



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO A BASE
DE ASPERSORES DE AGUA PARA
BATERIAS DE SEPARACIÓN ”.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

PRESENTA:

RUBÉN AZAEL SÁNCHEZ VARELA

DIRECTOR DE TESIS:

ING. RAMÓN EDGAR DOMÍNGUEZ BETANCOURT



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.

OCTUBRE 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

*Antes que nadie quisiera agradecer a **Dios** quien siempre ha estado conmigo, acompañándome en este arduo camino y no me ha dejado solo.*

*En segundo lugar quisiera agradecer a mi madre, **María del Mar Varela**, quién a pesar de todas las dificultades siempre buscó la forma de ayudarme a salir adelante y a quien debo todo lo que soy, siempre serás la mejor, jamás tendré la forma de pagarte todo lo que te debo.*

*A mi abuela **Bertha María Varela Sánchez**, quien siempre estuvo orgullosa y atenta de mi.*

*También agradecer al **Ing. Ramón Edgar Domínguez Betancourt**, a quien más que como un director de tesis siempre he visto como un amigo, muchas gracias por brindarme su apoyo cuando más lo necesité. Jamás vi sus comentarios de mala manera, sino como los de una persona que siempre se interesó porque hiciera lo mejor y fuera más allá.*

*Agradecer a mis dos pequeños ángeles, **Anyela Abigail Mago Varela** y **Aleyna Alexandra Mago Varela**, quienes siempre han sido mi fuerza para seguir adelante y no rendirme.*

*A mis dos padres, **Rafael Mago Camargo** y **Ricardo Antonio Sánchez Medina**.*

***Teresita Hernández**, la madre de mi mejor amigo quién me brindo su hogar y fue como una segunda madre para mí, durante todo el tiempo de realización de mi tesis.*

*A mi gran amigo **Efrén López López**, por brindarme su amistad y gran apoyo, durante toda la carrera y sobre todo durante la elaboración de ésta tesis.*

*A las familias **Iruegas Oyarzabal**, **Rebollo**, **Magos**, **Neri**, **Hernández Lima** (especialmente a **Isaura Hernández Lima**) y **Cuevas** por su apoyo moral durante toda la carrera y la realización de esta tesis.*

A mis amigos:

***Rebeca Hidalgo Raya**, por ser como una hermana y siempre estarme apoyando en las buenas y malas.*

***Issel Giles Iruegas**, mi niña, quién a pesar de todo lo que implica esta tesis jamás dejó de echarme ánimos.*

***José Miguel Martínez Hernández** y su hermano **Esteban Martínez Hernández**, quienes me brindaron su amistad y sobre todo su apoyo y ánimos, especialmente tú Miguel.*

***Miguel Ángel Orea Elias**, uno de los hermanos que sin ser de sangre lo es de espíritu y siempre estuvo apoyándome.*

Julio César Carrero Sánchez, gran amigo quién siempre me motivó y me ayudó en todos los aspectos cuando necesité su ayuda.

A Anel Olmos Montoya y Ángel Carbajal Loredo, por brindarme su amistad durante toda la carrera.

Y a mis demás amigos que siempre me han estado apoyando durante todo este proceso de la tesis.

Atte: Azael Varela

Índice

1	Introducción	1
1.1	La importancia de los sistemas de protección contra incendios	1
1.1.1	Sistemas de protección contra incendios a base de agua	3
1.2	Recipientes a presión	4
1.2.1	Tipos, clases y categorías de los esfuerzos	5
1.2.1.1	<i>Tipos de esfuerzos</i>	5
1.2.1.2	<i>Clases de esfuerzos</i>	6
1.2.1.3	<i>Categorías de los esfuerzos</i>	8
1.2.2	Fallas en los recipientes a presión	9
1.3	Propiedades de los metales y la temperatura	10
1.3.1	Temperatura de transición	13
2	Principios de la Química del Fuego	15
2.1	Reacción química	15
2.1.1	Cinética de la reacción	16
2.1.2	Teoría de las colisiones	18
2.1.3	Variación de la energía en el transcurso de una reacción	18
2.2	Combustión	19
2.2.1	Anatomía del fuego	23
2.3	El tetraedro del fuego	24
2.3.1	El combustible	24
2.3.2	El comburente	25
2.3.2.1	<i>Límites de inflamabilidad</i>	26
2.3.2.2	<i>El oxígeno</i>	28
2.3.3	El calor	29
2.3.3.1	<i>Conducción</i>	30
2.3.3.2	<i>Convección</i>	31
2.3.3.3	<i>Radiación</i>	31
2.3.3.4	<i>Desplazamiento</i>	35
2.3.4	Mecanismo de reacción	35
2.4	Ignición	35
2.4.1	Ignición de los combustibles sólidos	37
2.4.2	Ignición de los combustibles líquidos	37
2.4.3	Ignición de los gases	37
2.4.4	Autocalentamiento y autoignición	37
2.5	Clasificación de los fuegos	38
2.5.1	Por tipo de combustible	38
2.5.2	Por la existencia de la llama	40
2.6	Mecanismos de extinción	40
2.6.1	Agentes extintores	42
2.6.1.1	<i>Agentes extintores hídricos</i>	42

2.6.1.2	<i>Gases inertes</i>	48
2.6.1.3	<i>Agentes químicos: sólidos, líquidos y vapores</i>	50
2.6.1.4	<i>Elementos de acción física: mantas, batefuegos, explosivos y elementos ocasionales</i>	51
3	Los Sistemas de Protección Contra Incendio a Base de Agua	55
3.1	Propiedades de extinción del agua	55
3.1.1	Extinción por enfriamiento	55
3.1.2	Extinción por sofocación	56
3.1.3	Extinción por emulsificación	56
3.1.4	Extinción por dilución	57
3.2	El uso de agua en riesgos especiales	57
3.2.1	Incendios de productos químicos	57
3.2.2	Metales combustibles	57
3.2.3	Metales radioactivos	58
3.2.4	Incendios de gases	58
3.2.5	Incendios de líquidos inflamables y combustibles	58
3.3	Sistemas de rociadores automáticos	59
3.3.1	Desarrollos de los rociadores automáticos	60
3.3.1.1	<i>Eficacia de la protección mediante rociadores automáticos</i>	60
3.3.2	Principios de funcionamiento de los rociadores automáticos	61
3.3.2.1	<i>Elementos funcionales</i>	61
3.3.3	Temperatura de activación de los rociadores automáticos	63
3.3.4	Rociadores automáticos normalizados	64
3.3.4.1	<i>Deflectores dobles</i>	66
3.3.4.2	<i>Rociadores en rebajes</i>	67
3.3.4.3	<i>Rociadores para empotrar</i>	67
3.3.4.4	<i>Rociadores ocultos</i>	68
3.3.4.5	<i>Rociadores ornamentales</i>	68
3.3.4.6	<i>Rociadores pendientes y montantes de tubería seca</i>	69
3.3.5	Rociadores para condiciones especiales de servicio	69
3.3.5.1	Rociadores residenciales	69
3.3.5.2	Rociadores de gota gorda	70
3.3.5.3	Rociadores cíclicos	70
3.3.5.4	Rociadores para ambientes corrosivos	70
3.3.5.5	Rociadores de pared	70
3.3.5.6	Rociadores sin elementos activos	71
3.3.5.7	Rociadores de pequeño y gran orificio	71
3.3.5.8	Rociadores para tolvas batentes	72
3.3.5.9	Rociadores de nivel intermedio	72
3.4	Sistemas de mangueras y tomas fijas de agua	73

3.4.1	Consideraciones de diseño de las tomas fijas de agua	73
3.4.1.1	<i>Clases de sistemas</i>	73
3.4.1.2	<i>Necesidades de abastecimiento de agua</i>	74
3.4.1.3	<i>Componentes del sistema</i>	76
3.4.1.4	<i>Tipos de sistemas</i>	79
3.4.2	Sistemas de mangueras exteriores	79
3.5	Sistemas de aspersores de agua	80
3.5.1	Uso de los aspersores de agua	80
3.5.1.1	<i>Extinción</i>	81
3.5.1.2	<i>Control del fuego</i>	81
3.5.1.3	<i>Protección contra fuegos externos</i>	81
3.5.1.4	<i>Prevención del fuego</i>	81
3.5.2	Aplicaciones de los sistemas aspersores de agua	81
3.5.3	Sistemas fijos de aspersores	82
3.5.3.1	<i>Aplicación de los sistemas</i>	82
3.5.4	Cálculo y proyecto de los sistemas	83
3.5.4.1	<i>Dimensión de los sistemas de aspersores de agua</i>	85
3.5.4.2	<i>Suministro de agua</i>	85
3.5.4.3	<i>Dimensiones de las tuberías</i>	86
3.5.4.4	<i>Elección y uso de las boquillas de pulverización</i>	86
3.5.5	Sistemas especiales	87
3.5.5.1	<i>Sistemas de aspersión de agua a velocidad Ultra-Alta</i>	87
4	Las Baterías de Separación	89
4.1	El separador de gas y aceite	89
4.1.1	Partes internas	92
4.1.1.1	<i>Zona de entrada</i>	92
4.1.1.2	<i>Zona de gravedad/coalescencia</i>	93
4.1.1.3	<i>Zona de salida</i>	93
4.2	Fluidos del pozo y sus características	96
4.2.1	Aceite crudo	96
4.2.2	Condensado	96
4.2.3	Gas natural	96
4.2.4	Gas libre	97
4.2.5	Vapores condensables	97
4.2.6	Agua	97
4.3	Funciones primarias de los separadores de gas y aceite	97
4.3.1	Remoción del aceite del gas	97
4.3.1.1	<i>Métodos para remover el aceite del gas en los separadores</i>	98
4.3.2	Remoción del gas del aceite	100
4.3.3	Remoción del agua del aceite	100
4.4	Funciones secundarias de un separador de gas y aceite	100
4.4.1	Presión óptima de separación	100
4.4.2	Mantener el sello de líquido en el separador	101

4.4.2.1	Controladores de nivel	101
4.5	Problemas especiales en la separación de gas y aceite	102
4.5.1	Formación de espuma	102
4.5.2	Parafinas	103
4.5.3	Sólidos y sal	103
4.5.4	Corrosión	103
4.5.5	Agitación	104
4.6	Clasificación de los separadores de gas y aceite	104
4.6.1	Clasificación por configuración	104
4.6.2	Clasificación por función	104
4.6.3	Clasificación por presión de operación	106
4.6.4	Clasificación por aplicación	106
4.7	Dimensionamiento del separador	107
4.7.1	Teoría de asentamiento	107
4.7.1.1	<i>Separadores horizontales</i>	107
4.7.1.2	<i>Separadores verticales</i>	109
4.7.2	Tamaño de las gotas o burbujas	110
4.7.3	Tiempo de retención	111
4.7.3.1	<i>Separadores horizontales</i>	111
4.7.3.2	<i>Separadores verticales</i>	111
4.7.4	Dimensionamiento del extractor de niebla	111
4.7.5	Longitud de tapa a tapa	112
4.7.5.1	Separadores horizontales	112
4.7.5.2	Separadores verticales	113
4.7.6	Dimensionamiento de las boquillas	113
5	La Norma NFPA 15	115
5.1	Introducción	115
5.1.1	Definiciones	116
5.2	Requerimientos generales	119
5.2.1	Consideraciones especiales	119
5.2.1.1	<i>Materiales solubles en agua</i>	120
5.2.2	<i>Control del escurrimiento</i>	120
5.3	Componentes del sistema	121
5.3.1	Boquillas aspersoras de agua	121
5.3.1.1	<i>Recubrimientos especiales</i>	121
5.3.1.2	<i>Almacenamiento de las boquillas aspersoras de agua automáticas y de los rociadores piloto de repuesto</i>	122
5.3.2	Tuberías y Tubings	123
5.3.2.1	<i>Tubería de acero</i>	123
5.3.2.2	<i>Accesorios</i>	123
5.3.2.3	<i>Uniones de tubería y accesorios</i>	125
5.3.2.4	<i>Sujetadores</i>	127
5.3.2.5	<i>Válvulas</i>	128
5.4	Requerimientos de instalación	128
5.4.1	Distanciamiento eléctrico	128
5.4.2	Boquillas aspersoras de agua	128

5.4.2.1	<i>Selección</i>	128
5.4.3	Instalación de tuberías	130
5.4.3.1	<i>Válvulas</i>	130
5.4.3.2	<i>Soporte de la tubería</i>	130
5.4.3.3	<i>Drenaje para las tuberías</i>	132
5.4.4	Equipo de detección automática	132
5.4.4.1	<i>Protección</i>	132
5.4.4.2	<i>Selección, localización y espaciamento de los detectores</i>	133
5.5	Objetivos de diseño	134
5.5.1	Diseño del sistema	134
5.5.1.1	<i>Tamaño del sistema y demanda de agua</i>	134
5.5.2	Extinción	135
5.5.2.1	<i>Acometidas y charolas de cables</i>	135
5.5.2.2	<i>Bandas transportadoras</i>	135
5.5.3	Control de incendio	137
5.5.4	Protección contra la explosión	137
5.5.4.1	<i>Recipientes</i>	137
5.6	Planos y cálculos hidráulicos	137
5.6.1	Planos de trabajo	138
5.6.2	Cálculos hidráulicos	139
5.6.3	Información del suministro de agua	140
5.6.4	Procedimientos para los cálculos hidráulicos	141
5.6.4.1	<i>Fórmulas</i>	141
5.6.5	Longitudes equivalentes en tubería de válvulas y accesorios	143
5.6.5.1	<i>Procedimiento de cálculo</i>	144
5.7	Suministro de Agua	144
5.8	Sistemas de aspersión de agua a velocidad ultra-alta	145
5.8.1	Tiempo de respuesta	145
5.8.2	Consideraciones de diseño	145
5.8.2.1	<i>Tipos de sistemas</i>	145
5.8.2.2	<i>Gasto y densidad</i>	146
5.8.2.3	<i>Presión de diseño</i>	146
5.8.2.4	<i>Limitaciones de volumen del sistema</i>	146
5.8.2.5	<i>Duración</i>	146
5.8.2.6	<i>Detección</i>	146
6	Principios de Diseño de Recipientes a Presión	149
6.1	El Código ASME Sección VIII División 1	149
6.1.1	Materiales	151
6.1.1.1	<i>Placa</i>	151
6.1.2	Diseño	151
6.1.2.1	<i>Temperatura de diseño</i>	152
6.1.2.2	<i>Presión de diseño</i>	152
6.1.2.3	<i>Cargas</i>	153
6.1.3	Esfuerzo permitido	153
6.2	Armazones cilíndricas	156
6.2.1	Fuerzas de tensión	156

6.2.1.1	<i>Armazones cilíndricas delgadas</i>	156
6.2.1.2	<i>Armazones cilíndricas gruesas</i>	159
6.2.2	Compresión axial	162
6.2.3	Presión externa	165
6.2.3.1	<i>Presión externa para cilindros con $D_0/t \geq 10$</i>	165
6.2.3.2	<i>Presión externa para cilindros con $D_0/t < 10$</i>	169
6.2.3.3	<i>Ecuaciones empíricas</i>	170
6.2.3.4	<i>Anillos de refuerzo</i>	171
6.3	Armazones esféricas y tapas semiesféricas	174
6.3.1	Presión interna en armazones esféricas y presión en el lado cóncavo de las tapas semiesféricas	174
6.3.2	Presión externa en armazones esféricas y presión en el lado convexo de las tapas semiesféricas	178
6.4	Tapas elipsoidales	179
6.4.1	Presión en el lado cóncavo	179
6.4.2	Presión en el lado convexo	181
6.5	Tapas toriesféricas	182
6.5.1	Presión en el lado cóncavo	182
6.5.2	Presión en lado convexo	185
7	Diseño de Aspersores de Agua para Protección Contra Incendio de Recipientes a Presión	187
7.1	Diseño de un separador de gas y aceite	187
7.1.1	Método de Arnold	187
7.1.1.1	<i>Separadores verticales</i>	187
7.1.1.2	<i>Separadores horizontales</i>	189
7.1.1.3	<i>Ejemplo de dimensionamiento de un separador</i>	190
7.2	Diseño del sistema de aspersores para recipientes a presión	194
7.2.1	Distribución de las boquillas	194
7.2.2	Presión por velocidad	195
7.2.3	Norma NRF-016-PEMEX-2010	200
7.2.3.1	<i>Recipientes a presión horizontales</i>	201
7.2.3.2	<i>Recipientes a presión verticales</i>	202
7.2.4	Ejemplo de diseño	202
7.2.5	Caso de aplicación	209
	Conclusiones	213
	Bibliografía	215

1 Introducción

1.1 La importancia de los sistemas de protección contra incendios

La seguridad contra el fuego para el ser humano siempre ha sido de gran interés, probablemente desde que se descubrió y se le dieron sus primeras aplicaciones. La humanidad se ha visto beneficiada con la gran variedad de aplicaciones prácticas de la energía calorífica, la combustión como uno de estos beneficios, pero estos beneficios se ven reducidos ante la tremenda fuerza de destrucción que poseen los incendios y las explosiones. Esto nos ha llevado a intentar comprender la naturaleza de ambos y buscar los medios que nos lleven a reducirlos o eliminarlos.

Por otra parte, la prevención de incendios y explosiones, como un aspecto restringido de la protección contra incendios, ha ido aumentando tanto en el aspecto teórico como en el práctico. Raramente concebimos el fuego como una amenaza personal significativa, casi siempre pensamos en los incendios con relación a los demás. Claro, que también podemos decir lo mismo de otros peligros como las enfermedades, peligros ambientales y ocupacionales.

El término de protección contra incendios, se aplica al conjunto de medidas adoptadas para eliminar las circunstancias que generen el incendio, con el fin de evitar que éste se produzca o puedan reducirse los efectos causados por el mismo.


Por ser eventos probabilísticos, el fuego o la explosión jamás van a poder prevenirse del todo, independientemente de lo estrictas que sean las medidas tomadas sobre las fuentes de peligro. Desde el punto de vista de la protección, las medidas más importantes son las que actúan en las etapas iniciales del incendio, ya que en las últimas etapas se generan pérdidas sustanciales, que van desde materiales hasta vidas humanas.

La generación de un incendio es uno de los procesos muchas veces imprevisibles, que causa en muchas ocasiones pérdidas de vidas humanas, además de pérdidas costosas en lo que se refiere a materiales. Se ha comprobado estadísticamente que las empresas que se ven afectadas por un incendio, de dimensiones importantes, tienden a desaparecer en un periodo de 5 años posteriores a la catástrofe. De acuerdo con datos estadísticos de algunas compañías de seguros se deduce que, en caso de incendio:


- El 32% de las industrias desaparecen.
- El 19% hacen regulación de empleo y desaparecen tras unos años.
- El 49% continúa con grandes pérdidas económicas.

Si se llegara a producir un incendio, el tener medios de protección inadecuados conlleva responsabilidades civiles y penales para los involucrados. En general, podría decirse que la normativa está dirigida a la protección de personas y edificios, para su seguridad, contemplando además una eficaz evacuación.

La protección contra incendios no tiene una definición única, sino que puede dividirse en las siguientes categorías:


 **Protección Pasiva:** Su objetivo es la adopción de medidas para evitar que se pueda generar un incendio a causa de las actividades que se realizan en el inmueble. Cuando se inicia el incendio, se debe impedir que se extienda y facilitar la evacuación de las personas para que estén a salvo. Este proceso se realiza en dos fases:

- 1) **Diseño de las instalaciones:** Debe permitir una rápida evacuación del personal, así como un acceso rápido para los equipos de combate contra incendio e instalaciones que impidan la extensión del fuego fuera del inmueble.
- 2) **Materiales utilizados en los elementos estructurales de la construcción:** Estos materiales deben conservar sus propiedades durante el tiempo suficiente, para que se realice la evacuación de las instalaciones así como no representar un peligro para los equipos de rescate y bomberos.

 **Protección Integral:** En este tipo de protección se instalan diferentes tipos de dispositivos automáticos en el inmueble que pueden detectar o combatir las fuentes de incendio. Este tipo de dispositivos pueden evitar los errores que humanamente se puedan cometer, pero su acción debe complementarse con personal entrenado en la lucha contra incendios.

A continuación se dan unos ejemplos de estos dispositivos:

- Ⓢ Dispositivos que detectan las primeras manifestaciones del fuego.
- Ⓢ Sistemas que arrojan un agente extintor, ya sea agua, polvo, espuma o gas sobre el fuego para evitar que se desarrolle.
- Ⓢ Elementos móviles que tienen como objetivo evitar temporalmente la propagación del incendio por las aberturas (puertas y cortinas corta-fuego).
- Ⓢ Señalizaciones luminosas que se encienden si ocurriese un apagón para guiar al personal fuera del área de incendio.

 **Protección Activa:** Es el conjunto de los medios para luchar contra el incendio ya que este se ha declarado. Los manejan equipos de seguridad entrenados en el uso de material móvil, comúnmente de gran potencia. Los cuerpos de bomberos garantizan esta protección cuando los equipos de seguridad son pocos o inexistentes.

- ✚ **Protección Financiera:** Después de un siniestro es necesario indemnizar a las víctimas o a sus familias, reconstruir las instalaciones y recomenzar actividades. Es aquí donde entran las compañías de seguros.
- ✚ **Protección Industrial:** Este tipo de protección se enfoca a evitar que se genere un incendio debido a un proceso de fabricación o almacenamiento, su campo de acción es muy amplio.

La prevención de un incendio jamás conseguirá el 100 de éxito, sin embargo es necesario planificarla y diseñarla para tratar de reducir las pérdidas cuando se genere un incendio.

El desarrollo de un sistema integrado de protección, equilibrado, con características muy distintas y sistemas que se apoyen entre sí, para dar cobertura unos a otros si se llegase a presentar una falla en cualquiera de ellos, es la esencia de la ingeniería en protección contra incendios, cuyos objetivos de dar seguridad contra incendios, conforme a los códigos y normas en vigor.

La última oportunidad de detener el fuego y el humo, son los medios de protección pasiva, que desempeñan un papel esencial en hacer que los sistemas automáticos actúen y logren controlar el fuego.

1.1.1 Sistemas de protección contra incendios a base de agua

Podrías suponerse que el agua es el agente extintor más utilizado porque es barata y fácilmente disponible, comparándole con otros líquidos. Además, es el mejor agente extintor, comparada con cualquier otro líquido conocido, para la mayoría de las clases de fuego.

Sin embargo, el agua no es un agente extintor perfecto ya que se congela a los 0°C, conduce la electricidad, puede estropear algunos bienes de forma irreversible, aunque en la mayoría de los casos los daños ocasionados son recuperables. El agua no es nada eficaz en incendios de líquidos inflamables, en especial cuando son insolubles en agua, ya que estos tienden a flotar sobre el agua, tal es el caso de los hidrocarburos.

El agua puede extinguir el fuego en el momento en que logre aislar al combustible del oxígeno y mediante la combinación de diferentes mecanismos:

- ✚ Disminuye la temperatura del combustible sólido o líquido.
- ✚ Enfría la flama, generando vapor que evita que llegue el oxígeno a esta.
- ✚ En forma de niebla, bloquea la radiación del calor.

Las dos formas más comunes de aplicar el agua a un fuego son:

1. Mediante un chorro continuo: con una manguera.
2. Mediante un chorro pulverizado: a través de rociadores o aspersores automáticos.

Los sistemas comúnmente utilizados para la protección contra incendio a base de agua son:

- a. **Mangueras.** Pueden ser aquellas que se poseen dentro de las instalaciones o edificio, o aquellas que provienen de los equipos de bomberos. El agua llega a las mangueras a través de las tomas fijas de agua o de los camiones de bomberos.
- b. **Rociadores.** Son algunos de los medios más fiables para el control de un incendio. Estos dispositivos distribuyen agua sobre del fuego de manera eficiente, el agua llega a los rociadores a través de un sistema de tuberías que generalmente se encuentran suspendidas en el techo.
- c. **Aspersores.** Este tipo de sistemas utiliza agua pulverizada. El agua pulverizada es aquella agua que se lanza de manera especial, con ciertas dimensiones de partícula y velocidad, así como una densidad de pulverización. La descarga de las boquillas es, por lo general, distinta a la de los rociadores.

El diseño de este tipo de sistemas está basado en las normas NFPA, en la industria petrolera mexicana el diseño de las redes contra incendio terrestres está basado en la Norma NRF-016-PEMEX-2010.

1.2 Recipientes a Presión

Dentro de la industria petrolera en México el diseño y construcción de esta clase de recipientes está regido por la norma NRF-028-PEMEX-2010, Diseño y Construcción de Recipientes A Presión. Esta norma está basada en el Código ASME Sección VIII. Los recipientes a presión usados dentro de la industria petrolera son muy variados, en esta tesis nos enfocaremos a los separadores de gas y aceite, que por su forma se dividen en 3 tipos:

1. Verticales
2. Horizontales
3. Esféricos

Los recipientes a presión son contenedores herméticos. Posteriormente altas presiones, temperaturas extremas y una gran variedad de requerimientos funcionales en el diseño trajeron consigo los problemas de diseño.

El incremento del uso de recipientes para almacenar y procesos industriales de generación de potencia bajo condiciones inusuales de presión, temperatura y medio ambiente, ha generado que se le dé énfasis a los métodos analíticos y experimentales para determinar sus límites de operación.

Se requiere un conocimiento del material, no solo para evitar las fallas, por ejemplo, si los esfuerzos que actúan sobre la estructura son muy bajos, el tamaño se vuelve demasiado amplio

para los requerimientos y no se alcanza el potencial económico deseado. Al conjunto de características de los materiales que están sujetos a la acción de fuerzas y deformaciones se les llama propiedades mecánicas.

Los esfuerzos que actúan sobre los recipientes, producen cambios en sus dimensiones conocidos como deformaciones.

1.2.1 Tipos, Clases y Categorías de los esfuerzos

El código ASME Sección VIII División 1 no especifica la consideración de esfuerzos combinados. Tampoco da métodos para la combinación de dichos esfuerzos. Por otra parte, el código ASME en su Sección VIII División 2 provee una guía específica de las categorías de los esfuerzos y los métodos para su combinación. La siguiente información utiliza información de la División 2, que puede aplicarse en general a todos los recipientes.

El espesor del armazón se calcula con las fórmulas del Código para presión interna o presión externa únicamente, lo cual no es suficiente para entender los efectos combinados de todas las demás cargas. Cálculos detallados consideran los efectos de cada carga individualmente y después estos efectos deben combinarse para brindar el estado total del esfuerzo en cada parte. Los esfuerzos que están presentes en los recipientes están separados en varias clases, de acuerdo con los tipos de cargas que los produzcan y el peligro que representen para el recipiente.

Las cargas no cedentes producen esfuerzos primarios. Las cargas cedentes (auto-limitadas) producen esfuerzos secundarios. Las cargas generales producen esfuerzos primarios de membrana y esfuerzos de flexión. Los esfuerzos primarios deben de mantenerse por debajo de los secundarios.

1.2.1.1 Tipos de esfuerzos

Existen demasiados nombres para describir los tipos de esfuerzos. La siguiente lista nombra los tipos de esfuerzos sin considerar sus efectos sobre los recipientes o sus componentes. Estos definen la dirección de los esfuerzos o relacionan la aplicación de la carga:

- 1) Tensión
- 2) Compresión
- 3) Rotura
- 4) Flexión
- 5) Carga
- 6) Axial
- 7) Discontinuidad
- 8) Principal

- 9) Membrana
- 10) Térmico
- 11) Tangencial
- 12) Carga inducida
- 13) Tensión inducida
- 14) Circular
- 15) Longitudinal
- 16) Radial
- 17) Normal

1.2.1.2 Clases de esfuerzos

La lista anterior es demasiado general para proveer una base para la combinación de esfuerzos, que pueda aplicarse a los esfuerzos permitidos. Para este propósito, nuevos grupos llamados clases de esfuerzos deben de ser utilizados. Las clases de esfuerzo se definen por el tipo de carga que los producen y el riesgo que representen para el recipiente.

1. Esfuerzos primarios:
 - a. Generales:
 - ✚Esfuerzos primarios de membrana generales, P_m .
 - ✚Esfuerzos primarios de flexión generales, P_b .
 - b. Esfuerzos primarios locales, P_L .
2. Esfuerzos secundarios:
 - a. Esfuerzos secundarios de membrana generales, Q_m .
 - b. Esfuerzos secundarios de flexión generales, Q_b .
3. Esfuerzo pico.

Esfuerzos primarios generales

Estos esfuerzos actúan sobre toda la sección transversal del recipiente, se producen por cargas mecánicas (cargas inducidas) y son los más peligrosos de todos los tipos de esfuerzos. La característica básica de los esfuerzos primarios es que no se auto-limitan. Los esfuerzos primarios se deben generalmente a la presión interna o externa o son producidos por las fuerzas y momentos mantenidos. Los esfuerzos térmicos no entran en esta clasificación.

Esfuerzos primarios locales

También conocidos como esfuerzos de membrana locales, técnicamente no son una clasificación de esfuerzos pero son una categoría de esfuerzos, desde que son una combinación de dos esfuerzos. Los esfuerzos que combina son esfuerzos primarios de membrana, P_m , más esfuerzos secundarios de membrana, Q_m , producidos de las cargas que se sostienen. Estos han sido

agrupados de manera que se limite el esfuerzo permitido para esta combinación en particular a un nivel más bajo que el permitido para otras aplicaciones de los esfuerzos primarios y secundarios.

Un esfuerzo primario local se produce ya sea por la presión de diseño o por otras cargas mecánicas. La principal diferencia entre un esfuerzo primario local y un esfuerzo secundario, es que un esfuerzo primario local se produce por una carga no cedente, el esfuerzo solo se redistribuye. En un esfuerzo secundario la cedencia disminuye la carga y es absolutamente auto-limitado. La habilidad de los esfuerzos primarios locales para redistribuirse a ellos mismos después de que se alcanza una fuerza de cedencia provee un efecto de válvula de seguridad.

Tenemos que, $P_L = P_m + Q_m$, donde Q_m es el esfuerzo local de las cargas no cedentes que se sostienen. Los ejemplos de los esfuerzos primarios locales son:

1. P_m + esfuerzos de membrana en discontinuidades locales:
 - a. Unión tapa-armazón
 - b. Unión cono-cilindro
 - c. Unión boquilla-armazón
 - d. Unión brida-armazón
 - e. Unión tapa-faldón
 - f. Unión armazón-anillo de refuerzo
2. P_m + esfuerzos de membrana de cargas locales cedentes:
 - a. Soportes
 - b. Cargas de boquillas
 - c. Vigas de soporte
 - d. Accesorios mayores

Esfuerzos secundarios

La característica básica de los esfuerzos secundarios es que se auto-limitan. La aplicación de un esfuerzo secundario no puede causar la falla estructural debido a impedimentos que ofrece la parte del cuerpo a la cual se le está adjuntando. La media de los esfuerzos secundarios se desarrolla en las uniones de los componentes de un recipiente a presión. Esta clase de esfuerzos se produce por las cargas cedentes diferentes a la presión interna o externa.

Los esfuerzos discontinuos únicamente se consideran como esfuerzos secundarios si su extensión a lo largo del armazón es limitada. La División 2 de la Sección VIII del código ASME impone la restricción de que la longitud de un esfuerzo secundario es $\sqrt{R_m t}$, más allá de esta distancia el esfuerzo se considera como primario. En un recipiente cilíndrico, la longitud $\sqrt{R_m t}$ representa la longitud sobre la cual el armazón se comporta como un anillo.

Los esfuerzos secundarios se dividen en dos grupos adicionales, de membrana y de flexión. Ejemplos de cada uno se mencionan a continuación:

1. Esfuerzos secundarios de membrana, Q_m :
 - a. Esfuerzo axial en la unión de la brida y en el centro de la brida.
 - b. Esfuerzos térmicos.
 - c. Esfuerzos de membrana en el área de mayor curvatura de la tapa.
 - d. Esfuerzos de membrana debido a las cargas cedentes locales.
2. Esfuerzos secundarios de flexión, Q_b :
 - a. Esfuerzos de flexión en el grueso de las discontinuidades estructurales: boquillas, soportes, etc. (solo cargas de cedencia).
 - b. La porción no uniforme del esfuerzo en un recipiente con paredes delgadas debido a la presión interna.
 - c. La variación del esfuerzo radial debido a la presión interna en recipientes con paredes delgadas.
 - d. Esfuerzos discontinuos en los anillos de refuerzo o de soporte.

Esfuerzos pico

Son esfuerzos adicionales debidos a la intensificación del esfuerzo en localizados en muchas áreas. Hay distorsiones significativas que se causan por el efecto de estos esfuerzos. Su efecto es significativo, únicamente en condiciones de fatiga o en materiales frágiles. Algunos ejemplos son:

1. Esfuerzo en la esquina de una discontinuidad.
2. Esfuerzos térmicos en la pared causados por un repentino cambio en la temperatura superficial.
3. Esfuerzos térmicos en recubrimientos o recubrimientos de la soldadura.
4. Esfuerzo debido a los efectos del corte (concentración del esfuerzo).

1.2.1.3 Categorías de los esfuerzos

Una vez calculados los diferentes esfuerzos de los componentes, ellos deben de combinarse y este resultado final debe de compararse con los esfuerzos permitidos (ver Tabla 1.1). La combinación de las diferentes clases de esfuerzos debido a la combinación de cargas actuando al mismo tiempo se conoce como categorías de esfuerzos. Cada categoría tiene asignados límites de esfuerzos basados en el peligro que puedan representarle al recipiente. Lo siguiente esta derivado básicamente de la División 2 de la Sección VIII del Código ASME, simplificado para su aplicación en los recipientes de la División 1 y los esfuerzos permitidos. Debe de utilizarse únicamente como una guía, ya que la División 1 solo dos categorías de esfuerzos.

Tabla 1.1 Esfuerzos permitidos para las clasificaciones y categorías de los esfuerzos

<i>Clasificación o Categoría del Esfuerzo</i>	<i>Esfuerzo Permitido</i>
Primario de membrana general, P_m	SE
Primario de flexión general, P_b	$1.5 SE < .9S_\gamma$
Primario de membrana local, P_L ($P_L = P_m + Q_{ms}$)	$1.5 SE < .9S_\gamma$
Secundario de membrana, Q_m	$1.5 SE < .9S_\gamma$
Secundario de flexión, Q_b	$3SE < 2 S_\gamma < UTS$
Pico, F	$2S_a$
$P_m + P_b + Q_m^* + Q_b$	$3SE < 2 S_\gamma < UTS$
$P_L + P_b$	$1.5 SE < .9S_\gamma$
$P_m + P_b + Q_m^* + Q_b$	$3SE < 2 S_\gamma < UTS$
$P_m + P_b + Q_m^* + Q_b + F$	$2S_a$

Notas:

Q_{ms} = Esfuerzos de membrana por cargas sostenidas.

Q_m^* = Esfuerzos de membrana por cargas cedentes, cargas auto-limitadas.

S = Esfuerzo permitido por el Código ASME, Sección VIII, División 1 a temperatura de diseño.

S_γ = Esfuerzo mínimo cedencia a temperatura de diseño.

UTS = Fuerza mínima de tensión especificada.

S_a = Esfuerzo permitido para cualquier número de ciclos de las curvas de diseño de fatiga.

