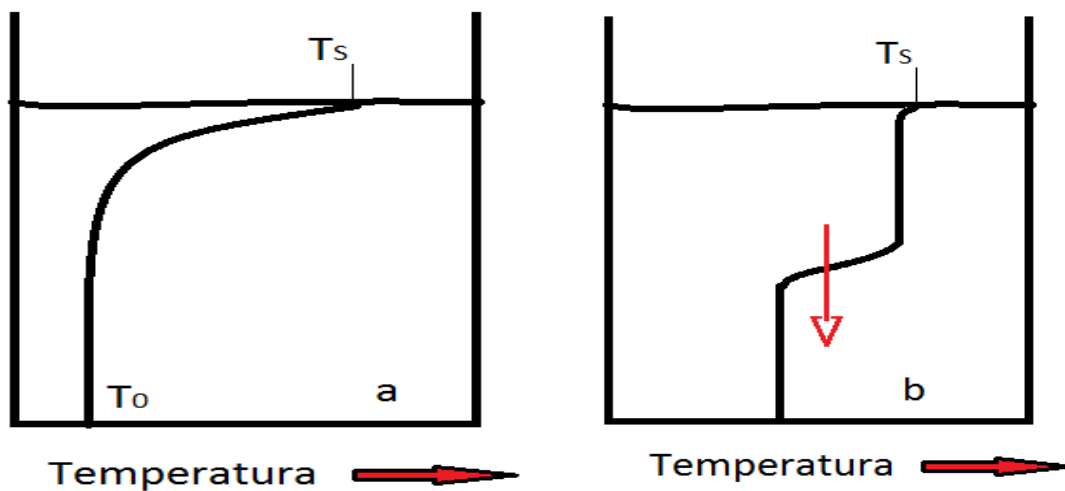
FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

hidrocarburos desde la producción, y en la primera etapa de almacenamiento coexisten estos diferentes fluidos, en donde por diferencias de densidades el agua siempre se concentra en el fondo del tanque. Cuando el fenómeno de boilover se manifiesta, lo hace con una violenta expulsión de agua y combustible en forma de espuma inflamada hacia el exterior del tanque que lo contiene y puede alcanzar una altura considerable, la expulsión de esta mezcla de agua e hidrocarburo en ignición también es acompañada con una fuerte radiación de la llama.

Estudios realizados en los últimos años deducen que para que este fenómeno tenga lugar es necesario la formación de una capa isotérmica²² de combustible y que además esté a una elevada temperatura, a esta capa de hidrocarburo a elevada temperatura se le conoce como **hot zone**, por esta razón a ésta tipología de boilover se le conoce como *Hot Zone Boilover*.

En la siguiente Figura 53 se muestran los perfiles de temperaturas en un incendio en un tanque de almacenamiento, donde se encuentran almacenados combustibles que no generan (a) y los que si generan (b) hot zone.

Figura 53. Combustibles que no generan (a) y que generan (b) hot zone.



En los perfiles de temperatura anteriores se puede observar que, en el primer caso la temperatura se eleva únicamente muy próximo a la superficie del líquido que se encuentra incendiado, y conforme a mayor profundidad la temperatura es igual a la temperatura inicial del combustible (T_0); esto significa que el agua no podrá alcanzar la temperatura de ebullición y por lo tanto no existirá boilover, debido a que no se forma una hot zone.

²² Capa a temperatura constante

Por otro lado el ejemplo (b), nos muestra que la temperatura es superior en la profundidad con respecto a la temperatura inicial del combustible, esto sucede debido a la propagación mediante una onda de calor (*heat wave*) procedente del frente de la capa isotérmica hacia el fondo del depósito.

El que los combustibles o líquidos inflamables sean capaces o no de formar la llamada hot zone, dependerá de las propiedades fisicoquímicas del producto que se está incendiando, es decir:

- Si la temperatura de la *hot zone* o capa isotérmica es mayor a la temperatura de ebullición del agua (mayor a 100°C), y
- Si la velocidad de la onda de calor o *heat wave* es mayor a la velocidad lineal de combustión, entonces;

En un tiempo determinado la onda de calor alcanzara la zona de interface con el agua, la cual entrara en ebullición, y por consiguiente una nucleación²³ de las burbujas de vapor, que pueden ser de forma homogénea o heterogénea. La nucleación homogénea ocurre en el interior del agua, mientras que la heterogénea se produce en la interfase entre el agua y las partículas impuras dispersas en el líquido combustible. En ambos casos el agua se encontrará en su punto de ebullición por debajo de una espesa capa de combustible, lo que en determinado momento provocara una expulsión, debido a la expansión y explosión de las burbujas de vapor. La intensidad de la explosión, dependerá de la geometría y dimensiones del tanque, de las condiciones climáticas, temperatura ambiental, humedad, por ejemplo y de las propiedades fisicoquímicas de ambos líquidos (agua y combustible) como: la tensión de vapor y puntos de ebullición.

La expulsión rápida y violenta de las burbujas de vapor de agua hacia el exterior, arrastrara combustible si éste último es lo suficientemente viscoso para adherirse a las paredes de las burbujas. Si las burbujas logran salir del tanque con el combustible adherido, éste se quemara rápidamente de manera explosiva provocando que el incendio crezca de manera abrupta y produciendo crepitación²⁴.

Puede ser que en algunos casos, las burbujas no logren salir de inmediato debido a la diferencia de presión, entonces estarán retenidas por algún momento mientras la ebullición continúa mientras siguen aumentando su tamaño, hasta que sean capaces de vencer la presión ejercida sobre ellas. Si las dimensiones de las burbujas llegan a ser considerables puede ocurrir una fuerte explosión al salir a la superficie e incendiarse debido al fuego que ya existía en la superficie del combustible. En situaciones muy extremas puede incluso originarse una bola de fuego que puede proyectar combustible incendiado a distancias considerables en relación a la ubicación del tanque.

²³ Entiéndase por nucleación al cambio de estado que puede ser la formación de un gas o un cristal a partir de un líquido

²⁴ Ruido de chasquidos repetidos como el que hacen las cosas al arder:

6.1.2 Hot Zone

Tras varios experimentos realizados por varios autores, es posible deducir que la formación de la *hot zone*, solo se presenta para combustibles con una mezcla de hidrocarburos con temperaturas de ebullición muy distintas entre sí.

El mecanismo de formación de esta capa isotérmica aun no ha sido establecido con precisión, pero es muy probable que la *hot zone* tenga su origen debido a la evaporación selectiva de las fracciones ligeras en la mezcla del combustible. Varios autores han realizado pruebas para tratar de determinar la aparición de la capa isotérmica capaz de producir el boilover, entre estos autores tenemos a los siguientes:

Hall en 1925 propuso que la migración de los componentes ligeros hacia la superficie seguida por una destilación es lo que genera la *hot zone*. Burgoyne y Katan en 1947 sugirieron que en la interfase *hot zone* y combustible frío, volatilizan los componentes ligeros de forma sucesiva y es así como ascienden a la superficie.

Otro mecanismo propuesto por Blinov y Kudiakov en 1961, propone que la formación de la *hot zone* es provocada por la transferencia de calor a través de las paredes del tanque, por lo que concluyeron que la formación de esta capa isotérmica depende del diámetro del tanque que almacena el combustible.

Pese a las dificultades a las que se enfrentaron los autores, es posible determinar que para que exista un *hot zone* boilover, se requiere que existan las siguientes condiciones:

- Presencia de agua.
- El combustible debe ser lo suficientemente viscoso para impedir el paso del vapor, y de esta manera pueda ser arrastrado hasta la superficie donde están las llamas y
- Debe existir la formación de una zona con temperatura elevada y que además se propague hacia el fondo del tanque.

6.1.3 Thin Layer Boilover

Cuando el combustible que se quema es de un espesor pequeño, el boilover también puede ocurrir. En esta situación nos referimos a un Thin Layer Boilover o boilover de capa fina. El estudio de este fenómeno está enfocado principalmente, a situaciones en donde se vierte accidentalmente hidrocarburos sobre superficies de agua, normalmente esto ocurre en incendios de petróleo que es derramado accidentalmente al mar. Otra posibilidad de que se produzca un Thin Layer Boilover, es durante el combate de incendios de hidrocarburos, ya que al intentar

extinguir el incendio con agua, ésta se acumula debajo del combustible, existiendo siempre el riesgo potencial de boilover de capa fina.

El thin layer boilover, se manifiesta con el aumento notable de las dimensiones y de la radiación de la llama, acompañado de una crepitación debido a la explosión de las burbujas de vapor cubiertas con combustible, en esta tipología del fenómeno, el incendio es de mayor turbulencia. Existen diferencias con respecto al *Hot Zone Boilover*, como el tamaño de la capa de los hidrocarburos, pero la principal diferencia es que no es necesaria la creación de una onda de calor (*heat wave*) para que se desarrolle el fenómeno.

En el Thin Layer Boilover se transfiere calor hacia la superficie del agua situada por debajo del combustible, esta transferencia de calor es por conducción, convección y radiación que la llama emite. En este caso cuando la capa de combustible calienta al agua lo suficiente para evaporarla, las burbujas de agua expulsaran al combustible, pero debido a que la capa de combustible es muy pequeña los efectos son reducidos y prácticamente incomparables en cuanto a magnitud con el Hot Zone Boilover. Para que el boilover de capa fina pueda ocurrir, es necesario que la capa de combustible se encuentre a una temperatura mayor que la de ebullición del agua.

Los estudios realizados referidos al Thin Layer Boilover, pueden no tener una representación práctica para condiciones reales, debido a factores de escala, es decir los experimentos realizados se hacen con contenedores de algunos centímetros de diámetro y con algunos milímetros de espesor de la capa de combustible, estas condiciones no se presentan en situaciones reales de la industria petrolera, ya que las magnitudes en cuanto a dimensiones de los depósitos son por mucho superiores a los ejemplos que fueron estudiados.

La mayoría de los experimentos que se han realizado, han sido pensados para estudiar el Thin Layer Boilover, esto es debido a cuestiones económicas, pero sobre todo de seguridad, pero se cree que los resultados obtenidos en el boilover de capa fina, pueden correlacionarse con los efectos causados en el boilover con un espesor considerable de hidrocarburos, uno de los objetivos de esta tesis es tratar de establecer la diferencia entre cada uno de los fenómenos, y poder determinar si es posible aplicar los conocimientos obtenidos en pruebas de Thin Layer Boilover al Hot Zone Boilover.

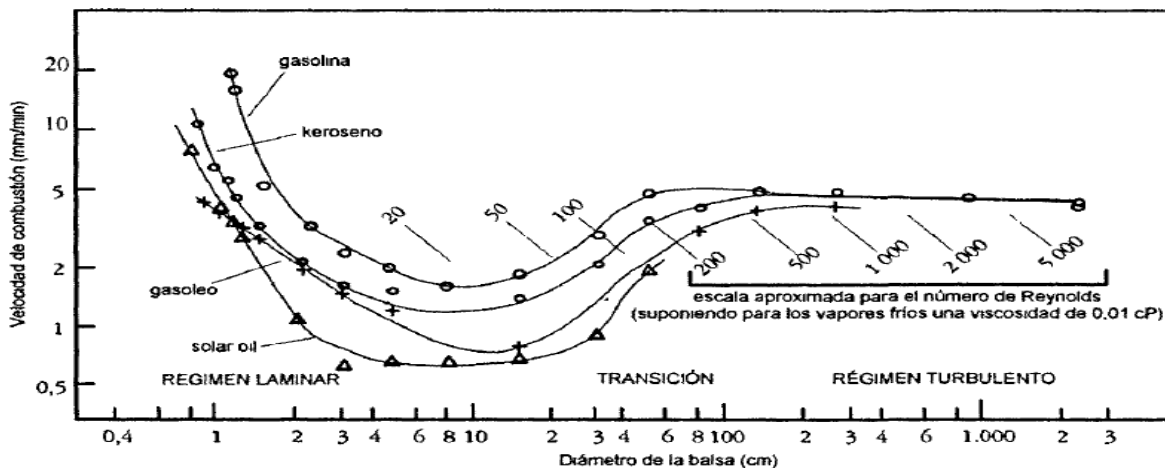
En los siguientes apartados haremos mención acerca de las variables que influyen para que tenga lugar dicho fenómeno, tales variables son: la velocidad de combustión, temperatura de la llama y la geometría de la llama, estas variables han sido estudiadas desde hace ya varios años, aunque los experimentos han sido en su mayoría efectuados al *thin layer boilover*. En este capítulo se presenta una recopilación de información de estudios realizados en una gran variedad de situaciones, como tipo de combustible y tamaño y forma del depósito.

6.2 Velocidad de Combustión

En 1957 Blinov y Khudiakov, realizaron experimentos para medir la velocidad de combustión del combustible, para esta prueba se utilizaron contenedores de varias dimensiones que iban desde los **0.37 cm** hasta los **30 m** de diámetro y se utilizaron gasolina, keroseno y gasóleo como combustibles en ignición. Los resultados obtenidos por estos autores, fueron analizados dos años más tarde por Hottel, quien dedujo que la relación entre la velocidad de combustión y el diámetro del tanque era muy similar para todos los combustibles analizados, y además la velocidad de combustión depende del número de Reynolds.

En la siguiente grafica (Figura 54) podemos apreciar dicho comportamiento de la velocidad de combustión de los combustibles quemados en relación al diámetro de los contenedores, y se puede observar que la velocidad de combustión disminuye con respecto al aumento del diámetro para un $Re < 20$ (régimen laminar). Sin embargo en regímenes transitorios donde el número $20 > Re > 200$ se observó que la velocidad de combustión aumentó en relación con el aumento del diámetro del depósito. Finalmente cuando el número $Re \geq 500$ se observó que la velocidad de combustión se mantenía prácticamente constante entre 4-5 [mm/min] independientemente del tipo de combustible utilizado.

Figura 54. Velocidad de Combustión en relación al Diámetro del Contenedor o depósito (Hottel 1959).



El comportamiento de la velocidad de combustión se relaciona con el mecanismo de transferencia de calor, a partir del flujo de calor medio intercambiado por unidad de superficie entre la llama y el tanque o recipiente que contenga el combustible. Este mecanismo de transferencia se representa por la suma de los tres términos siguientes:

- Transferencia de calor por conducción (a través de las paredes del tanque).
- Transferencia de calor por convección y
- Transferencia de calor por radiación.

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

La ecuación siguiente representa el mecanismo de transferencia de calor que fue planteado por Hottel.

$$\frac{\dot{Q}_{tot}}{\pi D^2/4} = \frac{4K}{D}(T_l - T_b) + H(T_l - T_b) + \sigma F(T_l^4 - T_b^4)(1 - e^{-kD})$$

Ecuación 3. Mecanismo de transferencia de calor

Donde;

- K** coeficiente de calor por conducción ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
- H** coeficiente de calor por convección ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
- F** factor de vista de la llama hacia la superficie del tanque.
- T_l** temperatura de la llama (K)
- k** coeficiente de extinción (m^{-1})
- T_b** temperatura en el seno del líquido en condiciones ambientales (K)
- D** diámetro del contenedor (m)

A partir del cociente entre el flujo de calor medio intercambiado por unidad de superficie (entre la llama y el tanque) y el calor de vaporización del combustible se puede obtener la velocidad de combustión (*Ecuación 4*) expresada como la pérdida de masa del combustible por unidad de área [$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$];

$$\dot{m} = \left(\frac{\dot{Q}_{tot}}{\pi D^2/4} \right) / \Delta H_v$$

Ecuación 4. Pérdida de masa del combustible por unidad de área.

Hottel considero en su análisis cuantitativo, contantes a los coeficientes de **K**, **H**, **F**, **T_l**, y **k**, lo que le permitió deducir lo siguiente:

- En los contenedores de diámetros muy pequeños (donde controla un régimen laminar), el principal y realmente importante mecanismo de transferencia de calor es el conductivo,

que es inversamente proporcional al diámetro del contenedor del combustible; es por esta razón que en la grafica observada (Figura 54) en esta primera fase la velocidad de combustión reduce conforme el diámetro del contenedor aumenta (Ecuación 5).

$$K = \frac{1}{D}$$

Ecuación 5. Velocidad de combustión

- Para contenedores con diámetros que van desde los 2 hasta 30 cm de diámetro, el mecanismo dominante es el correspondiente a la etapa de transición entre el régimen convectivo y el dominado por la radiación, con la aparición de un mínimo en la curva de velocidad de combustión en función del diámetro (Figura 54).
- Por último en los contenedores o tanques de almacenamiento con dimensiones mayores, que van de 1 m hasta 30 m de diámetro, que fueron las dimensiones utilizadas en estos experimentos, y además en donde se instaura un régimen turbulento, la transferencia de calor por conducción se considera despreciable, mientras que los términos de convección (**por las hipótesis hechas por Hottel**) y radiación se consideran constantes (**porque el producto kD es muy grande**), por esta razón para tanques con diámetros mayores a un metro, la velocidad de combustión de la capa de hidrocarburo se considera constante como se observa en la grafica de la Figura 54.

Llevando los resultados obtenidos en las pruebas hechas para los diferentes combustibles, a una aplicación en la realidad de la industria de almacenamiento de hidrocarburos, se puede concluir que los mecanismos de transferencia de calor dominantes, en caso de incendio en tanques de almacenamiento de crudo, se excluye al mecanismo por conducción, ya que este solo afecta a contenedores de diámetros muy pequeños (>3 cm), tales contenedores no los encontramos realizando alguna función en la industria. Por otro lado el mecanismo dominado por la convección, en caso estricto no influirá de manera importante en tanques con diámetros mayores a 1 m, ya que su principal afectación es en contenedores de hasta 30 cm de diámetro, aunque en este mecanismo (por convección) se pueden tener dos categorías distintas de flujo; laminar o turbulento. Por otra parte si en la zona de transición laminar-turbulento donde se encuentran ambos mecanismos de transferencia de calor, si el mecanismo dominante es el de radiación, se podrán observar dos clases diferentes de llamas: ópticamente delgadas u ópticamente gruesas. En la siguiente Tabla 10 se resume el mecanismo de transferencia de calor para distintos diámetros de contenedores.

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

Tabla 10. Mecanismo de transferencia dominante en función del diámetro del contenedor.