1.2.2 Fallas en los recipientes a presión

Las fallas en los recipientes pueden agruparse en 4 grandes categorías, las cuales describen por qué el recipiente falla. Las fallas también pueden agruparse en tipos de fallas, los cuales describen cómo ocurren las fallas. A continuación se nombran las 4 grandes categorías:

1. **Material.** Selección inapropiada del material, defectos en el material.
2. **Diseño.** Datos incorrectos de diseño, métodos de diseño imprecisos o erróneos, prueba de compra inadecuada.
3. **Fabricación.** Control pobre de la calidad, procedimientos de fabricación impropios o insuficientes, incluyendo soldadura, tratamiento de calor o métodos de modelado.
4. **Servicio.** El cambio de las condiciones de servicio por el usuario, operadores sin experiencia o mantenimiento del personal. Algunos tipos de servicios que requieren especial atención para la selección del material, detalles de diseño y métodos de fabricación son los siguientes:
 - a. Letales
 - b. Fatiga
 - c. Fragilidad (baja temperatura)
 - d. Alta presión
 - e. Alto golpeteo o vibración
 - f. Contenidos del recipiente

⚠Hidrógeno

⚠Amoniaco

- ✚ Aire comprimido
- ✚ Cáusticos
- ✚ Cloruros

Los tipos de falla son:

- ✚ **Deformación elástica.** Inestabilidad elástica o torsión elástica, geometría del recipiente, y dureza tanto como las propiedades de los materiales que son medidas de protección contra la torsión.
- ✚ **Fractura frágil.** Puede ocurrir a temperaturas bajas o intermedias. Las fracturas frágiles han ocurrido en recipientes hechos de acero con bajo carbón en un rango de temperaturas de 40-50°F durante la prueba hidráulica cuando existen menos defectos.
- ✚ **Deformación plástica excesiva.** Los límites primarios y secundarios como se mencionan en la División 2, Sección VIII del Código ASME, intentan prevenir la deformación plástica excesiva y el incremento del colapso.
- ✚ **Esfuerzo de ruptura.** La deformación por el arrastre como resultado de la fatiga o las cargas cíclicas producen una fractura progresiva. El arrastre es un fenómeno dependiente del tiempo, donde la fatiga es un ciclo que depende del fenómeno.
- ✚ **Inestabilidad plástica.** Incremento del colapso, el incremento del colapso es acumulación cíclica de la tensión o acumulación cíclica de la deformación. El daño acumulado conlleva a la inestabilidad del recipiente por deformación plástica.
- ✚ **Alta tensión.** Un ciclo de baja fatiga está dominado por la tensión y ocurre principalmente en materiales de baja fuerza y altamente dúctiles.
- ✚ **Esfuerzo de corrosión.** Es bien conocido que los cloruros causan esfuerzos de corrosión agrietando los aceros inoxidable; del mismo modo el uso para cáusticos puede causar esfuerzos de corrosión agrietando los aceros al carbón. La selección del material es crítica para este tipo de uso.
- ✚ **Fatiga por corrosión.** Ocurre cuando los efectos de corrosión y fatiga se generan al mismo tiempo. La corrosión puede reducir la vida de la fatiga agujerando y propagando las grietas. La buena selección del material y las propiedades de fatiga, son las mejores opciones para evitar este tipo de falla.

1.3 Las propiedades de los metales y la temperatura

La aplicación de calor a los metales va más allá de una simple expansión o contracción, ya que los cambios de temperatura ocasionan que las propiedades de los metales varíen, en cuanto a su resistencia.

Los materiales metálicos cuando son sometidos a fuerzas externas pueden reaccionar elástica o plásticamente. La línea A-B en la Fig. 1.1 representa los esfuerzos y deformaciones en el rango

elástico, en tanto que el esfuerzo en B no se exceda, el material asumirá la posición y forma original después de que se elimine la carga. B sería el límite elástico para este material y el aumento, por encima de este punto, del esfuerzo sobre el material causará una deformación permanente (deformación plástica), que no puede recuperarse por la simple eliminación de la carga. En el punto C, la deformación plástica ocurre a tal grado que los esfuerzos se alivian más rápido de lo que se forman y la fatiga aumenta sin un esfuerzo adicional. El esfuerzo unitario en C es conocido como punto de cedencia.

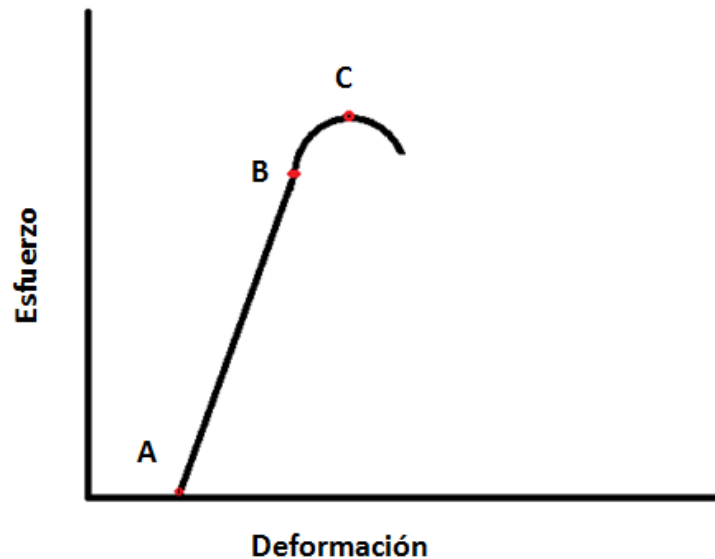


Fig. 1.1

El comportamiento elástico de los materiales metálicos se da normalmente cuando se encuentran a temperatura ambiente. A medida que la temperatura aumenta, el comportamiento elástico va desapareciendo (variables para cada metal) causan que se llegue más rápido a la deformación plástica, situación en la que el metal falla.

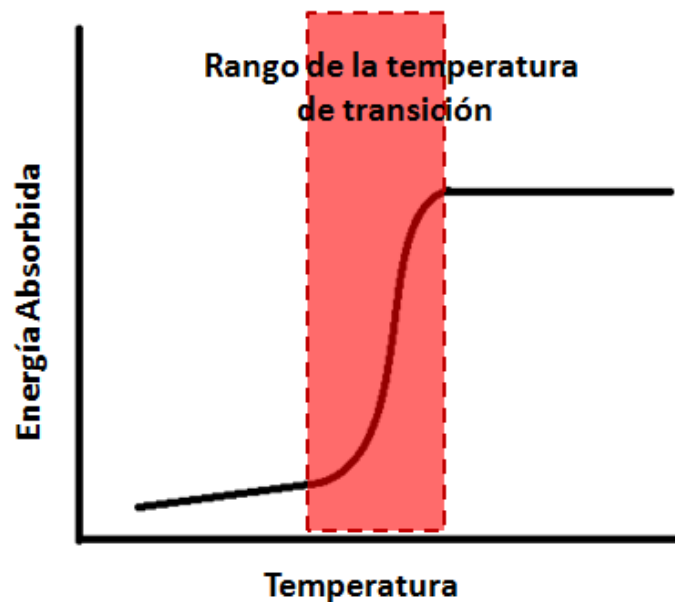
Es común que las condiciones de operación de los metales estén a temperatura ambiente (alrededor de 20°C). Cuando un metal se quiere utilizar lejos de estas condiciones se ven afectadas sus propiedades. En general un metal se vuelve más débil a altas temperaturas y más dúctil y se vuelve frágil a muy bajas temperaturas.

La mayoría de los materiales ferrosos tienen su fuerza máxima a aproximadamente 200°C, la fuerza de los materiales no ferrosos es generalmente medida a máxima temperatura del cuarto. La Tabla 1.2 muestra como varía la fuerza de algunos metales a diferentes temperaturas de ambiente.

Tabla 1.2 Porcentaje de fuerza de algunos metales basado en su fuerza a 20°C

<i>Material</i>	<i>Temperatura °C</i>				
	100	200	300	400	500
Hierro forjado	104	112	116	96	76
Hierro fundido	-	100	99	92	76
Aleaciones de acero	109	125	121	97	57
Acero estructural	103	132	122	86	49
Cobre	95	83	73	59	42
Bronce	101	94	57	26	18

Todos los metales tienden a “fluir” (ser más maleables) bajo esfuerzos a altas temperaturas en su forma de manufactura, pudiendo causar una deformación de sus componentes. En ese punto para aplicaciones en altas temperaturas la resistencia del acero a la fluidez, en general es un criterio importante para la selección de los metales.

*Fig. 1.2 Temperatura de transición*

A temperaturas por debajo de -10°C los aceros comunes tienden a hacerse más frágiles y su dureza se ve afectada. Utilizando cierto tipo de aleaciones de acero al carbón es posible operar a temperaturas por debajo de los -40°C .

1.3.1 Temperatura de transición

Este término se usa para referirse el mayor cambio en la resistencia a la falla del metal con un cambio relativamente pequeño en la temperatura, aunque la temperatura de transición sea realmente un rango como se muestra en la Fig. 1.2.

Esta temperatura puede ser definida aproximadamente como la temperatura por encima de la cual el acero se comporta de una forma predominantemente dúctil y, por debajo de la cual, el material muestra un comportamiento predominantemente frágil.

2 Principios de la Química del Fuego

2.1 Reacción química

Dos moléculas o más puestas en contacto y en ciertas condiciones (temperatura, luz, presión, etc.) pueden actuar entre sí (reaccionar) y producir un cambio químico. De la modificación se obtienen generalmente moléculas diferentes a las que se habían puesto en contacto y entonces se dice que ha habido una reacción química. Cuando las reacciones entre cuerpos diferentes se manifiestan con facilidad, se da el nombre de afinidad química. Las sustancias que no experimentan reacciones entre sí, se conocen como inertes.

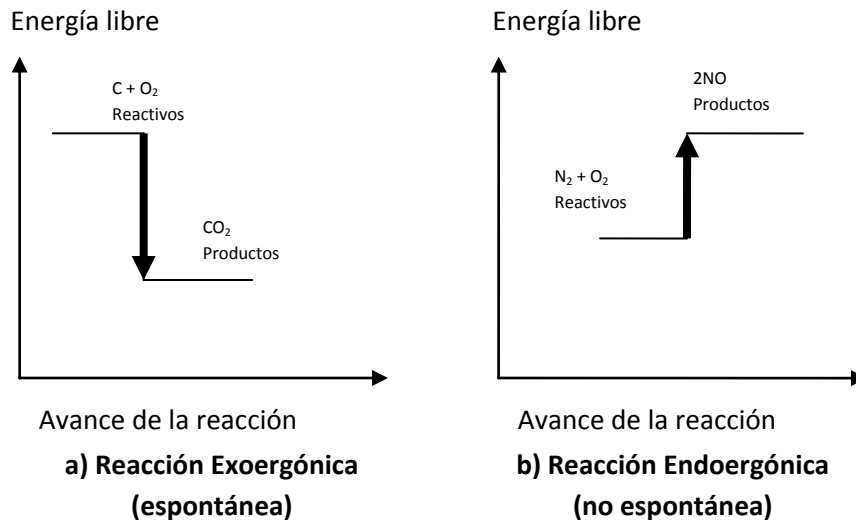


Fig.2.1 Cambios de energía libre en el sistema para reacciones espontáneas y no espontáneas

Las siguientes reacciones son conocidas como las reacciones fundamentales:

- *Reacción exoenergónica*: Es una reacción espontánea en la cual la energía libre va disminuyendo conforme se realiza la reacción.
- *Reacción endoenergónica*: Reacción no espontánea en la cual la energía libre va aumentando.
- *Reacción espontánea*: la que se produce por sí misma, poniendo simplemente las moléculas reactivas en contacto.

- *Reacción en equilibrio*: cuando todas las moléculas reactivas se transforman y el sistema queda modificado (también se conoce como reacción irreversible).
- *Reacción limitada*: cuando los reactivos no quedan transformados totalmente, indicando tendencia a formar de nuevo los cuerpos iniciales (también se denomina reacción reversible).
- *Reacción de transferencia electrónica (o redox)*: cuando entre dos cuerpos se intercambian electrones, oxidándose uno (el que los pierde) y reduciéndose otro (el que los gana).

2.1.1 Cinética de la reacción

La termodinámica no consideró en sus ecuaciones fundamentales el tiempo en que puede ocurrir una reacción química, por lo que es necesario realizarse estudios de los cambios de concentración contra el tiempo, a esta rama se le denomina cinética química que estudia las velocidades de las reacciones químicas y los mecanismos a través de los cuales éstas se producen. La velocidad de reacción es la velocidad con la que desciende la concentración de los reactivos o aumenta la de un producto en el curso de la reacción.

$$\text{Reactivos} \rightarrow \text{Productos} \quad v = \frac{-d[\text{Reactivos}]}{dt} = \frac{d[\text{Productos}]}{dt}$$

Se ha encontrado que la velocidad de una reacción depende de la naturaleza de los reactivos (estado físico, grosor de partícula, etc.), la concentración, la temperatura y los catalizadores.

Del estudio experimental de la cinética de una reacción química se deduce su ley de velocidad, que es una ecuación que expresa la velocidad en función de las concentraciones de las sustancias que toman parte en la reacción y que normalmente tiene la forma:

$$v = k[\text{Reactivos}]^x$$

El orden de la reacción con respecto a un reactivo es el exponente de su término de concentración en la ley de velocidad. El orden de la reacción global es la suma de los exponentes de todos los términos de concentración (Tabla 2.1).

Para calcular la concentración de reactivo quedará transcurrido un tiempo o el tiempo necesario para que determinada cantidad de reactivo se consuma, es útil integrar la ecuación de velocidad (Tabla 2.2). La vida media, $t_{1/2}$, de un reactivo es el tiempo necesario para que su concentración pase a ser la mitad del valor inicial. Para una reacción de primer orden, la vida media no depende de la concentración del reactivo (Tabla 2.2).

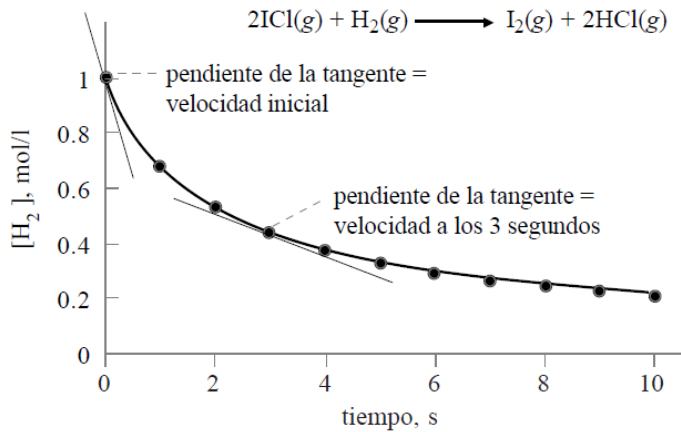


Fig. 2.2 Gráfica de la concentración de hidrógeno contra tiempo para la reacción entre ICl 2 M y H₂ 1 M. La velocidad de reacción (instantánea) es igual a la tangente a la curva en el instante deseado. La velocidad de reacción disminuye con el tiempo debido a la disminución de la concentración de los reactivos. A partir de los datos experimentales se deduce la siguiente ley de velocidad:

$$v = k[\text{ICl}][\text{H}_2]$$

donde k es la constante de velocidad, la cual depende de factores como la temperatura. Obsérvese esta relación entre las diferentes formas de expresar la velocidad:

$$v = \frac{-d[\text{H}_2]}{dt} = \frac{1}{2} \frac{-d[\text{ICl}]}{dt} = \frac{d[\text{I}_2]}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d[\text{HCl}]}{dt}$$

Tabla 2.1 Leyes de las velocidades y órdenes de algunas reacciones químicas

Reacción	Ley de velocidad	Órdenes de reacción
$2\text{N}_2\text{O}_5(\text{g}) \rightarrow 4\text{NO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{N}_2\text{O}_5]}{dt} = k[\text{N}_2\text{O}_5]$	Primer Orden
$2\text{NO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{NO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{NO}_2]}{dt} = k[\text{NO}_2]^2$	Segundo Orden
$\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{HI}(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{H}_2]}{dt} = k[\text{H}_2][\text{I}_2]$	Segundo Orden
$\text{CHCl}_3(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CCl}_4(\text{g}) + \text{HCl}(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{CHCl}_3]}{dt} = k[\text{CHCl}_3][\text{Cl}_2]^{\frac{1}{2}}$	Orden 1 ½
$2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$	$v = \frac{-d[\text{O}_3]}{dt} = k[\text{O}_3][\text{O}_2]^{-1}$	Orden Cero
$2\text{NH}_3(\text{g}) \xrightarrow{\Delta, \text{Pt}} \text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{NH}_3]}{dt} = k$	Orden Cero

Primer orden para H₂
Primer orden para I₂
Primer orden para CHCl₃
Orden ½ para Cl₂
Primer orden para O₃
Orden -1 para O₂

Tabla 2.2 Formas integradas de las leyes de velocidad

Orden	Ley de velocidad	Forma integrada	Vida media
0	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^0 = k$	$[A] = [A]_0 - kt$	
1	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]$	$\ln \frac{[A]}{[A]_0} = -kt$	$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k}$
2	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^2$	$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt$	$t_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{k[A]_0}$
3	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^3$	$\frac{1}{[A]^2} = \frac{1}{[A]_0^2} + 2kt$	
n>1	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^n$	$\frac{1}{[A]^{n-1}} = \frac{1}{[A]_0^{n-1}} + (n-1)kt$	$[A]_0$ =concentración del reactivo al tiempo t . $[A]_0$ =concentración inicial del reactivo.

2.1.2 Teoría de las colisiones

La velocidad de reacción aumenta al elevar la temperatura. Mediante observaciones experimentales, Arrhenius obtuvo una relación matemática entre la constante de velocidad y la temperatura, $k = Ae^{-E_a/RT}$, donde k es la constante o factor de velocidad, A es una constante que depende de la reacción, E_a es la energía necesaria para romper o debilitar los enlaces que forman las moléculas reaccionantes y dejar libres a sus átomos constituyentes (energía de activación), R es la constante de los gases ideales y T es la temperatura absoluta. La constante k es directamente proporcional a la temperatura. La teoría de las colisiones, permite deducir teóricamente la ecuación de Arrhenius y darle un sentido físico.

Esta teoría, que deriva de la teoría cinético-molecular, propone que para poder llevarse a cabo una reacción química entre átomos, iones o moléculas, es preciso que estos átomos experimenten primeramente colisiones. Según esta teoría, la velocidad de reacción dependerá de:

- ✚ La frecuencia de los choques (concentración, estado de los reactivos, temperatura, etc.)
- ✚ La frecuencia de los choques con orientación adecuada (naturaleza de los reactivos)
- ✚ La frecuencia de los choques con energía suficiente para llegar al estado de transición (temperatura).

La mayoría de las reacciones transcurren por mecanismos de varias etapas, llamadas reacciones elementales. La ecuación de una reacción elemental indica la molecularidad (número de partículas que colisionan) de los reactivos implicados en el choque que produce la reacción.

Se puede decir que la ley de velocidad para una reacción elemental (no global) viene dada por el producto de la constante de velocidad por las concentraciones de los reactivos en esa etapa. Es decir, en una reacción elemental, orden y molecularidad coinciden.

La etapa determinante de la velocidad en un mecanismo es la reacción elemental más lenta, pues gobierna la velocidad de la reacción global. Por ejemplo, el transporte de masa o por la reacción química, de esta forma, se puede saber si un mecanismo propuesto para una reacción es o no coherente con la ley de la velocidad experimental.

2.1.3 Variación de la energía en el transcurso de una reacción

Los estados de transición están vinculados a la cinética y la termodinámica de una reacción. Para reaccionar, las moléculas necesitan disociarse formando un complejo activado. La energía de activación, E_a , es la energía que deben de absorber los reactivos para alcanzar el estado activado. En una reacción de varias etapas, cada una tiene su complejo activado y su barrera de activación.

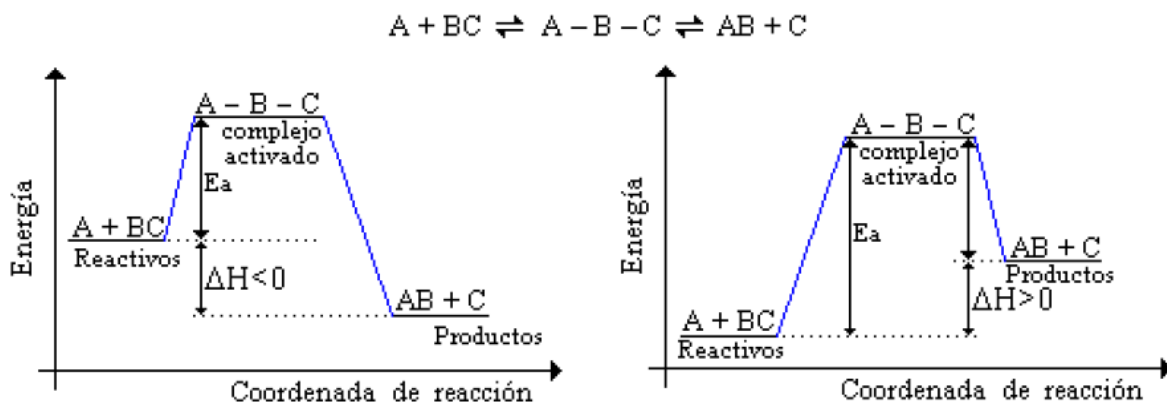


Fig. 2.3 Energía de activación

En general los pasos que requiere una reacción química son:

- ✚ Suministro de energía (E_a) para formar el complejo activado mediante colisiones eficaces de las partículas de los reactivos.
- ✚ Formación del complejo activado, estado de transición muy energético e inestable.
- ✚ Formación de las nuevas sustancias (productos), estado menos energético que el anterior.

La diferencia entre los valores de la energía correspondiente a los estados final e inicial del proceso global indica la entalpía de reacción (ΔH).

2.2 Combustión

El fenómeno químico que se produce con mayor frecuencia a nuestro alrededor, es la combustión. La misma vida animal consiste en una combustión lenta y controlada.

El fuego es una combustión, y ésta no es privilegio solamente de materias condicionadas como pueden ser la madera, la gasolina, el papel, etc. El proceso de combustión tiene mayor amplitud, aunque en ocasiones el término puede parecer ambiguo e inespecífico.

La combustión se conoce como una reacción de oxidación-reducción rápida y exotérmica. La sustancia reductora se llama combustible y la sustancia oxidante se llama comburente. Ambas sustancias pueden encontrarse en fase sólida, líquida, gaseosa o mixta. Todos los cuerpos, sean sólidos, líquidos o gaseosos, incapaces de arder, se denominan incombustibles. Sin embargo, algunos cuerpos considerados como incombustibles, arden en condiciones especiales (el hierro normalmente incombustible, arde en la atmósfera de oxígeno puro).

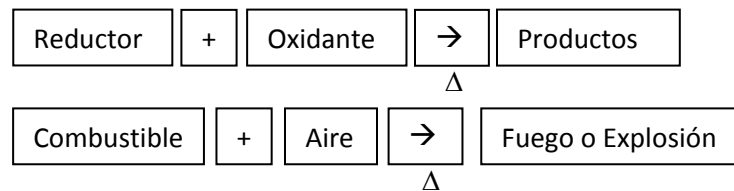
La combustión se puede desarrollar en las siguientes fases:

- Fase gaseosa (combustible y comburente son gases)

- Fase mixta (los gases combustibles provienen del combustible sólido y comburente gaseoso)

También puede existir combustión en atmósferas de cloro, dióxido de carbono, nitrógeno y algunos otros gases sin la presencia del oxígeno. Pero estas situaciones son poco frecuentes, por eso nos enfocaremos principalmente a la combustión en presencia del aire, que es la más común.

Se deduce así que el término de combustión es mucha más complejo que el simple planteamiento que sigue, dónde Δ es calor:



Evidentemente este fenómeno químico, incluye un elevado número de procesos diversos, aunque son cuantitativos y relacionados entre sí, cuya complejidad requiere análisis profundos.

Llamamos fuego a una combustión de aportación¹. El fuego se mantiene cuando hay combustible, oxígeno u otro comburente y temperatura suficientemente elevada para continuar la reacción.

La combustión transcurre esencialmente en fase vapor. En los sólidos, el calor inicia el proceso de descomposición en la estructura molecular hasta alcanzar la formación de gases a temperaturas ordinarias de flama. Los líquidos primero se evaporan, después se mezclan con el comburente, y finalmente se someten a la inflamación. En la combustión de gases, por naturaleza se sigue el mismo proceso que para los líquidos.



En el aspecto más riguroso, una sencilla sustancia química puede desarrollar la combustión por descomposición, con la manifestación de calor y luz (acetileno, peróxido de hidrógeno, ozono).

En condiciones ordinarias, sustancias orgánicas y oxígeno atmosférico, la combustión tiene efecto entre ciclos de dos fases, que generalmente presenta los compuestos del carbono:

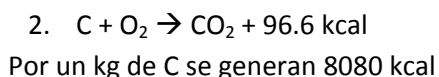
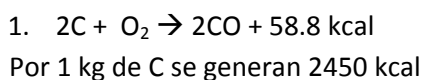
- a. energía de activación en el mecanismo que rige el proceso,
- b. aportación del comburente,
- c. punto de ignición
- d. calores de combustión,
- e. mecanismos de propagación del calor,

¹ Combustión que se inicia y mantiene mediante la aportación continua, por dosificación o difusión, de una cantidad limitada de combustible y comburente. El nombre común de las combustiones de aportación es fuego.

f. influencias:

-  en el gradiente de combustión del material,
-  en la propagación del fuego.

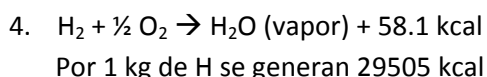
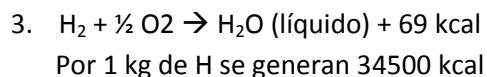
Los elementos determinantes de la materia combustible, son el carbono y el hidrógeno. El carbono entra en combustión por las siguientes reacciones:



1. Expresa una combustión incompleta: el carbono no se ha oxidado completamente y en consecuencia el combustible no ha desarrollado toda la energía calorífica.
2. Presenta una combustión completa: la oxidación ha llegado al máximo y el potencial de calor se ha desarrollado totalmente.

El poder calorífico varía según el combustible, y está definido como el calor desarrollado por un material durante su combustión.

Este poder calorífico se expresa en kcal por cada kg y también por m^3 , y puede determinarse a dos niveles: *superior e inferior*, según el contenido de humedad del material se considere en estado líquido o de vapor.



3. Determina el poder calorífico *superior*, ya que el agua procedente de la combustión, se considera en estado líquido
4. Expresa el poder calorífico *inferior*, ya que el agua producida está en fase vapor.

La madera es el combustible más representativo que se conoce. Si se toma para el análisis una pieza de medianas dimensiones (madera seca corriente), y se somete en presencia del aire ambiental a progresivo calentamiento, se obtendrán los fenómenos mostrados en la Tabla 2.3.

Excluyendo la combustión química con el oxígeno atmosférico, la materia reacciona con otros comburentes, que también intervienen en la oxidación, algunos ejemplos se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.3 Proceso de combustión de la madera

<i>Temperatura</i>	<i>Fenómeno</i>
100°C (aprox)	Pérdida en peso del material por evaporación del agua de humedad que contiene.
100-200°C	Pequeñas carbonizaciones en la superficie. El material se oxida y oscurece endotérmicamente.
200-280°C	Comienza la pirolisis y se desprenden gases combustibles. Se producen a su vez residuos carbonosos de difícil combustión.
280°C (aprox)	La combustión no precisa del suministro del calor exterior, la energía generada sustenta la pirolisis y se producen autoregulados gran cantidad de gases y vapores combustibles.
500°C (aprox)	Concluye la pirólisis en el material. El residuo carbonoso continua en combustión incandescente, los gases combustibles se han agotado
500 - 800°C	Se alcanza la combustión de los residuos carbonosos en incandescencia
800 - 1200°C	Máximas temperaturas que circunstancialmente pueden alcanzar este tipo de combustiones.

Tabla 2.4 Combustiones típicas

<i>Medio</i>	<i>Reacción</i>	<i>Observaciones</i>
<i>Aire atmosférico</i>	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	
<i>En oxígeno como parte de un compuesto</i>	$4\text{C}_3\text{H}_5(\text{NO}_3)_3 \rightarrow 12\text{CO}_2 + 10\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	
<i>En nitrógeno</i>	$3\text{Mg} + \text{N}_2 \rightarrow \text{Mg}_3\text{N}_2$	<p>El nitrógeno no oxidante ni reactivo, es un elemento muy peligroso en combinación con algunos metales. Por acción sobre el magnesio, aluminio, etc., así como aleaciones que forman nitruros, le convierte en un fuerte oxidante.</p> <p>El oxidante puede ser una sustancia sin oxígeno en su composición. El flúor, el más activo de los elementos, es apropiado para combinarse con el hidrógeno del combustible, desprendiendo luz y calor.</p>
<i>En elementos reactivos</i>	$\text{H}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{HCl}$	<p>Otros elementos tienen facilidad para ser oxidados, tal es el caso del sodio y demás metales alcalinos</p>
<i>En otros elementos</i>	$2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2 \text{ (gas)}$	

2.2.1 Anatomía del Fuego

Durante muchos siglos, prevaleció una teoría errónea sobre la combustión, la cual originó distintas interpretaciones. Cuando Lavoisier en 1774 descubrió la naturaleza química del aire, demostró la verdadera naturaleza del fenómeno de la combustión y compuso sus reglas.

La combustión era simplemente una oxidación entre dos sustancias y una de éstas, el oxígeno del aire, que actuaba de oxidante. Desmoronó así la creencia de que el nitrógeno participaba en la combustión, no se produce destrucción de materia, sino simplemente transformación.

La creencia arraigada de entender como combustible a la materia que quema, y por comburente necesariamente el oxígeno del aire que materializa la combustión, es errónea. Químicamente carece de base en varios puntos:

1. Muchas combustiones tiene efecto fuera del aire atmosférico. Son también comburentes el cloro, el hidrógeno, el azufre en vapor, etc.
2. Otras combustiones también tienen efecto son el aire atmosférico, pero con el concurso del oxígeno. Es el caso de los metales ligeros como el potasio que obtiene el oxígeno del agua, el magnesio que lo adquiere hasta del anhídrido carbónico circundante, etc.
3. En otro aspecto, las moléculas de ciertos combustibles contienen oxígeno propio, que extraen para su combustión. En la oxidación por cloratos, permanganatos, salitre, etc., combustible y comburente se hayan asociados en la misma sustancia. Ciertos compuestos explosivos tienen también oxígeno propio. Por ejemplo, la nitrocelulosa.
4. La combustión puede tener lugar entre los compuestos químicos cuales quiera, por ejemplo, el hidrógeno arde con el cloro.
5. La flama no es producto de las reacciones de la combustión, sino de los gases de ésta, que también son combustibles. Así las dos funciones de combustible y comburente pueden invertirse para una misma sustancia. Por ello la combustión entre el hidrógeno y el cloro es inversa. Esta se logra quemando cloro en atmósfera de hidrógeno o bien quemando poco hidrógeno en mucho cloro.
6. Aunque paradójicamente, esta regla también es válida para el oxígeno del aire, el comburente más importante y generalizado. El oxígeno puede invertir los términos de la combustión actuando de combustible, y este a su vez de comburente. Es decir, que es posible hacer arder el aire.

Todo ello indica, que la anatomía del fuego posee técnicas muy sutiles y que los fenómenos químicos se diversifican.

En este capítulo comúnmente, cuando hablemos de comburente nos referiremos al oxígeno que se encuentra en la atmósfera.

2.3 El tetraedro del fuego

Aunque los procesos de combustión son muy complejos, algunos pueden representarse gráficamente mediante un triángulo, cuyos lados representan los elementos esenciales del fuego (Fig. 2.4):

1. Combustible
2. Comburente
3. Calor

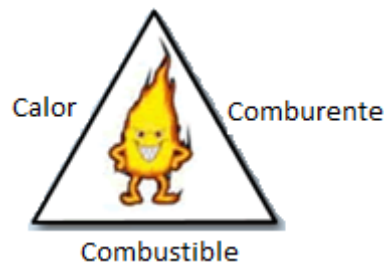


Fig. 2.4 Triángulo del fuego

Sin embargo, una observación más precisa del fenómeno de la combustión hizo necesaria la inclusión de un cuarto elemento: la reacción química, con lo cual el modelo ternario, ahora insuficiente, tuvo que completarse con una cuarta variable que por estar íntimamente relacionada con todas las anteriores, dio lugar al denominado tetraedro del fuego. Con este esquema se simboliza, prácticamente lo mismo que en el anterior, si retiramos alguna de las caras el tetraedro desaparece, es decir, la generación del fuego se puede evitar o eliminar, controlando o suprimiendo una o más de las caras del tetraedro.

. Quedando los siguientes elementos dentro del tetraedro (Fig. 2.5):

1. El combustible
2. El comburente (agente oxidante)
3. El calor
4. Mecanismo de reacción

2.3.1 El combustible

A cualquier sustancia que pueda experimentar una combustión se le denomina combustible. Y estas sustancias generalmente se separan en dos grupos:

1. *Combustibles orgánicos*: La mayoría de los combustibles pertenecen a este grupo, se caracterizan por su contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno en diferentes proporciones. En algunos casos estos llegan a contener nitrógeno. Algunos ejemplos son: madera, plásticos, gasolina, gas natural.

2. *Combustibles inorgánicos*: Este tipo de combustibles no contienen carbono. Entre ellos están los metales combustibles como lo son el potasio, magnesio o sodio.



Fig 2.5 Tetraedro del fuego

Existen tres fases en las que podemos encontrar la materia (sólida, líquida o gaseosa). La fase en que se presente un material dependerá de las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentre, es decir, la fase variará según varíen estas condiciones.

Al generarse la reacción de combustión sobre un combustible sólido o líquido, esta reacción tiene lugar sobre su superficie, en una zona donde se forman vapores debido al calentamiento de dicha superficie. El calor puede provenir de diferentes fuentes, tales como: el medio ambiente, una ignición o un fuego declarado. La aplicación de este calor causa que los combustibles liberen productos de la combustión o vapores que al entrar en contacto con el aire pueden llegar a arder, si existe una fuente de ignición.

Algunos materiales sólidos pueden sufrir una reacción de carbonización, cuando el oxígeno reacciona directamente con el material. En ocasiones la carbonización termina ardiendo en flamas, pero en otras ocasiones continúa así hasta el final del incidente, es decir la carbonización puede ser la fase inicial o final de la combustión.

Por otra parte, los combustibles gaseosos no necesitan de una vaporización o pirólisis². Solo son necesarias la mezcla del aire con el combustible y una fuente de ignición.

2.3.2 El comburente

Comúnmente el comburente, o agente oxidante, es el oxígeno de la atmósfera de la tierra, pero se pueden producir incendios en ausencia del oxígeno atmosférico cuando los combustibles se

² Se llama *pirólisis* a un tipo de reacción química en la que un compuesto químico o, de manera más común, un material producto de la asociación compleja de compuestos (p/ej. madera, plásticos, etc.) se somete a la acción del calor (y sólo del calor) y por ese efecto resultan productos de descomposición.

mezclan con oxidantes químicos, ya que estas sustancias contienen oxígeno que se libera fácilmente.

En las zonas donde hay abundancia de oxígeno la combustión tiende a acelerarse. Dependiendo del combustible, será su requerimiento de oxígeno y mientras más alta sea la temperatura ambiente la necesidad de oxígeno irá disminuyendo. La combustión con flama se puede producir a concentraciones del 14-16% de oxígeno en el aire, el aire normal contiene 21%, a temperatura ambiente de 21°C (70°F), la combustión con flama, a temperaturas posteriores a la combustión súbita generalizada³, puede continuar aunque la concentración de oxígeno se acerque al 0%. La combustión sin flama, una vez iniciada, puede continuar con poco oxígeno, aunque en los alrededores exista una temperatura relativamente baja.

Hay que observar que ciertos gases pueden formar mezclas inflamables en atmósferas distintas al aire u oxígeno. Por ejemplo, una mezcla de hidrógeno y cloro gaseoso.

Cuando un combustible arde es porque la relación aire/combustible cae dentro de los límites de inflamabilidad (o de explosividad). Los límites de inflamabilidad determinan un intervalo de composición, fuera de cuyos límites, una mezcla no se inflama. Estos valores no son fijos, ya que a parte de la naturaleza química del combustible, hay que analizar otros valores físicos y mecánicos (temperatura, presión, medio, etc.), que también dependerán de la forma de producirse la oxidación. Al formar mezclas inflamables, los combustibles con el aire, existe una mínima concentración de vapor en el aire por debajo de la cual no se propaga la flama, llamado límite inferior de inflamabilidad, así como una concentración máxima, límite superior de inflamabilidad. Generalmente, estos límites se expresan en porcentaje volumétrico de vapor o gas en el aire.

Los aumentos de temperatura y presión reducen los límites inferiores de inflamabilidad probablemente por debajo del 1% y aumentan los límites superiores. Estos límites superiores pueden ser para algunos combustibles de alta temperatura, próximos al 100%. Cuando se presente un descenso en la presión y la temperatura, el efecto generado es el contrario. Estos límites de inflamabilidad se corrigen normalmente a una temperatura de 0°C (32°F) y una presión de 1 atmósfera.

2.3.2.1 Límites de inflamabilidad o explosividad

Para que sea posible la ignición debe de existir una concentración de combustible suficiente en la atmósfera oxidante dada. Una vez que ésta comienza, mantener el estado de combustión exige un suministro continuo de combustible y comburente. Pero no todas las mezclas de combustible comburente son susceptibles de entrar en combustión.

³ En un sentido genérico, el término *flashover* (combustión súbita generalizada) es utilizado por muchos bomberos para describir una gama de sucesos que culmina en una rápida escalada del fuego o aún en una explosión acompañada por una onda de presión que rompe las ventanas y derrumba las paredes. Un fuego confinado que se expande fuera de sus límites iniciales.

Se definen los límites de inflamabilidad a los límites extremos de concentración de un combustible dentro de un medio oxidante a través de la flama, una vez iniciada, continúa propagándose a las presiones y temperaturas especificadas. El límite superior de inflamabilidad (LSI) es la máxima concentración de vapores de combustible en el aire, por encima de la cual no se produce combustión; y el límite inferior de inflamabilidad (LII) es la mínima concentración de vapores de combustible, en mezcla con el aire, por debajo de la cual no se produce la combustión. Por ejemplo, las mezclas de aire e hidrógeno permiten la propagación de la flama entre el 4% y el 64% del volumen de hidrogeno a 21°C (70°F) y la presión atmosférica. La cifra menor corresponde al límite inferior y la mayor al límite superior. Al aumentarse la temperatura de la mezcla, el margen de inflamabilidad se amplia. La disminución de la temperatura puede hacer que una mezcla anteriormente inflamable deje de serlo, al situarse por encima o por debajo de sus límites de inflamabilidad para unas condiciones ambientales fijas.

Obsérvese en la Fig.2.6 que para combustibles líquidos en equilibrio con sus vapores en el aire existe una temperatura mínima para cada combustible, por encima de la cual se comienza a emitir suficiente vapor para formar una mezcla vapor-aire inflamable. También hay una temperatura máxima por encima de la cual la concentración de vapores es demasiado alta para propagar las flamas. Estas temperaturas mínimas y máximas se llaman respectivamente punto mínimo y máximo de inflamabilidad. Las temperaturas del punto de inflamabilidad de un combustible líquido varían, en proporción directa con la presión ambiental.

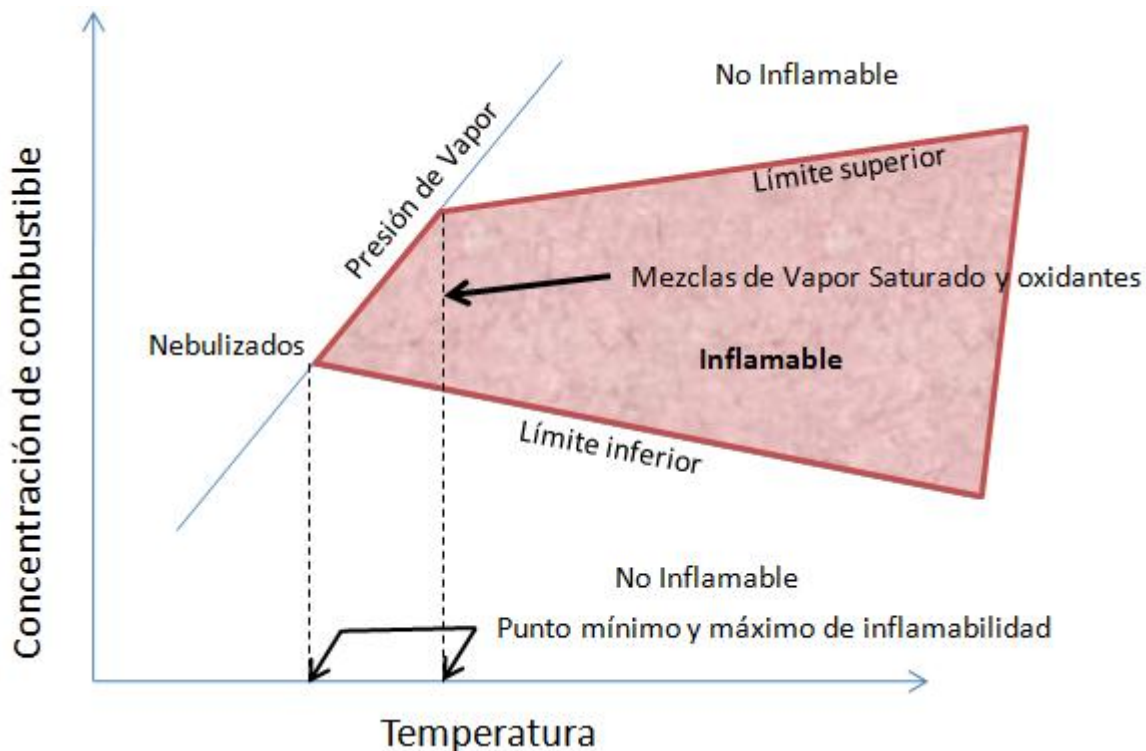


Fig. 2.6 Límites de inflamabilidad

Cada mezcla de aire/combustible tiene una relación óptima, que rara vez se cumple, en la que el punto de combustión es más eficaz. Esta relación óptima se cumple cuando las cantidades de combustible y de aire son tales que después de la combustión ya no queda ni aire ni combustible, este tipo de reacción se denomina estequiométrica.

Comúnmente los incendios se producen con:

- a) Exceso de aire: Cuando hay exceso de aire se considera que el incendio depende del combustible. Lo que genera que en la reacción se consuma todo el combustible.
- b) Exceso de combustible: Es el que se produce con mayor frecuencia, se desarrollan en lugares cerrados o habitaciones amplias, y en este caso el incendio depende de la ventilación. En este tipo de incendios la combustión será incompleta y la velocidad de combustión se limitará por la cantidad de aire que entre al lugar o habitación.

2.3.2.2 El Oxígeno

El oxígeno es el elemento más abundante de la tierra, y también el más importante. La vida animal es posible gracias al oxígeno molecular, el cual mantiene su energía y su existencia. Tal como se conoce la vida, es un proceso de evolución en que intervienen factores muy complejos, siendo un grupo importante el oxígeno, el dióxido de carbono, junto con la energía solar y el agua.

Su importancia química y biológica, puede comprobarse debido a que es el elemento que interviene en más reacciones naturales.

Constituye, aproximadamente, la mitad del peso de la corteza terrestre. Además en el aire se encuentra en un 21% y en el agua en un 88.8%.

El oxígeno es un gas incoloro, inodoro e insípido. En su estructura ordinaria, el oxígeno puro, está formado por moléculas biatómicas. Puede variar de estructura por cortos periodos de tiempo (monoatómica) o bien la que forma el ozono (triatómica) en las capas altas de la atmósfera.

A continuación, se nombrarán algunas de las propiedades del oxígeno:

- Punto de ebullición, -182.9°C
- Punto de fusión, -218.4°C
- Calor de vaporización, 51 cal/g
- Calor de fusión, 3.3 cal/g
- Temperatura crítica, 49.7 atm
- Densidad (-183°C), 1142.9 g/l

En todas las reacciones en las que interviene el oxígeno, éste siempre se presenta diluido en el aire, ya que biológicamente nunca se encuentra en estado puro. Las principales reacciones en las que interviene son:

- Respiración
- Combustión

A pesar de la perfecta combinación con casi todos los elementos, la reactividad del oxígeno es variable según los casos. En el oxígeno puro, generado industrialmente (95-99%), la reactividad es muy superior a la del aire, por ello la combustión en oxígeno puro es muy activa, ya que a mayor contenido de oxígeno, mayor resulta la intensidad de la combustión y más rápido se consume el combustible.

En este tipo de reacciones los factores son los siguientes:

- Elevación del elemento al estado reactivo
- Activación del oxígeno
- Combinación para la formación del óxido

Los dos primeros términos asociados, consumen energía. El tercero, indica el desprendimiento de la misma (proceso exotérmico). En todas las reacciones de oxidación se libera energía calorífica por la capacidad química de reacción del oxígeno con la mayor parte de las sustancias, aun a temperaturas ordinarias.

En todas las reacciones que tienen efecto en el aire, es el oxígeno atmosférico el que combinado con el combustible provoca la combustión en ciertas condiciones.

Aunque paradójico, cabe pensar cómo existen aún cuerpos combustibles sobre la tierra, dada la facilidad de combinación de estas sustancias con el oxígeno. La razón es sencilla: no se ha alcanzado la temperatura necesaria para desarrollar la combustión.

2.3.3 El calor

El calor se mide comúnmente en términos de intensidad o velocidad de calentamiento (BTU/s o KW) o como energía calorífica producida durante un tiempo (BTU o kJ). El calor causa que en un incendio se produzcan vapores combustibles, la ignición y la propagación de la flama al mantener un ciclo continuo de generación de vapores e ignición del combustible.

Es importante distinguir entre calor y temperatura. La temperatura es una medida que expresa el grado de actividad molecular de un material en comparación con un punto de referencia, como el punto de ebullición del agua. El calor es la energía necesaria para mantener o variar la temperatura de un objeto, por ejemplo, cuando se transmite energía calorífica a un objeto su temperatura aumenta, cuando ese objeto transmite calor su temperatura disminuye.

En el fuego, el calor siempre se transmite de una masa a alta temperatura a una con menor temperatura. Mientras mayor sea la diferencia de temperatura mayor será la velocidad de transferencia de calor.

La transmisión de calor se puede llevar a cabo mediante 4 mecanismos, que posteriormente pueden causar un fuego y su expansión, se mencionan a continuación:

1. Conducción
2. Convección
3. Radiación
4. Desplazamiento

2.3.3.1 Conducción

Es la forma de conducción de calor que tiene lugar en los sólidos cuando se calienta una parte de un objeto, la energía calorífica se transmite desde la zona más caliente hacia la que no lo está, la velocidad de la transmisión de calor dependerá de la diferencia de temperaturas, entre la zona con mayor temperatura y la de menor temperatura, y de las propiedades físicas conocidas como inercia térmica del material, estas son:

- Conductividad térmica (k)
- Densidad (ρ)
- Capacidad calorífica o calor específico (c)

La transmisión por conducción se mide en dos puntos, estando la fuente de energía a temperatura constante. A veces la definición de igualdad o desigualdad de temperaturas, se basa en el fenómeno de flujo calorífico; esto es, si el calor pasa de un cuerpo al otro cuando ambos se encuentran en contacto, la temperatura del primer es, por definición, mayor que la del segundo y si no hay paso de calor del uno al otro, sus temperaturas son iguales. En un punto estará la fuente de calor y en el otro punto la temperatura aumentará hasta alcanzar un valor constante inferior al de la fuente, a esto se le conoce como estado estacionario. Cuando se alcanza el estado estacionario, el factor dominante en la transferencia de calor es la conductividad térmica.

La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier. Establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección. Y se representa de la siguiente forma:

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{\delta T}{\delta x}$$

Donde $\frac{dQ_x}{dt}$ es la tasa de flujo de calor que atraviesa el área A en la dirección x. T es la temperatura, t es el tiempo y k (o λ) es una constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica.

El impacto de la inercia térmica sobre el aumento de la temperatura en un espacio o en los materiales que en el mismo, no es constante a lo largo de la duración de un incendio, por lo tanto, la inercia térmica de un material es más importante en las fases de iniciación y subsiguientes de un incendio (previas a la combustión súbita generalizada).

La conducción también es un mecanismo de propagación de fuego, ya que el calor que se conduce a través de una viga de metal, pared o a lo largo de una tubería puede causar la ignición de los combustibles que estén en contacto con estos materiales.

2.3.3.2 Convección

En este tipo de transmisión, el calor se transfiere a través del movimiento de los líquidos o los gases a través de su entorno, de la fuente de calor a la parte más fría del entorno.

El calor se puede transmitir por convección a un sólido cuando pasan gases calientes sobre superficies más frías y la velocidad con que se transmita este calor va a depender del área de contacto del sólido con el gas, la temperatura del sólido y la velocidad que lleve el gas. A mayor velocidad de los gases, mayor transmisión por convección.

La convección juega un papel muy importante en las primeras fases de un incendio, haciendo que la temperatura aumente en la habitación de origen y a través del edificio. Conforme la temperatura de la habitación va aumentando y se acerca la combustión súbita generalizada, la convección desempeña un papel menos importante y la radiación es el tipo de transferencia de calor que domina.

La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf})$$

Donde h es el coeficiente de convección (o coeficiente de película), A_s es el área del cuerpo en contacto con el fluido, T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo y T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

2.3.3.3 Radiación

La energía calorífica se transmite a través de ondas electromagnéticas de una superficie caliente a otra más fría, sin necesidad de que haya un medio entre ambas superficies. La energía radiante se puede transmitir solo en línea recta y se reduce si hay un medio entre ambas superficies, aunque estos materiales no obstaculizan totalmente el flujo de la transmisión de calor radiante, por ejemplo algunos cristales llegan a reducir el flujo calorífico por radiación en el orden del 50%.

Además, la radiación emitida no es monocromática, sino una mezcla de distintas longitudes de onda, de modo que cuanto más caliente es el emisor, más corto es el promedio de longitudes de onda emitidas.

La velocidad de transmisión del calor radiante depende, en gran medida, de la cuarta potencia de la diferencia de temperatura absoluta entre el radiador y el objeto frío. A grandes temperaturas, un pequeño aumento de la diferencia de temperatura produce un gran aumento en la transmisión de calor radiante. Si se duplica la temperatura absoluta del objeto más caliente, sin que se haya una variación en la del más frío, esto produce un aumento de la radiación entre ambos objetos de hasta 16 veces.

La energía radiante es predominante cuando la altura de la flama es mayor a 20 cm (por debajo de esta altura domina la convección).

Existen varias teorías para explicar la transmisión de energía por radiación. Una de ellas sostiene que el cuerpo emite "paquetes" o "cuantos" de energía y sirve para explicar el efecto fotoeléctrico, la radiación térmica, etc. Otra afirma que la radiación puede representarse por un movimiento electromagnético ondulatorio; con esta base explica los fenómenos de interferencia y polarización de la luz, etc. En la actualidad se acepta una teoría híbrida en la que se asignan a la vez, a la energía radiante, las características del movimiento ondulatorio y de la emisión discontinua.

Ley de Stefan-Boltzmann

En 1879, Josef Stefan (1835-1893) propuso la dependencia de la potencia de radiación o ritmo de emisión de energía electromagnética con la temperatura elevada a la cuarta potencia a partir del análisis de los datos experimentales. Cinco años más tarde Ludwig Boltzmann obtuvo la ley teóricamente partiendo de valores experimentales. Sugirió que la emisividad de una superficie, W , es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Más tarde, Boltzmann aplicó los conceptos del ciclo de Carnot, considerando la energía radiante como medio operatorio, y obtuvo la misma relación por vía analítica.

Como el cuerpo negro perfecto, ya definido, tiene un comportamiento único y característico, es conveniente emplearlo como base para representar la proporcionalidad indicada en las observaciones de Stefan-Boltzmann.

Ley de Stefan-Boltzmann para la radiación del cuerpo negro⁴ es:

$$W = e\sigma AT^4$$

Donde e es la emisividad⁵ del cuerpo, siempre será $0 \leq e \leq 1$, cuando $e = 1$, estamos en el caso del cuerpo negro, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/mK]$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

⁴ Cuerpo que a determinada temperatura absorbe o emite la mayor cantidad de energía, también se le denomina superficie negra.

⁵ La emisividad es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a una diferencia de temperatura determinada

La radiación que emitiría un cuerpo negro puede aproximarse con la precisión deseada por la radiación emitida a través de un agujero pequeño practicado en una cavidad (que está a una temperatura inferior a la temperatura de fusión del material que forma las paredes de la cavidad).

En cada una de las reflexiones en su interior se absorbe una parte de la luz, y después de las múltiples reflexiones, toda la energía que penetró por el orificio ha sido virtualmente absorbida, de esta forma, el orificio de la cavidad se comporta como un cuerpo negro ideal (Fig. 2.7).

Por tanto, la luz que sale por el agujero de la cavidad es una radiación de cuerpo negro.

La emisividad y la potencia irradiada por un cuerpo negro, o por el agujero de la cavidad, son independientes del material que forma sus paredes interiores.



Fig.2.7 Absorción de la luz después de cada reflexión

La potencia dada por la ley de Stefan Boltzmann Ecuación incluye todas las frecuencias. Veremos cómo se distribuye la radiación emitida por un cuerpo negro en función de la frecuencia. Esta dependencia resulta universal, esto es, igual para todos los cuerpos negros.

Esta característica de la interacción de la luz con la materia constituía uno de los problemas irresolubles mediante la física clásica y su solución ayudó al desarrollo de la teoría cuántica.

Ley de Wien

La ley del desplazamiento de Wien afirma que el máximo de la intensidad de la radiación térmica emitida por un cuerpo negro ideal se desplaza, con el aumento de la temperatura, hacia la región de longitudes de onda más corta. La ley de Wien dice: " El producto de la temperatura absoluta de un cuerpo negro por la longitud de onda para la cual la radiación emitida es máxima, es igual a una constante". Tenemos:

$$\lambda_{max}T = 2.898 \times 10^{-3} [m^{\circ}K]$$

La ley de Wien se utiliza para determinar las temperaturas de las estrellas, a partir de los análisis de su radiación. Se usa también en la termografía, que muestra variaciones de temperaturas en diferentes regiones de la superficie de un objeto, permitiendo detectar, por ejemplo, cáncer, ya que los tejidos cancerosos tienen una temperatura levemente mayor a los sanos de su alrededor.

Ley de la radiación de Planck

En 1900 Max Planck (1858-1947) presentó una fórmula que describía la distribución en frecuencias de la radiación de un cuerpo negro. Para conseguir las bases físicas de su fórmula, Planck hizo algunas propuestas que en su momento fueron calificadas de infundadas y extremadamente radicales. Estas propuestas pueden resumirse en los siguientes puntos:

1. Un oscilador (incluido un modo de vibración estacionario) de frecuencia ν , sólo puede cambiar su energía en múltiplos de una cantidad discreta denominada cuanto de energía, $\Delta E = h\nu$ donde h es la constante de Planck.
2. La energía de un oscilador está cuantizada, esto es, su energía está restringida a uno de los valores $E_n = n * h\nu$ donde el número cuántico n es un entero.

Planck fue capaz de demostrar que aceptando los principios anteriores de cuantización, la energía promedio por oscilador de un conjunto de osciladores de frecuencia ν a la temperatura T está dada por:

$$[E] = \frac{h\nu}{e^{K/T} - 1}$$

La constante h que relaciona la energía y la frecuencia, constante de Planck, está considerada como una constante fundamental de igual forma que lo son la velocidad de la luz, c o la carga del electrón, e . El valor más reciente de la constante de Planck es:

$$h = 6.626076 * 10^{-34} [J * seg]$$

Usando la ecuación anterior para la energía promedio de un modo de vibración estacionario de la cavidad e incorporando el número de modos de vibración por unidad de volumen anterior, obtenemos la ley de la radiación de Planck para el espectro de radiaciones de un cuerpo negro:

$$R_\nu = \frac{2\pi k \nu^3}{c^2 \left(e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1 \right)}$$

Esta expresión explica todas las características de la radiación de un cuerpo negro, incluyendo la ley de Stefan-Boltzmann.

Lo radical en la hipótesis de Planck es que la energía de un oscilador está cuantizada, y que la energía sólo puede poseer valores discretos y no un valor intermedio. Para un oscilador mecánico o eléctrico clásico, la energía es una variable continua. Es decir, si la energía está cuantizada, la amplitud sólo podría tener valores discretos. Nadie había observado esta cuantificación de la amplitud de un oscilador. La energía y la amplitud de los osciladores de tamaño ordinario parecen comportarse como una variable continua. Esto es debido a que los valores cuantizados son muy próximos unos a otros debido al valor tan pequeño de la constante de Planck.

2.3.3.4 Desplazamiento

Propagación por desplazamiento de materias inflamadas, que según el medio llegan a alcanzar importantes distancias. Se considera desplazamiento, como un movimiento virtual, en el cual un sistema material, pasa de una posición a dada a otra, en distancias que dependen del impulso inicial. Tal desplazamiento debe ser compatible con los vínculos existentes en un instante considerado y no con los efectivos que pueden variar con el tiempo.

Una mezcla explosiva, se propaga siempre más allá del foco inicial de combustión, por desplazamiento.

2.3.4 Mecanismo de reacción

La combustión es un conjunto complejo de reacciones químicas que causan la oxidación rápida de un combustible produciendo luz, calor y diversos subproductos químicos. Una oxidación lenta, como la de algunos metales o el color amarillento que toma el papel, genera tan poco calor que no se puede llevar a cabo la combustión. Una reacción de combustión auto-mantenida se produce cuando el calor procedente de la reacción exotérmica es radiado de nuevo hacia el combustible, esto causa la producción de vapores por parte del combustible y la ignición en ausencia de la fuente que la originó.

La combustión de los sólidos se puede producir mediante dos mecanismos:

1. La flama: Tiene lugar en la fase gaseosa o de vapor de un combustible. En los combustibles sólidos y líquidos, esta fase se genera por encima de la superficie del combustible.
2. Brasas (o sin flama): Es un fenómeno de combustión superficial con combustibles sólidos, que produce una menor liberación de calor y no produce una flama visible. Los incendios por brasas comúnmente llegan a sufrir una transición a combustión con flama, al aparecer una corriente de aire que acelere la combustión o al producirse una energía total suficiente para que aparezca la flama.

2.4 Ignición

Comúnmente para que un material llegue a arder, este material debe de encontrarse en estado gaseoso o de vapor, muy pocos son los materiales que pueden arder directamente con flama en estado sólido, como el carbono y el magnesio. Esos gases o vapores deben de formar una mezcla inflamable con el aire. Los líquidos con punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente no requieren calor adicional para producir una mezcla inflamable. Los vapores combustibles producidos deben de elevarse hasta su temperatura de ignición. El tiempo y la energía necesarios para que se produzca una ignición son función de la inercia térmica del combustible, la fuente de

ignición, la geometría y de la energía de ignición mínima para ese combustible. Para que un combustible alcance su temperatura de ignición, la velocidad de transmisión de calor hasta el mismo, debe ser superior a la conducción de calor en o a través del combustible y a las pérdidas por radiación y convección.

Un foco puede provocar la ignición si la magnitud e intensidad de su energía es suficiente para aumentar la temperatura en una zona de la masa del combustible por encima de su punto de autoignición.

Las diferentes formas de aporte energético a la mezcla se pueden agrupar en:

- Flama. Masa gaseosa en combustión, que se eleva desde los cuerpos que arden. Estos focos son los más peligrosos, pues provocan prácticamente el inicio (y favorecen el desarrollo) del incendio.
- Chispa. Partícula encendida de pequeña dimensión, que pueden surgir en un cuerpo en combustión o de una zona que haya alcanzado alta temperatura por causas mecánicas, eléctricas o propiamente térmicas. En la mayoría de los sólidos compactos una chispa no es suficiente para superar la temperatura de autoignición del combustible para lograr la propagación de la ignición.
- Superficie caliente. A diferencia de las chispas, este tipo de superficie no suele tener una temperatura excesivamente alta, pero, por otra parte están dotadas de mayor energía.

Según su origen las fuentes de ignición se pueden clasificar en:

- Fuentes naturales: rayos, sol.
- Fuentes eléctricas: chispas y arcos, cortocircuitos, cargas estáticas, sobrecargas, recalentamientos (exceso de aislamiento térmico).
- Flamas abiertas comunes: velas, hornos, quemadores, etc.
- Trabajos de soldadura y corte: flamas, conducción de calor, chipas, electrodos.
- Fuentes mecánicas: chispas, rozamientos mecánicos, impactos.
- Fuentes químicas: reacciones exotérmicas no biogénicas⁶, fermentaciones y descomposiciones naturales, diluciones.
- Material de fumadores: encendedores, fósforos, cigarrillos, pipas.

2.4.1 Ignición de los combustibles sólidos

Para que un combustible sólido arda con flama, se debe de suministrar energía al sólido para que se comiencen a generar los vapores. Estas sustancias sólidas susceptibles a arder con flama deben

⁶ Es una sustancia producida a partir de procesos de la vida. Pueden ser componentes, o secreciones, de plantas o animales.

de estar fundidas y vaporizadas (como los termoplásticos⁷) o pirolizada en gases o vapores (como la madera o los plásticos termoendurecidos).

Cuando se tiene un material de alta densidad sujeto a una ignición este conduce la energía más rápidamente desde la zona de la fuente de ignición que un material de baja densidad, que actúan como aislantes y mantienen la energía en su superficie.

La relación dada por superficie/peso de un cuerpo también afecta la cantidad de energía necesaria para que se realice la ignición. Las esquinas de los materiales combustibles arden más fácil que las superficies planas debido a la mayor relación superficie/peso.

2.4.2 Ignición de los combustibles líquidos

El líquido se debe de encontrar por encima de su punto de inflamación para que sus vapores puedan formar una mezcla combustible. El punto de inflamación es la menor temperatura a la cual el líquido genera los vapores suficientes para producir una flama sobre su superficie. A pesar de que un líquido pueda encontrarse por debajo de su punto de inflamación, una fuente de ignición puede generar una zona caliente en la superficie del líquido y generar la ignición.

2.4.3 Ignición de los gases

Las sustancias combustibles en fase gaseosa, tienen un peso muy bajo por lo que requieren una cantidad mínima de energía para su ignición.

2.4.4 Autocalentamiento y autoignición

El autocalentamiento es el proceso por el cual un material aumenta su temperatura sin necesidad de que este absorba el calor de sus alrededores. Si en el autocalentamiento el material alcanza la temperatura de ignición, entonces este presentará una autoignición.

Generalmente estas reacciones, autocalentamiento y autoignición, se dan en materias orgánicas, tales como las grasas sólidas y los aceites animales y vegetales. Estas reacciones no se pueden producir en sustancias tales como los aceites de motor o los lubricantes. Algunas materias inorgánicas, como ciertos polvos metálicos, pueden presentar autocalentamiento y autoignición a determinadas condiciones.

Los factores que influyen en la producción del autocalentamiento y de la autoignición son:

⁷ Un *termoplástico* es un plástico que, a temperatura ambiente, es plástico o deformable, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado vítreo cuando se enfría lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de débiles fuerzas Van der Waals (polietileno); fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados (poliestireno)

- ✚ *Oxidaciones bacterianas*: la oxidación bacteriana es la causa frecuente de la oxidación de las cosechas agrícolas, por ser el calor uno de sus efectos. Puesto que la mayor parte de las bacterias no sobrevive a temperaturas mayores a los 70 u 80°C, se cree que la continuación del calentamiento en estos productos se debe a una oxidación rápida iniciada a continuación, debido al precalentamiento generado por la oxidación bacteriana.
- ✚ *Exceso de humedad en el medio*: el contenido de humedad de los productos agrícolas tiene una definitiva influencia en el riesgo de autoignición. La experiencia indica que tal calentamiento puede originar una combustión espontánea tras un largo periodo de almacenamiento del producto, incluso después de dos y hasta 6 semanas.
- ✚ *Ventilación*: Es un arma de doble filo, ya que por un lado favorece la oxidación (aportando aire) y esto a su vez puede motivar el inicio de una autoignición y acelerar su desarrollo; pero por el otro, la ventilación ayuda a evitar la concentración del calor que se genera por la oxidación y el autocalentamiento. Sin embargo, no es posible alcanzar una gran ventilación para toda la masa del combustible disgregado, salvo que el combustible se encuentre en movimiento (esto sucede comúnmente en los procesos industriales), esto nos dice, que es más común que la ventilación favorezca la autoignición, particularmente en almacenamientos.

Los efectos aislantes de los materiales que hay alrededor. Este efecto tiene que ver con los efectos de ventilación, ya que los aislantes hacen que el calor se conserve y no se transmita tan rápidamente al entorno inmediato, lo que no llegaría a suceder si se cuenta con una ventilación excesiva.

2.5 Clasificación de los fuegos

Los fuegos se pueden clasificar utilizando los siguientes criterios;

- a. Tipo de combustible
- b. Tipo de radiación luminosa producida (presencia o no de flamas)

2.5.1 Por tipo de combustible

El fuego está dividido en 5 clases que se basan principalmente en el combustible que vaya a arder. Esta clasificación nos permite evaluar los peligros y encontrar el agente extintor más efectivo. También se utiliza para clasificar, categorizar y hacer pruebas a los agentes extinguidores. A continuación se muestran las figuras utilizadas para cada tipo de fuego (Fig. 2.8). Y su clasificación es la siguiente:



Fig.2.8 Simbología

- *Clase A.* Esta clase de fuego está referido a los combustibles ordinarios como son: madera, papel y ropa. Los fuegos clase A comúnmente son lentos en su fase inicial para desarrollarse y expandirse, debido a que estos materiales son sólidos y fáciles de contener. Los fuegos clase A dejan residuos después de que se consumen.
- *Clase B.* Este tipo de fuego incluye líquidos y gases combustibles e inflamables como la gasolina, keroseno y propano. Estos fuegos se desarrollan y se expanden rápidamente. Los materiales de la clase B son fluidos por naturaleza, esto permite que el fuego fluya y se mueva. Esto hace que acabar con esta clase de fuego sea un poco más complicado que con los fuegos de clase A. Esta clase de fuego comúnmente no deja residuos.
- *Clase C.* Incluye equipo eléctrico conectado a la corriente como motores, electrodomésticos y maquinaria. Esta es la única clasificación de las 5 que no está directamente relacionada con el tipo de combustible. Los materiales combustibles pueden caer dentro de las otras 4 clasificaciones. Si la corriente eléctrica se desconecta el fuego deja de considerarse como clase C. Que los aparatos estén encendidos hace que el fuego se considere de clase C, hasta que se apaguen los aparatos.
- *Clase D.* Involucra metales combustibles como son magnesio, titanio y circonio. Estos materiales comúnmente tienen dificultades para llevar a cabo su ignición, pero cuando la logran generan fuegos intensos. Los fuegos de clase D, son de los fuegos más difíciles de apagar, afortunadamente son poco comunes en la mayoría de las industrias.
- *Clase K.* Son fuegos de grasas y aceites de cocinar como mantecas vegetales y minerales. Esta es la más nueva clasificación de fuego.

2.5.2 Por la existencia de la flama

Como ya se había mencionado anteriormente, el proceso de la combustión puede tener lugar en dos formas diferentes: con flama y superficial sin flama. Las dos modalidades no se excluyen, sino que pueden tener lugar conjuntamente.

Los requisitos para la existencia de esas formas de combustión se representan en la Fig. 2.9. Como apreciamos en la figura, la combustión con flama se asocia con velocidades de combustión relativamente altas, expresadas en términos de liberaciones de energía térmica a partir de la energía química existente en los enlaces entre los átomos, que, junto con la relación peso-tiempo y el calor específico de los productos gaseosos de la combustión del cuerpo emisor determinan la temperatura de la flama.

Los líquidos y los gases inflamables arden siempre con flama. La velocidad de combustión de los gases es muy rápida, por lo que en muchos casos puede producirse una explosión.

Existen casos donde coexisten ambos tipos de combustión, estos son: combustibles carbonosos sólidos, tales como el carbón, azúcar, celulosa y plásticos termoendurecidos que no funden.

Algunos ejemplos de combustión sin flama son la del carbón puro y la de algunos metales fácilmente oxidables.

En la combustión incandescente o sin flama no se producen reacciones en cadena, por lo que estas combustiones pueden representarse por medio del clásico triángulo del fuego.

2.6 Mecanismos de Extinción

El triángulo o el tetraedro de fuego, que con frecuencia se muestra en los libros para representar los elementos básicos del fuego, es una forma intuitiva del fuego y sus mecanismos de extinción. Bastará con eliminar alguna cara del tetraedro para romper el equilibrio y terminan el fuego.

Según la cara que hayamos decidido eliminar, existirán diferentes mecanismos de extinción:

- Actuar sobre el combustible:

Retirada del aporte. Debido a que el fuego es una combustión de aportación, una de las formas de eliminarlo es precisamente la retirada del aporte del combustible. Ejemplos muy comunes de este mecanismo son el corte del suministro de líquido o gas combustible cerrando una válvula de alimentación o la retirada del combustible por un trasiego, del combustible aun no afectado por el fuego, y así detener su combustión.

Dilución. La cantidad de combustible disminuye con el fin de impedir que se aporte en cantidad suficiente para mantener la combustión. Se puede considerar una derivación imperfecta del mecanismo de retirada del aporte.

El nombre de este mecanismo está dado por la forma de extinción que le corresponde aplicando agentes extintores como el agua, para diluir combustibles líquidos de tipo polar.

- Actuar sobre el contacto combustible-comburente:

Sofocación. Se lleva a cabo interponiendo una barrera física entre el combustible, o los vapores desprendidos por este durante su combustión, y el comburente, evitando el contacto entre ambos. Este mecanismo no es efectivo en aquellas combustiones en que se libera oxígeno.