Diámetro del contenedor, deposito o tanque de almacenamiento según sea el caso [m]	Mecanismo de Transferencia de Calor
<0.05	convectivo, laminar
0.05-0.2	convectivo, turbulento
0.2-1.0	radiación, llama ópticamente delgada
>1.0	radiación, llama ópticamente gruesa

Más tarde en 1984 se estudia con mayor detenimiento el comportamiento de la velocidad de combustión en la zona de transferencia de calor, dominada por la radiación, es decir en tanques con diámetros mayores a un metro de diámetro. En este estudio realizado por Muda, quien elimina los términos relativos a la convección y a la conducción de la Ecuación 3, además de que se suponen constantes la temperatura de la llama y el factor de vista, y se obtiene la siguiente correlación (Ecuación 6).

Ecuación 6. Velocidad de combustión de la zona de transferencia de calor

$$\dot{y} = \dot{y}_{max}(1 - e^{-kD})$$

Donde;

\dot{y} velocidad de combustión (mm/seg)

\dot{y}_{max} velocidad máxima de combustión (mm/seg)

k coeficiente de extinción (m^{-1})

D Diámetro del contenedor (m)

Otros autores en 1971 Atallah y Allan, adquirieron de forma experimental los valores para el coeficiente de extinción “ k ” obteniendo resultados para distintos hidrocarburos que se presentan en la siguiente Tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes de extinción para algunos combustibles.

Combustible	Coeficiente de Extinción “ k ” [1/m]
Hidrógeno Líquido	7.0
Metanol	4.6
Gas Natural Licuado	3.0
Gas Butano	2.7

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

Keroseno	2.6
Benceno	2.6
Gasolina	2.0
Hexano	1.9
Xileno	1.2
Etanol	0.4

Los combustibles que están compuestos por mezcla de varios componentes, no muestran una velocidad de combustión uniforme. En un principio los componentes ligeros se evaporan y son quemados por las llamas del fuego, siendo ésta la principal razón de la velocidad de combustión. Una vez que el fuego ha consumido los componentes ligeros, el incendio se alimenta de componentes menos volátiles y, ocurre un aumento en su temperatura hasta el punto en que sea posible iniciar la evaporación de los componentes más pesados en el tanque de almacenamiento. En esta última etapa del incendio la velocidad de combustión se encuentra dominada por la temperatura de los componentes pesados, que tienen un punto de ebullición mayor.

En 1986 Yamagachi y Wakasa realizaron un trabajo a gran escala. En mi opinión este estudio resulta más cercano a las condiciones que existen en la industria petrolera, debido a que se utilizaron tanques de almacenamiento con diámetros 30, 50 y 80 [m]. El experimento se llevo a cabo con Keroseno quemándose sobre una capa de agua, durante este tiempo se logro medir no solo la velocidad de combustión, sino que también se obtuvieron mediciones de la temperatura y geometría de la llama, el calor emitido por la radiación y la composición de los productos de la combustión. Esto se realizó utilizando una videocámara que se encontraba sumergida filmando la disminución del nivel del hidrocarburo, y con ello era posible determinar la velocidad de combustión de manera muy simple; realizando solo una división entre la disminución del espesor del líquido y el tiempo en que se registro.

Con los valores obtenidos a determinados tiempos, se hizo un promedio para el espesor total del líquido inflamado, resultando así una velocidad de combustión de entre 4 y 7 mm/min, estas velocidades además, resultaron ser independientes del diámetro del tanque. Las grandes dimensiones de los tanques de almacenamiento, permitieron también observar las oscilaciones causadas en la superficie del líquido, debido a las turbulencias que provocaban las llamas del incendio sobre el combustible, lo cual permitió medir variaciones locales a nivel del combustible, observando fluctuaciones de velocidad de combustión que iban de los 2 a los 7 mm/min en distintas zonas del tanque.

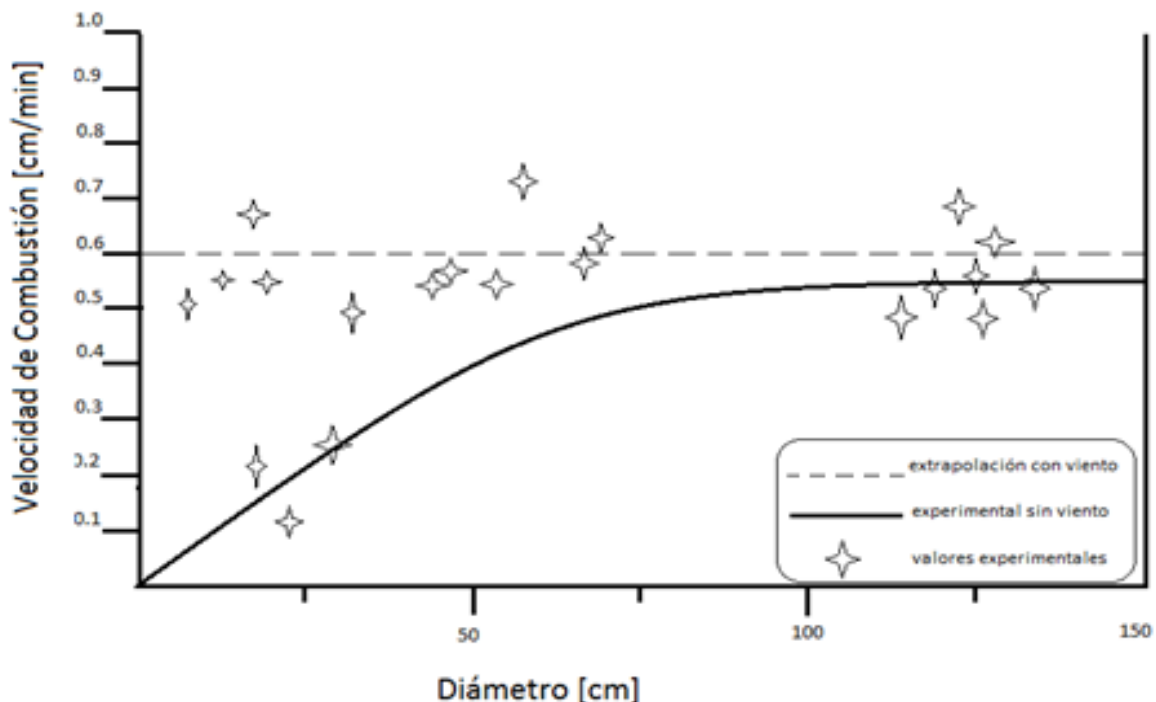
En conclusión podemos decir que, en diámetros considerablemente grandes de tanques de almacenamiento, la radiación es el principal mecanismo de transferencia de calor, lo cual indica

que en un siniestro ocurrido en la industria petrolera la transferencia de calor por radiación es la principal fuente por la cual puede ocurrir el fenómeno de boilover.

6.2.1 Velocidad del viento

El viento influye de manera importante en la velocidad de combustión. Las primeras aportaciones realizadas para determinar cómo afectaba el viento, se le atribuye a Burgges, Strasser y Grumer en el año de 1961. En el experimento que realizaron se utilizó como combustible benceno a condiciones variables del viento, que iban desde vientos despreciables, hasta vientos con velocidades de 4 [m/seg]. Con tales experimentos pudieron deducir que la velocidad de combustión aumenta con respecto a la velocidad del viento, pero esto solo ocurre en contenedores de diámetro pequeño (>1 [m]), y para diámetros mayores a 1 metro se alcanza un valor constante en la velocidad de combustión, como puede apreciarse en la siguiente gráfica (Figura 55). El comportamiento de tales experimentos, están relacionados a los mecanismos dominantes de transferencia de calor, que para diámetros superiores a 1 metro, se consideran despreciables los mecanismos por convección y por conducción, dominando la transferencia de calor por radiación.

Figura 55. Velocidad de combustión en función del diámetro del contenedor.



Los resultados obtenidos por estos autores fueron resumidos en la grafica anterior, en donde se puede observar, que la línea continua representa la velocidad de combustión en función del

diámetro del tanque o contenedor, donde las condiciones del viento no influyen ya que se probaron vientos inferiores a los 0.3 [m/seg]. En la línea punteada podemos observar la extrapolación de la velocidad de combustión, para diámetros infinitos y los puntos que se encuentran dispersos alrededor de esta línea discontinua representan las velocidades de combustión para diferentes condiciones de viento de hasta 4 m/seg.

Combinando la *Ecuación 3* y *Ecuación 4* y de igual manera despreciando los términos referidos al calor por conducción y por convección se obtiene la siguiente ecuación (*Ecuación 7*).

Ecuación 7. Velocidad de combustión a diferentes condiciones de viento

$$\dot{y} = \frac{\sigma F (T_l^4 - T_b^4)}{\rho \Delta H_v} (1 - e^{-kD})$$

Donde;

F factor de vista

T_l temperatura de la llama (K)

T_b temperatura en el seno del líquido a condiciones ambientales (K)

σ constante de Stefan Boltzmann ²⁵5.67*10⁻⁸ (W*m⁻²*K⁻⁴)

ΔH_v calor latente de vaporización (J/kg)

k coeficiente de extinción (m⁻¹)

D Diámetro del contenedor (m)

y' velocidad de combustión (mm/seg)

Esta ecuación es solo válida para diámetros mayores a un metro, proporciona la velocidad de combustión en [mm/seg]. En condiciones de viento prácticamente despreciables, dicha ecuación representa el comportamiento de la línea continua que se observa en la Figura 55 donde se deduce que la velocidad de combustión se ve influenciada por tres parámetros que son; el factor de vista (**F**) de la llama hacia la superficie de la balsa, la temperatura de la llama (**T_l**), y el coeficiente de extinción (**k**). A medida que el viento aumenta sus efectos dejan de ser despreciables y dejan sentir su efecto en la variable analizada. Si la velocidad del viento es la suficiente para que pueda ocurrir un desplazamiento de la llama, el factor de vista, el coeficiente de extinción y la temperatura de llama no se verán afectados. Sin embargo en presencia de viento fuerte, se produce una agitación en la superficie del combustible quemado y una agitación en la llama y como consecuencia un aumento en el coeficiente de extinción, debido a una mayor opacidad del fuego. El termino e^{-kD} decrece y por lo tanto el efecto debido a un aumento en la

²⁵ La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro *emite* radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m²) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

ventilación es análogo al efecto producido por un aumento en el diámetro del tanque o depósito, es decir, existe un valor máximo de velocidad del viento en donde la velocidad de combustión es constante. Sin embargo los autores encontraron limitaciones de carácter práctico en estas deducciones, ya que si por el contrario, el líquido combustible se encuentra contenido en un tanque medio lleno en donde las paredes del mismo son altas en relación al nivel del líquido, una fuerte turbulencia debida al viento, puede aumentar en centenas de grados la temperatura de la llama, y en este caso la velocidad de combustión puede verse afectada aumentando a una razón de dos veces, en comparación a que si el tanque estuviera lleno.

En otros estudios realizados por Cottone en 1989, observó que en general la velocidad de combustión no era la misma en toda la superficie del líquido, sino que ésta era mayor en la periferia del incendio, en donde la mezcla de vapores combustibles y aire era más eficaz, sin embargo también observó que en tanques con diámetros grandes la velocidad de combustión resultó ser mayor en el centro del tanque, él atribuyó este hecho a que el efecto en el aumento del diámetro sobre la radiación de la llama es más importante que el aumento en la velocidad del viento sobre la velocidad de combustión.

Con los estudios realizados, se puede concluir que aun es difícil conocer con precisión los efectos que causa la velocidad del viento sobre la velocidad de combustión, ya que los resultados fueron distintos para las diferentes condiciones tanto en el diámetro de los tanques o contenedores, como en la velocidad del viento y en las características fisicoquímicas del combustible analizado.

6.3 Geometría de la Llama

Estudiar la geometría de la llama, surgió como necesidad de poder determinar la influencia que un incendio tenía sobre instalaciones adyacentes y los daños que éste pudiera ocasionar. El análisis de esta variable también fue estudiada a escala pequeña, pero con el paso de los años ha surgido la necesidad de estudiar la geometría de la llama a gran escala, es decir en instalaciones reales, pero experimentar en una instalación donde se almacenan hidrocarburos resulta ser muy peligroso, además de que representa costos extremadamente elevados. Esto hace prácticamente necesario poder correlacionar los efectos producidos por un incendio pequeño a un incendio a gran escala.

6.3.1 Longitud de la Llama

En 1956 se llevaron a cabo experimentos utilizando alcohol, benceno, gasolina y keroseno como combustibles en contenedores de 30 cm de diámetro, en cada una de las pruebas se vertieron 6 cm de combustible sobre el agua, y posteriormente fueron incendiados. Esta prueba se realizó utilizando grabaciones de 30 imágenes por segundo, por un periodo de 10 segundos cada minuto

que continuaba la combustión, de esta manera pudieron los autores observar y analizar las llamas y registraron que estas llamas presentaban diferencias en cuanto a sus dimensiones, dependiendo del tipo de combustible que se estuviera quemando. Un año más tarde científicos como Blinov y Khudiakov evidenciaron que la estructura del incendio cambia en relación al diámetro, pasando de una forma cónica estable a una llama con altura pulsante y estas características sucedían conforme se aumentaba el diámetro.

Hottel en 1959 realizó un análisis de los estudios realizados en 1956 por los científicos soviéticos (Blinov y Khudiakov), evidenciando que la relación que existe entre la altura de la llama y el diámetro de los contenedores era muy grande cuando el líquido quemaba sobre un régimen laminar, es decir, sobre diámetros de contenedores muy pequeños, y conforme se iba aumentando el diámetro esta relación disminuía, hasta el punto de alcanzar un régimen turbulento, característico de los tanques con diámetros mayores, y observó que en este punto la relación entre la longitud de la llama y el diámetro era prácticamente constante, con un valor de 2.

Thomas en 1963, fue el primero en proponer una correlación para determinar la altura de la llama visible de las llamas turbulentas difusivas, en ausencia de viento. Este experimento se contempló a pequeña escala, en el cual se quemaron pequeños trozos de madera apilados y ordenados horizontalmente, una vez que fue fijada la altura de la pila (D), variando la cantidad de madera y la disposición de los trozos de madera en el interior de la pila, se midió la velocidad de combustión directamente a partir del peso medido antes y después de la combustión, y también fue posible grabar el experimento para determinar de esta manera la altura de la llama. Thomas propuso que la altura de la llama difusiva turbulenta dependía del caudal volumétrico del combustible vaporizado \dot{V}_v y la altura de la pila D , según la siguiente Ecuación 8 y en donde “ q ” es el coeficiente empírico adimensional dependiente de la forma de la llama (normalmente igual a 1).

Ecuación 8. Altura de la llama

$$\frac{L}{D} \alpha \left(\frac{\dot{V}_v^2}{gD^5} \right)^{\frac{1}{2q+1}}$$

Donde;

- L** altura/longitud de la llama visible (m)
- D** altura de la pila de madera (m)
- α** difusividad térmica del combustible (m^2/seg)
- \dot{V}_v^2** caudal volumétrico del combustible vaporizado (m^3/seg)
- g** aceleración de la gravedad (m/seg^2)

q coeficiente empírico adimensional dependiente de la forma de la llama generalmente igual a **1**.

A partir de una interpolación de los datos que obtuvo en el experimento Thomas obtuvo la siguiente ecuación empírica:

$$\frac{L}{D} = 42 \left(\frac{\dot{m}}{\rho_a (gD)^{1/2}} \right)^{0.61}$$

Ecuación 9. Altura de la llama

Thomas evaluó también los efectos que tenía el viento, sobre la geometría de la llama, realizó experimentos con velocidades de viento controlada de entre 1.5 y 4.5 m/seg., los resultados que obtuvo lo llevaron a deducir la siguiente relación (Ecuación 10):

Ecuación 10. Efectos del viento sobre la geometría de la llama.

$$\frac{L}{D} = 70 \left(\frac{\dot{m}^2}{\rho_a^2 g D} \right) \left(\frac{u^2}{g D} \right)^{-0.11}$$

Donde;

- L** altura/longitud de la llama visible (m)
- D** altura de la pila de madera (m)
- m[·]** velocidad instantánea de combustión (kg*m⁻²*seg⁻¹)
- u** velocidad del viento (m/seg)
- g** aceleración de la gravedad (m/seg²)
- ρ_a** densidad del aire (kg/m³)

La Ecuación 10 sufrió una reestructuración por el mismo autor para quedar de la forma siguiente:

*Ecuación 11. Efectos del viento sobre la geometría de la llama. ***

$$\frac{L}{D} = 55 \left(\frac{\dot{m}}{\rho_a (gD)^{1/2}} \right)^{0.67} \left(\frac{u^2}{gD} \right)^{-0.21} = 55 (\dot{m}^*)^{0.67} (u^*)^{-0.21}$$

Donde;

- L** altura/longitud de la llama visible (m)

D	altura de la pila de madera (m)
m[·]	velocidad instantánea de combustión (kg*m ⁻² *seg ⁻¹)
ρ_a	densidad del aire (kg/m ³)
g	aceleración de la gravedad (m/seg ²)
u	velocidad del viento (m/seg)
m^{·*}	velocidad de combustión dimensional
u[*]	velocidad del viento adimensional

Las correlaciones anteriores (Ecuación 9 Ecuación 10 y Ecuación 11) se siguen utilizando para el cálculo de la altura de la llama en incendios de hidrocarburos en tanques de almacenamiento, a pesar de que la base de estos experimentos fue con combustible sólido, pero algo de suma importancia es que lo que realmente afecta la longitud de la llama es que sea difusiva y en régimen turbulento, independientemente del tipo de combustible que se esté quemando. Si la llama es en régimen turbulento y es difusiva, las ecuaciones anteriores pueden aplicarse.

Más tarde en 1999 Tagakashi, realizo un análisis de un incendio a gran escala, el experimento consistió en el desarrollo de una técnica de análisis de imágenes, que se aplico a las grabaciones de video de dicho incendio llevado a cabo en 1981 por la *Japan Society for Safety Engineering (JSSE)*, en tanques de almacenamiento de 30 y 50 [m] de diámetro. Para cada incendio se consideraron 30 segundos de grabación a una velocidad de 10 imágenes por segundo. Esta técnica se basa en los valores de **RGB**²⁶, que asume un valor de probabilidad a cada pixel que compone la imagen digital, en base a esto Tagakashi y colaboradores, establecieron condiciones algebraicas sobre los valores de RGB, que tienen razonablemente la pertenencia del pixel en el perfil de la llama. A cada pixel examinado se le atribuye un valor de probabilidad de pertenencia a la zona luminosa, que se define como la relación entre el número de imágenes en las cuales el pixel respeta las condiciones de luminosidad y el número de imágenes total. Estos resultados mostraron que la máxima probabilidad de existencia de la zona luminosa de llama se encuentra en el eje de la columna del incendio, a una distancia aproximadamente de 25 [m] sobre la superficie del combustible para el caso del tanque de 30 [m] de diámetro y a 60 [m] para el tanque de 50 metros de diámetro, siempre sobre el eje del incendio. Existe una influencia del diámetro, ya que el valor de probabilidad máxima de existencia de la llama luminosa, disminuye al aumentar el diámetro.

Gracias a este estudio se pudo observar que las llamas en incendios a gran escala, se comportan de manera distinta con respecto a los de pequeña escala; ya que la probabilidad de existencia de la zona luminosa en incendios a pequeña escala es de 1 y se encuentra justo en la superficie del

²⁶ : Es la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios de la luz, en ingles R: red, G: green, B: blue

combustible quemado, y va disminuyendo a razón que el diámetro aumenta. Con esto se concluye que los experimentos hechos para incendios de pequeña escala no son aplicables para incendios grandes y reales.

En el año 2000 Koseki midió la altura de la llama para incendios de 20 [m] de diámetro, esta altura se obtuvo a partir de las imágenes registradas por una cámara termográfica, que se instaló en un helicóptero permitiendo la visión completa de la llama, esto hubiese sido muy difícil colocando una cámara a nivel del suelo, debido a las grandes dimensiones del incendio. Koseki, encontró que la temperatura de la llama era superior a los 230°C, y para obtener la altura de la llama se promediaron las medidas procedentes de 12 imágenes IR (imagen infrarroja), estimaron que la altura de la llama era de 1.9D, es decir, 1.9 veces el diámetro del incendio. Por lo que también concluyeron que las correlaciones hechas para incendios de pequeña escala no podían ser aplicadas a incendios reales y de mayor magnitud.

Otro factor que influye es la inclinación de la llama, esta inclinación es causada debido a la velocidad del viento, este factor debe ser analizado por razones de seguridad, ya que si la llama llega a presentar una inclinación que pueda alcanzar instalaciones contiguas, representara un gran riesgo, en incendios reales una llama inclinada puede llegar a tener efectos más graves que una llama sin inclinación. Una llama inclinada puede traer consigo un efecto dómimo.

6.4 Hot Zone Boilover

Como ya sea mencionado en apartados anteriores, para que este fenómeno pueda ocurrir se necesita de tres condiciones que son:

- Presencia de agua.
- Formación de una capa isotérmica (*hot zone*) que se propague hacia el fondo del tanque mediante una onda de calor y,
- El combustible debe ser bastante viscoso.

En párrafos siguientes se explicara acerca de los experimentos que fueron realizados, para el estudio del hot zone boilover y notar las diferencias en las observaciones que encontraron cada uno de los autores.

Dos autores realizaron experimentos en años distintos, por una parte Burge en 1947 y por otro lado Koseki en 1994, ambos llegaron a la conclusión de que la formación de la onda de calor está relacionada con procesos de destilación y que su propagación es proporcional a la diferencia entre la velocidad de propagación aparente de la propia onda y la velocidad de combustión.

En 1961 Blinov y Khudiakov, atribuyeron que la formación de la onda de calor a la transferencia a través de las paredes del tanque, que es en donde según ellos comienza el fenómeno. Estos autores también propusieron una ecuación para el cálculo del espesor de la onda de calor en función del tiempo.

Ecuación 12. Espesor de la onda de calor en función del tiempo.

$$h_{hz} = h_{hz,max} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{j}\right) \right)$$

Donde;

h_{hz} espesor de la onda de calor (mm)

$h_{hz,max}$ espesor máximo de la onda de calor (mm)

j constante de tiempo característica función del combustible y del recipiente.

En estudios sucesivos pero hechos en 1985, se observó en cambio que el incremento del espesor de la onda de calor con el tiempo era lineal, mientras dicha onda se propaga hacia el fondo del tanque.

En 1983 Petty propuso un espesor mínimo de combustible para que exista la combustión (pocos milímetros), además los resultados que obtuvo resultaron contradictorios (a los obtenidos por Burge y Koseki) a los que atribuían el boilover a un proceso de destilación, ya que la temperatura superficial del combustible resultaba ser constante durante todo el incendio, en lugar de aumentar como una destilación lo requiere.

En 1991 otro estudio experimental realizado por Koseki et al. Utilizaron fracciones de petróleo y keroseno en 5 contenedores de acero, cuatro de estos eran circulares con diámetros de 0.3, 0.6, 1 y 2 [m] de diámetro y un contenedor cuadrado de 2.7 [m] de lado. Las pruebas se realizaron con espesores de combustible comprendidos de entre 10 y 100 [mm] y se midieron parámetros como: velocidad de combustión y de regresión de la onda de calor, radiación emitida por la llama, temperatura en la capa de combustible y en el interior de la llama y por último el residuo de combustible. El análisis de los resultados permitió advertir que la formación de la onda de calor podría ser el mecanismo clave para la formación del boilover y que a su vez la aparición del fenómeno podría depender del diámetro del contenedor y del espesor inicial de combustible, por lo que se concluyó lo siguiente:

- La velocidad de regresión de la onda de calor se determinó en aproximadamente 3[mm/min] independientemente del diámetro del incendio, pero solo en el rango de 0.3 hasta 1 [m] de diámetro. Se pudo observar también que para un determinado espesor de

combustible, la velocidad de combustión en el boiler (la intensidad de ebullición), resulto decrecer con el aumento del diámetro.

- Cuando inicia la ebullición del agua, aumenta rápidamente la radiación, las llamas son mucho más grandes y el agua se encontraba sobrecalentada. Para espesores superiores a los 50 [mm] de combustible se registraron grandes aumentos de velocidad de combustión y radiación hasta 10 veces y del combustible no quemado al final de la prueba hasta 7 veces. Con este resultado se sugiere la transición de un *thin layer boiler* a un *hot zone boiler* para espesores iniciales de crudo de 50 [mm].

En otro estudio en 1994 el mismo Koseki, a partir de los datos obtenidos en su estudio realizado en 1991 y de nuevos experimentos a cielo abierto con tanques de hasta 17.2 [m] de diámetro obtuvo resultados como:

- Los valores de temperatura del combustible proporcionaron datos coincidentes con una posible destilación en el interior del combustible. Al aumentar la cantidad de combustible consumido, la temperatura de la *hot zone* crecía, de acuerdo con la curva de destilación del crudo quemado. En efecto los combustibles con ancho rango de ebullición (como el crudo) presenta la más alta tendencia al boiler.
- La propagación de la onda de calor (*heat wave*) hacia el fondo del tanque, se relaciona con la diferencia entre la velocidad de la *hot zone* y la velocidad de combustión; solo en el caso en que la *hot zone* avance más rápido que la velocidad de combustión puede ocurrir boiler. En caso contrario el combustible quemaría antes de alcanzar la temperatura suficiente para sobrecalentar el agua presente en el fondo (Figura 56)
- El espesor de la onda de calor en el momento de aparecer el Boiler fue definido por la siguiente expresión (
- Ecuación 13):

Ecuación 13. Espesor de la onda de calor al aparecer Boiler

$$h_{hz} = (\dot{r} - \dot{y})t_b = h_0 \left(1 - \frac{\dot{y}}{\dot{r}}\right)$$

Donde;

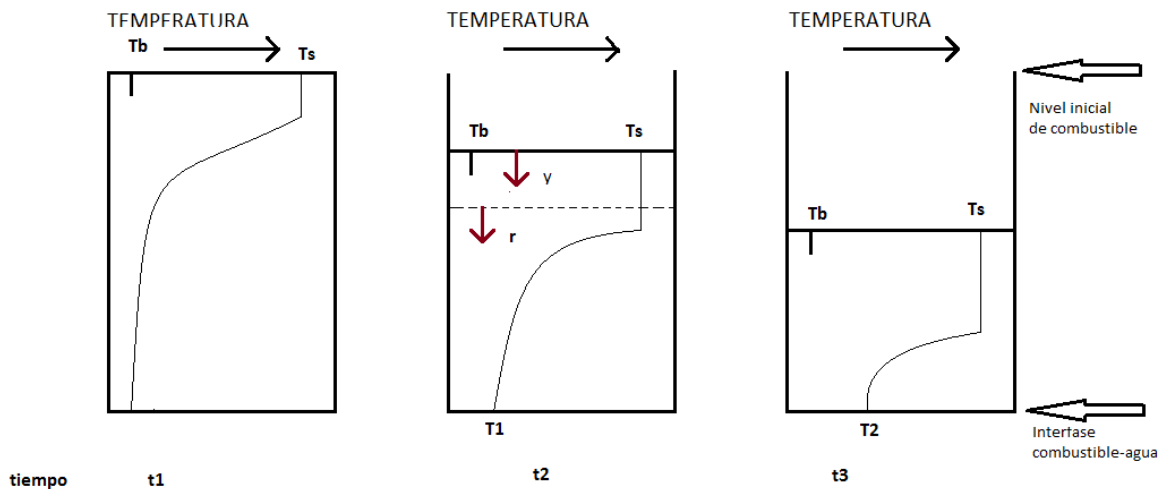
h_{hz} espesor de la onda de calor (mm)

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

- \dot{r} velocidad de regresión de la onda de calor (mm/seg)
- \dot{y} velocidad de combustión (mm/seg)
- t_b instante de inicio de boilover (seg)
- h_0 espesor inicial del combustible (mm)

- Como ya había observado Koseki en 1991, la intensidad de ebullición era mayor cuanto más grande era el espesor de la *hot zone* al inicio del boilover.
- La energía utilizada para la formación de la *hot zone* era siempre inferior al 5 % de la radiación procedente de la llama y la misma disminuía al crecer el diámetro, pese a que el calor total normalmente aumentaba.
- La cantidad de agua presente bajo la capa de combustible no influía en el boilover.

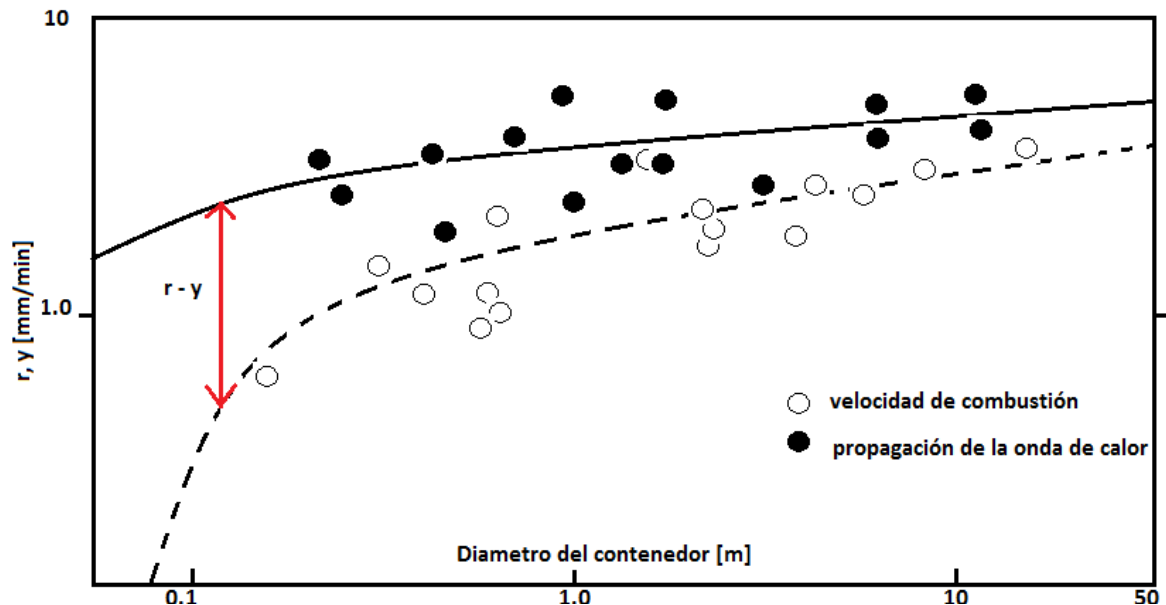
Figura 56. Propagación de la onda de calor hacia el fondo del tanque.



En la siguiente grafica (Figura 57) Koseki compara el comportamiento de la velocidad de combustión y la velocidad de propagación de la onda de calor (*heat wave*), al variar el diámetro del tanque o contenedor. Se puede observar como ambos parámetros crecen con las dimensiones del tanque, además la velocidad de combustión controlada por el calor de la radiación que llega a la superficie del combustible, crece en mayor medida que la propagación de la onda de calor regulada por la convección y conducción en el interior del combustible. La diferencia entre los parámetros ($\dot{r} - \dot{y}$) determina la posibilidad de formación de boilover. **Consecuentemente en un tanque de gran diámetro es más difícil que ocurra el fenómeno, debido a la pequeña diferencia entre los dos valores.**

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

Figura 57. Dependencia de la velocidad de propagación de la onda de calor y la velocidad de combustión con respecto al diámetro del tanque.



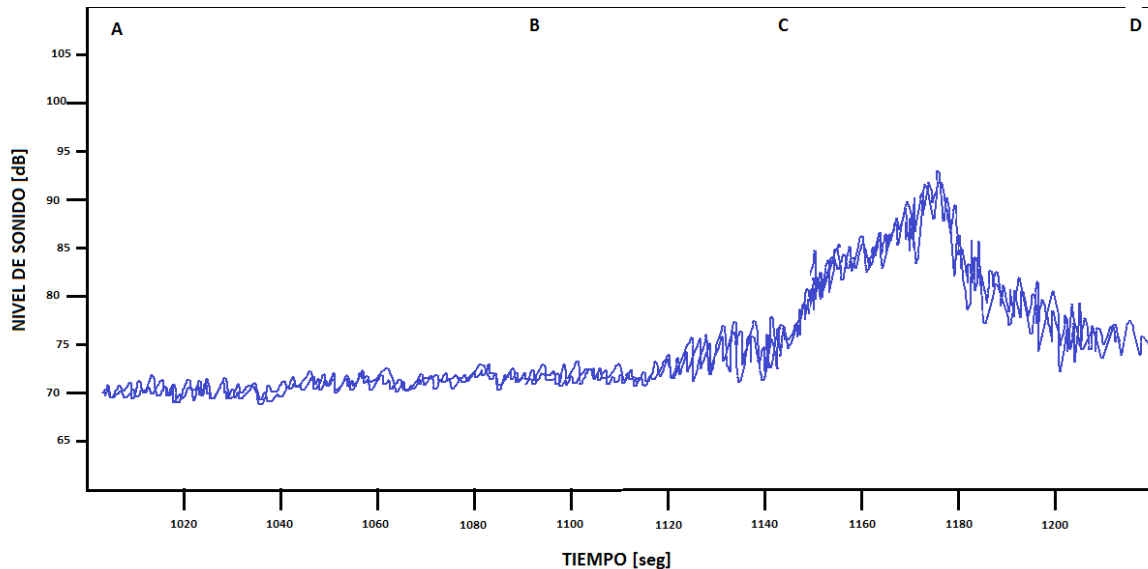
En el año de 1995 se realizaron pruebas para detectar el momento en que ocurría el boilover en contenedores de pequeña escala, se utilizó keroseno, petróleo y aceite para máquinas. En este experimento realizado por Fan, se visualizó la estructura de la llama utilizando videocámaras y se midió la temperatura tanto del agua como del combustible. La característica principal de este experimento fue el empleo del sonido producido por el incendio, para saber el momento en el que se desarrollaría el fenómeno. Estas características del sonido se dividieron en tres etapas:

- **Estado cuasi estacionario (Quasy-Steady State):** representa la etapa inicial del incendio, no hay ebullición de agua y el sonido se comporta de manera lineal.
- **Periodo premonitorio (Premonitory Period):** en esta etapa comienza la ebullición de la capa de agua, aunque no de manera intensa, se forman burbujas que son expulsadas inmediatamente. Comienza la explosión de algunas pequeñas burbujas de vapor cubiertas con combustible. En esta etapa del experimento ocurre un fenómeno denominado "*micro-explosion noise*" que es atribuible a la explosión de las burbujas mencionadas anteriormente.
- **Espumación desbordante (Boilover):** en este momento la ebullición ya es muy intensa, las burbujas no pueden escapar inmediatamente, así que antes deben alcanzar ciertas dimensiones para poder ser expulsadas. Esto provoca un ruido intenso que se denominó "*vapour-explosion noise*", que se asocia precisamente a la explosión de las burbujas cubiertas de combustible.

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

En la siguiente gráfica (Figura 58) se muestra el comportamiento del sonido en cada una de las etapas del incendio y hasta que ocurre el boilover.

Figura 58. Comportamiento del sonido en incendios donde se produce Boilover.



A partir de lo anterior, se propuso utilizar al fenómeno de “*micro explosión noise*” como un mecanismo para detectar el inicio del Boilover.

Por otro lado en el mismo año (1995), Broeckmann y Scheker, también analizaron las causas del Boilover en contenedores pequeños de entre 0.19 y 1.9 [m] de diámetro. Para este experimento se colocaron un grupo de termopares a diferentes alturas en correspondencia al eje del tanque, estos sensores eran de NiCr/Ni de 1.5 [mm] de diámetro. La temperatura de las llamas se midió con una cámara termográfica, los efectos de la evaporación del agua se registraron mediante una cámara de video y la velocidad de combustión se midió de acuerdo al tiempo en que la superficie del líquido incendiado alcanzaba a los termopares. Debido a este análisis los autores pudieron determinar la existencia de dos categorías de combustibles:

- **Combustibles que no forman hot zone** (Fuels non Forming Hot Zone): a esta clasificación pertenecen los combustibles que no dan origen a una onda de calor y por consecuencia no causan boilover (disolventes o compuestos puros).
- **Combustibles que forman hot zone** (Fuels Forming Hot Zone): son los combustibles que producen boilover cuando la onda de calor alcanza la capa de agua. Estos combustibles son los que están formados por varios hidrocarburos y por ende presentan puntos de ebullición diferentes entre sí.