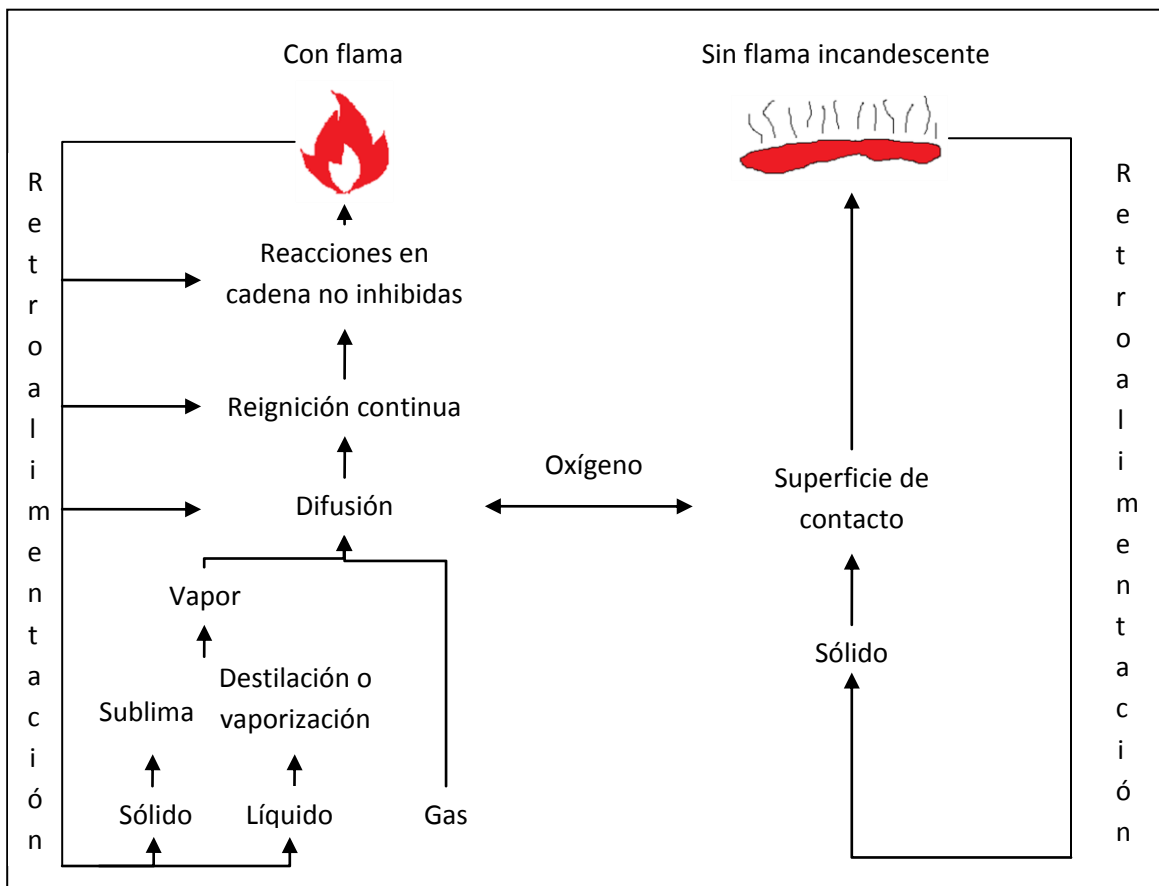


Fig. 2.9 Modalidades de combustión

- Actuar sobre el comburente:

Inertizar. Se disminuye la concentración o cantidad del comburente, o en dado caso se elimina totalmente. Este mecanismo tampoco resulta muy efectivo en aquellas combustiones donde se desprende oxígeno.

La sofocación y la inertización se utilizan con frecuencia para denominar mecanismos de extinción coincidentes. De hecho, casi nunca se consigue la separación total entre el combustible y el comburente, sino que se genera una zona intermedia en la que el comburente se encuentra diluido o se va consumiendo sin renovación (efecto de capa producido por una manta cortafuego o por la proyección de espuma). Aunque es de uso común denominar a la inertización como la acción preventiva consistente en la dilución del comburente previa a la generación del fuego, se considera como inertizar al mecanismo de extinción que genera una zona del comburente diluido, y sofocar al que genera una zona sin renovación de comburente.

- **Enfriamiento:** Se extingue el fuego enfriando el combustible, las moléculas del agente extintor absorben la energía que lleva al aumento de la temperatura y/o la vaporización, dicha sustancia impide que se llegue a alcanzar la energía de activación de la reacción entre combustible-comburente o elimina la formación de los vapores combustibles.
- **Inhibición.** Un fuego se extingue por este método desactivando químicamente (enlace químico) los radicales libres⁸ intermedios y por desactivación física interponiendo moléculas del agente entre las especies reactivas. Ambos efectos producen discontinuidad en la reacción química.

2.6.1 Agentes Extintores

Para llevar a cabo la extinción de un incendio se debe aplicar la cantidad necesaria del agente adecuado al tipo de fuego. Aquí abordaremos un pequeño estudio y descripción de los agentes extintores utilizados comúnmente, aplicaciones y recomendaciones de uso.

Se ha de entender como efectividad de los agentes extintores frente a fuegos de diversas clases a la capacidad de un agente extintor para extinguir fuegos de una clase determinada, bajo ciertas condiciones.

2.6.1.1 Agentes extintores hídricos

Agua

Es el extintor más conocido y empleado como tal desde tiempos remotos.

- a) **Propiedades generales⁹.** A continuación se presentan las propiedades que favorecen la acción extintora del agua:
 - Es un líquido relativamente estable en un amplio rango de temperaturas

⁸ Los radicales libres son átomos o grupos de átomos que tienen un electrón (e-) desapareado en capacidad de aparearse, por lo que son muy reactivos.

⁹ Los valores están referidos a condiciones normales, presión atmosférica y temperatura ambiente.

- Su calor específico es alto, 1 cal/g (4.18 kJ/kg). Esto significa que por cada kilogramo, cuando el agua eleva su temperatura disipa 4.18 kJ.
- Su calor de vaporización también es elevado 539 cal/g (2.253 kJ/kg).
- Cuando el agua se vaporiza, su volumen aumenta 1600 veces y el vapor producido desplaza al aire que rodea al fuego y, por lo tanto, al oxígeno disponible para la combustión.
- Su densidad relativamente alta (1kg/L) hace posible su proyección a largas distancias.
- Su elevada tensión superficial (73 mN/m) favorece su dispersión en pequeñas gotas y nieblas, aumentando la eficacia específica de la extinción.
- La viscosidad en estado líquido varía relativamente poco (aprox. de 1800 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ a 300 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ entre 0 y 100°C), lo que permite el transporte a través de tuberías, mangueras y boquillas bajo muy diversas condiciones.

Por otro lado, el agua es más densa que la mayoría de combustibles líquidos, lo que le hace perder efectividad en la extinción de éstos.

- b) Propiedades extintoras. Los efectos del agua para la extinción del fuego son los siguientes:
- Enfriamiento: producido por la cantidad de calor que absorbe para vaporizarse o aumentar su temperatura. La transferencia de calor aumenta al incrementar la superficie de intercambio, por lo cual la pulverización favorece la capacidad de enfriamiento.
 - Inertizar: cuando se vaporiza el agua se genera una atmósfera que reduce la cantidad de oxígeno en las proximidades del combustible.
 - Dilución: para extinguir los fuegos de algunos productos inflamables hidrosolubles¹⁰ (alcoholes, cetonas).
 - Sofocar: cuando se presentan fuegos de líquidos insolubles en agua y mucho más densos que ésta, con superficie horizontal de combustión y confinados, puede aplicarse suavemente sobre la superficie del líquido para crear una película o capa que sobrenade y evite el contacto combustible-comburente.
- c) Aplicaciones del agua. Como agente extintor líquido presenta distintas aplicaciones según su forma de proyección:
- Agua a chorro: Se usa principalmente en proyecciones de larga distancia sobre fuego de clase A. Tiene mucho alcance y actúa enfriando el foco o las superficies expuestas a la radiación térmica que se produce en un incendio.
 - Agua pulverizada: Tiene forma de multitud de pequeñas gotas y su alcance es poco, pero realiza un enfriamiento muy rápido. Se usa en la extinción de fuegos de combustibles sólidos y controlar fuegos A y B.
 - Agua nebulizada.

¹⁰ La hidrosolubilidad de una sustancia es la concentración de la saturación de masa de la sustancia en el agua a temperatura determinada. Se expresa en unidades de masa por volumen de solución. La unidad SI es el Kg/m³ (se puede utilizar también g/l).

Oliver W. Johnson, en su libro "Water on Oil Fires", resume el empleo del agua contra los incendios de productos petrolíferos de la siguiente manera:

1. Como agente enfriador, el agua puede usarse para:
 - a. Cortar la emisión de vapores de la superficie del líquido, extinguiéndose de este modo el fuego.
 - b. Proteger a los bomberos del calor radiante y de las flamas cuando deban cerrar válvulas o hacer otro trabajo que exija su aproximación al fuego.
 - c. Protección de las superficies expuestas al ataque de las flamas; es de la máxima eficacia cuando la superficie se encuentra a una temperatura superior a 212°F (100°C).
2. Como medio mecánico el agua puede obrar a distancia de la siguiente manera:
 - a. Controlar las fugas.
 - b. Dirigir la corriente del producto petrolífero que se escapa para que no se acerque al fuego e impedir su ignición o empujar el fuego hacia una parte donde produzca menos daños.
3. Como medio desplazante, el agua sirve para:
 - a. Hacer flotar el petróleo por encima del punto donde se produce la fuga de un depósito, tanto antes como durante el incendio.
 - b. Controlar el escape de combustible de una tubería, bombeándolo hacia un punto, aguas abajo de donde se produce la fuga.

Espuma

Las espumas contra incendio consisten en una masa de burbujas rellenas de gas que se forman a partir de soluciones acuosas de agentes espumantes de distintas fórmulas. Puesto que la espuma es más ligera que la solución acuosa de la que se forma y más ligera que los líquidos inflamables o combustibles, flota sobre estos, produciendo una capa continua de material acuoso que desplaza el aire, enfría e impide el escape de vapor con la finalidad de detener o prevenir la combustión.

Las espumas pueden fabricarse de diferentes maneras según su acción extintora. Algunas son espesas y viscosas, otras son más delgadas pero se extienden más rápidamente, otras forman una película que impide el paso del vapor por medio de una solución acuosa y otras sirven para producir grandes volúmenes de celdillas de gas húmedo para inundar superficies u ocupar espacio totalmente.

En general, la espuma es especialmente útil cuando se necesita un agente extintor o controlador muy ligero, compacto, sofocante y enfriador.

Tabla 2.3
APLICACIÓN DE LOS AGENTES EXTINTORES

	Usos		
	<i>No recomendado / No Utilizar</i>	<i>Control</i>	<i>Extinción</i>
Fuegos Clase A			Polvo ABC Agua Espuma Agentes químicos limpios CO ₂ ² Polvos ABC y BC Espuma ⁵
Fuegos Clase B	Agua a chorro ³	Agua pulverizada	Agentes químicos limpios Gases inertes y CO ₂ Polvos ABC y BC
Fuegos clase C			Agentes químicos limpios Gases inertes y CO ₂
Fuegos clase D	agua espuma CO ₂	⁴	Polvos especiales
Fuegos clase K			PRX ⁹

¹ Adecuado al metal que se considere.

² Fuegos superficiales Exclusivamente.

³ Puede producir la extensión y/o derrame del combustible. Sólo es aceptables si se consigue una rápida emulsificación o dilución, o en el caso de combustibles líquidos más densos que el agua e inmiscibles en ésta.

⁴ Pueden utilizarse agentes "ocasionales", tales como la arena, siempre que estén secos.

⁵ Adecuada al combustible que se considere.

⁶ Enfriamiento del recipiente del fuego y/o de las superficies afectadas.

⁷ En presencia de tensión eléctrica, se recomienda no utilizar agua ni espuma, especialmente en medios manuales.

⁸ La información contenida en esta tabla está referida a las condiciones de aplicaciones más habituales. Ciertas aplicaciones particulares no se hallan recogidas.

⁹ Su color es rojo, tiene una duración de almacenaje de 12 años, con Pto. Congelamiento -12°C y Pto. De ebullición 102°C, Viscosidad cinética 5.26 centistokes, Gravedad específica 1.19, pH 9.5 - 10.5. Este agente extintor forma parte de los sistemas fijos de extinción de fuegos de clase K

Tipos y características de las espumas contra incendios

Agentes espumantes proteínicos

Las espumas físicas de tipo proteínico consisten en concentrados de líquidos acuosos y agua en las proporciones adecuadas. Estos concentrados contienen polímeros proteínicos naturales de alto peso molecular derivados de la transformación e hidrólisis química de proteínas sólidas naturales. Los polímeros confieren a las espumas que se generan con ellos, elasticidad, resistencia mecánica y capacidad de retención del agua.

En general, estos concentrados producen espumas densas y viscosas de alta estabilidad, elevada resistencia al calor, así como mejor resistencia a su propia combustión, que la mayor parte de los agentes espumantes. No son tóxicas y son biodegradables después de diluirse. Las temperaturas ambiente de uso de estos concentrados son entre $-6,7^{\circ}\text{C}$ y $48,9^{\circ}\text{C}$ (20 y 120°F).

Agentes espumantes fluoroproteínicos

Los concentrados empleados para la generación de espumas de fluoroproteínas son de composición similar a los de proteína, pero, además de los polímeros proteínicos, contienen en la superficie agentes fluorados activos que les confieren la propiedad de no adherirse al combustible. Las espumas fluoroproteínicas alcanzan su máxima eficacia en la lucha contra fuegos de líquidos derivados del petróleo o de hidrocarburos en depósitos de gran profundidad, debido a esta propiedad de falta de adherencia a líquidos combustibles. No son tóxicas y son biodegradables después de diluirse. Las temperaturas ambiente de uso de estos concentrados son entre $-6,7^{\circ}\text{C}$ y $48,9^{\circ}\text{C}$ (20 y 120°F).

Agentes espumantes de baja temperatura

Son similares a los agentes proteínicos, con la excepción de que están protegidos para su almacenamiento a bajas temperaturas por la inclusión a la mezcla de un reductor del punto de congelación no inflamable. Pueden emplearse hasta temperaturas de $-28,7^{\circ}\text{C}$.

Agentes espumantes formadores de películas acuosas (AFFF)

Los agentes espumantes formadores de películas se componen de materiales sintéticos que forman espumas de aire similares a las producidas por materiales a base de proteínas. Además, son capaces de formar películas de solución acuosa sobre la superficie de los líquidos inflamables.

Las espumas de aire (físicas) generadas por soluciones AFFF poseen baja viscosidad, rápida extensión y nivelación y actúan como barreras superficiales para impedir el contacto del combustible con el aire y detener su vaporización, enfriando al igual que lo hacen otras espumas.

El resultado de la doble acción de los agentes espumantes formadores de película es la producción de una espuma de alto poder de extinción, en términos de la cantidad de agua y de concentrado necesarios y de la rapidez con que actúan contra las fugas de combustible.

Debido a la tensión superficial extremadamente baja de las soluciones que se obtienen con AFFF, estas espumas pueden ser útiles para fuegos de clase mixta (clase A y clase B) en los que se necesita la profunda penetración del agua además de la acción de protección superficial de la espuma.

También pueden emplearse en combinación con polvo químico sin que se presenten problemas de incompatibilidad. Aunque los concentrados de AFFF no deben mezclarse con otros tipos de concentrados de espuma, las espumas que producen no atacan a las espumas de otros tipos durante las operaciones de lucha contra el fuego.

Agentes espumantes tensoactivos de hidrocarburos sintéticos

Existen muchos compuestos tensoactivos producidos sintéticamente que forman espumas abundantes en solución acuosa.

Sus características extintoras depende del volumen de la capa espumosa sobre la superficie ardiente, que es lo que detiene el paso del aire e inhibe la producción de vapores combustibles, y el menor efecto enfriador del agua que forma parte de la espuma y que entra en acción debido a la rápida disolución de la masa de espuma.

Este tipo de espumas son generalmente menos estables que otros tipos de espumas contra incendios. Generalmente, deben de aplicarse a mayor velocidad que otras espumas para lograr con ellas la extinción. Muchas fórmulas de este tipo de concentrado espumante disuelven a otras espumas si se emplean simultáneamente o a continuación.

Espumas de resistentes al alcohol

Las espumas que generan los agentes ordinarios están expuestas a la disolución rápida y pérdida de efectividad cuando se emplean en fuegos de líquidos combustibles hidrosolubles, hidromiscibles o de tipo de disolvente polar.

Por lo tanto se han creado ciertos agentes espumantes especiales, llamados concentrados tipo alcohol. Las soluciones de este tipo no pueden bombearse a grandes distancias porque sus tiempos de recorrido antes de que se produzca la espuma son cortos.

Los agentes espumantes resistentes al alcohol se dividen en 3 categorías generales:

1. Concentrados a base de proteína que contienen pasta de metales pesados hechos solubles gracias a soluciones disolventes o amoniacales. Requieren una aplicación suave sobre la superficie en ignición y tienen limitaciones respecto al plazo de recorrido.
2. Consisten en dos componentes concentrados. Uno a base de un polímero y otro a base de un catalizador, que vuelve a polimerizarle para conferir a la espuma así formada estabilidad frente a disolventes. Puede emplearse con aparatos que no requieren necesariamente la aplicación de la espuma con suavidad y no tiene limitaciones con respecto al plazo de tiempo
3. Concentrados de base sintética en un sistema de componente único, que producen espumas para aplicación sobre líquidos inflamables ordinarios o sobre disolventes de tipo polar por medio de cualquier aparato generador de espuma. Los agentes de este tipo no tienen limitaciones de plazo de recorrido.

Las temperaturas de uso normal para cualquiera de los agentes de tipo alcohol son de 2°C a 49°C (35 a 120°F)

Agentes espumantes de alta expansión

Las espumas de alta expansión sirven para dominar fuegos de clase A o clase B y son especialmente aptas para producir inundaciones en espacios cerrados. En condiciones adecuadas se pueden generar espumas contra incendio con índice de expansión de entre 100 a 1(100x) hasta 1000 a 1(1000x).

La espuma de alta expansión constituye un vehículo muy valioso para el transporte de masas de espuma húmeda a lugares inaccesibles, para la inundación total de espacios cerrados y para el desplazamiento volumétrico de vapores, calor y humo.

La espuma de alta expansión es especialmente apta para combatir incendios en interiores y espacios cerrados. Su empleo al exterior puede verse afectado por los efectos climatológicos. Las espumas de alta expansión causan en el fuego diferentes efectos:

1. Cuando se generan en suficiente volumen, pueden impedir que el aire, necesario para la continuidad de la combustión, alcance el lugar incendiado.
2. Cuando se lanza directamente contra la zona donde existe mayor acumulación de calor, el agua que contiene la espuma se convierte en vapor, reduciendo la concentración de oxígeno por dilución del aire.
3. La conversión del agua a vapor, absorbe el calor del fuego.
4. Debido a su tensión superficial relativamente baja, la parte de espuma que no se convierte en vapor tiende a penetrar los materiales de clase A.
5. Cuando se acumulan en profundidad, las espumas de alta expansión forman una barrera aislante para la protección de materiales expuestos no atacados por el fuego, impidiendo por lo tanto la propagación.

2.6.1.2 Gases inertes

Dióxido de carbono (CO₂)

Es uno de los agentes extintores más utilizados dadas sus características y propiedades

- a) Propiedades generales. En condiciones normales el dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, que por su compresión y enfriamiento, se puede llegar a licuar e incluso a solidificar.
 - No es corrosivo ni deja residuos.
 - Es un muy mal conductor de electricidad
 - Durante su descarga su temperatura es muy baja (<-40°C)
 - Es un producto asfixiante y puede tener repercusiones contra la salud en concentraciones superiores al 9%.

- En las mismas condiciones el dióxido de carbono presenta una densidad 50% mayor a la del aire
- b) Propiedades extintoras. Los efectos extintores del dióxido de carbono son los siguientes:
- Inertización: el CO_2 genera en la superficie de combustión, una atmósfera pobre en oxígeno, causando una reducción considerable en la oxidación.
 - Enfriamiento: cuando se descarga CO_2 directamente sobre el combustible, se causa una disminución de la temperatura. Esta propiedad se aprecia más en los fuegos superficiales, pero es un mecanismo secundario de extinción.
- c) Aplicaciones del dióxido de carbono
- Fuegos de clase A: Su eficiencia es muy baja en esta clase de fuegos, ya que su acción solo es superficial.
 - Fuegos de clase B: es efectivo ante fuegos de combustibles líquidos o gaseosos, aunque su efectividad específica es baja.
 - Equipos clase C: El CO_2 es el agente extintor que conduce en menor manera la electricidad. Por ello, es el agente adecuado para la extinción de juegos con equipos eléctricos bajo tensiones elevadas. El uso fundamental de los extintores de CO_2 es, precisamente, el de protección del equipo eléctrico, pues los fuegos originados en estos equipos suelen tener muy poca profundidad de brasa.
 - Fuegos de clase D: no es efectivo frente a fuegos de metales reactivos, ya que este tipo de metales provocan su descomposición.

Otros gases inertes

Su utilización se ha extendido en gran manera a partir de la progresiva desaparición de los halones clásicos.

Son gases nobles, básicamente argón y nitrógeno.

El mecanismo de extinción es, en este caso, mediante la inertización del recinto protegido. Son por lo tanto aplicables en sistemas de inundación total. No se descomponen, son baratos y no dañan el medio ambiente. Como desventajas, los tiempos de descarga son prolongados, requieren un gran volumen de almacenamiento y requieren equipos de regulación, distribución y descarga más complejos.

Aplicaciones de los gases inertes

Se utilizan en suspensión y, sobre todo, prevención de explosiones. Así como en lugares donde se utiliza la protección por inundación total de áreas y recintos cerrados.

2.6.1.3 Agentes químicos: sólidos, líquidos y vapores

Polvo extintor

Es una sustancia química sólida en estado pulverulento empleada para la extinción de incendios. Está formado por sales inorgánicas, finamente pulverizadas y aditivos.

- a) Composición. Los agentes extintores de polvo están formados básicamente por:
 - Bicarbonato de sodio
 - Bicarbonato potásico
 - Cloruro potásico
 - Bicarbonato de urea-potásico
 - Fosfato monoamónico
 - Metales alcalinos
- b) Propiedades generales:
 - División en finas partículas (tamaño < 500 μm)
 - Toxicidad nula
 - Mal conductor de la electricidad
 - A temperaturas inferiores a 60°C el polvo es estable
- c) Propiedades extintoras:
 - Enfriamiento: absorbe la energía calorífica. Es un efecto prácticamente despreciable.
 - Sofocación: el polvo ABC, cuando se emplea sobre fuegos de clase A, se descompone por efectos del calor, produciendo un residuo ácido en la superficie en combustión que aísla el combustible del oxígeno del aire.
 - Inhibición: cuando se descargan los polvos sobre las flamas, los compuestos liberados se combinan con los radicales libres e impiden que estos continúen con la combustión.
 - Cuando se arroja sobre el área incendiada, apaga la flama casi instantáneamente.

Agentes químicos “limpios”

Los agentes extintores conocidos como “agentes limpios” tienen algunas de las siguientes características: son gases licuados o comprimidos, o líquidos compresibles; se vaporizan sin dejar residuos después de su aplicación y no conducen la electricidad.

Los agentes químicos limpios comprenden la siguiente familia de compuestos HCFC (hidroclorofluorocarbonos).

Los mecanismos de extinción por los que actúan estos agentes se basan en la inhibición de la reacción química auto-mantenida y el enfriamiento.

Aplicaciones de los agentes químicos “limpios”

Los agentes químicos limpios y sus mezclas, así como los gases inertes, se utilizan en la protección de áreas y recintos cerrados por inundación total. También pueden ser utilizados para la prevención y supresión de explosiones.

2.6.1.4 Elementos de acción física: mantas, batefuegos, explosivos y elementos ocasionales.

Hay diferentes causas que hacen necesaria la utilización de elementos de extinción de incendios en condiciones específicas, tales como: en algunas ocasiones, el uso de medios extraordinarios debido a la magnitud del incendio; en otras, porque la extensión del incendio requeriría igualmente una dispersión del agente extintor que anularía su eficacia, por lo que se necesitarían agentes de menor efectividad específica, pero de mayor permanencia; finalmente, hay casos en los que no se dispone de agentes específicos contra incendios y debe utilizarse aquel material que se encuentra a la mano.

Mantas

El mecanismo de extinción de las mantas es el de sofocación, creando una barrera física entre el material en combustión y el oxígeno del aire. Para lograr cumplir este objetivo, la manta, sea del tipo que sea, debe de tener ciertas cualidades que abarcar fundamentalmente 3 aspectos:

1. **Tamaño:** la incidencia del tamaño en la capacidad de extinción de una manta es obvia: solo puede extinguir si se separa totalmente la zona en combustión del oxígeno atmosférico.
2. **Estabilidad del fuego:** Es necesario que la reacción contra el fuego de la manta sea buena, en muy pocas ocasiones una manta será incombustible, pero puede dar buenos resultados si no se inflama muy rápidamente (es el caso de la lana cuando no se mezcla con fibras sintéticas). Pero, además de no arder, tiene que permanecer integra ante la acción del fuego, ya que si se agrieta o descompone el mecanismo deja de funcionar.
3. **Estanquidad:** dicha estanquidad debe de afectar al combustible y sus vapores. Esta característica es crítica para la extinción de fuegos de líquidos inflamables. Debe prestarse atención especial a la posible reignición, a veces violenta, de un fuego no totalmente sofocado, al retirar la manta sin haberse sofocado el fuego totalmente.



Fig. 2.10 Manta

Explosivos

Los explosivos se utilizan en la extinción de incendios de líquidos o gases combustibles cuando se dan las siguientes circunstancias:

- Se trata de un incendio en forma de fuga, en el cual no se pueden ocupar agentes de aportación como las espumas.
- No resulta posible detener el aporte de combustible o no es recomendable esperar a que el aporte se detenga.
- El tamaño del incendio hace inviable el uso de agentes químicos, por no estar confinado el incendio.

Este mecanismo se considera como un híbrido entre inertización y sofocación, ya que separa la zona en combustión del comburente mediante una barrera física, como es la onda de choque y mediante la generación de gases inertes procedentes de la descomposición del explosivo.

Batefuegos (Fire Flaps)

La acción de los batefuegos puede considerarse una reducción a la de los explosivos. Los batefuegos consisten en un conjunto de láminas metálicas unidas a un cuerpo central y provisto de un mango. Se manejan golpeando la base metálica contra las flamas, de tal modo que se logre la sofocación de aquellas. Los golpes dados con los batefuegos, levantan pavesas¹¹, por lo que la dirección de dichos golpes debe de ser tal que las pavesas se dirijan hacia la zona aun no extinta, ya que en caso contrario podría generarse de nuevo un incendio en la zona ya extinguida. Las ramas, preferentemente las verdes, también pueden considerarse batefuegos.

¹¹ Parte muy pequeña y ligera de materia que se desprende de un cuerpo que arde y que acaba convirtiéndose en ceniza



Fig. 2.11 Fire Flap

Arena

La tierra, y sobre todo, la arena son buenos agentes extintores de incendio, que pueden encontrarse, de forma ocasional, en multitud de escenarios donde el resto de los agentes extintores se hallan ausentes. La tierra, en general, puede utilizarse para confinar fuegos de clase A y charcos originados por derrames de líquidos inflamables. Si no se encuentra húmeda, se puede utilizar en fuegos donde hay tensión eléctrica presente, e incluso en fuegos de metales si está totalmente seca.



Fig. 2.12 Uso de arena

3 Los Sistemas de Protección Contra Incendio a

Base de Agua

3.1 Propiedades de extinción del agua

La extinción de un fuego solo se consigue si se aplica un agente efectivo en el punto donde se produce la combustión. Durante siglos, el método empleado ha sido dirigir un chorro compacto de agua desde una distancia segura hasta la base del fuego; este método se sigue empleando ampliamente; sin embargo, un método más eficaz consiste en aplicar agua en forma pulverizada, lo que aumenta el efecto refrigerante del agua y la conversión de agua en vapor.

3.1.1 Extinción por enfriamiento

En la mayoría de los casos, el fuego se extingue cuando la superficie de un material en combustión se enfría por debajo de la temperatura a la que se produce suficiente vapor para mantener la combustión.

El enfriamiento superficial no es normalmente efectivo sobre productos gaseosos y líquidos inflamables con puntos de inflamación por debajo de la temperatura del agua aplicada. Generalmente, no es recomendable emplear agua para líquidos con puntos de inflamación por debajo de 37.8°C (100°F).

Lo más efectivo es descargar el agua de manera que absorba el máximo calor. El agua absorbe el máximo calor cuando se transforma en vapor y esto se consigue con mayor facilidad si se aplica agua pulverizada en vez de un chorro compacto.

La aplicación del agua pulverizada se basa en los siguientes principios:

1. La velocidad de transmisión de calor es proporcional a la superficie expuesta de un líquido. Para un volumen dado de agua la superficie aumenta drásticamente si el agua se convierte en gotas.
2. La velocidad de transmisión de calor depende de la diferencia de temperatura entre el agua y el material en combustión o el aire que le rodea.
3. La velocidad de transmisión de calor depende del contenido de vapor del aire, especialmente en cuando a la propagación del fuego.

4. La capacidad de absorción de calor del agua depende de la distancia recorrida y de su velocidad en la zona de combustión.

Cuando la velocidad de absorción de calor del agua es superior al desprendimiento de calor, ya tenemos la extinción.

Los cálculos demuestran que el diámetro óptimo para la gota de agua es de 0.3 a 1.0 mm (0.1 a 0.4 pg), y que los mejores resultados se obtienen cuando las gotas son de un tamaño uniforme. Actualmente no hay ningún dispositivo de descarga capaz de producir gotas totalmente uniformes, aunque muchos dispositivos de descarga expulsan gotas que son bastante iguales en una amplia gama de presiones. La gota deberá ser lo suficientemente grande para poder alcanzar el punto de combustión a pesar de la resistencia del aire, la fuerza opuesta a la gravedad, y cualquier otra corriente de aire y penacho de la llama. Cuando las gotas de agua son demasiado pequeñas, pueden verse desviadas por el penacho o evaporarse antes de llegar a la base del fuego.

3.1.2 Extinción por sofocación

El aire puede desplazarse e incluso suprimirse si se genera suficiente vapor. La combustión de determinados materiales puede extinguirse mediante esta acción sofocante, que se produce con más rapidez si el vapor que se genera puede confinarse, de alguna forma, en la zona de combustión.

El agua puede sofocar el fuego de un líquido inflamable cuando su punto de inflamación esté por encima de los 37.8°C y su densidad relativa sea mayor que 1.1 y, además no sea soluble en agua. Para conseguir este efecto de manera más eficaz, se le añade normalmente al agua un agente espumante. El agua debe entonces aplicarse a la superficie del líquido de una forma suave.

En aquellos casos en los que la combustión de un material libere oxígeno, el efecto de sofocación aludido no es posible.

3.1.3 Extinción por emulsificación

Se logra una emulsión cuando se agitan juntos dos líquidos inmiscibles y uno de ellos se dispersa en el otro. La extinción por este procedimiento se logra aplicando agua a determinados líquidos viscosos inflamables, ya que el enfriamiento de la superficie de dichos líquidos impide la emisión de vapores inflamables. Debe de tenerse cuidado si el procedimiento se aplica a líquidos con cierta profundidad porque la espumificación puede producir el derrame del líquido ardiendo por fuera del recipiente contenedor. Generalmente, para la extinción por emulsión se emplea una pulverización de agua relativamente fuerte y gruesa. Debe evitarse el empleo de chorros compactos que producirían espumaciones violentas.

3.1.4 Extinción por dilución

Los fuegos de materiales inflamables hidrosolubles pueden extinguirse en algunos casos, por dilución. El porcentaje de dilución necesario varía ampliamente, al igual que el volumen de agua y el tiempo necesario para la extinción. Por ejemplo, la dilución puede aplicarse con éxito contra un fuego en un vertido de alcohol metílico o etílico, si se consigue una mezcla adecuada de agua y alcohol, sin embargo, no es práctica común si se trata de depósitos. El peligro de derrame, debido a la gran cantidad de agua que se requiere, y el de espumación, si la mezcla alcanza la temperatura de ebullición del agua, hace que esta forma de extinción sea escasamente efectiva.

3.2 Uso de agua en riesgos especiales

A pesar de que el agua es un agente extintor universal, existen ciertas prohibiciones y precauciones que deben observarse cuando se aplique manualmente sobre algunos materiales ardientes que, o bien reaccionan químicamente, o explotan al contacto con el agua. En otros casos, la acción mecánica de aplicar el agua debe estar controlada con cuidado para no crear condiciones que intensifiquen el riesgo más que controlarlo.

A continuación se dan guías resumidas para la utilización del agua sobre algunos materiales, que pueden presentar problemas si se usa indiscriminadamente como agente extintor.

3.2.1 Incendios de productos químicos

Como regla general, no se debe de utilizar agua en materiales como carburos, peróxidos, etc., debido a que al reaccionar pueden desprender gases inflamables y calor. Cuando se los humedece, algunos materiales, como la cal viva, se calentarán espontáneamente durante cierto tiempo sino se pudiera disipar el calor debido a las condiciones de almacenaje.

3.2.2 Metales combustibles

Como regla general, no se debe de usar agua en incendios relacionados con metales combustibles, como magnesio, titanio, sodio metálico, hafnio, o metales que son combustibles bajo ciertas condiciones, como el calcio, zinc y aluminio.

3.2.3 Metales radiactivos

El agua no se debe usar continuamente en metales radiactivos. Los requisitos de protección contra incendios para metales radiactivos van de acuerdo con sus contra partidas no radiactivas (con fines prácticos, la radiactividad no influye ni es influida por las propiedades del incendio del metal). El control de una corriente de agua contaminada es un factor que complica la utilización del agua sobre metales radiactivos.

3.2.4 Incendios de gases

El agua utilizada sobre emergencias de incendios de gases se utiliza generalmente para controlar el calor del incendio mientras que se intenta cortar, o detener, el flujo del gas emitido. El agua rociada aplicada desde las mangueras, o desde las boquillas de control o por sistemas de rociadores de agua fijos, se usa comúnmente para la dilución de concentraciones de gases inflamables.

3.2.5 Incendios de líquidos inflamables y combustibles.

El aceite pesado, el aceite lubricante, el asfalto y otros líquidos con puntos de combustión altos, no producen vapores inflamables a no ser que sean calentados. Una vez que hayan entrado en ignición, el calor del incendio causará suficiente vaporización para producir una continua combustión. Si se rocía agua en la superficie de los líquidos con alto punto de combustión que se encuentran ardiendo, el enfriamiento reducirá el grado de vaporización lo suficiente para extinguir el incendio.