De acuerdo a las consecuencias de la vaporización del agua, estos autores observaron lo siguiente:

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

- Para los combustibles que originaban una hot zone, la altura de la llama aumentaba notablemente hasta valores de 15 [m], esto se observó de igual manera en tanques de 1 y 2 [m] de diámetro, también observaron la formación de bolas de fuego a grandes alturas y un aumento en la radiación emitida.
- Por otro lado, en los combustibles que no eran capaces de formar una hot zone, la vaporización del agua causó un aumento en la altura de la llama y un consecuente aumento de la radiación. Debido a las características del combustible, solo se calienta una pequeña capa del mismo, la cual baja progresivamente hasta el fondo del tanque, con una velocidad igual a la regresión de la superficie libre del líquido. Es por esto que cuando se produce la ebullición del agua solo estará presente un estrato muy pequeño de combustible, por ende los efectos serán menores, aunque no despreciables.
- La cámara termográfica registro temperaturas de entre 800 y 1000° C antes del boilover, mientras que cuando comenzó la ebullición del agua se alcanzó una temperatura de hasta 1300°C, consecuentemente la radiación emitida por la superficie de la llama hacia el exterior aumento desde 45 a 120 kW/m² durante el boilover. Debido al aumento de las dimensiones de la llama, resulto que la distancia de seguridad para evitar daños a instalaciones aledañas y quemaduras, debía aumentar hasta en un factor de 6.

Los resultados obtenidos por estos autores los llevaron a determinar que un combustible que no forma una hot zone solo puede presentar un thin layer boilover, cualquiera que sea el espesor inicial de dicho combustible.

Experimentos más recientes fueron realizados desde 1999 y hasta 2004. Estos estudios fueron hechos por Fabio Ferrero bajo la dirección de Joaquim Casal y Joshep Arnaldos en el CERTEC (Centre d' Estudis del Risc Tecnològic) de la Universidad Politècnica de Catalunya. Esta serie de experimentos se realizaron para analizar el fenómeno de boilover de capa fina. Para llevar a cabo estos experimentos se hicieron necesarios las siguientes instalaciones:

- 5 balsas circulares concéntricas de hormigón armado (de 1.5, 3, 4, 5 y 6 metros de diámetro).
- Sistemas de soportes de termopares situados en el perfil de la llama.
- Sistema de posicionamiento de los termopares en el interior del líquido.
- Salas de control y de almacenamiento.
- Equipos de sistemas auxiliares (extintores, cableado de comunicación de los equipos, recubrimientos aislantes, suministro de combustible, etc.).

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

- Instalaciones propias del área de prueba (hidrantes, estación de bombeo de agua, enlace a la red eléctrica, etc.).

Figura 59. Instalación Experimental del CERTEC.



En los estudios realizados durante estos años no se observó la formación de una onda de calor (heat wave), debido a los limitados espesores de combustibles y a las peculiares características de los hidrocarburos utilizados, solo logro observarse una zona a alta temperatura de espesor muy reducido la cual no incrementa de tamaño ni de temperatura al avanzar hacia el fondo de la balsa. Esta zona encontrada la denominaron "*seudo onda de calor*" y se propaga a la misma velocidad que la velocidad de combustión y adquiere características distintas según el tipo de hidrocarburo; en el caso del gasóleo, estas características llevan a la formación del *thin layer boilover*.

El objetivo principal de desarrollar esos experimentos, fue desarrollar un modelo matemático para caracterizar la evolución de la temperatura en el interior de la capa del líquido y, especialmente en la interfase agua-combustible, para las mezclas de combustible que se queman sobre agua. Prácticamente los resultados obtenidos han sido los mismos a los que he mencionado a lo largo de este capítulo.

Otra parte de este estudio fue la modificación del modelo aplicable para boilover de capa fina y extender su aplicación para un hot zone boilover, es decir capas gruesas de hidrocarburos que son capaces de formar la onda de calor. Además los autores, buscaban de esta manera aclarar si existía alguna diferencia sustancial entre estas dos tipologías de boilover, o bien, si estas son prácticamente iguales con leves variaciones.

Como objeto de este trabajo se busca que el análisis y la investigación se asemejen más a lo ocurrido en los tanques de almacenamiento, por esta razón, pondremos más énfasis en la modificación del modelo original para representar el fenómeno de boilover genérico.

6.5 Modelo Teórico Hot Zone Boilover

Considerando una velocidad de las corrientes convectivas variable con el tiempo, de acuerdo con la ecuación:

Ecuación 14. Velocidad de corrientes convectivas

$$V_a = V_{a,0}(\rho_0/\rho_r)$$

Donde;

V_a velocidad de las corrientes convectivas (mm/seg)

V_{a,0} velocidad inicial de las corrientes convectivas (mm/seg)

ρ₀ densidad inicial del combustible (kg/m³)

ρ_r densidad del combustible sin quemar (kg/m³)

La velocidad de **las corrientes convectivas se define como una velocidad efectiva generada por el movimiento hacia abajo de los componentes más pesados del combustible, los cuales remplazan a los componentes de menor densidad y que a su vez viajan hacia la superficie**, este movimiento reciproco produce un flujo de calor hacia abajo, ya que las partículas que están por encima se encuentran a una temperatura más elevada, debido a que los componentes de baja densidad son evaporados, la densidad promedio del combustible cambia aumentando durante la quema del mismo. Esto es, que mientras el proceso se desarrolla el rango de densidad de los componentes del combustible quemado se hace cada vez más estrecho, y por esta razón la velocidad de las corrientes convectivas adquiere valores menores.

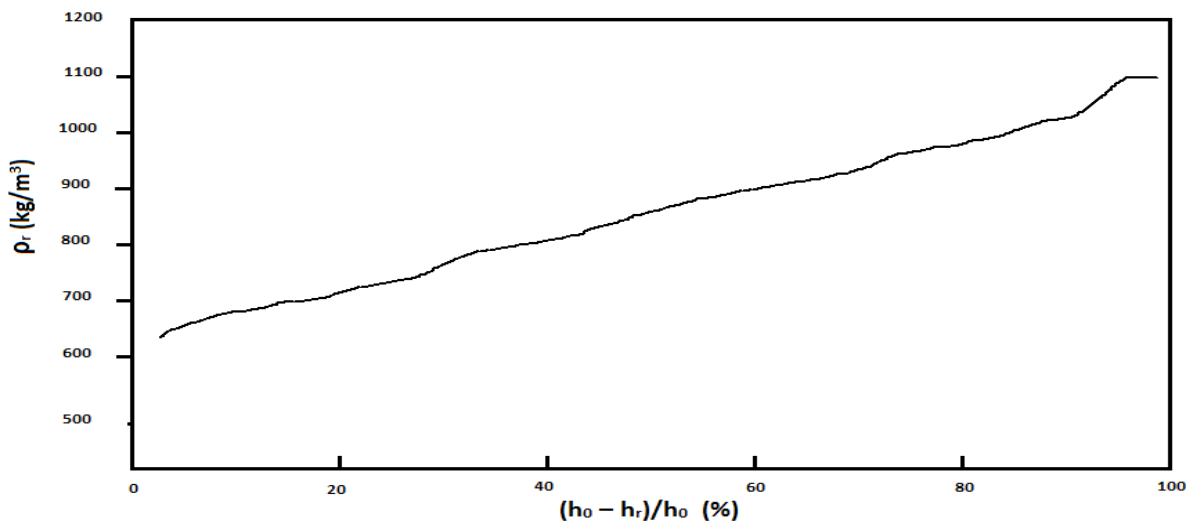
Pero esta observación no fue un resultado nuevo para Fabio Ferrera y la CERTEC, ya que la suposición antes mencionada, ya había sido descubierta por Broeckman y Schecker en 1995, quienes determinaron que la velocidad de expansión de la hot zone hacia el fondo del tanque

decrecía al aumentar la temperatura de dicha zona, es decir al quemarse las partículas más ligeras, aumentaba la densidad del combustible por ende la velocidad de la hot zone disminuía.

De esta manera podemos concluir que para el hot zone boilover las suposiciones, las ecuaciones y las condiciones son las mismas que las utilizadas en el modelo del thin layer boilover, con la única diferencia que V_a es un valor variable y no constante según la Ecuación 14

En la siguiente grafica (Figura 60) se muestra la variación de la densidad del combustible, en función del mismo combustible quemado.

Figura 60. Variación de la densidad del combustible.



En este nuevo modelo el parámetro de ajuste es la velocidad inicial de la corriente convectiva $V_{a,0}$.

Los autores realizaron comparaciones entre los resultados obtenidos con su modelo modificado para hot zone boilover, y con los datos de experimentos hechos antes por otros autores (Koseki y Broeckman), y obtuvieron resultados muy parecidos, por lo que sus predicciones resultaron ciertas al ajustar un modelo que en un inicio era para thin layer boilover al hot zone boilover, por lo tanto debido se puede afirmar que el modelo se aplica para espesores mayores de combustibles.

Todos los datos que fueron modelados obtuvieron un buen ajuste entre las predicciones del modelo y los datos experimentales. También observaron que la $V_{a,0}$ no sigue una tendencia clara con el diámetro de la balsa, esta observación resulta ser coherente ya que el mismo Koseki (1994) ya había hecho esta suposición para ciertos rangos de diámetros, quien considero que la velocidad de regresión de la onda de calor era independiente del diámetro del incendio.

Por otro lado un mayor espesor de combustible, provoca una mayor velocidad de corrientes convectivas para todos los combustibles, esto se puede observar en las siguientes figuras (Figura 61, Figura 62 y Figura 63).

FENÓMENO DE ESPUMACIÓN DESBORDANTE

Figura 61. Variación de la Velocidad de las corrientes convectivas con el espesor inicial del combustible (a)

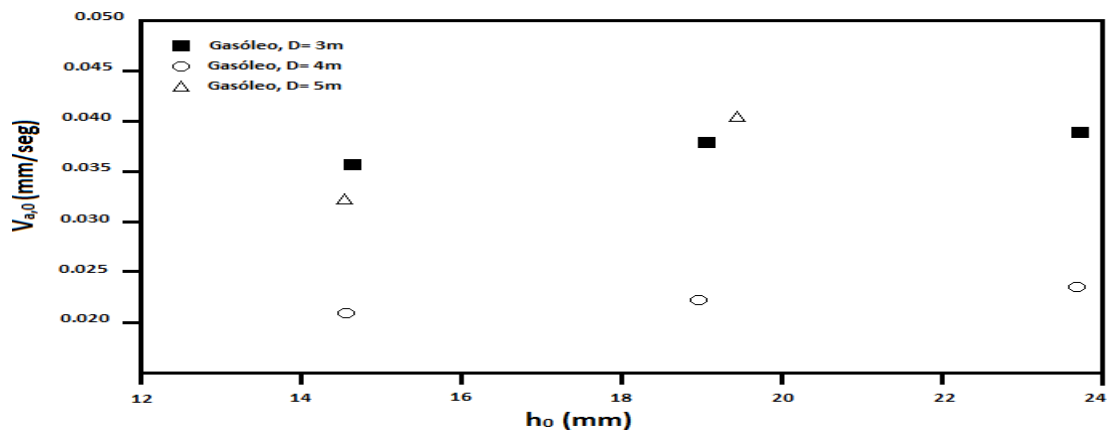


Figura 62. Variación de la Velocidad de las corrientes convectivas con el espesor inicial del combustible (b)

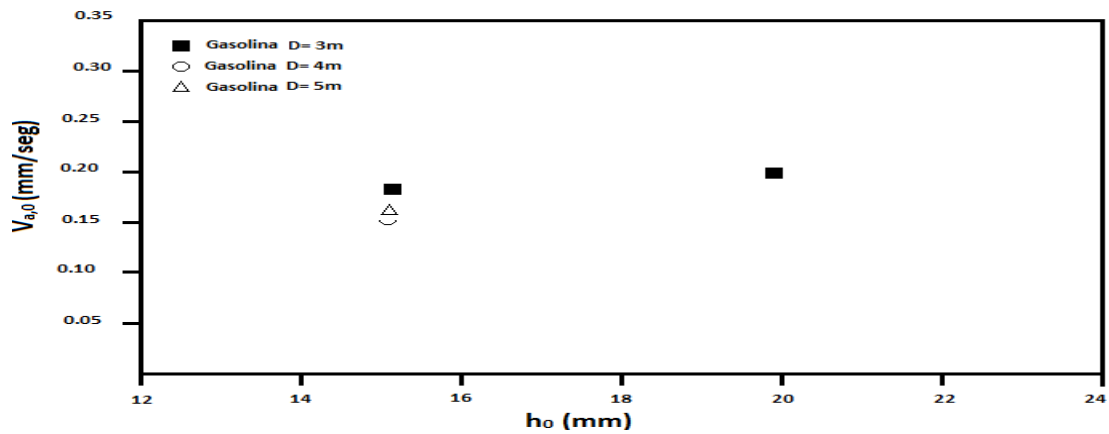
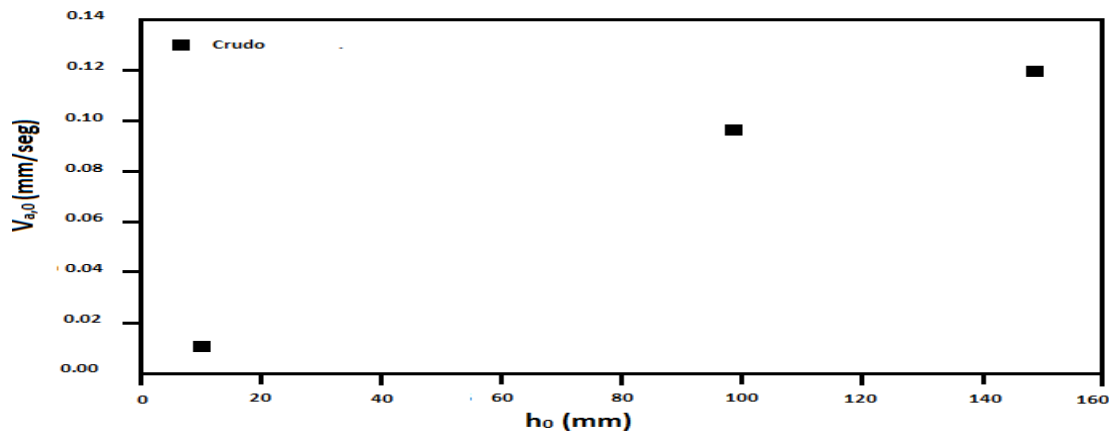


Figura 63. Variación de la Velocidad de las corrientes convectivas con el espesor inicial del combustible (c)



El calentamiento a través de una capa más espesa hace que un mayor número de partículas contribuya a la convección y en consecuencia crea mayores velocidades. Estos resultados de igual manera ya habían sido observados por Koseki en 1994, en donde los valores publicados mostraban la misma tendencia, es decir una propagación de onda de calor tanto mayor cuanto más grande es el espesor del combustible.

En la siguiente Figura 64 se presenta un análisis en términos del número de Prandlt, en esta figura se define un tiempo característico para el boilover como:

Ecuación 15. Tiempo característico²⁷ del boilover

$$t_c = \int_0^{h_0} \frac{dh_r}{v_a(h_r)}$$

El número de Prandlt,²⁸ es la relación de la velocidad cinemática con la difusividad térmica.

Ecuación 16. Número de Prandlt

$$Pr = v/\alpha = \frac{c_p \mu}{k}$$

Donde;

v es la viscosidad cinemática

α es la difusividad térmica

C_p es la capacidad calorífica a presión constante

μ es la viscosidad

k es la conductividad térmica

El combustible debe tener una naturaleza viscosa, para poder ofrecer una resistencia al paso del vapor y eventualmente, generar una expulsión violenta. Para una determina viscosidad, un combustible con una mayor difusividad térmica (un número de Prandlt mayor), requiere un tiempo mayor para que la onda de calor alcance la interfase. En los combustibles analizados en estos experimentos (gasóleo, gasolina y crudo), se encontró que el tiempo experimental al inicio

²⁷ El tiempo característico hace referencia al tiempo necesario que requiere la onda de calor, para viajar a través del combustible hasta la interfase, dicho tiempo es más elevado para combustibles con numero de Prandlt mas altos.

²⁸ En general, los valores característicos del número de Prandlt son; para los metales líquidos muy bajos, los gases tienen la particularidad de poseer un número de Prandlt en torno a 0.70, el agua tiene un valor intermedio y finalmente los valores mayores del número de Prandlt lo presentan los fluidos viscosos. Para gases y líquidos no metálicos u oleosos, el orden de magnitud del número de Prandlt es la unidad y su magnitud varía muy poco con la temperatura o la presión.

del boilover es menor que el tiempo característico, esto es evidente ya que el tiempo característico es hipotético; en la realidad la interfase alcanza temperaturas suficientemente altas, mientras el punto de temperatura máxima aun sigue viajando a través del combustible hacia el fondo del tanque. El combustible no es quemado completamente y en consecuencia el boilover ocurre antes de que dicho tiempo característico se alcance.

Para combustibles con más bajos números de Prandtl, el fenómeno de espumación desbordante “boilover” ocurre antes y para el caso de la gasolina (combustible analizado en estos experimentos y con un número de Prandtl igual a 3), no se observa dicho fenómeno, debido a que la velocidad de combustión es mayor que la velocidad de la onda de calor. Esta observación llevo a la conclusión de que existe un número de Prandtl mínimo requerido para que pueda ocurrir boilover.

Inamura en 1992 y Koseki en 1994 observaron una especie de boilover después de un largo proceso de combustión de keroseno ($Pr = 6.2$), este largo proceso de combustión podría acabar con la expulsión de dicho combustible debido a la ebullición del agua. Considerando estas observaciones, se determino que para que pueda ocurrir boilover el número de Prandtl se estableció alrededor del número de Prandtl del keroseno. Como se hizo mención antes este número puede llegar a presentar variaciones con respecto a la presión y la temperatura, para este caso se tomó como base 373 K.

El número de Fourier también fue considerado en la medida de la velocidad de penetración de la onda de calor, en la Figura 64 se muestra el número de Fourier basado en el tiempo característico y definido por la Ecuación 17 como una función del número de Reynolds, éste último definido por la **Ecuación 18**.

Ecuación 17. Número de Fourier

$$Fo = \alpha t_c / h_0^2$$

Donde;

α difusividad térmica del combustible (m^2/s)

t_c tiempo característico (seg)

h altura total del líquido en la balsa (mm)

Ecuación 18. Número de Reynolds

$$Re = V_{a,0} D / \nu$$

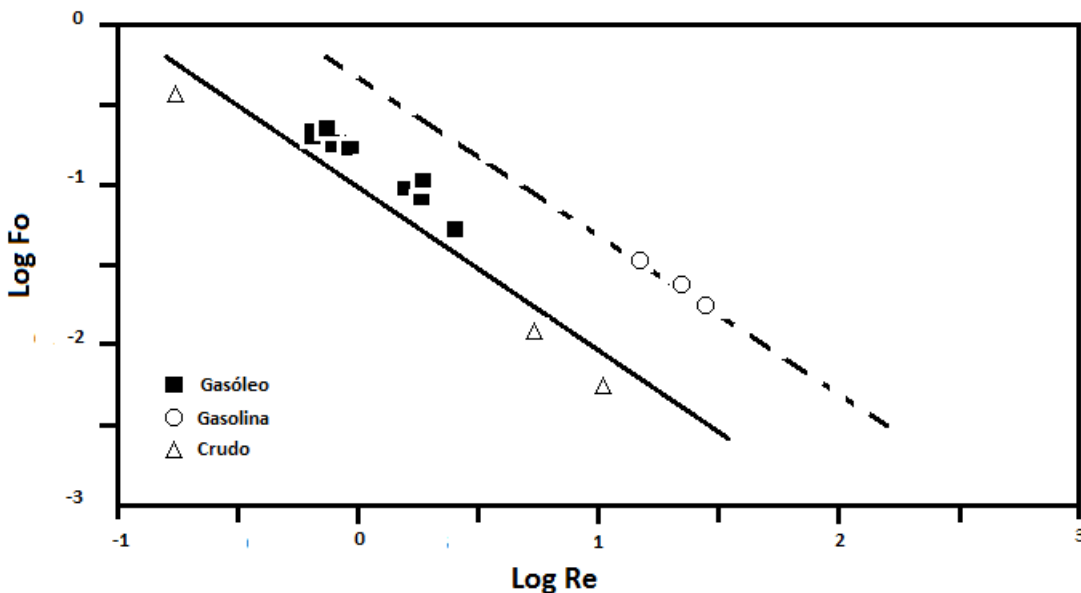
Donde;

$V_{a,0}$ velocidad inicial de las corrientes convectivas (mm/seg)

ν viscosidad cinemática (m^2/seg)

D diámetro de la balsa (m)

Figura 64. Número de Fourier vs Número de Reynolds.



Se observa que los datos de los combustibles que generan boilover (gasóleo y crudo) siguen una línea, mientras que la gasolina que no produce boilover, sigue otra tendencia, prácticamente paralela a la que siguen los otros combustibles, pero desplazada. Como ya se había mencionado el número de Fourier está considerado como una medida de la velocidad de penetración de la onda de calor, y una rápida penetración no permite la formación de un frente a temperatura suficientemente alta para producir un boilover. En otras palabras, un valor alto de difusividad térmica ayuda a reducir el riesgo de boilover. En situaciones con altos números de Prandtl y bajos números de Fourier existirá el boilover. Mientras que altos valores de ambos números producen un *thin layer boilover* y, finalmente, el boilover no ocurrirá en casos donde el número de Prandtl es relativamente bajo.

Con lo anterior se puede concluir que el mecanismo de transferencia de calor en mezclas de hidrocarburos que queman sobre una superficie de agua, para los tres casos, los que generan *boilover*, los que generan *thin layer boilover* y los que no producen ninguna de las dos tipologías, pudieron observarse con el modelo original que fue hecho para boilover de capa fina. La aparición de uno u otro depende del tipo de hidrocarburo involucrado.

También resulta evidente que la velocidad de corrientes convectivas ($V_{a,0}$) depende del tipo de combustible y del espesor al inicio del incendio, pero también es razonable pensar que esta dependencia del combustible se ve influenciada por la temperatura media de ebullición del mismo combustible.

7. MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO

7.1 Causas de Incendio

En la construcción de tanques de almacenamiento se han tomado medidas de prevención para garantizar la seguridad e integridad del personal, el material almacenado y las instalaciones. Así como para evitar al máximo el riesgo de incendio, derrames o explosiones.

Se han diseñado normas con el objeto de mitigar accidentes, estas normas involucran el diseño y la construcción óptima de los tanques de almacenamiento para minimizar la posibilidad de daño al tanque o el riesgo de un siniestro que pueda causar pérdidas humanas y económicas.

Aun con las normas para el diseño, construcción e instalación no es garantía que no existan accidentes que puedan traer consigo consecuencias devastadoras.

Los problemas que se pueden presentar son los siguientes:

7.1.1 Apoyos inadecuados

Los soportes deben diseñarse y construirse de acuerdo a las normas que regulan dichas actividades, los apoyos o soportes representan un elemento esencial ya que previenen la excesiva acción de cargas. Los cimientos del tanque deben ser diseñados para evitar asentamientos del mismo, así como también deben mitigar la corrosión en toda la superficie que descansa sobre los apoyos.

Cuando se encuentran contenidos líquidos **Clase I, II o IIIA**, en tanques que estén soportados por encima de sus cimientos, los soportes deben ser de mampostería, cemento, o acero protegido, este último debe ser capaz de tener una resistencia al fuego de al menos dos horas para hacer frente al incendio.

En caso de que los tanques sean instalados en zonas propensas a inundaciones, es necesario tomar medidas preventivas para evitar que el tanque flote durante el incremento del nivel del agua.

Aun con estas medidas preventivas existe el riesgo de que en ciertos casos haya fallas en la estructura que soportan los tanques, provocando asentamientos o que el tanque golpee el suelo provocando un derrame, un incendio o una explosión.

7.1.2 Mala Ventilación

Representa un factor de riesgo considerable la mala instalación de venteo en el tanque, ya que si éste se encuentra expuesto al fuego, el sistema no permitirá la liberación de presión y calor si existe una mala instalación o se encuentra en malas condiciones para operar, dando como resultado una explosión producida por la expansión de los vapores de líquido que se encuentran contenidos en el tanque.

Para extinguir los incendios en los Tanques de Almacenamiento es importante enfriar la zona de la envolvente del mismo, situada por encima del nivel del líquido para evitar el sobrecalentamiento del acero.

7.1.3 Mantenimiento Inadecuado del Tanque

El Tanque de Almacenamiento de crudo debe ser sometido a revisiones periódicas con el fin de garantizar su correcto funcionamiento y evitar accidentes. A veces el mantenimiento del tanque no se lleva a cabo conforme a lo estipulado, provocando que aumente el riesgo de falla de alguna de las partes esenciales del tanque como son la envolvente, el techo, el fondo del mismo o incluso las tuberías.

7.1.4 Fractura de Tuberías y Válvulas

Es importante evitar que el líquido almacenado en los tanques pueda fugarse a través de las tuberías y/o válvulas, ya que de ser así, se podría provocar un incendio, por esta razón es inminente tomar en cuenta todos los aspectos de diseño e instalación que vienen en las normas, para disminuir la posibilidad de riesgo de incendio.

Aunque la mayoría de los accidentes se deben a descuidos humanos, por no tener un estricto control y orden en la revisión y mantenimiento de las instalaciones, equipo y productos almacenados, existen otras causas en donde la responsabilidad de hombre tiene poca o nula participación, como son:

7.1.4.1 Cargas Estáticas

Las cargas electroestáticas son producidas principalmente por la fricción entre las moléculas de los líquidos en movimiento. Por ejemplo, si un líquido fluye a través de una tubería, los electrones de las áreas de contacto son atraídos hacia la superficie de dicha tubería, las moléculas forman dipolos momentáneos de carga positiva y fluyen arrastrados por la turbulencia, debido a la atracción natural entre cargas opuestas.

La carga electrostática en una tubería se incrementa conforme a la longitud hasta llegar a un valor límite que depende de la velocidad de flujo, por esta razón se establece una velocidad máxima de alimentación de 3 [ft/s].

La **NOM- 022-STPS-1999**, establece que, donde se manejen, almacenen o transporten sustancias inflamables y que además se empleen equipos que sean capaces de generar y/o almacenar cargas electroestáticas, o que estén ubicados en zonas donde puedan recibir descargas eléctricas, se deberá instalar equipos y dispositivos conectados a tierra, con equipos y materiales a prueba de explosión.

Las cargas electroestáticas pueden producirse también en la superficie del aceite dentro del tanque, debido a fuerzas friccionales acumuladas en el espacio vapor que resultan de la descarga rápida del tanque. Estas cargas no logran hacer tierra de manera instantánea, pero es posible proporcionar un paso conductor cuando se baja una línea de acero para medir la superficie de aceite y se permite que haga contacto con el techo del tanque que está a tierra, es entonces cuando es posible formar chispas estáticas que pueden provocar un incendio o peor aun una explosión. Los tanques de acero debidamente contruidos e instalados presentan poco riesgo eléctrico.

7.1.4.2 Riesgos de Rayos

La caída de rayos puede provocar incendios que tienen su origen fuera del tanque y entre las placas del techo. En la vecindad de tales estructuras la protección contra los rayos con frecuencia se logra colocando torres altas y conectando el tanque a tierra.

Un tanque de almacenamiento puede ser utilizado como un receptor de rayo si cuenta con un mínimo 5mm de espesor en su envolvente, según establece el API-2003.

Debido a que el espesor del tanque varía conforme a la altura, entonces el espesor mínimo lo tenemos en la parte más alta, con valores que oscilan alrededor de los 3/8" (95mm). Como este valor excede por mucho los límites de la Norma, pero solo es aplicable si las placas que conforman la pared del tanque no tienen corrosión, fisuras o debilitamiento en algún punto de la envolvente que permita la penetración del arco eléctrico al momento de ser golpeado por un rayo.

El sistema auto-protegido se basa en el espesor de la pared del tanque para soportar un rayo directamente en un plano equipotencial y el riesgo de descargas eléctricas locales, siempre y cuando se satisfagan los siguientes requerimientos:

- Interconectar las redes de tierra locales de los tanques, para obtener una red general, y así de esta manera lograr una red más equipotencial posible.

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

- Obtener una superficie equipotencial en los elementos constitutivos del tanque, a través de uniones metálicas permanentes y efectivas entre el cuerpo del tanque y el techo flotante si existe.
- Revisar periódicamente el sello perimetral de los techos flotantes para asegurar su funcionamiento correcto y evitar la generación de mezclas explosivas.

7.1.5 Propagación de incendios

Si el incendio llega a iniciarse por cualquiera de las causas antes mencionadas, se espera una reacción en cadena, que ira poco a poco alcanzando lugares a su alrededor y muy probablemente llegue a afectar tanques aledaños, provocando otro incendio. Para minimizar el riesgo de otros incendios en tanques cercanos se ubican muros o diques de contención para fuego o derrames alrededor de los tanques de almacenamiento.

El incendio como ya sabemos se puede generar de diferentes maneras, pero la importancia es el control del mismo para evitar el daño a otras instalaciones o tanques aledaños que puedan hacer del incendio una catástrofe mayor. (Figura 65).

Figura 65. Propagación de Incendio.



Fuente: Tomada de <http://www.ciudadccs.info/?p=329320>

7.1.6 Otros Riesgos

Es muy peligroso tener cables eléctricos y luces descubiertas cerca de los tanques, ya que en caso de que exista un derrame, el líquido puede entrar en contacto con las luces o los cables provocando que el líquido se incendie. Otro factor de riesgo es fumar cerca de los tanques de

almacenamiento ya que, los vapores que llegan a escaparse a la atmósfera son más pesados que el aire y se acumulan en áreas cercanas al tanque; entonces fumar cerca de ellos puede provocar explosiones.

7.2 Evaluación del Riesgo.

En el almacenamiento y manejo de líquidos combustibles e inflamables, existen condiciones que propician la generación de incendio. Por tal razón de hace necesario identificar y evaluar los posibles riesgos de que exista una catástrofe, los dos condiciones anteriores nos permitirán controlar el riesgo inmediatamente en caso de ocurrencia.

Las instalaciones petroleras y en específico las áreas de los tanques de almacenamiento deben contar con medidas de prevención y control de incendios, que permitan garantizar la seguridad e integridad física de los trabajadores, así como, salvaguardar las instalaciones y equipos dentro de estas áreas, y poder minimizar los riesgos de pérdidas de propiedad, reducir la posibilidad de exposición y que se propague el fuego a las instalaciones adyacentes.

Las medidas de prevención y control de incendios deberán determinarse bajo una estricta evaluación de ingeniería, y bajo la aplicación de normas que se rigen en la seguridad de los procesos y principios contra incendios.

Una evaluación para la prevención, control y combate de incendios en áreas de tanques de almacenamiento debe contar con lo siguiente:

- Analizar los requerimientos de diseño de las instalaciones y equipos.
- Análisis del manejo, transporte y transferencia de los materiales almacenados.
- Análisis de las condiciones climatológicas locales que pueden ocasionar posibles inundaciones, ciclones, tormentas eléctricas, etc.
- Análisis de riesgo de incendios y explosión de la operación.
- Análisis de la capacidad de respuesta de los servicios de emergencia.

Un análisis de riesgo necesita una evaluación continua y repetitiva, esto se hace cada vez que hay cambios en los procesos de manejo de los materiales almacenados o cuando hay cambios en los procedimientos de las operaciones. Si la evaluación se realiza de manera continua y conforme a lo establecido, es posible garantizar una reducción de riesgos y posibles accidentes que podrían ocurrir en otras condiciones diferentes a las establecidas.

Cabe mencionar que la evaluación de riesgos es una práctica que debe ser diseñada para cada una de las áreas o zonas a analizar, esto dependerá de las condiciones y el tipo de instalaciones sometidas a este análisis.

Un plan integral de prevención de accidentes y contaminación ambiental debe ser capaz de:

- Reconocer la existencia de peligros inherentes al trabajo, que puedan influir de manera adversa a los trabajadores, las instalaciones y el medio ambiente.
- Evaluar cualitativa y cuantitativamente el riesgo para determinar acciones que disminuyan la probabilidad de ocurrencia.

La evaluación del riesgo es una herramienta estrictamente de carácter preventivo, mediante la cual se aplica un análisis, evaluación y control de acontecimientos no deseados que pueden conducir a que el riesgo se concrete. Este instrumento de carácter preventivo, nos permitirá anticiparnos a la posible liberación de un accidente, de tal manera que sea posible prevenir, mitigar y cuantificar su impacto.

7.3. Análisis de Riesgos para la Seguridad del Proceso

Se utilizan técnicas para la identificación de la magnitud y la probabilidad de ocurrencia de diversos aspectos de riesgos potenciales en un proceso y para asegurar que se especifiquen medidas para la eliminación y control de estos riesgos. La evaluación de riesgos para la seguridad del proceso consta de cuatro etapas, que se especifican a continuación.

- *Identificación de los Riesgos.* Se identifican las causas que llevan a la ocurrencia del riesgo, estas causas son identificadas mediante inspecciones planeadas y no planeadas, lista de verificación, investigación de accidentes o incidentes ocurridos, método “Hazop²⁹”, entre otras herramientas.
- *Análisis y Evaluación de las consecuencias.* Ya que se han identificado las causas por las cuales puede ocurrir un incidente, con efectos nocivos y de cierta magnitud, es entonces cuando podemos determinar las consecuencias del riesgo, mediante modelos que relacionen la causa principal, con los posibles efectos y de esta manera puedan ser calificados, tanto de manera cualitativa como cuantitativa.
- *Evaluación cualitativa y cuantitativa.* Una evaluación cualitativa, evalúa los riesgos potenciales de incendio, explosión y toxicidad de los materiales almacenados en los tanques de almacenamiento, manejados en el proceso, así como también el riesgo total de la unidad de proceso , además cuenta con procedimiento de cálculo para pérdidas

²⁹ El HAZOP es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los riesgos, los accidentes o los problemas de operabilidad, se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación en un sistema dado y en una etapa determinada

económicas. Para la evaluación cuantitativa se usan modelos matemáticos de fugas, explosiones y fuego.

- *Determinación de la probabilidad de ocurrencia.* Existen técnicas que, se basan en datos o registros históricos de accidentes semejantes para encontrar dicha probabilidad, este método no suele ser muy efectivo ya que con frecuencia no se encuentran suficientes datos.

Existen métodos más efectivos basados en la asignación de probabilidades haciendo uso de información que se tiene disponible, como son:

- **Árbol de fallas.** Este método es meramente deductivo y parte de lo general a lo particular y se identifica una combinación lógica de fallas, que pueden dar lugar a que se concrete el riesgo.
- **Árbol de eventos.** Al contrario del árbol de fallas, este es un método inductivo que va de lo particular a lo general, identificando la combinación lógica de fallas consecuentes, iniciando con riesgos primarios y hasta llegar al máximo riesgo.

7.3.1 Toma de decisiones

Finalmente podemos deducir que la evaluación de riesgos, nos permitirá saber cómo actuar ante un riesgo identificado y evaluado.