La capacidad del agua sin aditivos (agentes espumantes) para acabar con un incendio, es limitada en líquidos inflamables con bajo punto de combustión, como los líquidos inflamables de clase I (puntos de combustión por debajo de 100°F), como queda definido en la NFPA 30, Código de líquidos inflamables y combustibles (Flammable and Combustible Liquids Code). Si el agua alcanza la superficie de un líquido inflamable con bajo punto de combustión que se encuentra ardiendo en un depósito, con toda seguridad irá al fondo pudiendo causar que depósito se derrame. En el caso de incendios vertidos, el agua probablemente causará que el incendio se propague. La manipulación profesional de ciertas clases de boquillas para rociar agua puede extinguir incendios en estos líquidos o, como mínimo, realizar un control efectivo del incendio.

La utilización de agua sobre incendios de productos derivados del petróleo se pueden resumir como sigue:

1. Como agente enfriador el agua se puede usar para:
 - a) Cortar el desprendimiento de vapor de la superficie del petróleo con alto punto de combustión y con ello extinguir el incendio.

- b) Proteger a los bomberos de las llamas y del calor radiante cuando vayan a cerrar una válvula o realicen otros trabajos cerca del incendio.
 - c) Proteger las superficies expuestas a llamas; más eficaz cuando la superficie está por encima de los 100°C (212°F).
2. Como herramienta mecánica , una corriente de agua puede trabajar a distancia para:
- a) Controlar fugas.
 - b) Dirigir el flujo del producto derivado del petróleo para prevenir su ignición, o dirigir el incendio a una zona donde cause menos daños.
3. Como un medio que puede desplazar, el agua se puede usar para:
- a) Hacer flotar el aceite por encima de la fuga en un depósito, bien antes o durante el incendio.
 - b) Cortar el escape de combustible bombeándolo hacia una tubería para fugas por encima de la misma.

3.3 Sistemas de Rociadores automáticos

Los rociadores automáticos son dispositivos termosensibles diseñados para reaccionar a temperaturas predeterminadas produciendo, en forma automática, la liberación de un chorro de agua que distribuyen en formas y cantidades específicas sobre zonas designadas. El agua pasa a las boquillas de descarga de los rociadores a través de un sistema de tuberías, generalmente suspendido o elevado, estando los rociadores conectados a intervalos a lo largo de las tuberías.

La NFPA no tiene normas que regulen la fabricación de de rociadores. Sin embargo a través de sus muchas normas de protección contra incendio sí especifica que solo los rociadores homologados por organismos competentes pueden emplearse en sistemas que cumplan con la NFPA 13, Instalación de sistemas de rociadores (Standard for the Installation of Sprinkler Systems).

Desde que empezó a emplearse este sistema a finales del siglo XIX, el comportamiento y la fiabilidad de los rociadores automáticos ha ido mejorando continuamente gracias a la experiencia adquirida y a los fabricantes y laboratorios de ensayos.

Entre 1952 y 1953, se realizó un cambio radical en la configuración de la descarga del agua de los rociadores que mejoró considerablemente su eficacia. En un principio, este tipo de rociador mejorado se llamó de pulverización. En 1958 se convirtió en el normal y los modelos anteriores comenzaron a conocerse como tipo antiguo. La nueva configuración del deflector fue la principal característica que contribuyó a la mejora del nuevo rociador normal.

3.3.1 Desarrollo de los rociadores automáticos

Los rociadores automáticos son dispositivos para distribuir automáticamente agua sobre un fuego, en cantidad suficiente para dominarlo. Aunque los actuales sistemas de rociadores no están diseñados para extinguir el fuego, muchos sistemas han conseguido hacerlo.

El agua llega a los rociadores a través de un sistema de tuberías, generalmente suspendidas en el techo; los rociadores están situados a determinada distancia a lo largo de ellas. El orificio de los rociadores automáticos está normalmente cerrado por un disco o cubierta, sostenido en un sitio por un elemento de disparo termosensible. La Fig. 3.1 muestra una secuencia fotográfica de un rociador automático de elemento termosensible típico.

Los antepasados de los rociadores automáticos fueron los sistemas de tuberías perforados y los rociadores abiertos, que se instalaron en un buen número de industrias entre 1850 y 1880.

La idea de protección a base de rociadores automáticos de modo que el calor del fuego pusiera en acción uno o más rociadores, permitiendo la salida del agua data de 1860. Sin embargo, su aplicación práctica en Estados Unidos, no comenzó hasta 1878, cuando se instaló el primer rociador automático de Parmelee.



Fig. 3.1 Secuencia fotográfica del funcionamiento de un rociador automático de ampolla típico

3.3.1.1 Eficacia de la protección mediante rociadores automáticos

Los rociadores automáticos son particularmente efectivos para la seguridad de la vida humana, ya que dan el aviso de la existencia de un fuego al mismo tiempo que liberan agua sobre la zona incendiada, con un sistema de rociadores existen escasos problemas de acceso al lugar del fuego, o de visibilidad a causa del humo, que imposibiliten la lucha manual contra el fuego.

La actuación de los rociadores sobre el humo es doble: una parte, el empuje físico sobre el humo tiende a mantenerlo en los niveles más bajos; por otra parte, el enfriamiento de los humos

permite una estancia más prolongada de las personas, lo que no sucedería en la ausencia de los rociadores.

3.3.2 Principios de funcionamiento de los rociadores automáticos

3.3.2.1 Elementos funcionales

La descarga de agua de los rociadores automáticos se impide por medio de una cubierta o válvula que se mantiene rígidamente unida contra el orificio de descarga por medio de un sistema de palancas y de enlaces que la oprimen y la retienen firmemente por medio de varillas de sujección.

Rociadores de enlace fusible

El rociador automático de enlace fusible común actúa al fundirse una aleación metálica cuyo punto de fusión está predeterminado (Fig. 3.2). Las soldaduras empleadas en los rociadores automáticos son aleaciones de fusibilidad óptima, compuestos principalmente de estaño, plomo, cadmio y bismuto y tienen puntos de fusión claramente definidos. La aleación de dos o más metales puede tener un punto de fusión inferior a la del metal componente que tenga el punto de fusión más bajo. La mezcla de dos o más metales que den el punto de fusión más bajo posible se llama aleación “eutéctica”.



Fig. 3.2 Muestra de la disposición de las piezas de un rociador automático de enlace fusible

Rociadores de ampolla

Tiene como elemento funcional un bulbo frágil o ampolla (Fig. 3.3). El pequeño bulbo de vidrio especial contiene un líquido, pero no está totalmente lleno, puesto que queda atrapa en su interior una pequeña burbuja de aire. Al expandirse el líquido en el interior a causa del calor, la burbuja se comprime y finalmente el líquido la absorbe. Tan pronto como desaparece la burbuja, la presión aumenta rápidamente y el bulbo se rompe, soltando la cubierta de la válvula.

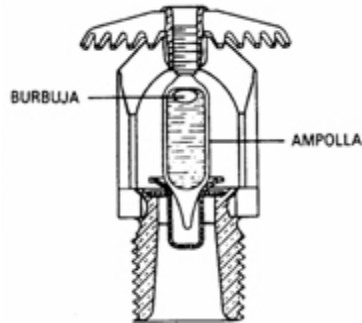


Fig. 3.3 Rociador automático Grinnell "Quartzoid", serie D

Otros componentes termosensibles

Para provocar la descarga automática se emplean también otros elementos sensibles a la temperatura como discos bimetálicos, capsulas de aleación fusible y cápsulas químicas.

Dinámica de los rociadores

En la Fig. 3.4 se muestra la forma de actuación de los mecanismos de palanca o de enlace fusible de los rociadores automáticos.

La presión mecánica que se ejerce normalmente en la parte superior de la cubierta o válvula es muchas veces mayor que la creada por la presión de agua que se encuentra por debajo, de modo que la posibilidad de fugas, incluso por efecto de golpe de ariete o por presiones de agua excepcionalmente altas, es prácticamente nula. La presión mecánica se produce en tres etapas:

1. El efecto del par de las dos palancas.
2. El mecanismo de los enlaces.
3. Por la carga del fundente entre las piezas del enlace.

La estructura del rociador u otras partes del mecanismo poseen un grado de elasticidad que proporciona la energía que produce el disparo de las piezas móviles.

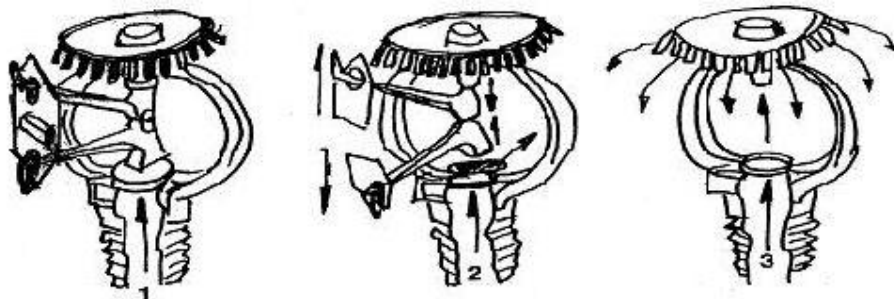


Fig. 3.4 Ejemplo de la disposición de las piezas móviles de un rociador automático de enlace fusible

Diseño del deflector

Unido a la estructura o cuerpo del rociador, existe un deflector o distribuidor contra el que se lanza el agua con fuerza y una gruesa pulverización calculada para que cubra o proteja una superficie dada. La cantidad de agua que se descargue dependerá de la presión del flujo y de las dimensiones del orificio rociador. Se considera generalmente que la presión para obtener una acción eficaz del caudal es de 48 kPa (7 psi). A esta presión, un rociador que tenga orificio nominal de ½ pulgada (12.7 mm) descargará 58 l/min (15 gpm) y si el orificio fuera de 17/32 pulgadas la descarga sería 79 l/min (21 gpm).

Para lograr que incluso los rociadores que están más distantes del suministro de agua tengan una presión equivalente al mínimo, especialmente cuando varios rociadores tienen que entrar en acción simultáneamente, se suministra el agua a una presión de 345 a 690 kPa (50 a 100 psi).

La distribución de agua fluyendo desde un rociador no puede ser simétrica respecto al eje, sobre todo porque los brazos impiden una distribución uniforme del agua y los bordes dentados del deflector actúan como dedos.

3.3.3 Temperaturas de activación de los rociadores automáticos

Los rociadores automáticos se clasifican según la temperatura a la que actúan, que se obtiene por medio de pruebas normalizadas en las que se sumerge el rociador en un líquido cuya temperatura se eleva muy lentamente hasta que el rociador reacciona (ver Tabla 3.1).

Como regla general no deben de emplearse rociadores de temperatura ordinaria donde las temperaturas excedan de los 38°C (100°F) para disponer de un margen de seguridad.

Tabla 3.1 Temperaturas de activación, clasificación y códigos de colores*

<i>Máxima temperatura del techo</i>		<i>Temperatura de activación</i>		<i>Clasificación de la temperatura</i>	<i>Código de colores</i>	<i>Color de la ampolla de vidrio</i>
<i>°F</i>	<i>°C</i>	<i>°F</i>	<i>°C</i>			
100	38	135-170	59-77	Ordinaria	Sin color	Naranja o rojo
150	66	175-225	79-107	Intermedia	Blanco	Amarillo o verde
225	107	250-300	121-149	Alta	Azul	Azul
300	149	325-375	163-191	Muy alta	Rojo	Morado
375	191	400-475	204-246	Extra alta	Verde	Negro
475	246	500-575	260-302	Ultra alta	Naranja	Negro
625	329	650	343	Ultra alta	Naranja	Negro

*Fuente: NFPA 13, Norma para sistemas de rociadores

Los rociadores de temperatura ordinaria pueden emplearse sin riesgo en el interior de edificios y en otros lugares donde no estén expuestos directamente a los rayos del sol, excepto en respiraderos de cubierta, es desvanes ciegos carentes de ventilación, bajo cubiertas metálicas o de tela, por encima o en la proximidad de fuentes de calor o en espacios ocultos y cerrados donde pudieran excederse las temperaturas normales.

Deben de emplearse rociadores con clasificaciones de temperaturas intermedias o altas, en lugar de los de clasificación ordinaria, en las situaciones donde pudiera preverse la declaración de un incendio de desarrollo rápido o de alta tasa de emisión de calor. Los rociadores de clasificación más alta pueden tener la ventaja de reducir el número de rociadores que, de otra manera, entrarían en acción fuera de la zona incendiada.

La velocidad de actuación depende de la capacidad de absorción de calor de las piezas metálicas del rociador. En los casos en que es necesario que los rociadores funcionen a gran velocidad debido a la posibilidad de que se desarrolle y se propague rápidamente un fuego, por ejemplo en las fábricas de explosivos, se usan sistemas de inundación total o diluvio con rociadores abiertos. La activación de estos sistemas puede darse por medio de rayos infrarrojos o ultravioleta, detectores de humo u otros medios, causando la apertura rápida de la válvula y la descarga del agua a través de los rociadores abiertos.

3.3.4 Rociadores automáticos normalizados

Los rociadores estándar tienen generalmente el mismo aspecto que los convencionales que poseen el mismo tipo de estructura, de enlace u otro tipo de mecanismo de activación. La diferencia esencial se encuentra en el deflector; unas diferencias aparentemente mínimas en la forma del deflector producen grandes diferencias en las características de descarga.

Anteriormente la investigación para la mejora de los rociadores se dirigía hacia la obtención de una distribución razonablemente uniforme del agua sobre la zona protegida por el rociador, así como hacia la humidificación del techo, en la suposición que la descarga de agua contra el techo era esencial para lograr la extinción del fuego. Las investigaciones posteriores demostraron que se podía lograr una extinción más efectiva y cubrirse una superficie mayor dirigiendo todo el agua hacia abajo y horizontalmente (Figuras 3.5 y 3.6).

Una característica de los rociadores normales en la distribución del agua relativamente uniforme a todos los niveles por debajo de los rociadores. A una distancia de 1.2 m (4 pies) por debajo del deflector, la pulverización cubre una superficie circular con un diámetro aproximado de 4.9 m (16 pies), cuando el rociador descarga a razón de 58 l/min (15 gpm).

Los rociadores pueden instalarse, respecto a la tubería que los alimenta, en forma colgante o en forma montante, deben montarse siempre en la posición que les corresponde (Fig. 3.7) según

indique el rótulo estampado sobre el deflector con la palabra correspondiente SSU (rociador normal montante) o SSP (rociador normal colgante).

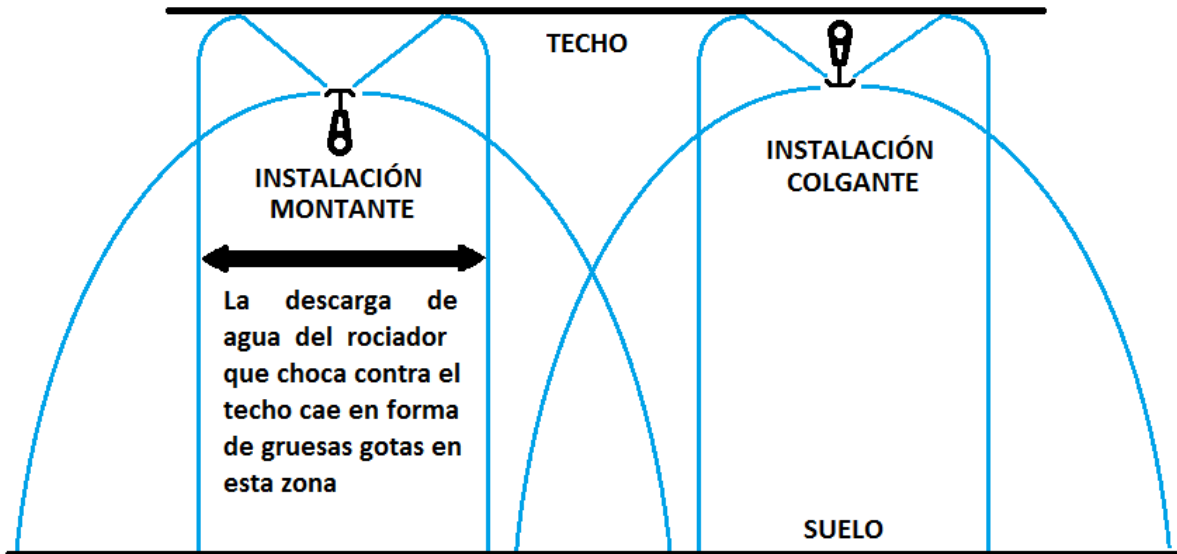


Fig. 3.5 Forma de distribución del agua producida por los rociadores convencionales (anteriores a 1953)

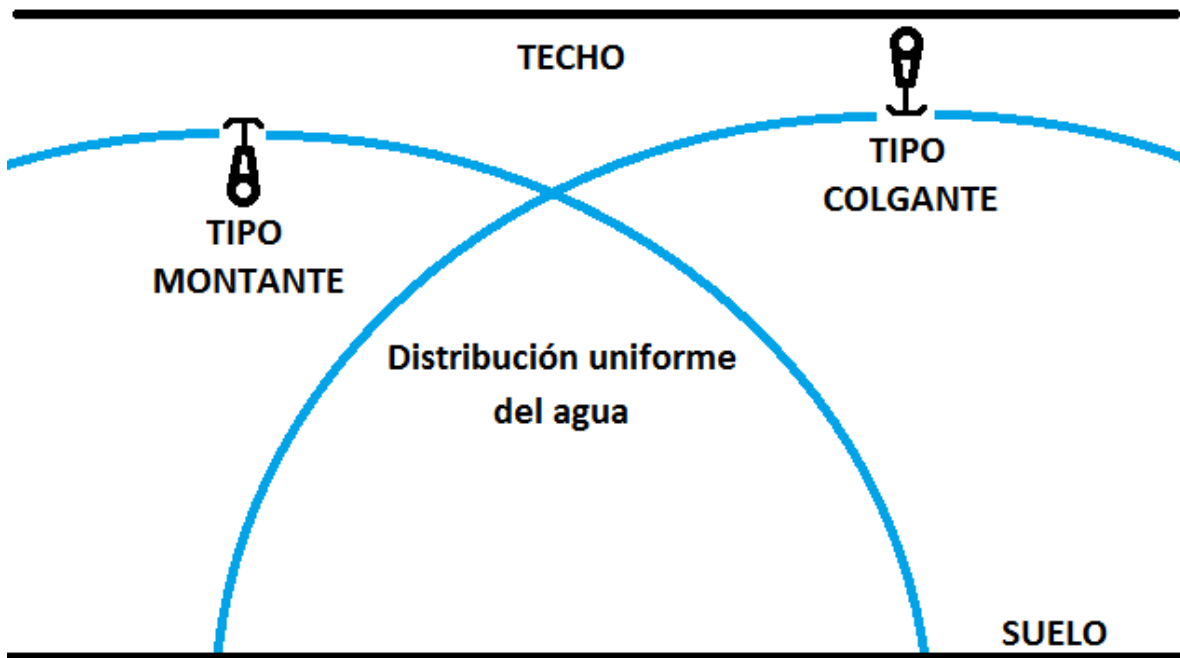


Fig. 3.6 Forma de distribución del agua producida por los rociadores normales (en vigor desde 1953)



Fig. 3.7 Rociadores del mismo modelo para la instalación colgante y montante. Nótese la diferente forma de los deflectores

3.3.4.1 Deflectores dobles

Varios fabricantes han creado un deflector doble como modelo principal para emplearse en los rociadores montantes. En la Fig. 3.8 se muestra un deflector doble típico.



Fig. 3.8 Rociador automático normal con deflector doble.

Los rociadores normales tienen un orificio nominal $\frac{1}{2}$ pulgada con una configuración cilíndrica o cónica (Fig. 3.9).

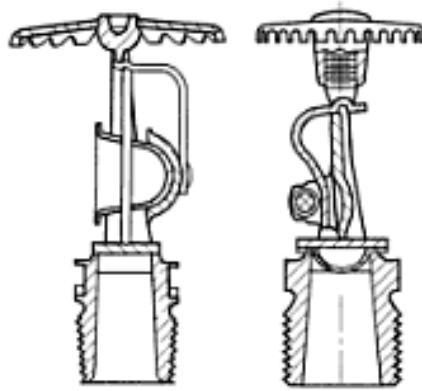


Fig. 3.9 Ejemplos de rociadores mostrando un orificio de descarga recto de media pulgada (cilíndrico) a la izquierda y otra de forma cónica a la derecha.

3.3.4.2 Rociadores en rebajes

Un rociador de este tipo tiene una parte de él introducida dentro de un rebaje en el techo (Fig. 3.10). Su funcionamiento es exactamente igual que los del tipo pendiente.



Fig. 3.10 Un rociador central del tipo rebaje

3.3.4.3 Rociadores para empotrar

La configuración especial de estos rociadores hace que solamente asomen el mínimo de las partes activas o móviles por debajo del techo dónde están instalados sin que se afecte desfavorablemente su sensibilidad al calor ni la configuración de la distribución del agua (Fig. 3.11).



Fig. 3.11 Rociador de techo para empotrar

En un esfuerzo para facilitar la protección por medio de rociadores en locales de riesgo bajo donde la estética es importante, los industriales han creado modelos más estéticos que se integran de una forma más atractiva en el material del falso techo.

3.3.4.4 Rociadores ocultos

Un rociador de este tipo tiene todos los elementos incluyendo el mecanismo de funcionamiento, por encima de una tapa que los oculta. Cuando se declara un incendio la tapa cae, dejando descubierto el dispositivo termosensible, comienza la descarga.



Fig. 3.12 Rociador colgante oculto

3.3.4.5 Rociadores ornamentales

Son rociadores automáticos que tienen añadidos de tipo decorativo o que están bañados o esmaltados con acabados superficiales del tipo que se desee. Los tipos aprobados de rociadores

ornamentales lo son solo para la instalación pendiente, de acuerdo con la Norma para rociadores de la NFPA.

3.3.4.6 Rociadores pendientes y montantes de tubería seca

Estos tipos de rociadores se usan para suministrar protección en áreas sin calefacción, tales como cámaras frigoríficas, donde los rociadores están alimentados por una tubería individual descendente o ascendente, según sea el caso, procedente de una tubería seca situada en el exterior de la zona sin calefacción. Para prevenir el daño a la tubería ascendente/descendente deberá permanecer vacía de agua.

Se situará un dispositivo de cierre a la entrada del rociador para evitar la llegada del agua hasta que no se haya roto el fusible. Los mecanismos termosensibles de funcionamiento son adaptaciones de los que se usan para los rociadores normales.

3.3.5 Rociadores para condiciones especiales de servicio.

Los sistemas de rociadores normales provistos de rociadores montante o colgantes se adaptan a una gran variedad de situaciones. Sin embargo, existen algunas que requieren tipos especiales o disposiciones distintas de los rociadores. En algunos casos se necesitan configuraciones especiales en la distribución del agua, como sucede con los rociadores de pared; en otros casos, las temperaturas poco habituales o las atmósferas corrosivas exigen el empleo de rociadores de modelo especial o con características constructivas distintas.

3.3.5.1 Rociadores residenciales

Son rociadores homologados específicamente para viviendas y cuyos requisitos de instalación se encuentran en la norma 13D de la NFPA, Norma para la Instalación de Rociadores en Viviendas uni, bifamiliares y rodantes (Standard for the Installation of Sprinkler Systems in One- and Two-Family Dwellings and Manufactured Homes). Constan de enganches fusibles de poca masa que se activan en mucho menos tiempo que el que se necesita en un rociador de enganches convencionales. En algunos tipos se consigue un tiempo de activación de 1/5 del de uno convencional. Debido a su rápida respuesta se emplea con mucha frecuencia en viviendas en que los sistemas convencionales instalados según la norma para sistemas de rociadores de la NFPA no resultan tan prácticos.

3.3.5.2 Rociadores de gota gorda

Son rociadores especiales con un factor K comprendido entre 11 y 11.5 (este factor varía de 5.3 a 5.8 para rociadores normalizados de ½ pulgada (12.7 mm) de orificio. El diseño del deflector especial y junto con mayor descarga, produce gotas de suficiente tamaño y velocidad para conseguir la penetración en el fuerte tiro ascendente generado por los fuegos de gran intensidad.

3.3.5.3 Rociadores cíclicos

Rociador que se activa y se desactiva cíclicamente según sea necesario. En condiciones normales, la válvula piloto se mantiene cerrada por medio de un disco de acción rápida. El agua que se encuentra en la cámara del pistón mantiene a este cerrado. Cuando el disco de acción rápida se calienta hasta una temperatura determinada abre la válvula piloto y deja pasar el agua de la cámara del pistón, permitiendo que el pistón se abra y el agua llegue al rociador descargándose al exterior. Cuando el disco de acción rápida se vuelve a enfriar hasta 37.8°C (100°F), cierra la válvula piloto. El agua penetra en la cámara del pistón por medio del orificio restringido del mismo pistón y la diferencia de las fuerzas de presión hace que se cierre la válvula.

3.3.5.4 Rociadores para ambientes corrosivos

Son rociadores protegidos contra ambientes corrosivos. Un recubrimiento total con una cera cuyo punto de fusión sea ligeramente por debajo de la temperatura a la que es sensible el rociador es el método más comúnmente empleado. También es común un revestimiento de plomo sobre el cuerpo y las palancas del rociador, en combinación con cera para la protección de los elementos fusibles.

Los recubrimientos típicos son cera sola, asfalto solo, plomo solo, cera sobre plomo y asfalto sobre plomo para rociadores que tengan temperaturas nominales de funcionamiento entre 57 y 100°C (135 y 212°F). En rociadores homologados para atmósferas corrosivas se utilizan recubrimientos de plomo en la gama total de 57 a 200°C (135 a 500°F).

Sean cuales sean las medidas de protección que se adopten, no se deben retrasar la función del fundente por la acción de cualquier otro elemento sensible al calor que interfiera con el libre movimiento de las paredes activas o altere la configuración de la descarga de agua.

3.3.5.5 Rociadores de pared

Tienen los mismos componentes que los normales excepto un deflector especial que descarga la mayor parte del agua hacia un costado con una distribución parecida a un cuarto de esfera. El alcance horizontal es de unos 4.6 m (15 pies) y por lo tanto mayor que la de los rociadores ordinarios. Montados cerca del encuentro entre el techo y la pared, los rociadores laterales proporcionan protección adecuada en actividades de riesgo ligero tales como vestíbulos de

hoteles, comedores, oficinas y otras situaciones donde las tuberías de rociadores habituales tendrían un aspecto poco atractivo. No se emplean rociadores de pared en las situaciones donde puedan ocuparse rociadores normales sin afectar el aspecto decorativo (Fig. 3.13).



Fig. 3.13 Rociador automático de pared de gran alcance

3.3.5.6 Rociadores sin elementos activos

Se emplean rociadores automáticos normales o de pared carentes de asiento de válvula y de elementos sensibles al calor, como boquillas de descarga de los sistemas de diluvio en los que el suministro de agua se controla por una válvula automática de actuación independiente a la de los rociadores.

3.3.5.7 Rociadores de pequeño y gran orificio

Los rociadores automáticos con caudal de descarga mayor o menor que el normalizado de orificio nominal de ½ pulgada (12.7 mm) y con igual presión de trabajo, se recomienda en la protección de determinadas propiedades. Los rociadores de gran orificio y con densidades de descarga de 0.45 gpm/pie² (18 [l/min]/m²) proporcionan un caudal inalcanzable con los rociadores normalizados de orificio nominal de ½ pulgada. La Norma para sistemas de rociadores acepta los rociadores automáticos de orificio pequeño y grande pero no proporciona tablas de dimensionamiento de tuberías ni especificaciones de distanciamiento.

Siempre que se sustituyan rociadores hay que tener cuidado de reemplazarlos por otros del mismo tipo. En sistemas calculados hidráulicamente es vital la sustitución con rociadores de idéntico tamaño de orificio es vital la sustitución con rociadores de idéntico tamaño de orificio.

- ✚ **Rociadores automáticos de pequeño orificio:** se han probado estos rociadores con orificios de ¼ y 7/16 de pulgada (6.4 y 11.1 mm). Tienen capacidades de descarga que carían entre una cuarta parte o la mitad de los rociadores normales de ½ pulgada. Llevan su diámetro estampado en la base del rociador.
- ✚ **Rociadores automáticos de gran orificio:** estos rociadores tienen un caudal de descarga del 140% respecto a los normalizados de diámetro nominal de ½ pulgada a la misma presión. Su dimensión se estampa en el cuerpo del rociador.

Rociadores automáticos de orificio extra grande: estos rociadores tienen un factor K de 11.0 a 11.5 y una descarga de 200% de un rociador de orificio nominal de ½ pulgada (12.7 mm) funcionando a la misma presión.

Tabla 3.2 identificación de las características de descarga de rociadores

<i>Diámetro nominal del orificio en pulgadas</i>	<i>Tipo de orificio</i>	<i>Factor * "K"</i>	<i>% de la descarga nominal con ½ pulgada</i>	<i>Tipo de rosca</i>	<i>Pivote</i>	<i>Diámetro nominal del orificio marcado en el cuerpo</i>
1/4	pequeño	1.3/1.5	25	½ pulg NPT	Sí	Sí
5/16	pequeño	1.8/2.0	33.3	½ pulg NPT	Sí	Sí
3/8	pequeño	2.6/2.9	50	½ pulg NPT	Sí	Sí
7/16	pequeño	4.0/4.4	75	½ pulg NPT	Sí	Sí
1/2	normal	5.3/5.8	100	½ pulg NPT	No	No
17/32	grande	7.4/8.2	140	½ pulg NPT o ¼ pulg NPT	No Sí	No Sí

Unidades SI: $Q_m = K_m P_m$ siendo Q_m = gasto en l/min, P_m presión en bars y $K_m = 14K$.

*El factor K es la constante de la fórmula $Q = KP$, siendo Q el caudal en gpm y P la presión en psi.

3.3.5.8 Rociadores para tolvas batantes

Tienen un pequeño deflector liso que impide que se acumulen las pelusas y otras fibras en el rociador cuando están montados en el interior de conductos o espacios cerrados donde se transporta la materia prima textil en suspensión por medio de corriente de aire. Más importante que la configuración de la descarga es impedir que se produzcan obstrucciones en los rociadores o una fragmentación general del corro de agua.

3.3.5.8 Rociadores de nivel intermedio

Los rociadores de nivel intermedio o de pantalla, a veces denominados rociadores para almacenes en estanterías, incorporan grandes discos (pantallas) para proteger el elemento termosensible del impacto de la pulverización de los rociadores situados a un nivel superior. Sin discos protectores de agua podría enfriar el elemento y retardar la activación.

3.4 Sistemas de mangueras y tomas fijas de agua

Mientras haya edificios, habrá incendios en los edificios y habrá la necesidad de equipos para extinguirlos. En los edificios altos y de gran superficie, entre tales equipos tendrá que haber tomas fijas de agua, aumentando así de manera significativa la eficacia de las operaciones de lucha manual contra el fuego. Incluso en los edificios altos y de gran superficie protegidos con sistemas de rociadores automáticos, las tomas fijas de agua desempeñan un papel esencial en la seguridad del edificio, pues sirven de complemento y respaldo a los rociadores.

3.4.1 Consideraciones de diseño de las tomas fijas de agua

Todos los sistemas basados en tomas fijas de agua tienen el objetivo común de suministrar agua para la lucha manual contra el fuego. Sin embargo, sus características pueden ser muy distintas.

El proceso de proyecto empieza por determinar para qué se va a usar el sistema, es decir, si es para luchar contra todo tipo de fuegos, o sólo como ayuda inicial o amabas funciones. Estos tres usos corresponden a tres categorías de sistemas de tomas fijas, o “clases”, como suelen conocerse.

3.4.1.1 Clases de sistemas

Las tres clases de sistemas de tomas fijas de agua son la Clase I, Clase II y Clase III. Alguna documentación incluye una cuarta clase o “sistema combinado”, que incluye sistemas de Clase I o Clase III que abastecen de agua además a un sistema de rociadores.


- ✚ **Sistemas de Clase I:** Tienen conexiones para mangueras de 2 ½ pulgadas (64 mm) en determinados lugares de un edificio, con el fin de facilitar una total intervención contra incendios. Estos sistemas están proyectados generalmente para ser utilizados por los bomberos.

Los sistemas de Clase I están exigidos en general en edificios de más de tres pisos de altura, estén o no protegidos por rociadores.

- ✚ **Los sistemas de Clase II:** Tiene conexiones para mangueras de 1 ½ pulgadas (38 mm) en determinados lugares del edificio, para proporcionar una primera ayuda en caso de incendio. Estos sistemas están proyectados generalmente para ser utilizados por las brigadas de incendios y en última instancia por los ocupantes del edificio, hasta que llegan los bomberos.

Los sistemas de Clase II son generalmente obligatorios en edificios grandes que no tienen instalados sistemas de rociadores.

Actualmente, muchos de los servicios de bomberos no están de acuerdo en que se les instalen sistemas de tomas fijas para uso por los ocupantes de un edificio, debido a que son necesarias personas bien entrenadas para que puedan manejar con seguridad mangueras de 30.5 m (100 pies) capaces de lanzar 378 l/min (100 gpm) y cuya existencia fomenta la actuación de los ocupantes en la lucha contra el fuego, en vez de la evacuación del edificio. Por este motivo, es cada vez menos frecuente el uso de los sistemas de Clase II.

 **Sistemas de Clase III:** Reúnen características de los sistemas de Clase I y Clases II. Están proyectados tanto como primera ayuda en caso de incendio como para luchar contra el fuego.

Debido a sus múltiples usos, los sistemas de Clase III pueden tener conexiones para mangueras como los de Clase I y los de Clase II. Es decir, a veces tienen válvulas de conexión de 2 ½ pulgadas (64 mm) con adaptadores de 2 ½ pulgadas a 1 ½ pulgadas (38 mm), fácilmente desmontables, sujetos con una cadena a las conexiones principales. Como los sistemas de Clase I, los sistemas de Clase III se usan cada vez menos debido a la preocupación, por razones de seguridad, de que los ocupantes sin entrenamiento intentasen luchar contra el fuego.

3.4.1.2 Necesidades de abastecimiento de agua

Una vez establecida la clase de sistema, la característica más crítica que hay que determinar es el abastecimiento de agua. Antes de ello, el proyectista debe evaluar cuánta agua necesitará el sistema y a qué presión. Los requisitos mínimos de caudal y presión se conocen como “demanda del sistema”.

Demanda del Sistema

La demanda de un sistema de tomas fijas de agua es función de varias variables:

1. El caudal y la presión en la conexión más remota de las mangueras.
2. El caudal necesario para otras tomas adicionales.
3. El agua necesaria para los sistemas de rociadores que dependerán de las mismas tuberías.
4. Las pérdidas de carga por variación de altura.

Según la edición de 1990 de la NFPA 14, Norma para la instalación de tomas fijas y sistemas de mangueras (Installation of Standpipe and Hose Systems), los sistemas de Clase I y Clase III deben

de ser capaces de proporcionar 500 gpm (1893 l/min) para la primera toma fija más 250 gpm (947 l/min) para cada toma adicional, hasta un máximo de 2500 gpm (9463 l/min). Esta norma exige también que el abastecimiento de agua sea capaz de proporcionar el caudal mínimo durante 30 minutos. Además, la NFPA 14 exige que el abastecimiento de agua para los sistemas de clase I y III sea capaz de suministrar una presión residual de 65 psi (448 kPa) en la conexión hidráulica más alta de cada toma fija. Para los sistemas de Clase II, la NFPA exige que el abastecimiento de agua pueda proporcionar 100 gpm (378 l/min) durante 30 min, con una presión residual de 65 psi (448 kPa) en la conexión hidráulica más remota, con un caudal de 100 gpm.