- Lo primero que hay que hacer es *definir* si *el riesgo* a enfrentar es aceptable o no, esto es, haciendo una comparación del riesgo en cuestión con el riesgo enfrentado cuando la persona se encuentra en su casa.
- El segundo paso es establecer **medidas preventivas**, para **eliminar, reducir, transferir o aceptar los riesgos** y en cuyo caso se establecerán decisiones sobre medidas correctivas en caso de ocurrencia del riesgo. Una manera de mitigar los riesgos es sustituyendo o modificando la tecnología, como sustitución de materia prima, modificar los procesos o adquirir herramientas que hagan más eficiente el proceso. No siempre es posible eliminar los riesgos, debido a razones económicas o técnicas, pero siempre es posible reducirlos.
- El tercer paso es la **reducción** de la probabilidad de ocurrencia para que el riesgo se concrete, esto es posible lograrlo mediante la aplicación de estándares de seguridad, códigos y medidas creativas, propuestas por un grupo multidisciplinario de trabajo altamente calificado, que basados en su experiencia, encuentran posibles soluciones para el caso en cuestión. Pero si aun con todas las herramientas propuestas anteriormente, no es posible mitigar o reducir el riesgo, se procede a la transferencia del mismo.

- El **transferir los riesgos** es una acción que se hará asegurando las posibles pérdidas, mediante una aseguradora. Pero si al final de todo el proceso es imposible realizar alguna de las etapas anteriores, se termina por aceptar los riesgos quedando debidamente documentados.

7.4. Análisis de Riesgos para Tanques de Almacenamiento

En primera instancia es necesario, para la **identificación de riesgos**, realizar una caminata o paseo planificado, a través del área donde se encuentran los productos almacenados, esto con el fin de identificar problemas de soldadura en los tanques, fugas en las tuberías, y algunos otros problemas que sea posible encontrar de manera visual. De otra manera se debe realizar una inspección basada en una lista de verificación establecida por normas, las cuales indican los posibles problemas a ocurrir con cada uno de los elementos que conforman todo el sistema, refiriéndose en este caso, a los tanques de almacenamiento y sus componentes. El objetivo de la verificación basada en estas listas, es comparar el marco técnico y las bases de diseño con lo que establecen las normas, es decir, conocer lo que tenemos y lo que deberíamos tener.

Posteriormente es necesario estudiar y evaluar los efectos de posibles eventos como incendios o explosiones y hacer uso de la historia, es decir comparar dichos eventos con accidentes ocurridos en tanques de almacenamiento para poder hacer un correcto **análisis de consecuencias**. Es importante tener en cuenta los efectos causados por un incendio o explosión ya que pueden afectar a personas y propiedades aledañas a las instalaciones. En caso de una explosión, esta puede afectar la estructura de alguna propiedad cercana si existe, o provocar incluso la muerte de personas que se encontraban cerca de las instalaciones en ese momento, además se pueden formar atmósferas explosivas debido a la acumulación de gases calientes y humos tóxicos. La inhalación de estos gases puede provocar incluso quemaduras internas. Por eso es tan importante analizar los incidentes y accidentes ocurridos en instalaciones similares.

7.5 Medidas Preventivas

Algunas de las acciones que deben tomarse para evitar accidentes y disminuir el riesgo de incendio o explosión en tanques de almacenamiento son las siguientes:

7.5.1 Color exterior en tanques de almacenamiento

Los tanques que almacenan líquidos combustibles como combustibles y residuales de refinación (C-26 a C-60) y aquellos que almacenan productos con peso específico mayor o igual a 0.9, que no estén aislados térmicamente y que cuenten con dispositivos de calentamiento para mantener el

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

producto almacenado a una temperatura mayor a 60° C deben ser pintados exteriormente de color negro mate (Figura 66), esto con el propósito de absorber la energía solar radiante y promover la disminución de los costos provenientes del empleo de medios de calentamiento y facilitar las operaciones de bombeo de estos materiales.

Aquellos tanques que requieren evitar absorber energía solar, que contengan líquidos inflamables pueden ser pintados exteriormente de color blanco brillante (Figura 67).

Figura 66. Tanques de almacenamiento que requieren radiación solar (negro)



Figura 67. Tanque de almacenamiento que requiere reflejar la radiación solar (blanco)



MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Además de los colores correspondientes para cada tipo de líquido almacenado, los tanques de almacenamiento requieren de una placa de identificación, esta placa debe estar unida a la pared del tanque, debe ser de un material resistente a la corrosión y cuyas letras y números deben ser mayores a 4mm de alto, la placa debe contener la información siguiente (Figura 68).

Figura 68. Placa de identificación de Tanque de Almacenamiento.

API STANDARD 650			
APÉNDICE	<input type="text"/>	AÑO DE CONSTRUCCION	<input type="text"/>
EDICIÓN	<input type="text"/>	NUMERO DE ADDENDUM	<input type="text"/>
DIÁMETRO NOMINAL	<input type="text"/>	ALTURA NOMINAL	<input type="text"/>
CAPACIDAD NOMINAL	<input type="text"/>	TEMP. DE DISEÑO DEL METAL	<input type="text"/>
PESO ESPECIFICO DE DISEÑO	<input type="text"/>	TEMP. MÁXIMA DE OPERACION	<input type="text"/>
PRESION DE DISEÑO	<input type="text"/>	RELEVADO DE ESFUERZOS	<input type="text"/>
NUMERO DE SERIE	<input type="text"/>	NUMERO DE SERIE	<input type="text"/>
		TAG	<input type="text"/>
FABRICADO POR	<input type="text"/>		
ARMADO POR	<input type="text"/>		
ANILLO DE LA PARED		MATERIAL	

Es sumamente importante identificar los productos que se almacenan en los tanques atmosféricos, es por esto tan necesario el uso de una placa de identificación, además de contar con conjuntos gráficos que deben ser ubicados en distintos puntos específicos del tanque de almacenamiento para su identificación rápida.

El primer grafico debe ser ubicado en el techo del tanque, en el TAG de identificación debe ser pintando un rectángulo que indique el grupo de producto almacenado al que pertenece, este conjunto grafico debe repetirse y colocarse en el todos los frentes de ataque con los que cuenta el tanque.

Los colores utilizados para la identificación de los productos son los siguientes:

- Líquidos inflamables
 - *Color violeta 602 (265 de la PMS Color Chart³⁰)*
- Líquidos combustibles
 - *Con el color café 502 (146C de la PMS Chart)*

³⁰ <http://www.cal-print.com/InkColorChart.htm>

- Líquidos pesados (asfaltos, combustóleos)
 - *Color negro 001 (black C de la PMS Chart)*

El otro conjunto grafico debe ser colocado en la pared del tanque, aproximadamente 50 cm (20 in) sobre el nivel superior de la boquilla de descarga del tanque, este grafico debe contener señalizaciones sobre los peligros que se asocian al producto, la capacidad del tanque tanto en barriles como metros cúbicos, así como también el nombre de dicho producto almacenado, y debe ser posible ubicarlo fácilmente desde los puestos de operación.

7.5.2 Señalizaciones para la Identificación de Riesgos de Productos Almacenados

Para la identificación de riesgos en zonas de almacenamiento, se hace uso de la norma **NFPA 704**, la cual hace uso de un rombo como símbolo de identificación de riesgos, este símbolo está destinado a utilizarse en instalaciones fijas como equipos de proceso químico, entradas de laboratorios, materiales empacados que son transportados y dese luego en el almacenamiento de materiales combustibles e inflamables Figura 69.

El rombo esta subdividido en 4 rombos más pequeños de manera que el rombo lateral izquierdo indica aspectos específicos de salud (color azul), el rombo lateral derecho, indica los riesgos de reactividad (color amarillo), el rombo superior indica la inflamabilidad (color rojo) y por ultimo en rombo inferior es utilizado para indicar información especial específica (color blanco).

El conjunto de rombos es asignado también con números, estos números indican el grado de peligrosidad, susceptibilidad y daños que pueden ocasionar dichos productos.

En los tanques de almacenamiento deberá indicarse el grado de riesgo de acuerdo a la clasificación del producto.

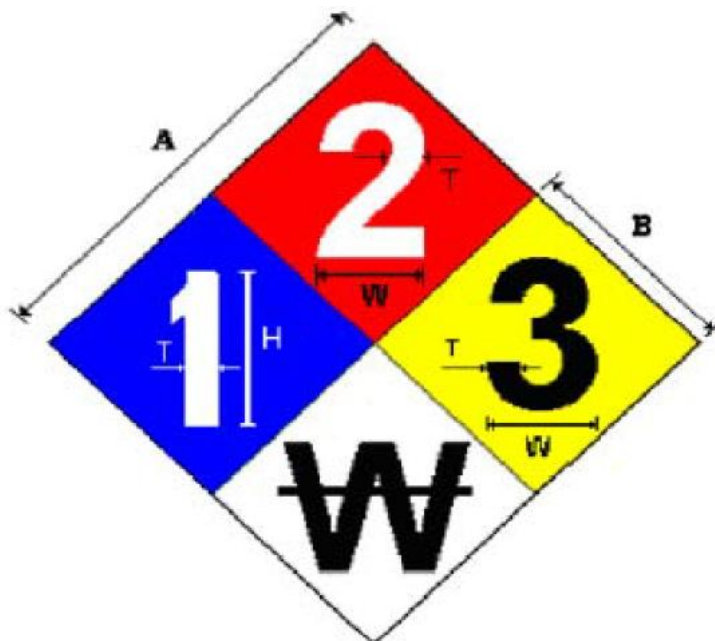
MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Figura 69. Rombo de señalización de Riesgos.



Además de los colores y los números utilizados para la identificación de riesgos, el rombo cuenta también con dimensiones estandarizadas para los números que indicaran el grado de riesgo, estas dimensiones son presentadas en la siguiente Tabla 12, así como también se puede observar las acotaciones en la siguiente imagen (Figura 70).

Figura 70. Dimensiones Rombo de Identificación de Riesgos.



MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Dimensiones:

- A** *longitud rombo principal*
- B** *longitud rombos pequeños*
- H** *altura del dígito*
- T** *espesor del dígito*
- W** *ancho del dígito*

Tabla 12. Dimensiones del rombo de señalización de riesgos en tanques de almacenamiento

Dimensiones (mm)					Distancia a la cual la señal es visible (m)
A	H	W	T	B	
62	25	17	4	31	15
125	50	35	8	62	23
187	76	52	12	93	30
250	101	70	16	125	60
357	152	105	24	187	>60

Este rombo ofrece información inmediata, además de que cuenta con mucha precisión ya que no hay que ver más de lo que en él se indica. Este sistema básico y estandarizado utiliza números y códigos de colores para la identificación rápida de riesgos, lo cual es ciertamente ventajoso para poder hacer frente en caso de siniestro.

La siguiente Tabla 13 muestra las escalas de riesgo de algunos productos almacenados en tanques atmosféricos, esta tabla indica el grado de riesgo, tanto en salud, reactividad e inflamabilidad de líquidos utilizados en la industria petrolera todos ellos sin presentar riesgo específico.

Tabla 13. Escala de Grado de Riesgo.

Producto	Salud (Toxicidad)	Inflamabilidad	Reactividad
Aceite Cíclico Ligero	0	2	0
Aceite Recuperado	1	3	0
Alquilado Ligero	1	3	0
Asfaltos	0	1	0

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Combustóleos	0	2	0
Crudo	2	3	0
Diesel Industrial	0	2	0
Gasóleo de Vacío	0	2	0
Gasóleo Pesado	0	2	0
Gasolina Amarga	2	3	0
Gasolina Desulfurada	1	3	0
Gasolina PEMEX Magna	1	3	0
Gasolina PEMEX Premium	1	3	0
Heptano	1	3	0
Keroseno	0	2	0
M.T.B.E.	1	3	0
PEMEX Diesel	0	2	0
Residuo Catalítico	0	2	0
Residuo Primario	0	2	0
T.A.M.E	1	3	0
Turbosina Amarga	1	3	0

7.6 Capacitación para Emergencias

Para la seguridad en los procesos así como salvaguardar la vida de los trabajadores, la integridad de las instalaciones y el medio ambiente, es necesario establecer un plan de acción para emergencia, este plan debe estar por escrito y todo el personal deberá conocerlo, así como saber también el equipo disponible para el combate de incendio y/o cualquier otra emergencia que pueda presentarse en las instalaciones. Este plan de emergencia deberá contener los aspectos siguientes:

- Indicaciones y procedimientos a seguir en caso de incendio, por ejemplo, señales de alarma, evacuación del personal, notificación al departamento local de bomberos, control y extinción del fuego.

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

- Tener personal capacitado y debidamente entrenado para hacer frente a situaciones de emergencia, que sean capaces de realizar las tareas asignadas de manera eficiente y rápida.
- Mantenimiento y revisión periódica del equipo de protección y combate de incendio.
- Contar con medidas alternativas que garanticen la seguridad de los ocupantes, así como, procedimientos de paro o aislamiento de equipos, para reducir la liberación de líquidos.
- Asignación de personal responsable y capacitado para mantener estables las funciones de planta en caso de situaciones críticas.

El personal destinado para el uso de los sistemas contraincendio, debe estar debidamente capacitado para realizar las operaciones de esos equipos. Además deberá realizar entrenamiento de actualización por lo menos una vez al año.

El plan de emergencia debe ser coordinado con las autoridades locales capacitadas para responder a emergencias, en este caso departamento de bomberos y protección civil, ya que el plan de emergencia deberá llevarse a cabo en conjunto para tener un mejor control de la seguridad. Además de establecer procedimientos que proporcionen un paro seguro de las operaciones en caso de emergencia, y proveer de capacitación correspondiente para el uso de alarmas.

7.7 Áreas Peligrosas en Tanques de Almacenamiento Atmosférico

Las áreas peligrosas son aquellas zonas en cuya atmosfera puede haber presencia de elementos explosivos o combustibles, en cantidades que puedan provocar fuego o explosión.

En los tanques de almacenamiento siempre habra emisiones de vapores, estas ocurren inevitablemente en las operaciones de llenado y vaciado del tanque, pero también ocurren por cambios climatológicos que traen consigo aumento o disminución de temperatura. Las mezclas explosivas existen en alguna parte del tanque que contiene líquidos combustibles o inflamables, esto hace posible la existencia de zonas con riesgo de incendio o explosión.

La **NFPA 70**³¹ divide estas áreas peligrosas en **CLASES** (estado físico), **DIVISIONES** (grado de peligrosidad) y **GRUPOS** (tipo de sustancia). La determinación de la extensión de estas áreas peligrosas se basa en la norma **API RP-500**³² que es para la identificación de zonas de riesgo y/o peligrosas, y en donde se indican los límites en que se confina la atmosfera peligrosa.

³¹ <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/document-information-pages?mode=code&code=70>

³² <http://www.techstreet.com/products/2932>

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Las áreas se clasifican dependiendo de las propiedades de los vapores, líquidos o gases inflamables, o de polvos o fibras combustibles de fácil ignición que pudieran estar presentes, así como la posibilidad de que se encuentren en cantidades o concentraciones inflamables o combustibles.

Las áreas peligrosas en los tanques de almacenamiento quedan comprendidas en la siguiente clasificación:

CLASE I: Son aquellas en las cuales existen, o pueden existir gases o vapores inflamables en cantidades suficientes para producir mezclas explosivas o inflamables.

División 1: Áreas en las cuales existe en forma continua, periódica o intermitente en condiciones normales de funcionamiento, concentraciones peligrosas de gases o vapores inflamables, como puede ser un radio de 1.5 metros alrededor de las boquillas de los venteos del tanque, el espacio vapor de los tanques de techo fijo y las trincheras que alojan tuberías dentro de los diques de contención.

División 2: Aquellas áreas en las cuales se manejen, o empleen líquidos o gases inflamables en recipientes o sistemas cerrados, pero en los cuales, dichos líquidos solo puedan escapar por alguna fractura en los recipientes o contenedores, o por un mal funcionamiento de los equipos.

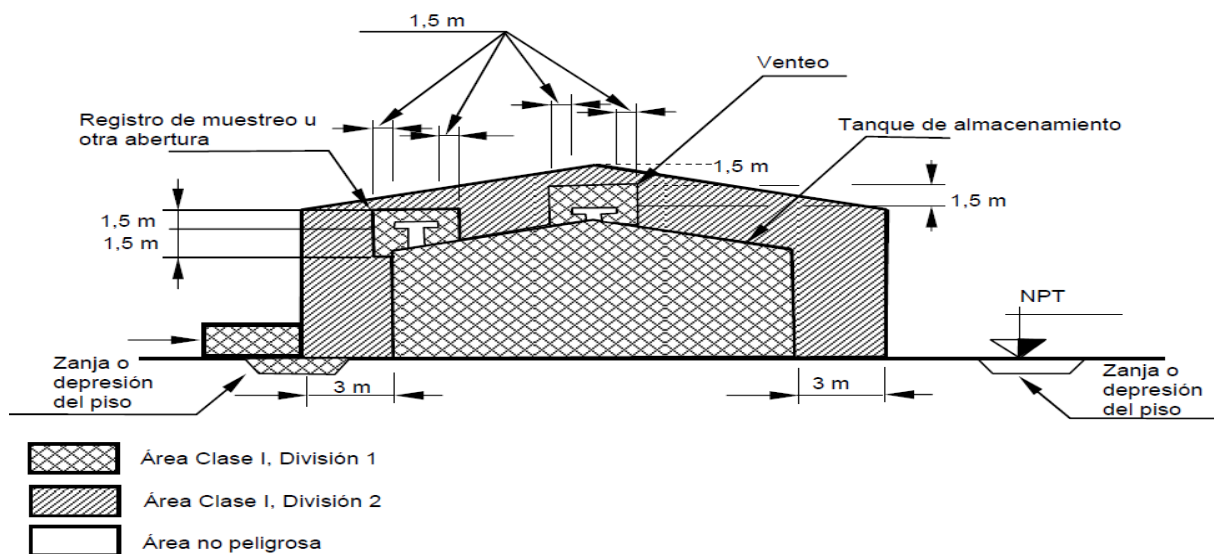
Grupo D: Son los compuestos líquidos inflamables y/o combustibles con puntos de auto-ignición alrededor de los 280 °C.

En los tanques de almacenamiento atmosféricos, que contengan líquidos inflamables o combustibles se considera que existen las siguientes áreas peligrosas:

Tanques Atmosféricos de Almacenamiento de Techo Fijo.

- i. En el interior del tanque existe un área de la **División 1**.
- ii. Cualquier registro abierto, venteo o salida abierta del tanque da origen a un área de la **División 1**.
- iii. Desde la superficie exterior del tanque se considera como área de la **División 2**.
- iv. Existe un área de la **División 2** que comprende en cualquier plano vertical toda el área situada dentro del muro de contención y hasta la altura de este, y cualquier zanja, canal, fosa o depresión del piso da origen a un área de la **División 1**. Como puede observarse en la siguiente Figura 71.

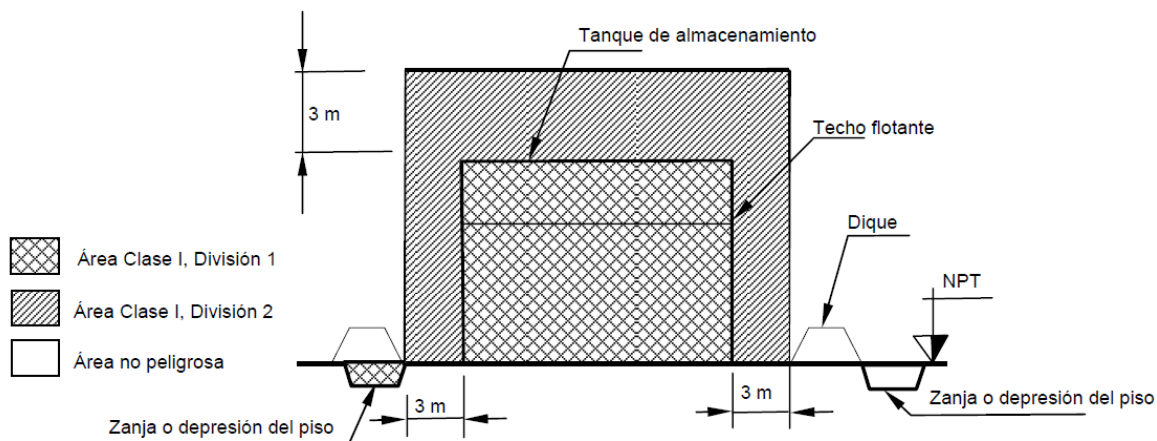
Figura 71. Áreas Peligrosas en Tanque de Almacenamiento de Techo Fijo.



Tanque Atmosférico de Almacenamiento de Techo Flotante.

- i. En todo el interior del tanque existe un área de la **División 1**. Desde la superficie exterior del tanque, se considera como área de la **División 2**.
- ii. Existe un área de la **División 2**, que comprende en cualquier plano vertical toda el área situada dentro del muro de contención y hasta la altura de éste, y cualquier zanja, canal, fosa o depresión del piso, da origen a una área de la **División 1**. Como se muestra en la siguiente Figura 72.

Figura 72. Áreas Peligrosas en Tanques de Almacenamiento de Techo Flotante.



7.8 Prevención de Incendios y Explosiones

Como se ha venido mencionando a lo largo de este trabajo, debe quedar bien en claro que el almacenamiento de combustibles y líquidos inflamables representan un riesgo latente. Para prevenir incendios o explosiones, el personal debe estar capacitado para realizar acciones que eviten que se concrete un riesgo, ya que si este existe una combustión no controlada puede alcanzar niveles catastróficos. Siempre es mejor prevenir a reparar y lamentar y con esto me refiero a cuestiones económicas, integridad de las instalaciones, pero sobre todo integridad y seguridad de los trabajadores. Es de suma importancia que el ingeniero tenga presente ciertos aspectos esenciales para la prevención de incendios y/o explosiones, como son:

- Propiedades fisicoquímicas de los materiales almacenados.
- Los métodos de prevención y control de incendios y explosiones.
- Conocer los procedimientos para reducir los riesgos de incendio y/o explosión.
- Conocer a detalle las características de los procesos

Es necesario conocer a la perfección los materiales utilizados, conocer el entorno donde se desarrollan los procesos y dar un correcto y periódico mantenimiento a las instalaciones para que se encuentren en niveles de seguridad aceptable o incluso superior.

Se necesita que las instalaciones, operaciones, estructuras, procedimientos y equipo donde se almacenan los combustibles, estén diseñados correctamente para este fin, que incluyan además instalaciones seguras y de fácil acceso a los trabajadores en caso de desalojo. Si se concreta el riesgo de incendio, es inminente evitar que el tanque y el sistema de tuberías se debiliten, esto se logra haciendo una buena construcción e instalación del tanque y sus dispositivos, siguiendo los procedimientos correctos señalados en las normas, así como también, utilizar los materiales adecuados requeridos bajo las especificaciones de diseño y construcción.

Para prevenir el riesgo de incendio o explosión, es necesario hacer uso de todas las recomendaciones anteriores como una sinergia, es decir, cada una de las partes debe trabajarse en conjunto para poder tener éxito en el principal objetivo que es la prevención, y garantizar el correcto funcionamiento del equipo, sus instalaciones y la seguridad de todo el personal, quien es en gran medida responsable de que las acciones se lleven de manera óptima y efectiva.

7.9 Reducción de Riesgos

Un factor que reduciría en gran medida el riesgo de incendio, es el combustible, si logramos evitar que éste entre en contacto con el aire, es decir el factor oxidante, podemos garantizar en gran medida la reacción que provocaría el fuego. Esta ventaja se puede tener en los tanques de techo

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

flotante o en tanques con membrana flotante interna, en comparación con los tanques de techo fijo, ya que en estos últimos debido al espacio existente entre el techo y el líquido existe la generación de vapores, que si logran entrar en contacto con el aire provocan la creación de atmosferas explosivas y además se pueden incendiar. Estas atmosferas pueden viajar con el viento y afectar otras áreas alejadas de la zona de almacenamiento, por esta razón es también importante tener en cuenta la dirección de los vientos dominantes como un factor que hay que prevenir. Debido a esto los sistemas de venteo deberán colocarse tomando en cuenta la dirección del viento, para que puedan llevarse los gases en una dirección segura y una zona fuera de peligro.

Los sistemas de seguridad, los procedimientos y la capacitación son los elementos medulares, que deben contar con los recursos suficientes y necesarios para prevenir incendios y explosiones, además estos requerimientos y procesos deben estar bajo estricto uso de las normas, en este caso la **NFPA-30³³. Código de líquidos inflamables y combustibles** que es aplicable al manejo y uso de estos líquidos, tiene por objetivo dotar a los tanques de almacenamiento las medidas necesarias de prevención fundamentales para garantizar la seguridad en el proceso.

Cuando existen derrames de líquidos, se debe estar preparado con las barreras o los diques de contención que eviten que los líquidos derramados puedan llegar a una fuente de ignición. Aunque existe cierta desventaja en las paredes de contención y es que impiden la circulación del aire, por tanto impide la ventilación natural de esta área incrementando así la intensidad de una posible explosión.

Es muy importante también tener en cuenta los reglamentos municipales, ya que existen ciertas restricciones por parte de las autoridades locales, para la instalación de tanques de almacenamiento, como son las zonas naturalmente protegidas, las rutas de acceso y evacuación en caso de un incendio. Tener conocimiento de la densidad demográfica de la región así como la distancia a la que se encuentran de la zona de almacenamiento, conocer si existen albergues donde pueda refugiarse la población en caso de un siniestro, conocer las instalaciones para el abastecimiento de agua y si este abastecimiento es natural saber la distancia a la que se encuentra.

Otros factores que deben tomarse en cuenta son: saber si la región donde se encuentran los tanques de almacenamiento está bajo influencias políticas, en donde puedan organizarse golpes de estado o formar guerrillas, huelgas o incluso que este cerca de zonas donde exista narcotráfico, ya que estos eventos podrían poner en riesgo el producto almacenado, las instalaciones e incluso al personal. Existen factores que son meramente de índole natural, como son las inundaciones, tormentas eléctricas, derrumbes, lluvias, vientos huracanados, maremotos, etc. Además no se deben olvidar los riesgos geológicos como son los hundimientos, derrumbes, sismos, vulcanismo, deslaves fracturamiento, acarreo de materiales, desprendimientos, fallas geológicas, entre otras.

En el papel de los sistemas de seguridad es importante la instalación de sensores de derrames, que harán que se evite un derrame provocado por sobre flujo al tanque, a menos que esta

³³ <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/document-information-pages?mode=code&code=30>

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

operación sea monitoreada continuamente y/o que el sobre flujo sea desviado a otra parte del proceso. También se instalan sensores de temperatura que cortan la fuente de calor cuando la temperatura del fluido en el proceso es excesiva.

Otra manera de evitar que los líquidos derramados lleguen a afectar zonas ecológicas o lleguen a ríos, lagos o cuerpos de agua, es mediante los diques, la captación remota y las trampas de aceite, que ya fueron detalladas en el capítulo 5 de esta manera se evita que los líquidos derramados causen daños graves en el ambiente y puedan tener consecuencias en la salud de la población.

Todas las operaciones efectuadas por el personal debe ser inspeccionadas y verificadas para que se lleven de manera segura, el personal debe ser capacitado para las tareas que va a realizar y hacerlas con total precaución, para prevenir que por descuidos se origine un accidente, conocer los riesgos que trae consigo el realizar sus tareas y además deben conocer los procedimientos a seguir en caso de un percance.

Algunos de los procedimientos que deben realizarse con cautela son los siguientes:

- Verificar que las cimentaciones cuenten con soportes adecuados, capaces de soportar sismos e incluso incendios, por esto deben ser construidos de material resistente al calor para dar tiempo a que se actué de manera efectiva en el control de un incendio.
- En las limpiezas de los tanques es necesario tomar medidas de seguridad, que deben llevarse a cabo por el mismo personal, como dejar que se ventile el tanque antes de realizar alguna operación, que no se generen vapores que puedan ser inhalados y que provoquen daños a la salud de los trabajadores, además deben conocer perfectamente los riesgos que esto implica. Otro ejemplo es, cuando se van a realizar trabajos en caliente, como la utilización de soldadura, se debe dejar ventilar el tanque y dejar evaporar los residuos que pudieron haber quedado dentro del mismo. Otra opción es llenar el tanque con gas inerte ³⁴ para crear una atmosfera segura, y durante la realización de los trabajos en caliente deberá existir siempre una ventilación en el tanque, para evitar la acumulación de vapores tóxicos, estas acumulaciones pueden ser retiradas con vapor de agua o algunos otros productos químicos que sean adecuados y seguros para mantener una atmosfera segura.

Estos factores juegan un papel muy importante, en la prevención de incendios o explosión, pero también en la minimización de los efectos si se concreta el riesgo. El objetivo de un plan de seguridad, es abastecer con sistemas, recursos y factor humano que permitan la prevención de un incendio o un siniestro peor, pero si el evento no se puede evitar, entonces el plan de seguridad junto con los sistemas y equipos juegan el papel de minimizar los daños, evitando por ejemplo que haya un abastecimiento mayor de combustible que pueda hacer más grave la situación, y que además, se logre la integridad de los trabajadores involucrados en las operaciones.

³⁴ Un **gas inerte** es un gas no reactivo bajo determinadas condiciones de presión y temperatura. Los gases inertes más comunes son el nitrógeno y los gases nobles.

Es determinante establecer un procedimiento que cuantifique los daños ocurridos, si el riesgo se concreta, de esta manera podrá saberse cuales y cuantos fueron los daños y la gravedad de dicho evento.

7.10 Inspección y Mantenimiento en Tanques de Almacenamiento Atmosférico

Existen fallas en tanques de almacenamiento que han ocurrido en formas variadas, que van desde explosiones de vapores inflamables dentro del tanque atmosférico, hasta fracturas en las placas de acero. Algunos casos particulares son los ocurridos durante las operaciones de soldadura, al realizar reparaciones al tanque, los trabajadores que se introducen alguna fuente de ignición han ocasionado accidentes que cobran la vida de algunos y lesiones a otros. Además de las pérdidas humanas y daños a la salud, este tipo de accidentes provoca grandes pérdidas económicas, daños al ambiente y daños a las instalaciones.

Si un tanque de almacenamiento se diseña y construye de manera adecuada, este puede durar varios años dando un servicio óptimo sin problema alguno, sin embargo, no debemos asumir que un tanque atmosférico de almacenamiento se encuentra en buen estado solo por su apariencia física del exterior, por esta razón se hace necesaria una inspección periódica para asegurarse que dicho tanque esta en optimas condiciones, las cuales no solo garanticen su buen funcionamiento sino la seguridad de las instalaciones y los trabajadores. La experiencia ha demostrado y garantizado que la falta de mantenimiento e inspección en los tanques ha terminado en fallas, accidentes, daños al medio ambiente, pérdidas económicas y pérdidas humanas. Continuaran pasando accidentes e incidentes como los antes mencionados si no se hace una inspección y mantenimiento periódico a los tanques y sus componentes.

En la actualidad los tanques de almacenamiento son diseñados y construidos bajo estrictos estándares, como la norma **API-650**³⁵, si son diseñados y construidos de manera correcta estos tanques pueden dar un servicio incluso por décadas, siempre y cuando se ponga en marcha un plan de inspección y mantenimiento tal que pueda asegurar su funcionamiento ininterrumpido. Se deben someter a revisión áreas como:

- Construcción
- Seguridad
- Inspección y mantenimiento

Las normas que regulan y se encargan de efectuar los requerimientos para las áreas anteriores son: API-650, normas de la NFPA, normas de referencia para el caso de PEMEX, e incluso normas

³⁵ <http://www.api.org/events-and-training/api-u-training/api-u-calendar/2012-events/10-8-12-api-650-datanet>

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

de la **STPS** y la **API-653**, estas son algunas de las normas y organizaciones que marcan pautas en los tanques de almacenamiento.

La **API-653**³⁶ es la norma encargada de marcar los requerimientos para la inspección de los tanques y sus elementos. Se debe realizar un estudio que comprenda la inspección visual, con instrumentación y/o equipo especializado, mediante un programa que debe ser elaborado anualmente en cada centro de trabajo. Los elementos a inspeccionar en los tanques son los siguientes:

Protección anticorrosiva.- se debe verificar que las paredes de los tanques no presenten burbujas o ampollamientos, que dejen expuesto la estructura de metal y que existan puntos de corrosión.

Anillos de cimentación.- detectar grietas que puedan poner en riesgo al tanque y al producto almacenado, revisar que no existan cuarteaduras o fisuras o incluso roturas.

Boquillas.- revisar las boquillas que se encuentren en condiciones adecuadas y que se encuentran en la parte inferior del tanque.

Escaleras.- inspección visual, dar golpes y rascar la estructura de la escalera para comprobar daños por corrosión o partes rotas.

Venteos.- revisar el estado y funcionamiento de las válvulas de presión vacío y de los arrestadores de flama para determinar la confiabilidad de las mismas.

Conexiones a tierra.- inspeccionar estas conexiones, principalmente en donde penetran al suelo y donde conectan al tanque verificando que no exista corrosión.

Instrumentación.- revisión continua de la instrumentación, alarma y medición de nivel, medidores de presión, etc.

Techos de los tanques.- una inspección visual y martilleo determinara la magnitud de las áreas corroídas.

Pared de los tanques.- con una inspección visual será suficiente para determinar si hay abombado o desplomado en los tanques.

La revisión ocular de las paredes internas del tanque es la primera inspección visual general, por razones de seguridad siempre es recomendable verificar el techo, las juntas y la estructura donde se apoya el tanque antes de revisar su interior. Con la inspección en el interior del tanque se debe determinar fracturas, zonas de corrosión y deformaciones, una vez hecha la inspección visual y localizando las áreas dañadas se debe registrar el tipo de daño, la localización y la magnitud del mismo. Estas áreas de daño pueden localizarse con frecuencia en el fondo del tanque, en cada uno de los anillos, en el soporte del techo y en las boquillas.

³⁶ <http://www.api.org/events-and-training/api-u-training/api-u-calendar/2012-events/09-17-12-api-653-datanet>

MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Las placas del techo y piso deben probarse mediante martilleo para ver si hay desprendimiento y/o exista corrosión, una vez localizando los restos que se desprenden se registra la placa a la cual se le hizo la prueba para poder reparar el daño. Se requieren inspecciones periódicas que permiten verificar el espesor de la placa metálica del tanque y compararlos con los valores permisibles de seguridad y así evitar esfuerzos excesivos en la envolvente.

Cuando se efectúen pruebas de reparación en el tanque, ya sea en el fondo, techo, paredes, boquillas, etc., deberán realizarse también pruebas neumáticas o hidráulicas según sea el caso, en el fondo, pared, techo, pontones y cubiertas de los techos flotantes, para conocer el funcionamiento del tanque. Cada uno de los tanques debe contar con una bitácora, en la cual se pueda indicar las reparaciones o cualquier intervención realizada a dicho tanque, esto con el fin de tener un control de las operaciones, además de que nos permitirá programar inspecciones y mantenimiento futuro.