Para compensar las pérdidas de carga que se producen en las mangueras, la presión de proyecto en las conexiones de manguera debe aumentar por lo menos en 25 psi (172 kPa), pérdida de carga que resulta adecuada en mangueras forradas de goma de 200 pies (61 m) de longitud y 2 ½ pulgadas de diámetro, con un caudal de 250 gpm; en mangueras forradas de goma, de 200 pies de longitud y 2 pulgadas (51 mm) de diámetro, con un caudal de 125 gpm (472 l/min) o de 150 pies (46 m) de longitud y 1 ¾ pulgadas (45 mm) de diámetro, con un caudal de unos 100 gpm (379 l/min).

Tipos de abastecimiento de agua

Los sistemas de tomas fijas de agua requieren como mínimo un sistema de abastecimiento capaz de proporcionar agua suficiente para la demanda hidráulica del sistema, durante un periodo mínimo establecido. Hay varios sistemas de abastecimiento que cumplen estos requisitos:

1. Sistemas de abastecimiento público, con bombas de refuerzo si son necesarias mayores presiones.
2. Bombas contra incendios conectadas a una fuente fiable de abastecimiento.
3. Depósitos de presión.
4. Depósitos de gravedad.
5. Autobombas del servicio de bomberos, con acceso a una fuente de suministro fiable.

El principal requerimiento, al elegir cualquier sistema de abastecimiento, es si la fuente de abastecimiento capaz de satisfacer la demanda del sistema debe ser permanente o si basta con las autobombas de los bomberos. Los sistemas de tomas fijas deben de tener fuentes de abastecimiento permanente cuando están proyectados para ser utilizados antes de que lleguen los bomberos, como los de Clase I y Clase III con mangueras preconectadas.

Aunque se disponga de una fuente de abastecimiento de agua permanente, en los sistemas de toma fija de agua Clase I y Clase III se debe instalar por los menos una conexión para los bomberos si el sistema protege zonas a las que llegue fácilmente el agua bombeada por las autobombas.

La medida en la que un sistema requiera una fuente de abastecimiento de agua que supere el alcance de las autobombas de los bomberos depende del tipo de bombas y la presión residual que tenga el sistema. Esto se puede calcular según la siguiente fórmula:

$$AP + RS = SD$$

Donde:

AP= presión de la autobomba al caudal de demanda del sistema

RS= presión residual de la red de abastecimiento pública o privada al caudal de demanda del sistema

SD= Presión de demanda del sistema (calculada en la autobomba) al caudal de demanda del sistema.

Como norma, los sistemas que protegen zonas situadas más de 122 m (400 pies) por encima del nivel más bajo de acceso del servicio contra incendios, se deben evaluar para determinar si puede llegar el agua bombeada por las autobombas de los bomberos.

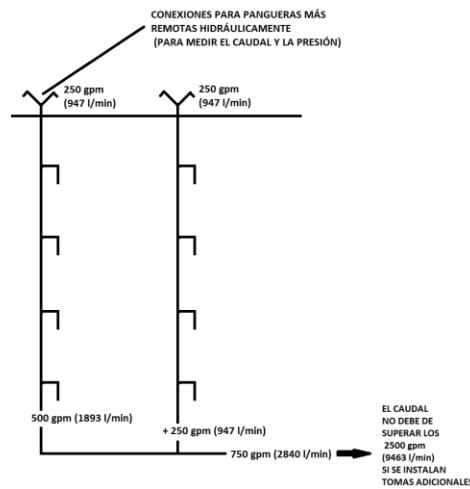


Fig. 3.14 Necesidades básicas de caudal para sistemas de tomas fijas de Clase I y Clase III en edificios sin rociadores

3.4.1.3 Componentes del sistema

La elección de los componentes de un sistema de tomas fijas de agua viene determinada en gran medida por la clase del sistema y su disposición.

Tuberías y conexiones

Las tuberías más corrientes suelen ser de acero con uniones soldadas, a rosca, a brida, con unión de goma o con cualquier combinación de ellas. Las tuberías deben de soportar las presiones máximas que maneje el sistema.

Las conexiones deben de soportar la mayor de las siguientes presiones: 175 psi (1207 kPa) o la presión máxima que se produzca en el sistema. Si se espera que esta presión supere los 175 psi, hay que montar conexiones extrafuertes o capaces de soportar presiones nominales hasta de 300 psi (2068 kPa). Si la presión del sistema supera los 300 psi, hay que montar conexiones especiales.

Mangueras, bastidores, boquillas y armarios para mangueras

Cuando haya que instalar mangueras preconectadas en sistemas de Clase II y Clase III, se deben emplear mangueras forradas. Generalmente se instalarán mangueras de 1 ½ pulgadas (38 mm). Sin embargo, la NFPA 14, Norma para la instalación de tomas fijas de agua y sistemas de mangueras (Installation of Standpipe and Hose Systems), permite la instalación de mangueras de menor diámetro en edificios de riesgo ligero, siempre que lo apruebe la autoridad competente.

Las mangueras preconectadas en sistemas de Clase II y Clase III se limitan generalmente a una longitud de 30.5 m (100 pies), para evitar dificultades si se tienen que usar por personas poco entrenadas, evitando el golpe debido a la presión.

Las mangueras preconectadas deben estar equipadas con boquillas abiertas y homologadas de 3/8 o 1/2 pulgadas (10 o 13 mm), o boquillas de chorro variable; solido/pulverizada. Es preferible usar boquillas que funcionen adecuadamente con presiones del orden de 50 psi (345 kPa), para que las conexiones se puedan mantener permanentemente a esta presión y las mangueras puedan ser manejadas por los ocupantes.

Válvulas y dispositivos reguladores de presión: Los sistemas de tomas fijas de agua están compuestos por diferentes tipos de válvulas, como válvulas de compuerta, de retención y de manguera. Las válvulas reguladoras de presión. Las válvulas y reguladores de presión deben de ser capaces de soportar las presiones máximas que se puedan crear en el sistema.

Hay que instalar válvulas de compuerta en las conexiones con todas las tomas fijas de agua, para que estas se puedan revisar independientemente sin alterar el paso del agua por el sistema general.

También se deben de instalar válvulas de drenaje para vaciar cada toma fija o todo el sistema. Por último, todas las salidas de un sistema de tomas fijas de agua deben terminar en una válvula para manguera, en una válvula reguladora de un sistema de rociadores o en una combinación de ambas.

Los dispositivos reguladores de presión se usan para limitar la presión de descarga del sistema. Pueden ser de tres tipos básicos:

1. **Limitadores de presión.** Reducen la presión del sistema mientras circula agua, pero no compensan los cambios que se produzcan en la presión de entrada por lo tanto no

mantienen constante la presión de descarga, por lo que no controlan la presión en condiciones estáticas.

2. **Reguladores de presión.** Los dispositivos preferidos para regular la presión excesiva son las válvulas reguladoras, diseñadas para que regulen la presión de descarga. Suelen ser de dos tipos:
 - a. Las que regulan sólo la presión en condiciones dinámicas.
 - b. Las que regulan en condiciones estáticas y dinámicas.

Estas últimas son más adecuadas para los sistemas de tomas fijas de agua, porque las mangueras y los rociadores conectados a las tomas fijas están expuestos a variaciones de presión estáticas y dinámicas, cualquiera de las cuales puede afectar a los equipos y poner en peligro a los usuarios.

3. **Alivio de presión.** Cuando las presiones del sistema son muy altas, las válvulas de alivio de presión, que reducen la presión descargando agua a un sistema de drenaje, pueden ir dotadas de un sistema de reserva consistente en una válvula reguladora. Las válvulas de alivio son generalmente de dos tipos:
 - a. De muelle
 - b. Piloto

Son preferibles las últimas debido a que responden con mayor rapidez a los cambios de presión del sistema, aunque requieren de mayor mantenimiento para evitar la acumulación excesiva de suciedad en los filtros.

Conexiones para el servicio de bomberos

Los sistemas de Clase I y Clase III deben tener conexiones para el servicio de bomberos. En algunos casos pueden ser la única conexión y en otros servir como sistema auxiliar.

Como norma general, la mayoría de las conexiones tiene una entrada de 2 ½ pulgadas (64 mm) para un caudal de 250 gpm (947 l/min).

Dispositivos de vigilancia y supervisión del sistema

Hay que instalar dispositivos que permitan vigilar la presión y supervisar las válvulas reguladoras. La presión del sistema se puede vigilar mediante manómetros instalados en las acometidas de los diversos sistemas y en la parte superior de cada toma fija.

3.4.1.4 Tipos de Sistema

Los códigos y normas se refieren generalmente a dos tipos de sistemas de tomas de agua:

1. **Sistemas de tubería húmeda.** Por definición un sistema de tubería húmeda es al mismo tiempo el que tiene todas las tuberías llenas de agua y el que requiere una fuente de abastecimiento permanente capaz de satisfacer la demanda del sistema. Estos sistemas son más fiables que los de tubería seca que, como su nombre indica, mantienen las tuberías vacías de agua y es más difícil detectar las fugas.
2. **Sistemas de tubería seca.** Pueden o no estar conectados a una fuente de abastecimiento capaz de satisfacer la demanda del sistema y sus tuberías pueden o no estar llenas de agua.

Los 3 tipos de sistemas de tubería seca más corrientes son:

- a. Sistemas cuyas tuberías están normalmente llenas de aire y que pueden admitir agua automáticamente a través de una válvula seca o de otro dispositivo aprobado. Se pueden utilizar cuando es necesaria una fuente permanente de abastecimiento del sistema, pero las tuberías se pueden congelar.
- b. Sistemas cuyas tuberías están normalmente llenas de aire, dispuestas de modo que pueden admitir agua mediante el funcionamiento manual de un dispositivo remoto aprobado, situado en los puestos de mangueras. En este tipo de sistemas hay que poner especial atención a que los mecanismos de control sean fiables. Se pueden ocupar en los mismos casos que los anteriores y al igual las tuberías se pueden congelar.
- c. Sistemas con tuberías que pueden estar llenas de aire o agua, pero que no están conectadas directamente a una fuente de abastecimiento capaz de satisfacer las demandas del sistema. Estos sistemas se utilizan generalmente con el agua proveniente de las autobombas de los bomberos. Se pueden ocupar cuando no es necesaria una fuente de abastecimiento del sistema. Si estos sistemas no están expuestos a congelación, es preferible mantener las tuberías llenas para evitar cualquier fuga.

3.4.2 Sistemas de mangueras exteriores

Los sistemas de mangueras exteriores son complementarios a los de abastecimiento normal de agua. Son similares a los de tomas fijas, pues ofrecen un medio eficaz de aplicar agua al fuego. Aunque no están regulados por los códigos de construcción o contra incendios, pueden ser requeridos por compañías de seguros o por propietarios que deseen una mayor seguridad para minimizar las consecuencias de un incendio. Estos sistemas se encuentran por lo general en zonas industriales y como requieren normalmente equipos para lanzar gran volumen de agua, su

instalación o uso sólo lo debe de hacer personal debidamente entrenado. Estos sistemas constan normalmente de hidrantes en patios o zonas abiertas, estratégicamente situados alrededor de los edificios. Junto a éstos se almacenan, en lugares adecuados, mangueras y otros accesorios para caso de incendio, también puede haber puestos de mangueras o conexiones en los tejados si son lugares propicios a que se declare algún incendio.

3.5 Sistemas de Aspersores de agua

El término “agua pulverizada” se refiere al empleo de agua lanzada de una forma especial, con unas dimensiones de partícula, una velocidad y una densidad de pulverización determinadas y que se descarga por aparatos y boquillas especiales diseñadas para este fin.

La descarga por boquilla es, por lo general, distinta de la de los rociadores. El “modelo” de pulverización de agua de una boquilla sobre una superficie puede ser elíptico o circular, mientras que la sección del chorro de agua es cónica. El agua lanzada con fuerza sobre el objeto o superficie que se quiere proteger. Esta agua debe salvar la distancia entre la boquilla y el objetivo, compensar la fuerza del viento y las corrientes y llegar con eficacia a la superficie que hay que proteger. Otros elementos esenciales de esta operación son la densidad de descarga en galones por minuto entre pie² y la posibilidad de cubrir completamente la zona para proteger todos los elementos esenciales.

A diferencia de la mayoría de los sistemas e rociadores automáticos, los de aspersores de agua son de tipo diluvio o inundación total. Las boquillas pulverizadoras no están dotadas de elementos fusibles.

Las boquillas pulverizadoras pueden ir equipadas con válvulas internas de presión o con tapones o cubiertas desmontables o rompibles que se quitan automáticamente cuando empieza a funcionar el sistema. Las válvulas de presión, los tapones o las cubiertas evitan que penetren en las tuberías gases corrosivos y además se utilizan para mantener llenas las tuberías, de modo que el sistema se ponga en marcha con más rapidez.

3.5.1 Uso de los aspersores de agua

El agua asperjada puede emplearse eficazmente para cualquiera de los siguientes fines o una combinación de ellos:

1. Extinción del fuego.
2. Control del fuego.
3. Protección contra fuegos externos.

4. Prevención del fuego.

3.5.1.1 Extinción

La extinción del fuego por medio de agua pulverizada se logra por enfriamiento, sofocación (por el vapor producido), por emulsionamiento de alguno de los líquidos, por dilución en algunos casos, o por una combinación de todos estos factores.

3.5.1.2 Control del fuego

El control del fuego, con la consecuente limitación de su propagación, puede ser un objeto cuando los materiales incendiados no pueden ser extinguidos por la acción del agua pulverizada o cuando no se desease su total extinción.

3.5.1.3 Protección contra fuegos externos

La protección contra fuegos externos se logra por medio de la aplicación directa de agua pulverizada a las estructuras expuestas o al equipo cercano al incendio, para eliminar o reducir el calor que el foco de fuego les transmite. Las cortinas de agua pulverizada instaladas a cierta distancia de la superficie expuesta son menos efectivas que la aplicación directa.

3.5.1.4 Prevención del Fuego

A veces es posible prevenir o impedir que se produzca un incendio empleando cortinas de agua pulverizada para disolver, diluir, dispersar o enfriar materiales inflamables.

3.5.2 Aplicaciones de los sistemas de aspersores agua

La protección por medio de aspersores de agua se emplea para uno o más de los fines de indicados en los párrafos anteriores y se aplica usualmente a los materiales y equipos que se sitan a continuación:

1. Materiales combustibles ordinarios, tales como papel, madera y tejidos, especialmente para extinguir fuegos de estos materiales.
2. Instalaciones de equipos eléctricos tales como transmisores, interruptores en baño de aceite y maquinaria eléctrica rotativa.
3. Líquidos y gases inflamables, especialmente para controlar los fuegos de estos materiales y para extinguir determinados tipos de incendios de líquidos combustibles.

4. Depósitos de gases y líquidos inflamables, equipos de procesos industriales y estructuras, protección de estas instalaciones contra fuegos exteriores.
5. Bandejas de cables y rozas, conteniendo cables eléctricos o tubos en bandejas o rozas abiertas.

Los sistemas fijos de agua pulverizada están especialmente proyectados para ofrecer una protección óptima, controlar y extinguir el incendio cuando existan problemas especiales de protección frente a fuegos exteriores. Los sistemas de aspersores fijos no pretenden reemplazar a los rociadores automáticos. Pueden ser independientes o complementar otras formas de protección. Existen limitaciones con respecto al empleo de agua pulverizada, tales como las propiedades y características químicas y físicas de los materiales al entorno de los riesgos o peligros.

3.5.3 Sistemas fijos de aspersores

Los sistemas de aspersores consisten en un sistema de tuberías especiales, fijas, conectadas a un suministro seguro de agua contra incendios y provista de lanzas o boquillas de pulverización para la descarga específica de agua y su distribución sobre la superficie que se desee proteger. El sistema de tuberías está conectado al suministro hidráulico por medio de una válvula que se pone en funcionamiento manual o automáticamente y que da paso al agua.

Las válvulas automáticas de control del gasto de agua para los sistemas de aspersores pueden activarse eléctricamente por medio de equipos automáticos de detección, tales como detectores de calor y gases, circuitos de relés, etc.; o mecánicamente mediante sistemas hidráulicos o neumáticos según el modo operativo de las válvulas individuales.

3.5.3.1 Aplicación de los sistemas

Los sistemas fijos de agua pulverizada se emplean generalmente para proteger tuberías, equipos industriales, depósitos de gases y de líquidos inflamables y equipos eléctricos tales como transformadores, conmutadores o interruptores en bajo de aceite y máquinas eléctricas rotativas. También se usan en aberturas de los suelos y paredes cortafuegos a través de las cuales tienen que pasar cintas transportadoras. El tipo de pulverización de agua necesario para enfrentarse a cada uno de estos casos depende de la naturaleza del riesgo mismo y del fin que se pretenda con esta protección.

La Fig. 3.15 muestra una instalación de agua pulverizada funcionando en pruebas para la protección de recipientes a presión. El sistema de pulverización que se muestra está calculado para que proporcione una humidificación completa de la superficie con una densidad de agua predeterminada, teniendo en cuenta el tipo de boquillas, sus dimensiones y espaciamiento y el suministro de agua disponible. Por regla general no es de esperar ni aconsejable que los sistemas

de aspersores extingan o dominen los incendios de los escapes de gases licuados de petróleo. Sin embargo, el efecto de enfriamiento del agua sobre los depósitos puede reducir la velocidad de combustión y la gravedad de la exposición hasta que el suministro de gas a la zona incendiada se agote o pueda interrumpirse.



Fig. 3.15 Prueba de un sistema de aspersores para la protección de un recipiente a presión

En la Fig. 3.16 se muestra la protección por medio de agua pulverizada para un grupo de transformadores eléctricos de aceite. Debido a los puntos relativamente altos de inflamación y ebullición del aceite de los transformadores, puede esperarse que estos incendios se extingan rápidamente si los sistemas de aspersores están proyectados de manera correcta. No obstante, las superficies metálicas de la carcasa del transformador y los miembros en los que se apoya se deben proteger del calor radiante al mismo tiempo que se apaga el aceite.

3.5.4 Cálculo y proyecto de los sistemas

La ubicación más acertada de las tuberías y las boquillas respecto a la superficie a la que debe aplicarse la pulverización tiene que ser eficaz, se determina principalmente por la disposición y las necesidades de protección de las instalaciones que se desea proteger. Una vez que han quedado establecidos estos criterios pueden determinarse las dimensiones (velocidad de descarga) de las boquillas que van a emplearse, el ángulo del cono de descarga de las boquillas y la presión necesaria de agua.

Lo primero que hay que calcular es la densidad de agua necesaria para extinguir el fuego o para absorber la cantidad de calor previsible que se pueda desprender en la combustión, una vez que esto ha quedado determinado se pueden escoger el tiro de la boquilla que ofrezca la densidad y velocidad adecuada para vencer las corrientes de aire y lanzar el chorro pulverizado sobre el equipo que haya que proteger. Todas las boquillas que se escojan deben proporcionar el ángulo de descarga necesario para cubrir la zona que les corresponda proteger.

La determinación de la densidad de descarga adecuada exige profundos conocimientos de ingeniería y, en el caso de líquidos inflamables o combustibles, depende de distintas características del combustibles tales como presión de vapor, punto de inflamación, solubilidad en

el agua y densidad específica. Este parámetro varía entre 0.2 y 0.5 gpm/pie² (4.1 a 12.2 [l/min]/m²).



Fig. 3.16 Sistema de aspersores para la protección de transformadores

Para la protección de contenedores una densidad de 0.25 gpm/pie² (10.2 [l/min]/m²) proporciona suficiente enfriamiento para una disipación de calor de 6000 Btu/h/pie² (18 W/m²). En el caso de estructuras y equipos tales como bandejas de cableado, transformadores, cintas transportadoras y tendidos de tubería, varía entre 0.1 y 0.3 gpm/pie² (4.1 a 12.2 [l/min]/m²).

Una vez seleccionado el tipo de boquilla, su situación y su espaciamento para que quede cubierta la zona deseada, se hacen los cálculos hidráulicos para establecer las dimensiones correctas de las tuberías y las necesidades de suministro de agua.

Cuando se empleen aspersores de agua para la protección contra incendio de equipos eléctricos que utilicen aceite, tales como transformadores o cableado eléctrico, debe tenerse cuidado en disponer distancia de seguridad respecto a los aparatos eléctricos. Para obtener la alta densidad

de pulverización necesaria, combinada con un buen alcance, una mínima interferencia del viento y un tendido de tuberías simplificado que no quede cerca de los elementos eléctricos en corriente, se han ideado boquillas fijas especiales de pulverización.

3.5.4.1 Dimensión de los sistemas de aspersores de agua

Existen muchos factores que condicionan las dimensiones de los sistemas de aspersores de agua, incluyendo la naturaleza del riesgo y la de los combustibles implicados y la cantidad y tipo de equipo que se desee proteger, la adecuación de otros medios de protección y las dimensiones de las superficies que pudieran verse envueltas en un solo incendio. Las dimensiones del sistema necesario pueden reducirse aprovechando la posible subdivisión del espacio con paredes cortafuegos, limitando la posibilidad de propagación de los líquidos inflamables por medio de diques, bordillos o drenajes especiales y por medio de cortinas de agua o cortinas térmicas o combinando varias de estas características.

Debido a que los sistemas de inundación funcionan con todas las boquillas abiertas al mismo tiempo, y debido a la gran densidad de descarga de agua que muchas veces se requiere, es preciso un suministro cuantioso de agua. Cada riesgo debería protegerse por su propio sistema independiente que tendría que ser adecuado para proporcionar una protección segura.

La norma de aspersores de agua de la NFPA aconseja las dimensiones de cada sistema independiente se limiten, de modo que la velocidad de descarga calculada a las presiones mínimas a las que las boquillas son eficaces no exceda 11356 l/min (3000 gpm). Las zonas de incendios separadas pueden protegerse por medio de sistemas independientes.

3.5.4.2 Suministro de agua

Los sistemas fijos de pulverización suelen alimentarse por medio de uno o varios de los siguientes métodos:

1. Conexiones con sistemas públicos fiables de abastecimiento de agua, a presión y a caudal adecuados.
2. Bombas de incendios automáticas que tengan potencia suficiente y un suministro de agua de capacidad y seguridad adecuadas.
3. Un depósito elevado (por gravedad) con capacidad y elevación suficientes.

La capacidad de los depósitos de presión es generalmente insuficiente para alimentar los sistemas de agua pulverizada. Estos depósitos sin embargo pueden resultar adecuados como suministro de agua para sistemas pequeños, cuyas necesidades de volumen y presión no excedan la capacidad del depósito de presión.

3.5.4.3 Dimensiones de las tuberías

El diámetro de las tuberías debe calcularse específicamente para cada sistema para que las boquillas de pulverización reciban el agua con presión suficiente. Uno de los procedimientos para hacer los cálculos hidráulicos para los sistemas fijos de tuberías para aspersores de agua, se dan en el apéndice de la norma NFPA 15, Norma para sistemas de aspersores fijos para la protección contra incendios (Water-spray Fixed Systems for Fire Protection).

3.5.4.4 Elección y uso de las boquillas de pulverización

Al elegir las boquillas de pulverización hay que tener en cuenta factores tales como el tipo de riesgo que deben proteger, la finalidad del sistema y la posibilidad de que se produzcan fuertes vientos y corrientes.

Las boquillas pulverizadoras de alta velocidad, empleadas generalmente en instalaciones fijas, descargan el agua pulverizada en forma de cono, mientras que las de baja velocidad lanzan un chorro pulverizado mucho más fino en forma de esfera o cono "reellenos" de gotitas.

Algunas boquillas producen la pulverización imprimiendo al chorro de agua un movimiento giratorio al pasar por unas espirales situadas en su interior (Fig. 3.17). Este chorro se mezcla internamente con otro chorro central, de modo que sale por la boquilla un cono de agua pulverizada bastante "macizo". Estas boquillas se conocen como de "choque interno".



Fig. 3.17 Boquilla de pulverización de agua con conductor espiral interno

Otro tipo de boquilla pulverizadora se basa en el principio del deflector, como los rociadores. El orificio por el que sale el agua proyecta un chorro continuo y cilíndrico sobre el deflector, que lo convierte en agua pulverizada en forma más o menos cónica.

Otro tipo distinto de boquilla es la que descarga el agua a lo largo de un eje en espiral, cuyo diámetro disminuyendo. Esto crea una fina capa de agua alrededor de la superficie del cono que forma el chorro y esa capa es la que se convierte en gotitas pulverizadas al salir de la espiral (Fig. 3.18).



Fig. 3.18 Boquilla de pulverización de agua tipo espiral

3.5.5 Sistemas especiales de agua

Se han creado sistemas especiales que aplican agua pulverizada para atender ciertas necesidades particulares de control del fuego.

3.5.5.1 Sistemas de aspersión de agua a velocidad Ultra-Alta

Estos sistemas están destinados a hacer frente a fuegos de propagación extremadamente rápida, que pueden presentarse donde se manipulan propulsores sólidos, productos químicos sensibles y donde exista cualquier tipo de proceso industrial y en las atmósferas ricas en oxígeno (cámaras hipo e hiperbáricas). Las características esenciales de los sistemas de aspersores de agua de velocidad alta y ultra-alta son que llevan instalados detectores de incendios fotoeléctricos, por rayos ultra violeta o infrarrojos, de respuesta rápida y otros controles electrónicos, que accionan unas electroválvulas que dejan que llegue la presión a las boquillas pulverizadoras o, en su caso, producen la pequeña explosión que las pone en marcha.

4 Las Baterías de Separación

4.1 El separador de gas y aceite

El término “separador de aceite y gas” en la terminología petrolera se designa para recipientes a presión usados para separar fluidos, que los pozos de gas y aceite producen, en sus componentes líquidos y gaseosos. La separación es necesaria para la fase de recuperación de los hidrocarburos líquidos, produciendo gas y aceite vendibles, pruebas de pozo, medición y protección de las bombas y compresores.

Los separadores se requieren para proveer corrientes de gas y aceite con ciertas especificaciones para las tuberías de venta, así como también corrientes de agua y sólidos para depósito. Comúnmente, el aceite debe de tener menos del 1% (de volumen) de agua y menos de de 5 lb_m agua / MMPC_{gas}. La corriente de agua debe de tener menos de 29 ppm de aceite para la descarga total en el Golfo de México. La separación por etapas se necesita para maximizar los volúmenes de hidrocarburos líquidos recuperados.

La función principal de una separador de aceite y gas, junto con los métodos de separación. Un recipiente de separación se le puede llamar de las siguientes maneras:

- ✚ Separador de gas y aceite.
- ✚ Separador.
- ✚ Separador de etapa.
- ✚ Trampa.
- ✚ Recipiente deshidratador, tambor de deshidratación, trampa de deshidratación o deshidratador de líquido.
- ✚ Cámara flash, separador flash o trampa flash.
- ✚ Separador por expansión o recipiente de expansión.
- ✚ Depurador (depurador de gas), del tipo húmedo o seco.
- ✚ Filtro (filtro de gas), del tipo húmedo o seco.
- ✚ Separador de filtro.

Los términos “separador de gas y aceite”, “separador”, “separador de etapa” y “trampa” se refieren a separadores de gas y aceite convencionales. Estos recipientes de separación son normalmente usados en las tomas de producción o plataformas cerca de la cabeza del pozo, árbol de válvulas o el tanque de almacenamiento para separar fluidos producidos por los pozos de gas y aceite, y como resultado de ésta separación obtener gas y aceite o gas y líquido. Los separadores deben de ser capaces de manejar “baches” o “tapones” de los fluidos producidos por los pozos.

También son comúnmente diseñados para manejar grandes gastos de aceite que se pudiesen generar en un instante.

Un recipiente deshidratador, tambor o trampa pueden ser usados para remover solamente el agua de los fluidos del pozo o para remover todos los líquidos (agua y aceite) del gas. En el caso del deshidratador de agua es para el uso cerca de la cabeza del pozo, el gas y el petróleo líquido comúnmente se descargan juntos y el agua libre se separa y se descarga del fondo del recipiente.

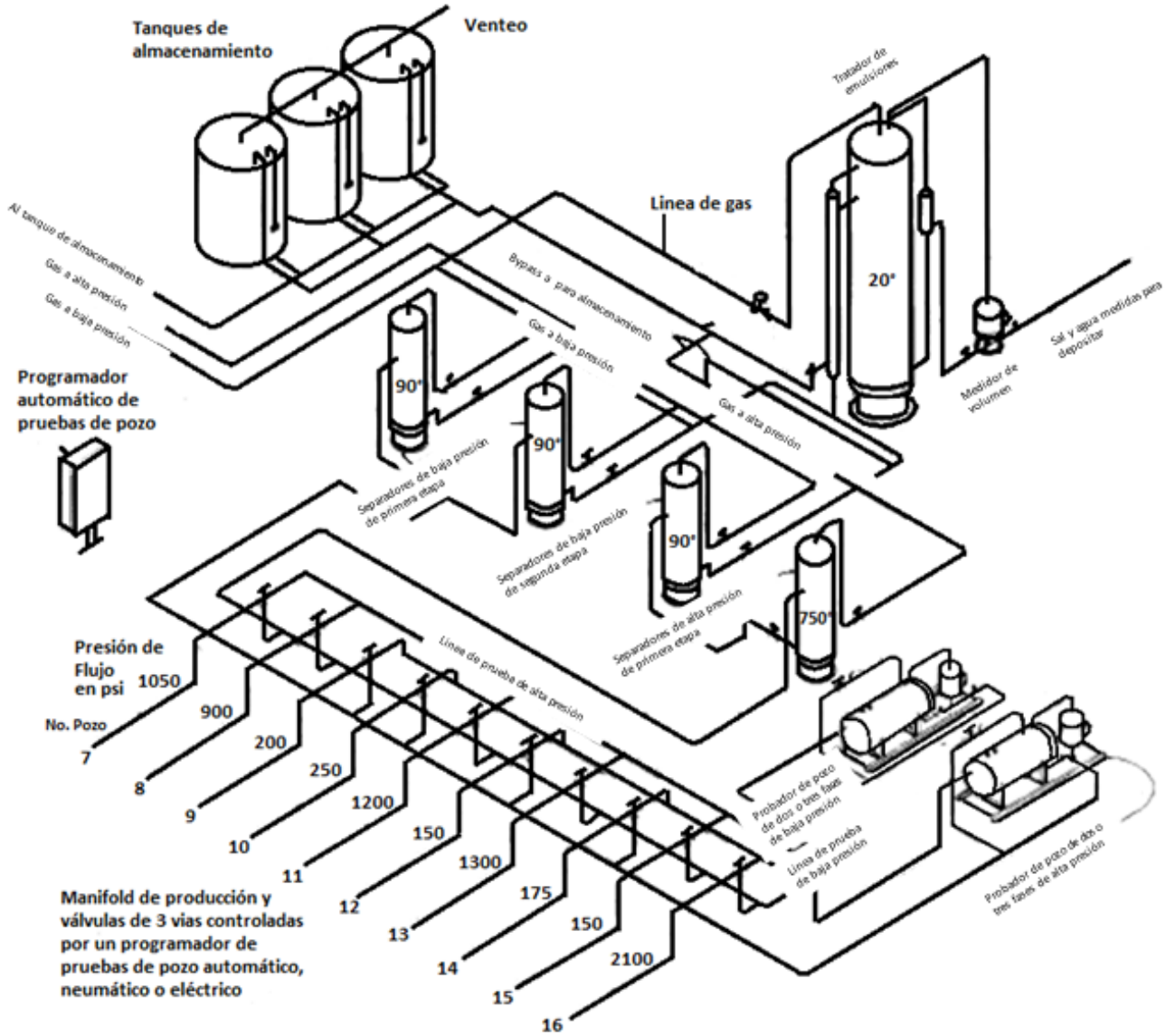


Fig. 4.1 Equipo típico de producción superficial para el manejo de separadores de aceite y separadores de gas y aceite así como otros equipos relacionados

Un deshidratador de líquidos se utiliza para remover todos los líquidos (agua y aceite) del gas. El agua y los hidrocarburos líquidos se descargan juntos del fondo del recipiente y el gas se descarga de la cima del recipiente.

Una cámara flash (trampa o recipiente) normalmente se refiere a separadores convencionales operando a baja presión. Esta cámara flash es casi siempre la segunda o tercera etapa de separación, con el líquido siendo descargado de la cámara flash al tanque de almacenamiento.

Un recipiente de expansión es un separador de primera etapa en una unidad de baja temperatura o separación fría. Este recipiente puede estar equipado con calentadores para derretir los hidratos, o con líquido para la prevención de hidratos (como el glicol) que puede ser inyectado a los fluidos del pozo poco antes de la expansión en el recipiente.

El depurador de gas es similar a un separador de gas y aceite. Comúnmente este maneja fluidos que contienen menor líquido que el que se produce de los pozos de gas y aceite. Se utilizan normalmente en trenes de compresión, recolectores de gas, líneas de venta y distribución donde no se requiere manejar baches o tapones de líquido. Un depurador puede referirse a un recipiente usado corriente arriba de cualquier recipiente o unidad procesadora de gas para proteger el recipiente o unidad corriente debajo de cualquier hidrocarburo líquido y/o agua.

El Filtro (filtro de gas o separador de filtro) se refiere a un separador de gas seco, especialmente si la unidad a ser utilizada se usa principalmente para remover polvo de la corriente de gas.

Un separador de gas y aceite generalmente consiste de los siguientes componentes y rasgos:

- ✚ Un recipiente que incluye un dispositivo o sección de separación primaria; sección secundaria de asentamiento por gravedad; extractor de niebla para remover las pequeñas partículas de líquido del gas; salida de gas; sección de asentamiento del líquido para remover el gas de los líquidos; sección para separar el agua del aceite y para separar los sólidos de los líquidos; y una salida de aceite y una salida de agua.
- ✚ Capacidad adecuada de líquido para manejar los baches de líquido del el pozo y/o de las líneas de flujo.
- ✚ Diámetro adecuado del recipiente y altura o longitud que permita la mayor cantidad de líquido para separarlo del gas y que debido a eso la zona de extracción de niebla no se vea inundada.
- ✚ Medias de control de los niveles de agua y aceite en el separador, las cuales comúnmente incluyen un nivel controlador de líquido y una válvula de control en las salidas del agua y el aceite.
- ✚ Válvula de mantenimiento de presión en la salida del gas, para mantener una presión estacionaria en el recipiente.
- ✚ Dispositivos de alivio de presión.

En la mayoría de los equipos de producción de gas y aceite superficiales, el separador de gas y aceite es el primer recipiente por el cual pasa el fluido del pozo después de dejar el pozo productor.

Comportamiento del separador

El comportamiento de un separador depende de muchos factores, como lo son el flujo, las propiedades de los fluidos, las partes internas, etc. La capacidad de la mayoría de los equipos de separación gas líquido esta dimensionada en la base de la remoción de ciertos tamaños de gota. La principal incógnita es la distribución del tamaño de la gota en el flujo entrante.

La capacidad de líquido de la mayoría de los separadores está dimensionada para proveer el tiempo de retención suficiente para permitir que las burbujas de gas en el líquido se formen y se separen. Más tiempo de retención es necesario para los separadores que están diseñados para separar el agua del aceite, tanto como para separar el gas del líquido (separadores de 3 fases comparados con los separadores de 2 fases).

4.1.1 Partes internas

El mayor factor en el comportamiento del separador son las partes internas que pueden afectar la distribución del flujo, creación de espumas, mezcla y nivel de control. El separador esta generalmente dividido en tres zonas:

- ✚ Entrada,
- ✚ Gravedad/coalescencia y
- ✚ Salida.

A continuación se mencionarán varios tipos de partes internas para las diferentes zonas.

4.1.1.1 Zona de entrada

Algún tipo de dispositivo de entrada es necesario para obtener una gran cantidad de separación de líquido y gas. En la mayoría de los casos, el gas viene en no disuelto en la tubería, entrado a él separador (debido a la pérdida de presión debida al estrangulador o la válvula de control). Por tal motivo la mayor parte del gas está separada del líquido en la zona de entrada. La Fig. 4.2 muestra los típicos arreglos de entrada.

En la actualidad, debido a las espumas y a la necesidad de mayores capacidades, las entradas ciclónicas se han estado convirtiendo en las más ampliamente usadas. Las ventajas de una entrada ciclónica o de vórtice es que permite mayores momentos a la entrada, características

antiespumantes, beneficios en la coalescencia de líquidos, beneficios en el desempeño del gas y grandes niveles de líquido.

Debido al flujo centrífugo, las burbujas grandes de la espuma se rompen y las gotas de líquido se remueven.

Dependiendo del gasto, se puede llegar a necesitar más de un tubo ciclónico para generar una rápida desgasificación del aceite. Esto permite el uso de un tiempo de retención más corto. Sin una entrada ciclónica, la espuma puede ocupar un volumen considerable dentro del separador. Al usar una entrada ciclónica se ya no se toma en cuenta la espuma para el tamaño del separador en el diseño.

Las principales características para buscar una entrada ciclónica se listan a continuación:

- ✚ Gran capacidad de drene de líquido.
- ✚ Baja reentrada de líquido a la fase gaseosa.
- ✚ Bajas fuerzas de rompimiento en la reentrada del líquido al gas.
- ✚ Bajas fuerzas de rompimiento en la fase dispersa en el líquido a su salida.
- ✚ Mínima cantidad de gas a la salida del líquido.

La distribución del flujo, a pesar del tamaño del recipiente, un circuito corto puede resultar en una pobre eficiencia de separación debido a la mala distribución del flujo. Un palto que abarque todo el diámetro permite un flujo más uniforme entre el gas y el líquido.

5.1.1.2 Zona de Gravedad/Coalescencia

Para ayudar en la coalescencia (y rompimiento de espumas), mayas, aspas, etc., son algunas veces colocados en las fases líquida y sólida. Estos mecanismos internos proveen impacto o superficies de rompimiento para la fase dispersa.

Para la coalescencia entre líquidos en separadores de tres fases y otros separadores en los cuales es deseado tener diferentes salidas para líquidos (agua y aceite), los platos proveen menos turbulencia, más flujo laminar y una menor distancia sobre las gotas que se deben asentar. Del mismo modo los platos se colocan para aumentar la desgasificación.

4.1.1.3 Zona de salida

La captura de la niebla puede ocurrir por 3 mecanismos, como se muestra en la Fig. 4.3 Se puede tener en mente que no hay límite entre mecanismos. Como el momento de la una gota varía directamente con la densidad del líquido y el cubo del diámetro, las partículas más grandes o pesadas tienden a resistir la línea de corriente de un gas fluyendo y golpearán objetos en su línea de viaje. Este impacto inercial, es el responsable de la remoción de partículas de diámetro menor a

10 μm . Pequeñas partículas que fluyen en la línea de corriente pueden colisionar con los objetos sólidos si su distancia de aproximación es menor que su radio. Esto es un impacto directo. Como las partículas se vuelven de menor tamaño y la velocidad disminuye, la captura Browniana se vuelve más eficiente. Casi todo el equipo de eliminación de niebla cae en las siguientes cuatro categorías: mayas, aspas, ciclones y camas de fibra.

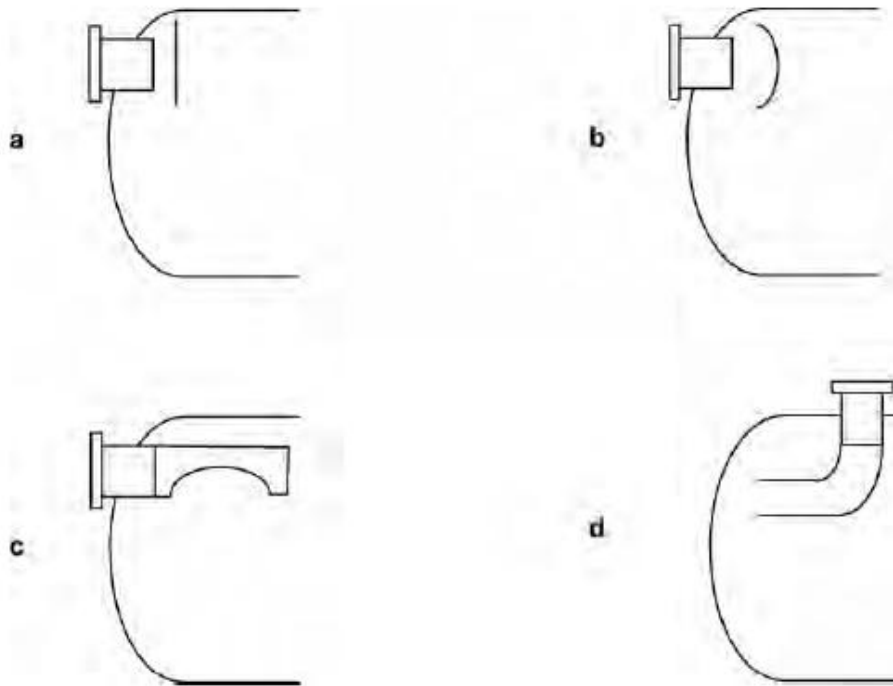


Fig. 4.2 Entradas comúnmente usadas per pueden afectar negativamente la separación: (a) plato de impacto, (b) cabeza de disco, (c) tubería abierta a la mitad y (d) tubería abierta a la pared del recipiente.

Como el vapor pasa acarreado consigo gotitas de líquido, éste pasa a través de de la maya libremente. De cualquier forma, la inercia de las gotitas de líquido causa que ellas hagan contacto con las superficies de los hilos de las mayas, coalescen, y finalmente las gotas se hacen más grandes y se drenan.

Los extractores de niebla del tipo aspa son ampliamente usados en los separadores de gas y aceite. Ellos pueden tener diseños diferentes Fig. 4.4.

Como la corriente de niebla cargada de gas pasa a través de aspas paralelas, forzando a la corriente a cambiar de dirección varias veces. La niebla se separa por las fuerzas centrífugas subsecuentes y se colecta en las navajas de las aspas. Las gotas de líquido coalescen y se drenan a través de garfios o rendijas.

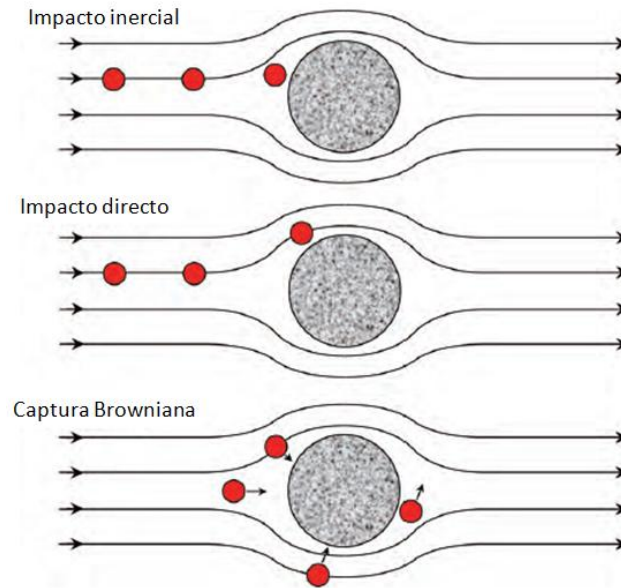


Fig. 4.3 Mecanismos de captura de niebla

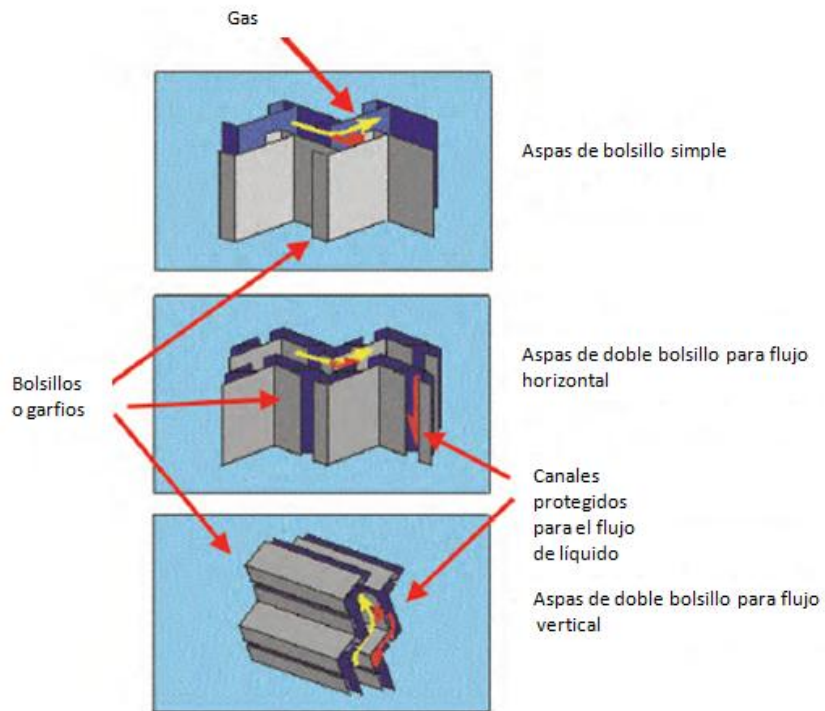


Fig. 4.4 Ejemplos de extractores de niebla tipo aspa

La eficiencia de separación de los extractores de niebla de tipo aspa depende del número de aspás en el elemento, la distancia entre las aspás, el ángulo de las aspás y el tamaño de las partículas de líquido.

Los dispositivos típicamente usados en los recipientes de producción han sido generalmente las mayas y las aspas. De todas maneras, los ciclones de flujo axial se han estado siendo usados con mayor frecuencia debido a sus ventajas: mayor eficiencia a grandes presiones, mayor capacidad gas/líquido, rompimiento de espuma y no obstruyen.

Las camas de fibra utilizadas para eliminar la niebla utilizan diámetros pequeños de fibra (0.02 mm) para capturar las pequeñas gotas. Estas fibras utilizan la difusión Browniana o un mecanismo de impacto para remover las gotas tan pequeñas como los son las de 1 μ m.

4.2 Fluidos del pozo y sus características

4.2.1 Aceite Crudo

Es una mezcla compleja de hidrocarburos producidos en forma líquida. La densidad del American Petroleum Institute (API) del aceite crudo va de los 6 a los 50°API y su viscosidad de los 5 a los 90,000 cp en el rango de las condiciones de operación. Las viscosidades casi siempre menores en el yacimiento. El color varía desde tonos verdes, amarillo, café y negro.

4.2.2 Condensado

Este hidrocarburo puede existir en la formación productora de dos formas, como líquido o como un vapor condensable. La licuefacción de los componentes gaseosos del condensado usualmente ocurre con la reducción de la temperatura del fluido del pozo a condiciones de operación superficiales. Las densidades API de los condensados van en un rango de los 50 a los 120°API y viscosidades de los 2 a los 6 cp a condiciones estándar. El color puede ser blanco agua, amarillo brillante o azul brillante.

4.2.3 Gas Natural

Un gas es una sustancia sin forma o volumen propio. El gas llenará completamente cualquier recipiente en el cual se le coloque y tomará la forma del recipiente que lo contenga. El gas hidrocarburo, asociado con el aceite crudo, se le denomina como gas natural y puede encontrarse como gas libre o gas en solución. El peso específico del gas natural puede variar entre 0.55 y 0.9 y la viscosidad puede ir de 0.01 a 0.024 cp a condiciones estándar.

4.2.4 Gas libre

El gas libre es el hidrocarburo que existe en la fase gaseosa a las presiones y temperaturas de operación. Puede referirse a cualquier gas a cualquier presión que no está en solución o mecánicamente disuelto en el hidrocarburo líquido.

4.2.5 Vapores condensables

Estos hidrocarburos existen como vapor a ciertas presiones y temperaturas y como líquidos a otras presiones y temperaturas.

4.2.6 Agua

El agua producida con el aceite crudo y el gas natural puede ser en la forma de vapor o líquida. El agua líquida puede estar libre o emulsificada.

4.3 Funciones primarias de los separadores de gas y aceite

La separación del aceite del gas puede comenzar cuando el fluido fluye a través de la formación productora hacia el pozo y puede aumentar progresivamente en la tubería, líneas de flujo y el equipo superficial. Bajo ciertas condiciones, el fluido puede ser completamente separado en líquido y gas antes de que llegue al separador. En esos casos, los recipientes de separación ayudan solo como un “alargamiento” que permite que el gas ascienda a una de las salidas y el líquido baje a otra.

4.3.1 Remoción del aceite del gas

La diferencia entre las densidades de los hidrocarburos gaseosos y líquidos puede llevar a una separación aceptable entre el aceite y el gas en un separador de gas y aceite. De todos modos, en algunos casos, es necesario utilizar dispositivos mecánicos comúnmente llamados “extractores de niebla”, para remover la niebla de líquidos del gas antes de que se descargue del separador.

4.3.1.1 Métodos utilizados para remover el aceite del gas en los separadores

La niebla puede ser removida efectivamente de la corriente del gas en un separador de aceite con un buen diseño del extractor de niebla. Los vapores condensables en el gas no pueden ser removidos por los extractores de niebla. La condensación de estos vapores puede producirse reduciendo la temperatura, o puede ocurrir antes de que el gas sea descargado del separador.

Los métodos utilizados para remover el aceite del gas en un separador de gas y aceite, algunos se muestran en la Fig. 4.5, son:

- *Diferencia de densidades.* El gas natural es más ligero que el hidrocarburo líquido. Pequeñas partículas de líquido que están temporalmente suspendidas en la corriente del gas natural se asentarán si la velocidad del gas es suficientemente lenta. Si el líquido posee una densidad de 6 a 10 veces mayor que la del gas, puede indicar que las gotas de líquido se asentarán y se separarán del gas. De todos modos, esto no puede ocurrir cuando las partículas del líquido son demasiado pequeñas y éstas tiendan a flotar en el gas y puede que no se asienten en un periodo corto de tiempo.
- *Impacto.* Una corriente de gas que contiene líquido se impacta contra una superficie. Después de que la niebla coalesce en gotas más grandes, las gotas tiendan a irse a la sección del líquido en el recipiente.
- *Cambio en la dirección de flujo.* Cuando se cambia la dirección del flujo de una corriente de gas que contiene líquido, la inercia causa que el líquido continúe en la dirección original del flujo. La separación del líquido de la corriente de gas ocurre porque el gas asume la dirección de flujo más rápidamente y fluirá lejos de las partículas de líquido suspendidas en él.
- *Cambio de la velocidad del flujo.* La separación del líquido del gas puede ser afectada ya sea por un incremento o decremento en la velocidad del gas. Ambas condiciones usan la diferencia de la inercia entre el gas y líquido. Con un decremento en la velocidad, la mayor inercia del líquido lo acarrea lejos del gas, causando que el líquido se junte en alguna superficie y se dirija a la zona del líquido en el separador. Con un incremento en la velocidad, la mayor inercia del líquido causa que el gas lo lance fuera de la corriente, y el líquido caerá a la sección del líquido del separador.
- *Fuerza centrífuga.* Si la corriente de gas que acarrea líquidos fluye en movimiento circular a una velocidad lo suficientemente alta, la fuerza centrífuga lanzaría las gotas de líquido hacia afuera contra las paredes del contenedor. La fuerza centrífuga es uno de los métodos más efectivos para la separación de las gotas del líquido del gas. La eficiencia de este tipo de extractores de niebla incrementa tanto como lo haga la velocidad de la corriente de gas.
- *Coalescencia.* Los coalescedores aportan medidas efectivas de separación y remoción del líquido de la corriente del gas. Uno de sus usos más apropiados es para la remoción del líquido en el gas en sistemas de transmisión y distribución donde la cantidad de líquido en el gas es baja. Los coalescedores usan una combinación de impacto cambio de dirección,

cambio de velocidad y coalescencia para remover y separa el líquido de la corriente de gas.

- *Filtración*. En algunas aplicaciones los filtros porosos son efectivos para remover el líquido que se encuentra en la corriente de gas. Esto se logra usando los principios antes mencionados.

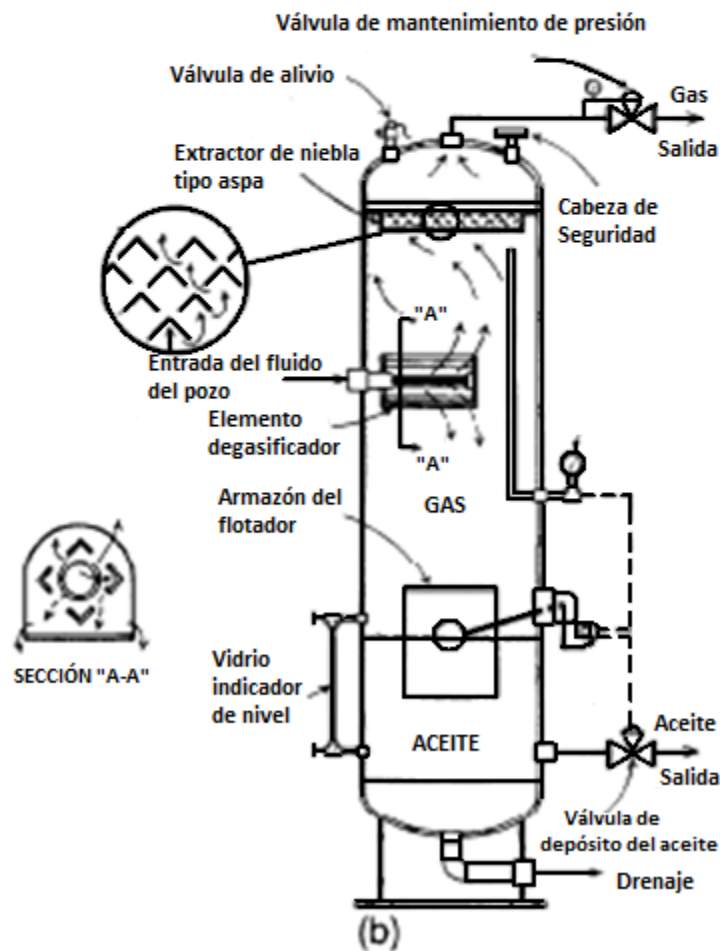
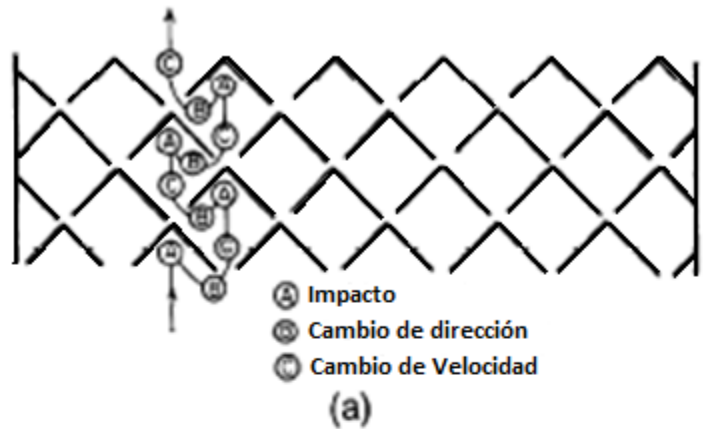


Fig. 4.5 (a) esquema del separador de niebla, (b) esquema de un separador vertical de gas y aceite

4.3.2 Remoción del gas del aceite

Las características físicas y químicas del aceite y las condiciones de presión y temperatura determinan la cantidad de gas que está en solución. El volumen de gas que sea removido del aceite depende de:

1. Características físicas y químicas del aceite.
2. Presión de operación.
3. Temperatura de operación.
4. Gasto de rendimiento.
5. Tamaño y configuración del separador.
6. Otros factores.

4.3.3 Separación del agua del aceite

En algunos casos es preferible separar y remover el agua del fluido del pozo antes de que fluya a través de reducciones de presión, como las que causan las válvulas y los estranguladores. Esta remoción del agua previene inconvenientes, tales como: corrosión, formación de hidratos y la formación de pequeñas emulsiones que pueden ser difíciles de solucionar entre el agua y el aceite.

El agua se puede separar del aceite en separadores de tres fases a través del uso de químicos y separación por gravedad. Si el separador de tres fases no es suficientemente largo para separar el agua adecuadamente, puede ser separado en un deshidratador de agua libre instalado corriente arriba o corriente abajo de los separadores.

4.4 Funciones secundarias de un separador de gas y aceite

4.4.1 Presión óptima de separación

Para completar las funciones primarias de un separador, la presión debe de mantenerse en el separador por eso el líquido y el gas pueden ser descargados en sus respectivos sistemas procesadores o de recolección. La presión se mantiene en el separador a través de uso de una válvula de mantenimiento de presión en la salida del gas de cada separador o con una válvula maestra de mantenimiento de presión que controle la presión en un tren de separación de dos o más separadores (Fig. 4.).

La presión óptima a la que se debe de mantener un separador es la presión que brinde la mayor ganancia económica de la venta de los hidrocarburos líquidos y gaseosos. Esta presión puede ser calculada teóricamente o determinara por pruebas de campo.

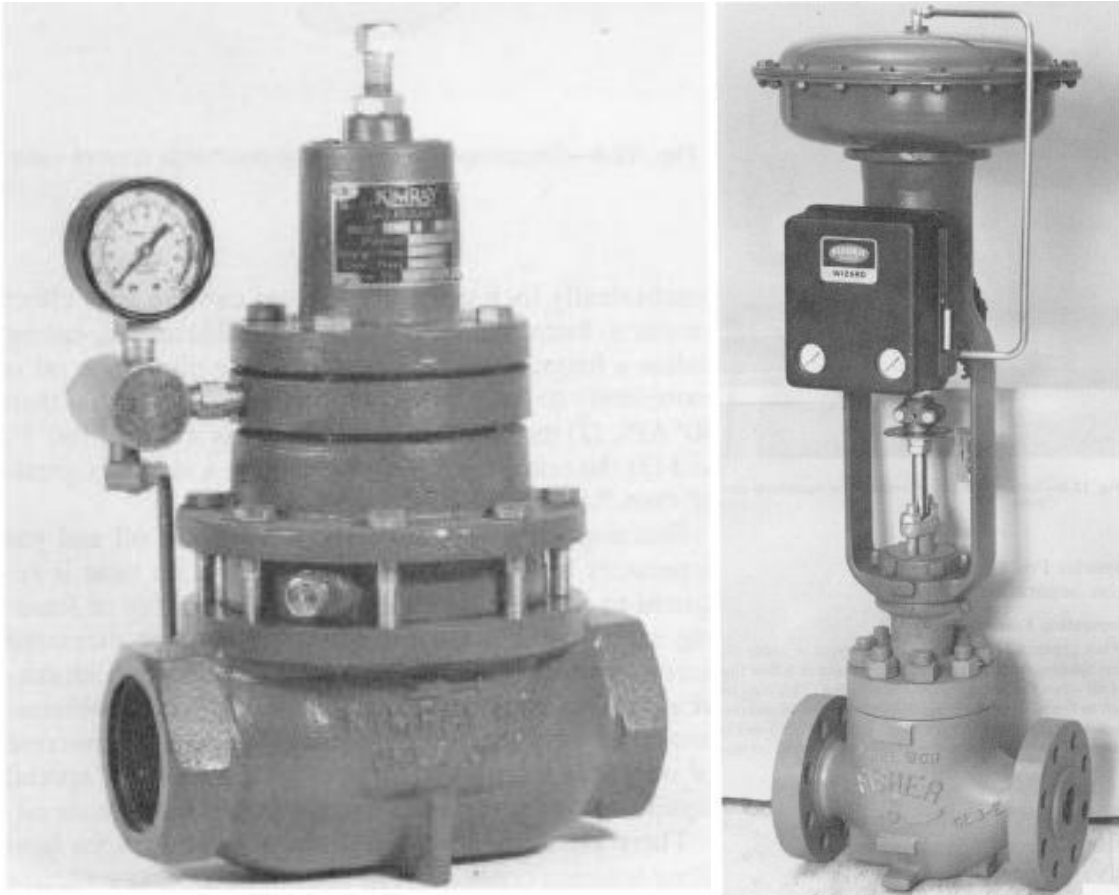


Fig. 4.5 Válvulas de mantenimiento de presión del gas, a la izquierda de baja presión y a la derecha de alta presión.

4.4.2 Mantener el sello de líquido en el separador

Este sello de líquido previene las pérdidas de gas con el aceite y requiere el uso de controladores de nivel de líquido y una válvula similar a la que se muestra en las Fig. 4.6.

4.4.2.1 Controladores de Nivel

Un control estable de las interfaces agua/aceite y gas/aceite es importante para una buena separación.

Comúnmente el espaciamiento entre los diferentes niveles es por lo menos de 4 a 6 pulgadas o un mínimo de 10 a 20 segundos de tiempo de retención. Los niveles más bajos deben también considerar el asentamiento de los sólidos y la sal.

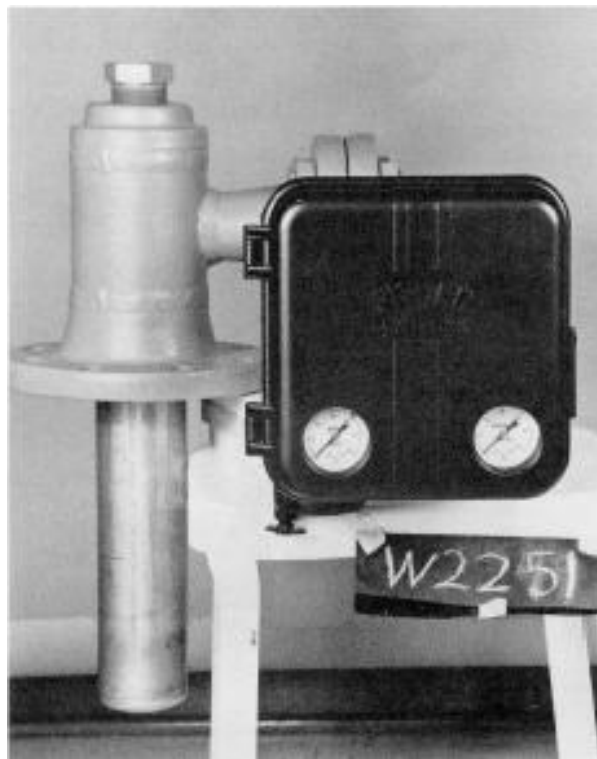


Fig. 4.6 Tubo de torque, controlador de nivel de líquido del tipo de desplazamiento

4.5 Problemas Especiales en la separación de gas y aceite

4.5.1 Formación de Espuma

Cuando la presión se reduce en ciertos tipos de aceite crudo, pequeñas burbujas de gas se encapsulan en una pequeña película de aceite cuando el gas deja de estar disuelto en el aceite. Esto puede producir una espuma, o espumar, dispersándose en el aceite generando la creación de “aceite espumoso”. En otros tipos de aceite crudo, la viscosidad y la tensión superficial del aceite puede bloquear mecánicamente el gas causando un efecto similar al de la espuma. La espuma del aceite no es estable o duradera, a menos que exista un agente espumante en el aceite.

No se sabe a ciencia cierta si el aceite es espumoso. La literatura indica que los ácidos orgánicos pueden ser agentes espumantes. Los aceites pesados y los condensados no presentan formación de espumas.

La creación de espumas reduce en gran medida la capacidad de los separadores de gas y aceite debido al mucho mayor tiempo de retención necesario para separar una cantidad de espuma.

Los principales factores que ayudan al rompimiento de las espumas son el asentamiento, la agitación, el calor, los químicos y las fuerzas centrífugas. Estos factores o métodos para reducir o romper las espumas del aceite han evolucionado.

Los químicos basados en silicones y fluorosilicones son comúnmente usados en conjunto con los ciclones para romper las espumas. El químico desespumante tiene una concentración generalmente en un rango de 5 a 10 ppm, aunque para algunos aceites del Golfo de México, 50 a 100 ppm es lo más común.

4.5.2 Parafinas

El depósito de las parafinas en los separadores de gas y aceite reduce su eficiencia y pueden terminar siendo inoperables debido al depósito de las parafinas llenando las tuberías o bloqueando los extractores de niebla y los lugares por donde pasan los fluidos. Las parafinas pueden ser eficientemente removidas usando vapor o solventes. Otra de las formas de evitar el depósito de las parafinas es cubriendo todas las partes internas del separador con plásticos que eviten su depósito o que no tengan afinidad con las parafinas.

En general, las parafinas en el aceite no son un problema cuando la temperatura está por encima del punto de saturación de las parafinas (temperatura a la cual las parafinas comienzan a cristalizarse). El problema aumenta cuando hay un cierre de producción, cuando el aceite tiene la oportunidad de enfriarse, provocando que las parafinas se cristalicen.

4.5.3 Sólidos y Sal

Si la sal y otros sólidos son continuamente producidos en una cantidad apreciable con los fluidos del pozo, ellos deben de ser removidos antes que los fluidos entren a las tuberías. La sal debe de removerse mezclándole agua al aceite, y después de disolverse en el agua, esta agua puede ser separada del aceite y drenada de los sistemas.

Los separadores verticales están bien diseñados para la remoción de sólidos debido a su pequeña área recolectora. Los separadores horizontales tienen propulsores de arena y boquillas de succión colocados a lo largo del fondo del recipiente, comúnmente cada 5 u 8 pies.

4.5.4 Corrosión

Los fluidos producidos del pozo pueden ser muy corrosivos y causar una falla prematura del equipo. Dos de los elementos más corrosivos son el ácido sulfhídrico y el dióxido de carbono. Estos dos fluidos pueden presentarse en los fluidos del pozo en cantidades que van desde el 40 al 50% de volumen del gas producido en el pozo.

4.5.4 Agitación

Debido a la agitación de las olas en una estructura flotante, puede ocurrir alguna excitación del líquido contenido en el separador, dando como resultado la agitación del fluido interno. Este problema se presenta particularmente en separadores horizontales. La agitación disminuye la eficiencia de separación en lo que va mezclando, creando así una mayor carga de líquido en la línea de gas y pérdida del nivel de control. Por este motivo es necesario el diseño de dispositivos que frenen la agitación.

4.6 Clasificación de los separadores de gas y aceite

4.6.1 Clasificación por configuración

Los separadores de gas y aceite tienen 3 configuraciones generales:

1. **Vertical.** Su tamaño puede variar entre 10 ó 12 pulgadas de diámetro y de 4 a 5 pies en su longitud de tapa a tapa hasta 10 ó 12 pulgadas de diámetro y de 15 a 25 pies en su longitud de tapa a tapa. Los separadores verticales se muestran en las Figs. 4.7 y 4.8.
2. **Horizontal.** Se manufacturan con armazones monotubo o doblotubo. Un monotubo es un armazón cilíndrico y las unidades doblotubo tienen dos armazones cilíndricas paralelas con una encima de la otra. Ambos tipos de armazones pueden utilizarse para separadores de dos o tres fases.
El tamaño de los separadores horizontales puede variar en tamaño desde 10 a 12 pulgadas de diámetro y 60 a 70 pies de longitud tapa a tapa. Un ejemplo de separador horizontal se muestra en la Fig. 4.9.
3. **Esférico.** Se pueden encontrar de 24 a 30 pulgadas hasta 66 a 72 pulgadas de diámetro. Este tipo de separador se muestra en la Fig. 4.10

4.6.2 Clasificación por función

Las tres configuraciones de separadores están disponibles para separadores de dos o tres fases. En los separadores de dos fases el gas se separa del líquido y ambos se descargan a diferentes tuberías. En los separadores de 3 fases, los fluidos del pozo se separan en gas, aceite y agua con estos tres fluidos siendo descargados de manera separada.