El programa que debe ser creado para la prevención, protección y combate de incendios, debe tener como mínimo los siguientes requerimientos:

- Procedimientos de seguridad para la prevención de riesgos de incendios.
- Procedimientos para el combate de incendios y minimización de los daños.
- Ubicación de los equipos y herramientas para combatir los incendios.
- La práctica de simulacros periódicos son esenciales para poder responder rápidamente cuando se presente un siniestro. Se debe realizar por lo menos dos veces al año y la participación de todos los trabajadores es inminente, ya que depende de ellos el conocer las rutas de evacuación, la ubicación de los sistemas contraincendio, y poder tener acceso a los equipos de emergencia locales como: bomberos, ambulancias y cuerpos de rescate.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

1. La dependencia de la velocidad de combustión con respecto al diámetro del incendio es proporcional para contenedores con diámetros pequeños de hasta 1 metro, una vez rebasado este diámetro la velocidad de combustión se mantiene constante desapareciendo esta dependencia con respecto al aumento del diámetro.
2. Los mecanismos de transferencia de calor dominantes, en caso de incendio en tanques de almacenamiento de crudo, se excluye al mecanismo por conducción, ya que éste solo afecta a contenedores de diámetros muy pequeños (>3 cm).
3. Los combustibles que están compuestos por mezcla de varios componentes, no muestran una velocidad de combustión uniforme. En un principio los componentes ligeros se evaporan y son quemados por las llamas del fuego, siendo ésta la principal razón de la velocidad de combustión.
4. Los líquidos que pueden llegar a producir boilover no deben ser almacenados en tanques de techo fijo cuyo diámetro sea mayor a 150 [ft], si no cuentan con un sistema de inertizado (que minimice o inactive su potencial naturaleza química).
5. Para que el boilover exista es necesario la formación de una capa isotérmica (*temperatura constante*) de combustible y que además este a una elevada temperatura, a esta capa o estrato de hidrocarburo a elevada temperatura se le conoce como **hot zone**.
6. En diámetros considerablemente grandes de tanques de almacenamiento, la radiación es el principal mecanismo de transferencia de calor, lo cual indica que es la principal fuente por la cual puede ocurrir el fenómeno de boilover.
7. La velocidad de combustión aumenta con respecto a la velocidad del viento, pero esto solo ocurre en contenedores de diámetro pequeño >1 [m], y para diámetros mayores se alcanza un valor constante en la velocidad de combustión.
8. En los tanques atmosféricos de almacenamiento que contengan líquidos polares no se debe instalar la inyección subsuperficial de espuma ya que los líquidos polares son solubles en agua, y ésta es el recurso principal para la formación de espumas.
9. En los tanques atmosféricos de almacenamiento que contengan líquidos polares no se debe instalar la inyección subsuperficial de espuma, debido a que la solución de espuma es a base de agua y los líquidos polares son solubles en agua.
10. En condiciones de viento prácticamente despreciables, el comportamiento de la línea continua que se observa en la Figura 55 deduce que la velocidad de combustión se ve

CONCLUSIONES

- influenciada por tres parámetros que son; el factor de vista (**F**) de la llama hacia la superficie de la balsa, la temperatura de la llama (**T_l**), y el coeficiente de extinción (**k**).
11. A medida que el viento aumenta sus efectos dejan de ser despreciables y dejan sentir su efecto. Si la velocidad del viento es la suficiente para que pueda ocurrir un desplazamiento de la llama, el factor de vista, el coeficiente de extinción y la temperatura de llama no se verán afectados. Sin embargo en presencia de viento fuerte, se produce una agitación en la superficie del combustible quemado y una agitación en la llama y como consecuencia un aumento en el coeficiente de extinción, debido a una mayor opacidad del fuego y por lo tanto el efecto debido a un aumento en la ventilación es análogo al efecto producido por un aumento en el diámetro del tanque, es decir, existe un valor máximo de velocidad del viento en donde la velocidad de combustión es constante.
 12. Aun es difícil conocer con precisión los efectos que causa la velocidad del viento sobre la velocidad de combustión, ya que los resultados fueron distintos para las diferentes condiciones tanto en el diámetro de los tanques o contenedores, como en la velocidad del viento y en las características fisicoquímicas del combustible analizado.
 13. La estructura del incendio cambia en relación al diámetro, pasando de una forma cónica estable a una llama con altura pulsante, estas características suceden conforme se aumenta el diámetro. La relación que existe entre la altura de la llama y el diámetro de los contenedores es muy grande cuando el líquido se quemaba sobre un régimen laminar, es decir sobre diámetros de contenedores muy pequeños, y conforme se iba aumentando el diámetro esta relación disminuía, hasta el punto de alcanzar un régimen turbulento, característico de los tanques con diámetros mayores donde la relación entre la longitud de la llama y el diámetro era prácticamente constante.
 14. Lo que realmente afecta la longitud de la llama es que sea difusiva y en régimen turbulento, independientemente del tipo de combustible que se esté quemando. Si la llama es en régimen turbulento y es difusiva, las ecuaciones (Ecuación 9 Ecuación 10 y Ecuación 11) anteriores pueden aplicarse.
 15. La intensidad de ebullición decrece con el diámetro del incendio. Además la velocidad de combustión para diámetros de incendios mayores a los 3 metros, es mayor en el periodo estacionario, es decir antes del boilover, que durante el periodo de transición justo antes de que aparezca el boilover.
 16. La diferencia entre los parámetros ($\dot{r} - \dot{y}$) determina la posibilidad de formación de boilover. Por lo que en tanques de gran diámetro es más difícil que ocurra el fenómeno, debido a la pequeña diferencia entre los dos parámetros.
 17. Situaciones con bajos números de Fourier constituyen un riesgo mayor de ocurrencia de boilover. Por lo tanto una combinación de los números de Prandtl y Fourier determina la

CONCLUSIONES

posibilidad y el tipo de boilover. Los combatibles con menor difusividad térmica presentan una mayor tendencia a provocar este fenómeno.

18. En los contenedores de diámetros muy pequeños (régimen laminar), el principal mecanismo de transferencia de calor es el conductivo. Para contenedores con diámetros que van desde los 2 hasta 30 cm de diámetro, el mecanismo dominante es el correspondiente a la etapa de transición entre el régimen convectivo y el dominado por la radiación. Por último en los contenedores de 1 m a 30 m de diámetro donde se instaura un régimen turbulento, la transferencia de calor por conducción se considera despreciable, mientras que los términos de convección y radiación se consideran constantes.
19. La formación de la onda de calor está relacionada con procesos de destilación y su propagación es proporcional a la diferencia entre la velocidad de propagación aparente de la propia onda y la velocidad de combustión. Al aumentar la cantidad de combustible consumido la temperatura de la hot zone crece.
20. La propagación de la onda de calor (*heat wave*) hacia el fondo del tanque, se relaciona con la diferencia entre la velocidad de la *hot zone* y la velocidad de combustión; solo en el caso en que la *hot zone* avance más rápido que la velocidad de combustión puede ocurrir boilover. En caso contrario el combustible quemaría antes de alcanzar la temperatura suficiente para sobrecalentar el agua presente en el fondo.
21. Los tanques de techo flotante ofrecen mayor seguridad porque reducen el espacio disponible para la formación de vapores, reduciendo así la posibilidad de que se mezcle el vapor con el aire.
22. Con la aplicación de las nuevas tecnologías en la construcción de tanques de almacenamiento, se ha logrado reducir en gran medida la probabilidad de incendio en estos contenedores, además cuando el tanque es instalado debidamente el riesgo de incendio es casi nulo.

8.2 Recomendaciones

1. La prevención de accidentes depende en su mayoría del uso y operación correcta de las herramientas y equipo de trabajo, esto es posible lograrlo con personal totalmente capacitado y comprometido con la seguridad tanto de las instalaciones, compañeros de trabajo y la sociedad, para ello se necesita tener absoluta conciencia de las consecuencias que un error puede provocar y solo de esta manera ser capaces de realizar el trabajo bajo condiciones seguras.

CONCLUSIONES

2. Los incendios en tanques de almacenamiento pueden evitarse casi en su totalidad atendiendo todas y cada una de las recomendaciones descritas en normas oficiales, de esta manera se evitara cometer errores que puedan ser irreversibles. Es necesario conocer también los procedimientos a seguir en caso de un incidente.
3. La protección contra incendios debe estar en virtud del grado de riesgo, este se determina en función al número de personas en el lugar, área de las instalaciones, cantidad de sólidos combustibles, así como, líquidos combustibles y líquidos inflamables almacenados. Teniendo conocimiento de todos estos factores es posible determinar un sistema de protección contra incendios.
4. Para proteger al tanque contra incendios o explosiones se deben proporcionar equipo y herramientas para el combate del siniestro, así como adoptar métodos de diseño y construcción efectivos que nos permitan minimizar la posibilidad de incendio, contar con medidas preventivas eficaces y que además nos permitan identificar las posibles causas de incendio y estar preparados con métodos y técnicas para hacer frente a los incendios.
5. En la construcción de tanques de almacenamiento se han tomado medidas de prevención para garantizar la seguridad e integridad del personal, el material almacenado y las instalaciones. Así como para evitar al máximo el riesgo de incendio, derrames o explosiones. Se han diseñado normas con el objeto de mitigar accidentes, estas normas involucran el diseño y la construcción optima de los tanques de almacenamiento para minimizar la posibilidad de daño al tanque o el riesgo de un siniestro que pueda causar pérdidas humanas y económicas. Para poder garantizar la seguridad humana, económica y técnica es necesario apegarse estrictamente a las recomendaciones que establecen las normas.
6. Para extinguir los incendios en los Tanques de Almacenamiento es importante enfriar la zona de la envolvente del mismo, situada por encima del nivel del líquido para evitar el sobrecalentamiento del acero. La función principal del agua es el enfriamiento de las envolventes de los tanques expuestos al fuego, por esta razón es necesario contar con la demanda de agua requerida para las instalaciones en caso de un incendio.
7. El mantenimiento del tanque debe hacerse en periodos establecidos de tiempo para garantizar su integridad, cuando no se lleva a cabo conforme a lo estipulado existe la posibilidad de que aumente el riesgo de falla de alguna de las partes esenciales del tanque como son la envolvente, el techo, el fondo o incluso las tuberías.
8. Es indispensable que los tanques de almacenamiento cuenten con sistemas conectados a tierra, esto para evitar que las descargas eléctricas producidas por rayos puedan producir incendios en los sellos del tanque.

CONCLUSIONES

9. Queda estrictamente prohibido fumar cerca de las instalaciones de almacenamiento, ya que puede haber vapores que llegan a escaparse a la atmosfera, estos vapores son más pesados que el aire y se acumulan en áreas cercanas al tanque, por lo tanto fumar cerca de ellos puede provocar explosiones.
10. Las instalaciones petroleras y en específico las áreas de los tanques de almacenamiento deben contar con medidas de prevención y control de incendios, que permitan garantizar la seguridad e integridad física de los trabajadores, así como salvaguardar las instalaciones y equipos dentro de estas áreas, y poder minimizar los riesgos de pérdidas de propiedad, reducir la posibilidad de explosión y propagación del fuego a las instalaciones adyacentes.
11. Un análisis de riesgo necesita de una evaluación continua y repetitiva, debe hacerse cada vez que hay cambios en los procesos de manejo de los materiales almacenados o cuando hay cambios en los procedimientos de las operaciones. La evaluación de riesgos es una práctica que debe ser diseñada para cada una de las áreas o zonas a analizar, esto dependerá de las condiciones y del tipo de instalaciones sometidas a este análisis.
12. El personal destinado para el uso de los sistemas contraincendio, debe estar debidamente capacitado para realizar las operaciones de esos equipos. Además deberá realizar entrenamiento de actualización por lo menos una vez al año. El plan de emergencia debe ser coordinado con las autoridades locales capacitadas para responder a emergencias, en este caso departamento de bomberos y protección civil, ya que el plan de emergencia deberá llevarse a cabo en conjunto para tener un mejor control de la seguridad.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. NRF-015-PEMEX-2008. PROTECCIÓN DE ÁREAS Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS INFLAMABLES Y COMBUSTIBLES.
2. NRF-125-PEMEX-2005. SISTEMAS FIJOS CONTRA INCENDIO: CAMARAS DE ESPUMA
3. NRF-010-PEMEX-2004. ESPACIAMIENTOS MÍNIMOS Y CRITERIOS PARA LA DISTRIBUCIÓN DE INSTALACIONES INDUSTRIALES EN CENTROS DE TRABAJO DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS.
4. NRF-036-PEMEX-2010. CLASIFICACIÓN DE AREAS PELIGROSAS Y CLASIFICACIÓN DE EQUIPO ELECTRICO.
5. CONSIDERACIONES ECONOMICO-AMBIENTALES Y DE PROCESO EN LA UTILIZACIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS TIPO API. TESIS LICENCIATURA. JOSE ALBERTO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ. MÉXICO D.F. 2007. PP, 5-18, 32-38, 42-46, 50-58, 60, 62, 68-77.
6. ARTICULO: INVESTIGACIÓN DE CAUSAS DE EXPLOSIONES EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE EN PUERTO RICO. JEAN BATISTA ABREU Y LUIS A. GODOY. ARTÍCULO RECIBIDO EL 10 DE MAYO DE 2011 Y ACEPTADO PARA PUBLICACIÓN EL 15 DE JULIO DE 2011.
7. ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN LA JUNTA TECHO-ENVOLVENTE DE TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO DE 560 BARRILES. TESIS MAESTRIA. ING. ALEJANDRO MARQUINA CHÁVEZ. MÉXICO D.F. OCTUBRE 2006. PP, 3-26.
8. PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO CRUDO. TESIS LICENCIATURA. JOSÉ MANUEL PARRALES GALLARDO. MÉXICO D.F. 2011. PP, 5-24, 29-65, 66-77, 80-88, 91-102, 129-142.
9. APUNTES DEL MANEJO DE LA PRODUCCIÓN EN SUPERFICIE. CAPITULO IV, ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS PRODUCIDOS. PP, 1-26.
10. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL CONTROL Y MONITOREO DEL SISTEMA CONTRA INCENDIOS, PARA EL PROCESO DE EXTRACCIÓN, ALMACENAMIENTO Y MEDICIÓN DE CRUDO EN LA ESTACIÓN PARAÍSO DE ENAP SIPETROL ECUADOR. DAVID ARMANDO QUISPE GUANOLUISA. ECUADOR QUITO JUNIO 2011. PP, 23-66.
11. ARTICULO: STORAGE TANK FIRES; IS YOUR DEPARMENT PREPARED? FIRE ENGINEERING NOVEMBER 2008.

BIBLIOGRAFÍA

12. INCENDIOS DE HIDROCARBUROS: ESTUDIO DE LA FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DEL *BOILOVER DE CAPA FINA*. TESIS DOCTORAL. FABIO FERRERO. BARCELONA 2006. PP, 2-8, 17-39, 97-100, 147-153, 189-200.
13. BLINOV, V.L., KHUDIAKOV, G.N., "DIFFUSION BURNING OF LIQUIDS ", ENGLISH TRANSLATION OF US ARMY ENGINEERING RESEARCH AND DEVELOPMENT LABORATORIES, T-1490A-C. ASTIA, AD 296762, 1961.
14. BROECKMAN, B., SCHECKER, H.G., "BOILOVER: EFFECTS IN BURNING OIL-TANKS", 7TH INT. SYMP. LOSS PREVENTION AND SAFETY PROMOTION IN THE PROCESS INDUSTRIES, ITALIA, 1992.
15. BROECKMAN, B., SCHECKER, H.G., "HEAT TRANSFER MECHANISMS AND BOILOVER IN BURNING OIL-WATER SYSTEMS ", JOURNAL LOSS PREVENTION IN THE PROCESS INDUSTRIES, 8(3), PP. 137-147, 1995.
16. FAN, W.C., HUA, J.S., LIAO, G.X., "EXPERIMENTAL STUDY ON THE PREMONITORY PHENOMENA OF BOILOVER IN LIQUID POOL FIRES SUPPORTED ON WATER", JOURNAL OF LOSS PREVENTION IN THE PROCESS INDUSTRIES, 8(4), PP. 221-227, 1995.
17. HOTTEL, H.C., "CERTAIN LAWS GOVERNING DIFFUSIVE BURNING OF LIQUID", FIRE RES. ABS. AND REV., 1, PP. 41-44, 1959.
18. INAMURA, T., SAITO, K., TAGAVI, K.A., "A STUDY OF BOILOVER IN LIQUID POOL FIRES SUPPORTED ON WATER. PART II: EFFECTS OF IN-DEPTH RADIATION ABSORPTION", COMBUSTION SCIENCE AND TECHNOLOGY, 86, PP. 105-119, 1992.
19. JAPAN SOCIETY OF SAFETY ENGINEERING, "REPORT OF OIL FIRE EXPERIMENT", 1981.
20. KOSEKI, H., "COMBUSTION PROPERTIES OF LARGE LIQUID POOL FIRES", FIRE TECHNOLOGY, 1989, PP. 241-255, 1989.
21. KOSEKI, H., KOKKALA, M., MULHOLLAND, G. W., "EXPERIMENTAL STUDY OF BOILOVER IN CRUDE OIL FIRES ", FIRE SAFETY SCIENCE, 3, PROCEEDINGS OF THE 3RD INT. SYMP., PP. 865-874, 1991.
22. KOSEKI, H., "BOILOVER AND CRUDE OIL FIRE", JOURNAL OF APPLIED FIRE SCIENCE, PP. 243-272, 1994.
23. KOSEKI, H., "LARGE SCALE POOL FIRES: RESULTS OF RECENT EXPERIMENTS", FIRE SAFETY SCIENCE, 6 PROCEEDINGS OF THE 6TH INT. SYMP., 1999.
24. ZUKOSKI, E.E., KUBOTA, T., CETEGEN, B., "ENTRAPMENT IN FIRE PLUMES". FIRE SAFETY JOURNAL, 3, PP. 107-121, 1981.

BIBLIOGRAFÍA

25. ZUKOSKI, E.E., "PROPERTIES OF FIRE PLUMES", EN COX, G., "COMBUSTION FUNDAMENTALS OF FIRES", FIRE RESEARCH STATION, WATFORD, UK, 1995.
26. NFPA-11. NORMA PARA ESPUMAS DE BAJA, MEDIA Y ALTA EXPANSIÓN. ED. 2002

RECURSOS DE INTERNET:

1. BOILOVER: <http://www.contraincendioonline.com/columna/boilover1.php>
2. REVISTA LLAMAS EL DECANO: http://revistallamas.blogspot.mx/2012/09/causas-que-produjeron-la-tragedia-de_2738.html
3. FIRE INVESTIGATION REPORTS ALERT BULLETINS (ARCHIVE) 29 APRIL 2009:
<http://www.nfpa.org/assets/files/pdf/fireports.pdf>
4. THE TEXAS CITY DISASTER: <http://www.nfpa.org/assets/files/pdf/texascity.pdf>
5. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION:
http://www.nfpa.org/assets/files/aboutthecodes/472/472_a2012_rop_ballot.pdf
6. REBOSAMIENTOS DE LIQUIDOS COMBUSTIBLES:
<http://lamolina96.pe.tripod.com/boilover.htm>
7. <http://www.desastres.org/articulos.php?id=02082009-01>
8. <http://www.ri.pemex.com/index.cfm?action=content§ionid=134&catid=12202>
9. http://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=dwkg8u2mmic&oi=fnd&pg=pr13&dq=petroleo+crudo+y+sus+caracteristicas+&ots=ealt_cnjv1&sig=1n_zm_iosv1bh0i_er25otyhja0#v=onepage&q=petroleo%20crudo%20y%20sus%20caracteristicas&f=false
10. <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/petroleo/default.aspx?tema=s>