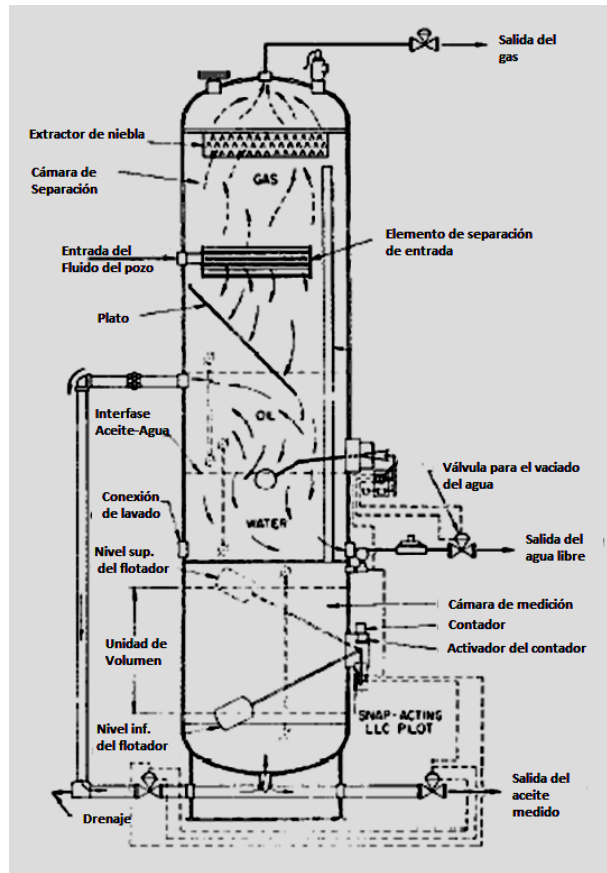


Fig. 4.8 Esquema de un separador vertical de 3 fases

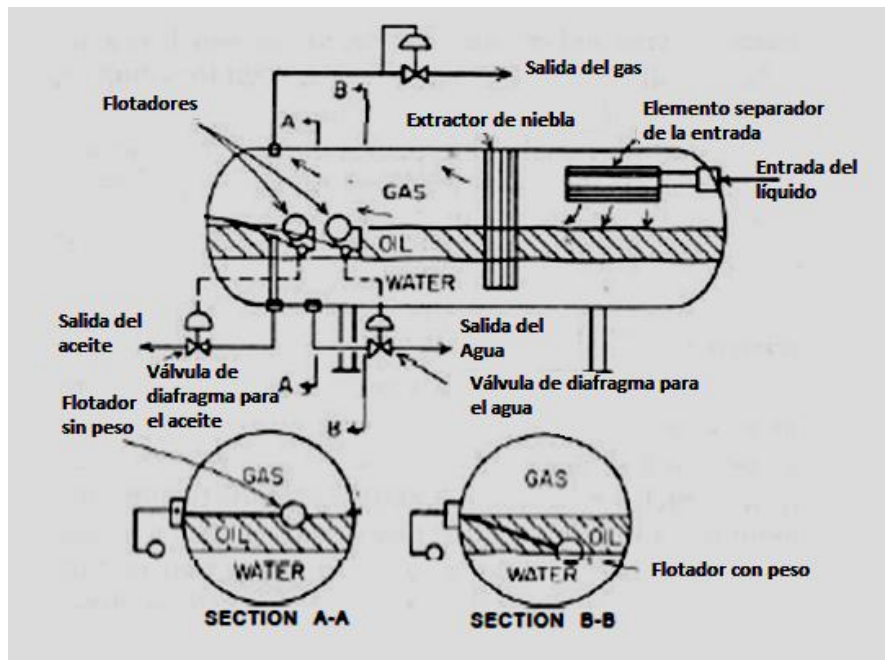


Fig. 4.9 Esquema de un separador horizontal de 3 fases

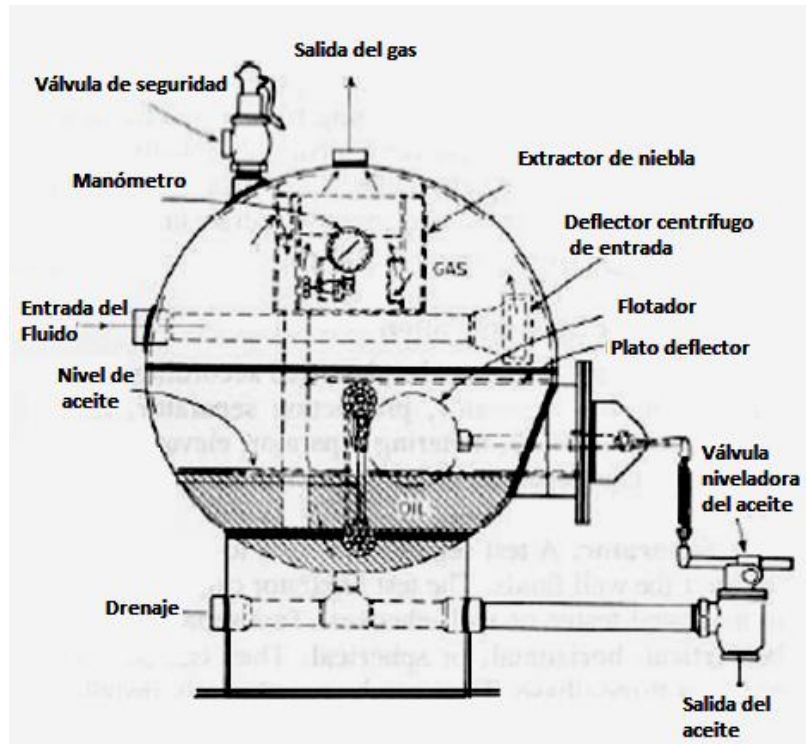


Fig. 4.10 Esquema de un separador esférico de dos fases

4.6.3 Clasificación por presión de operación

Los separadores de gas y aceite pueden operar a presiones en un rango que va desde un gran vacío hasta 4,000 o 5,000 psi. La mayoría de los separadores de gas y aceite funcionan en un rango de 20 a 1,500 psi.

Por su presión de operación se puede referir a los separadores como:

- Baja presión (10-20 hasta 180-225 psi).
- Presión media (230-250 hasta 600-700 psi).
- Alta presión (750-1,500 psi).

4.6.4 Clasificación por aplicación

Los separadores de gas y aceite pueden clasificarse de acuerdo a su aplicación como:

- Separador de prueba
- Separador de producción

- Separador de baja temperatura
- Separador de medición
- Separador elevado
- Separador de etapa (primera etapa, segunda etapa, etc.)

4.7 Dimensionamiento del separador

Los pasos básicos para el diseño se enlistan a continuación:

1. Estimar el diámetro y la longitud con base en los requerimientos del líquido. Las consideraciones del diseño incluyen el tamaño de las gotas a remover, tiempo de retención, coalescedores, volumen de surgencia, niveles y alarmas y movimiento.
2. Calcular el área transversal y la longitud del recipiente. Las consideraciones del diseño incluyen tamaño de las gotas, requerimientos de los eliminadores de niebla y requerimientos de velocidad.
3. Elegir el diámetro y la longitud que satisfaga 1 y 2.
4. Seleccionar el dispositivo de salida e iterar.

Los separadores están dimensionados por la teoría de asentamiento de las gotas o el tiempo de retención para la fase líquida.

4.7.1 Teoría de asentamiento

En el asentamiento por gravedad, la fase dispersa gotas/burbujas se asentarán a una velocidad determinada por la diferencia de la fuerza de gravedad en la gota/burbuja con la fuerza de arrastre causada por su movimiento relativo en la fase continua.

En los separadores horizontales, se puede usar un modelo simple de balística para determinar la relación entre el diámetro del recipiente y la longitud. En separadores verticales, la teoría de asentamiento resulta en una relación para el diámetro del recipiente.

4.7.1.1 Separadores Horizontales

La teoría de asentamiento, usando el modelo de balística, resulta en la siguiente correlación:

$$\frac{L_{eff} d^2 F_g}{h_g} = 421 \frac{T Z Q_g}{P} \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{1/2}$$

Donde:

d = diámetro interno del recipiente, pulgadas;

d_m = diámetro de la gota, μm ;

h_g = altura de la fase gaseosa, pulgadas;

F_g = fracción del área transversal de gas;

L_{eff} = Longitud efectiva del recipiente donde se lleva a cabo la separación, pies;

T = temperatura de operación, °R;

Q_g = gasto de gas, MMPCD;

P = presión de operación, psia;

Z = compresibilidad del gas;

ρ_l = densidad del líquido, lbm/pie^3 ;

ρ_g = densidad del gas, lbm/pie^3 ;

C_D = Coeficiente de arrastre.

Para burbujas o gotas de líquido en la fase líquida:

$$\frac{L_{eff} d^2 F_c}{h_c} = \frac{Q_c}{12} \left[\left(\left| \frac{\rho_c}{\rho_d - \rho_c} \right| \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{1/2}$$

Donde:

d_m = diámetro de la gota, μm ;

h_c = altura de la fase continua de líquido, pulgadas;

F_c = fracción del área transversal de la fase continua;

Q_c = gasto de la fase líquida continua, BPD;

ρ_d = densidad de la fase dispersa de líquido, lbm/pie^3 ;

ρ_g = densidad de la fase continua de líquido, lbm/pie^3 ;

Números de Reynolds bajos, la Ecuación anterior puede reducirse a:

$$h_c = \frac{0.00129 t_{rc} (\Delta\gamma) d_m^2}{\mu_c}$$

Donde:

t_{rc} = tiempo de retención de la fase continua, minutos.

μ_c = viscosidad dinámica de la fase continua, cp.

$\Delta\gamma$ = diferencia entre el peso específico de la fase continua y el de la fase dispersa.

4.7.1.2 Separadores verticales

La teoría de asentamiento se reduce en las siguientes correlaciones. Para gotas de líquido en la fase gaseosa:

$$d^2 = 5,054 \frac{TZQ_g}{P} \left[\left(\left| \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right| \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{1/2}$$

Para burbujas o gotas de líquido en la fase líquida:

$$d^2 = Q_c \left[\left(\left| \frac{\rho_c}{\rho_d - \rho_c} \right| \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{1/2}$$

Asumiendo que el número de Reynolds es bajo, la ecuación puede reducirse a:

$$d^2 = 6,663 \frac{Q_c \mu_c}{(\Delta\gamma) d_m^2}$$

Donde:

d = diámetro interno del recipiente, pulgadas;

d_m = diámetro de la gota, μm ;

h_g = altura de la fase gaseosa, pulgadas;

F_g = fracción del área transversal de gas;

L_{eff} = Longitud efectiva del recipiente donde se lleva a cabo la separación, pies;

T = temperatura de operación, °R;

Q_g = gasto de gas, MMPCD;

Q_c = gasto de la fase continua de líquido, BPD;

P = presión de operación, psia;

Z = compresibilidad del gas;

ρ_l = densidad del líquido, lbm/pie³;

ρ_g = densidad del gas, lbm/pie³;

C_D = Coeficiente de arrastre.

μ_c = viscosidad dinámica de la fase continua, cp.

$\Delta\gamma$ = diferencia entre el peso específico de la fase continua y el de la fase dispersa.

4.7.2 Tamaños de las gotas o burbujas

Si la remoción de las burbujas o gotas se utiliza para dimensionar, consulte la Tabla 4.1 como guía. Dimensionar la fase líquida para la remoción de las gotas de agua es comúnmente poco efectivo. El tiempo de retención para el volumen de la fase de agua está determinado comúnmente a partir de la experiencia.

Las gotas de aceite removidas de la corriente de gas también dependen del equipo corriente abajo. Las balas de fibra están típicamente diseñadas para la remoción de las gotas que tienen un tamaño de cientos de micrones.

Tabla 4.1 Tamaños típicos de gota o de burbuja

<i>Servicio</i>	<i>Tamaño de la gota o burbuja [μm]</i>
Remover gotas de líquido del gas	Tamaño medio: 100-300 Depurador: Mire abajo Filtro: 1
Remover agua del aceite	Tamaño medio: 500 Fino: 50
Remover aceite del agua	Tamaño medio: 100
Remover gas del aceite	Tamaño medio: 200

4.7.3 Tiempo de retención

4.7.3.1 Separadores horizontales

La correlación para el diámetro y la longitud del recipiente está dada por:

$$d^2 L_{eff} = \frac{t_{ro} Q_o + t_{rw} Q_w}{1.4 F_l}$$

Donde:

t_{ro} = tiempo de retención del aceite, minutos;

t_{rw} = tiempo de retención del agua, minutos;

Q_o = gasto de aceite, BPD;

Q_w = gasto de agua, BPD;

F_l = área transversal del recipiente que llena el líquido.

4.7.3.2 Separadores verticales

Similarmente a los recipientes verticales, la correlación para el diámetro del separador y las alturas de los líquidos está dada por:

$$d^2 (h_o + h_w) = \frac{t_{ro} Q_o + t_{rw} Q_w}{0.12}$$

Donde:

h_o = altura del aceite, pulgadas;

h_w = altura del agua, pulgadas.

4.7.4 Dimensionamiento del extractor de niebla

Varios de los extractores de niebla están limitados por una velocidad máxima dada por:

$$V_m = K_d \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}}$$

Donde:

K_d = factor de capacidad del extractor de niebla, pie/s y depende del tipo de extractor;

V_m = velocidad máxima, pie/s;

ρ_l = densidad del líquido, lbm/pie³;

ρ_g = densidad del gas, lbm/pie³.

Para recipientes horizontales, el área del extractor de niebla (A_d) está dada por:

$$A_d = \frac{0.327 \frac{TZQ_g}{P}}{K_d \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}}}$$

Para recipientes verticales, la Ecuación también es válida. El diámetro del recipiente se obtiene como:

$$d^2 = \frac{60 \frac{TZQ_g}{P}}{K_d \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}}}$$

En adición al área del extractor de niebla, se debe de mantener cierta altura entre la parte baja del extractor y el mayor nivel de líquido para el drene del extractor. Existe una caída de presión a lo largo del extractor. Si el nivel de líquido es muy alto, el extractor no va a drenar y el líquido se puede desviar del sifón. Un pequeño agujero algunas veces perforado en la tubería de drene se utiliza para evitar que el líquido se desvíe.

Cuando se utiliza la teoría de asentamiento o el dimensionamiento del extractor de niebla, uno también debe de considerar la velocidad de reentrada para el gas. Una velocidad muy alta del gas puede ocasionar una reentrada del líquido desde su superficie, que podría inundar el extractor de niebla y causar una sobrecarga del líquido.

4.7.5 Longitud de tapa a tapa

4.7.5.1 Separadores horizontales

La longitud tapa a tapa, L_{ss} , del recipiente debe ser determinada por la geometría una vez que el diámetro y la longitud efectiva han sido determinadas. La longitud debe estar repartida para los dispositivos de entrada, extractores de niebla del gas y coalescedores. Para propósitos de escrutinio, se pueden utilizar las siguientes aproximaciones:

$$L_{ss} = L_{eff} + \frac{d}{12} (gas) = \frac{4}{3} L_{eff} (liquido)$$

La relación del largo con respecto al diámetro es comúnmente de 3 a 5 veces.

Donde:

L_{ss} = longitud de tapa a tapa, pies.

L_{eff} = longitud efectiva, pies.

4.7.5.2 Separadores verticales

La longitud de tapa a tapa de un separador debe ser determinada de la geometría, una vez que el diámetro y la altura del volumen de líquido sean conocidas. La distribución debe de hacerse para la boquilla de entrada, el espacio sobre el nivel del líquido, la sección de separación de gas, extractor de niebla y para cualquier espacio por debajo de la salida del agua. Para propósitos de escrutinio, las siguientes aproximaciones pueden hacerse, donde d es el diámetro del recipiente:

$$L_{ss} = \frac{h + \text{diámetro interno de la boquilla} + \text{altura del extractor de niebla} + 54}{12}$$

ó

$$L_{ss} = \frac{h + \text{diámetro interno de la boquilla} + \text{altura del extractor de niebla} + 18}{12}$$

Donde:

L_{ss} = longitud de tapa a tapa, pies.

La relación entre el tamaño y el diámetro es comúnmente de 3 a 5 para separadores de dos fases. Para separadores de 3 fases, la relación se encuentra en el rango de 1.5 a 3.

Se debe dar una consideración especial para la instalación de las partes internas como también al acceso para el personal. El espacio para el acceso debe de asignarse para la instalación del equipo.

4.7.6 Dimensionamiento de las boquillas

Las boquillas son generalmente dimensionadas por momentos o velocidades. La Tabla 4.2 da una guía que puede usarse para el dimensionamiento de las boquillas, donde ρ_m es la densidad bulk y V_m la velocidad bulk.

Tabla 4.2 Guía para el dimensionamiento de las boquillas de entrada y salida

<i>Boquilla de entrada</i>	$\rho_m V_m^2$, <i>lbm/pie-s²</i>
Sin dispositivo de entrada	600-700
Tubería abierta a la mitad	1,000
Aspersor de aspas interno	4,000-6,000
Ciclones internos	6,000-10,000
Boquilla de salida del gas	2,500
Boquillas de salida del agua	Velocidad 2-3 pie/s

5 La Norma NFPA 15: Norma Para los Sistemas Fijos de Aspersores de Agua para la Protección Contra Incendios

5.1 Introducción

Se ha establecido que los recipientes en espacios abiertos a las condiciones promedio de la planta, cuando se ven envueltos por una flama, pueden llegar a tener una tasa de absorción del calor de por lo menos 20000 btu/h/pie² (63000 W/m²) de superficie expuesta que esté humedecida por el contenido del recipiente. No humedecido, el acero en espacios abiertos absorbe el calor rápidamente, ocasionando que se presente una falla en el recipiente por sobrecalentamiento o por sobrepresión, o ambos, cuando dichos equipos se exponen al fuego. La Fig. 5.1 muestra la cantidad de tiempo requerido para que los recipientes se calienten hasta 100°F (38°C) de una temperatura inicial de 70°F (21°C) para tanques contenedores y de 60°F (16°C) para tanques de acero.

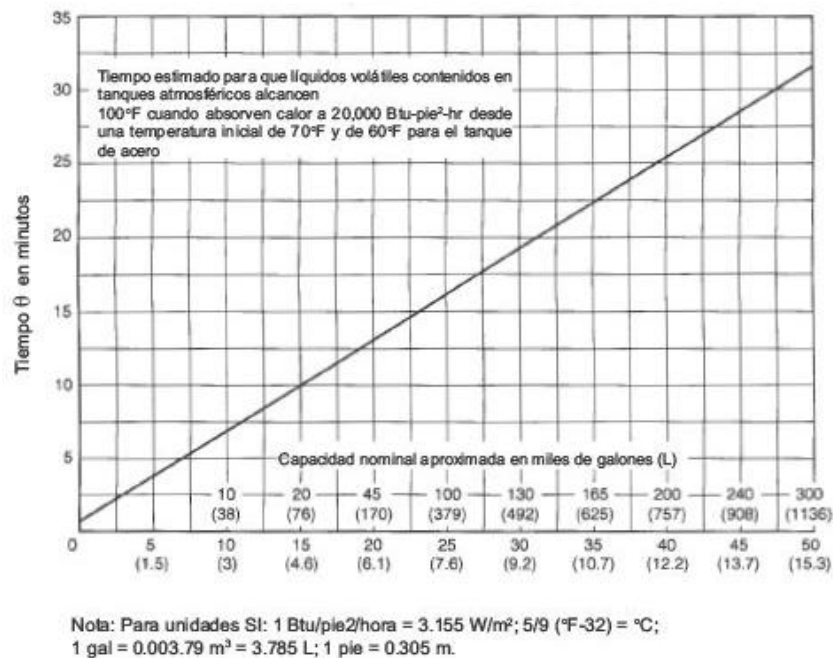


Fig. 5.1 Cantidad de tiempo requerido para que los recipientes se calienten hasta 100°F (38°C) de una temperatura inicial de 70°F (21°C) para tanques contenedores y de 60°F (16°C) para tanques de acero

La aplicación del agua asperjada a un recipiente envuelta por fuego reducirá la tasa de absorción del calor a un valor del orden de 6000 btu/h/pe^2 (18 W/m^2) de superficie expuesta humedecida por su contenido donde el gasto unitario de aplicación sea de 0.20 gpm/pe^2 (8.2 [L/min]/m^2) de superficie expuesta. La Fig. 5.2 muestra el tiempo estimado para que los líquidos volátiles en tanques de almacenamiento al aire libre alcancen su punto de ebullición cuando absorben calor a 6000 btu/h/pe^2 (63000 W/m^2). Este valor puede compararse con la Fig. 5.1 para mostrar los beneficios generados por el uso de un sistema de aspersores de agua.

Cuando se deba de limitar la temperatura del recipiente o de su contenido, una mayor densidad que 0.20 gpm/pe^2 (8.2 [L/min]/m^2) debe de utilizarse.

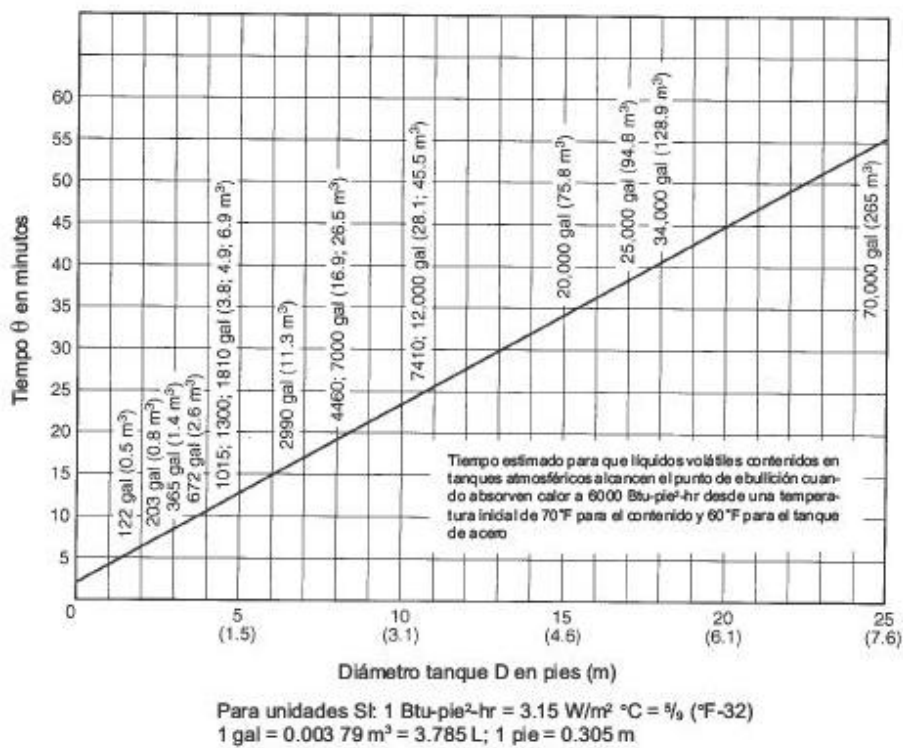


Fig. 5.2 tiempo estimado para que los líquidos volátiles en tanques de almacenamiento al aire libre alcancen su punto de ebullición cuando absorben calor a 6000 btu/h/pe^2 (63000 W/m^2)

5.1.1 Definiciones

Sistema Combinado. Un sistema de tubería que conecta a aspersores y rociadores en un área de incendio común y está alimentada por una tubería simple y una válvula de activación del sistema.

Control del incendio. Aplicación de los aspersores en equipos o áreas donde el fuego puede aparecer para controlar la velocidad de propagación del incendio y de ese modo limitar la liberación de calor del fuego hasta que se elimine el combustible o se extinga.

Deflagración. Propagación de la zona de combustión a una velocidad menor que la velocidad del sonido en el medio que no ha reaccionado.

Equipo de detección:

- ✚ Equipo de detección automática. Equipo que detectará automáticamente un porcentaje en volumen de la concentración de gas inflamable u otras condiciones que pueden generar el fuego u una explosión y causa que se accione automáticamente la alarma y el equipo de protección.
- ✚ Equipo de detección de gases inflamables. Equipo que automáticamente detectará un cierto porcentaje en volumen de la concentración de gas o vapor inflamable con respecto a un nivel relativo predeterminado.

Detonación. Propagación de la zona de combustión a una velocidad mayor que la velocidad del sonido en un medio que no ha reaccionado.

Distanciamiento eléctrico. Distancia al aire entre el equipo de aspersión, incluyendo tubería y boquillas, y los componentes eléctricos descubiertos o expuestos que no están conectados a tierra.

Protección contra exposición. Absorción del calor a través de la aplicación de agua asperjada en estructuras o equipos expuestos al fuego, para limitar la temperatura superficial a un nivel que minimice los daños y prevenga cualquier falla.

Área de incendio. Es un área que está físicamente separada de otras áreas por espacios, barreras u otros medios de modo que se contenga el fuego dentro de esa área.

Líquidos combustibles e inflamables. Los líquidos inflamables incluyen a todos aquellos líquidos que poseen un punto de deflagración por debajo de los 100°F (37.8°C) y posee una presión de vapor que no excede los 40 psia (276 kPa) @ 100°F (37.8°C). Los líquidos inflamables se subdividen de la siguiente forma:

- ✚ Clase I: Líquidos con puntos de deflagración por debajo de los 100°F (37.8°C) y están subdivididos de la siguiente forma:
 - Ⓢ Clase 1A: Incluye los líquidos con punto de deflagración por debajo de los 73°F (22.8°C) y que tienen un punto de inflamación por debajo de los 100°F (37.8°C).
 - Ⓢ Clase 1B: Incluye líquidos que tienen un punto de deflagración por debajo de los 73°F (22.8°C) y un punto de inflamación por arriba de los 100°F (37.8°C).
 - Ⓢ Clase 1C: Líquidos que poseen puntos de deflagración entre 73 y 100°F (22.8 y 37.8°C).

Los combustibles líquidos están incluidos en aquellos líquidos que tienen un punto de deflagración de, o por encima de, 100°F (37.8°C). Y están subdivididos como se muestra a continuación:

- ✚ Clase II: Líquidos con puntos de deflagración entre los 100 y los 140°F (37.8 y 60°C).
- ✚ Clase IIIA: Líquidos con punto de deflagración entre los 140 y los 200°F (60 y 93.3°C).
- ✚ Clase IIIB: Líquidos con punto de deflagración de o por encima de los 200°F (93.3°C).

Impacto. El golpeteo de las gotitas de agua en una superficie protegida que fluyen directamente de las boquillas aspersoras.

Recubrimientos:

- ✚ Recubrimiento. Se refiere a equipos, estructuras o recipientes provistos con un material que los encapsula durante la duración aproximada del incendio, limitará la temperatura del acero a un máximo de 850°F (454°C) para partes de la estructura o 650°F (343 °C) para recipientes. El sistema de recubrimiento debe de ser:
 - Ⓢ No combustible.
 - Ⓢ Resistente al moho y a las condiciones ambientales.
 - Ⓢ Resistentes a los chorros de las mangueras.
 - Ⓢ Asegurada por fuego y contra la corrosión.
- ✚ Expuesta. Se refiere a equipos, estructuras o recipientes que no poseen un material que los encapsule o que cumpla con los requerimientos de recubrimiento.

Gasto neto. Gasto total de la descarga de agua, menos el desperdicio de agua debido a factores como el viento y la falta de precisión en el ángulo de las boquillas.

Rociador piloto. Rociador automático o termo estático utilizado como detector para accionar de forma neumática o hidráulica la válvula de activación del sistema.

Sistema de aspersion de agua a velocidad ultra-alta. Un tipo de sistema de aspersores automáticos donde el agua es rápidamente aplicada para proteger riesgos específicos donde se anticipan las deflagraciones.

- ✚ Sistema de aspersion de agua a velocidad ultra-alta, área de aplicación. La aplicación del agua asperjada a velocidad ultra-alta, sobre un área específica del suelo o sobre el área específica de un objeto.
- ✚ Sistema de aspersion de agua a velocidad ultra-alta, aplicación local. Aplicación del agua asperjada a velocidad ultra-alta, en uno o varios puntos específicos de ignición, así como en operaciones de corte, mezcla o molienda.

Válvula:

- Ⓢ Válvula de inundación. Válvula del tipo de activación del sistema que es abierta por el sistema de detección instalado en las mismas áreas que las boquillas aspersoras o por operación manual suministrando agua a todas las boquillas.

- Ⓢ Válvula de activación del sistema. La válvula principal que controla el flujo de agua dentro del sistema de aspersión.

Agua asperjada. Agua que posee un determinado patrón, tamaño de partícula, velocidad y densidad de descarga según las boquillas o los dispositivos especialmente diseñados.

Boquilla aspersora de agua:

- 🔧 Boquilla aspersora de agua automática. Es una boquilla diseñada para abrir automáticamente a través de un elemento que responde al calor y mantiene el orificio de descarga cerrado por medio del esfuerzo ejercido por la tapa (botón o disco), que cuando se descarga agua a presión, distribuirá el agua en un patrón direccional.
- 🔧 Boquilla aspersora de agua abierta. Dispositivo de descarga de agua abierto, cuando se descarga agua bajo presión distribuirá el agua en un patrón direccional específico.

Sistema aspersor de agua. Es un sistema de tuberías fijas conectado a una fuente de abastecimiento de agua y equipado con boquillas aspersoras de agua diseñadas para proveer una distribución y descarga específica de agua sobre las superficies o áreas protegidas.

Desperdicio de agua. Descarga de las boquillas aspersoras de agua que no se impacta en la superficie que está siendo protegida.

5.2 Requerimientos Generales

En general, el agua asperjada debe de considerarse efectiva para uno o una combinación de los siguientes elementos:

- 🔧 Extinguir el fuego
- 🔧 Controlar el incendio
- 🔧 Protección contra la exposición
- 🔧 Prevención del fuego

5.2.1 Consideraciones especiales





Se debe de realizar un estudio de las propiedades físicas y químicas de los materiales en los cuales se planea utilizar un sistema de aspersores de agua, para determinar la viabilidad de su uso.

El punto de deflagración, peso específico, viscosidad, miscibilidad, solubilidad y permeabilidad del material, temperatura del agua asperjada y la temperatura normal del riesgo, son también factores que deben de tomarse en consideración.

Cuando el agua asperjada pueda encontrarse con materiales confinados a alta temperatura, o que presenten alto grado de destilación, se deben de evaluar los requerimientos y el alto nivel de riesgo.

5.2.1.1 Materiales solubles en el agua

Cuando se protegen materiales solubles en el agua como lo son alcoholes, los sistemas deben de permitir la extinción por:

-  Control
-  Dilución
-  La aplicación adecuada del gasto
-  Cobertura del sistema

Cada material soluble en agua debe de ser probado bajo las condiciones de uso para determinar que tan aplicable es un sistema de aspersión de agua a menos que exista información que brinde soporte al diseño.

El agua asperjada no debe de aplicarse directamente en materiales que reacciones con ella, como algunos metales alcalinos, que producen reacciones violentas o incrementan la emisión de materiales peligrosos como resultado de la emisión de los vapores calientes.

5.2.2 Control del escurrimiento

La descarga de agua de los sistemas aspersores se debe de controlar o contener para prevenir la expansión del fuego donde hay líquidos combustibles o inflamables.

En lugares donde no hay líquidos combustibles o inflamables, el potencial de daño causado por el agua en áreas adyacentes será mínimo, no se necesita controlar el escurrimiento del agua en los sistemas aspersores de agua.

Para el control o contención del sistema se debe de utilizar cualquiera de las siguientes opciones:

1. Colocar bordes y cierta pendiente.
2. Drenajes cerrados o subterráneos.
3. Zanjas o trincheras.
4. Diques
5. Cualquier combinación de los 4 anteriores.

El control del escurrimiento debe de diseñarse para adecuarse al flujo combinado total de los siguientes factores:

- ✚ Todos los sistemas de aspersores intentarán operar al mismo tiempo dentro del área de incendio.
- ✚ Se utilizarán mangueras contra incendios y boquillas monitoras comúnmente utilizadas mientras dura el incendio.
- ✚ Un gran derrame anticipado o accidental de líquidos procesados, donde sea aplicable.
- ✚ Cualquier descarga normal de líquidos procesados o agua para enfriamiento en el sistema de drenaje.
- ✚ Agua de lluvia, si las condiciones locales justifican que se incluya este factor.

El agua y los demás líquidos depositados en el drenaje, provenientes de las áreas protegidas deben de ser recolectados y tratados según lo indiquen las normas locales.

5.3 Componentes del sistema

Los componentes del sistema deben de estar probados para la presión máxima de trabajo a la cual están expuestos, pero no menor a 175 psi (12.1 bares).

5.3.1 Boquillas aspersoras de agua

Las boquillas aspersoras de agua que se van a utilizar en los sistemas, deben de estar listadas para sistemas aspersores de agua y cumplir con los siguientes requisitos:

1. Coeficiente de descarga (k).
2. Patrones de aspersión a diferentes presiones, distancias y orientaciones.
3. Distribución uniforme del agua en cualquier patrón de flujo.

Las boquillas aspersoras de agua deben marcarse permanentemente con las especificaciones listadas. Los requerimientos de temperatura y colores para las boquillas aspersoras son los mismos que los requeridos para los rociadores en la NFPA 13, *Norma para la instalación de sistemas de rociadores (Standard for the Installation of Sprinkler Systems)*.

5.3.1.1 Recubrimientos especiales

Las boquillas aspersoras resistentes a la corrosión que se encuentren listadas, deben de instalarse en lugares donde las sustancias químicas, humedad u otro tipo de vapores sean suficientes para corroer dicho tipo de dispositivos.

Recubrimientos resistentes a la corrosión

Los recubrimientos contra la corrosión deben ser aplicados por el fabricante de la boquilla aspersora. Cualquier daño causado al recubrimiento especial debe de repararse inmediatamente, utilizando únicamente el recubrimiento del fabricante de la boquilla aspersora en una forma probada de tal manera que ninguna parte de la boquilla aspersora quedará expuesta después de la instalación.

Pintura

A menos que el fabricante aplique un recubrimiento de pintura, las boquillas aspersoras no deben de pintarse. Cualquier boquilla aspersora que haya sido pintada por alguien diferente al fabricante debe de ser reemplazada por otra boquilla aspersora con las mismas características, incluyendo coeficiente de descarga K, repuesta térmica (boquillas automáticas) y distribución del agua.

5.3.1.2 Almacenamiento de las boquillas aspersoras de agua automáticas y de los rociadores piloto de repuesto

Los repuestos de las boquillas aspersoras de agua automáticas y los rociadores piloto deben de mantenerse en las instalaciones, de este modo si una boquilla aspersora o rociador piloto falla o se daña, pueda ser reemplazado. Los repuestos deben de corresponder al tipo de aspersores automáticos y rociadores piloto que utiliza el sistema dentro de la propiedad.

Estos dispositivos deben de encontrarse en un cuarto que no exceda los 100°F (37.8°C).

El almacenamiento de los aspersores automáticos de agua y rociadores piloto debe incluir como mínimo 1 repuesto de cada tipo de aspersor automático o rociador piloto utilizado en la propiedad, en ningún caso el número de repuestos debe de ser menor que las siguientes cantidades basadas en el número total de aspersores automáticos y rociadores piloto en la propiedad:

1. Para propiedades con menos de 300 aspersores automáticos o rociadores piloto, no deben de existir menos de 6 aspersores automáticos o rociadores piloto de repuesto.
2. Para propiedades con más de 300 pero menos de 1000 aspersores automáticos o rociadores piloto, no deben de existir menos de 12 aspersores automáticos o rociadores piloto de repuesto.
3. Para propiedades con más de 1000 aspersores automáticos o rociadores piloto, no deben de existir menos de 24 aspersores automáticos o rociadores piloto de repuesto.

5.3.2 Tuberías y tubings

La tubería y tubings utilizados en los sistemas aspersores de agua deben de cubrir o exceder las especificaciones de la Tabla 5.1, o se permitirá el uso de tubería de cobre en los sistemas de aspersores de agua con tuberías llenas donde la presión no exceda de las 175 psi (12.1 bares). En adición la tubería de acero debe de ser unida por soldadura o por accesorios roscados.

Cuando la tubería de acero está unida por accesorios roscados o ranurados, el espesor mínimo de la pared debe de estar de acuerdo con la Cédula 30 (en tubería de 8pg [203mm] y más grandes) ó Cédula 40 (en tuberías menores a 8pg [203mm]) para presiones arriba de 300 psi (20.7 bares).

Se permite el uso de otro tipo de tuberías investigadas para su compatibilidad con las instalaciones de los sistemas de aspersores automáticos y listadas para este uso, incluyendo pero no limitando a aceros diferentes a los mencionados en la tabla 5.1, que pueden instalarse de acuerdo a sus limitaciones de lista, incluyendo instrucciones de instalación. El doblado de este tipo de tuberías se permite según esté listado.

5.3.2.1 Tubería de Acero

La tubería de acero utilizada en los sistemas manuales y abiertos debe de galvanizarse por inmersión, en sus superficies internas y externas de acuerdo con las especificaciones de la Tabla 5.1, y sus extremos roscados deben de protegerse contra la corrosión.

Se permite el uso de tuberías de acero negro en sistemas con tuberías llenas de agua.

Las tuberías de acero inoxidable no requieren galvanizarse.

El tamaño mínimo de la tubería debe de ser 1pg (25mm) para acero y acero galvanizado y de ¾pg (19 mm) para tuberías de cobre y de acero inoxidable.

Doblado de la tubería

El doblado de la tubería, de acero con espesores de pared iguales o mayores a los de la Cédula 10 y los tipos K y L de tubería de cobre, está permitido cuando el doblado no cause ensortijamientos, distorsiones, disminuciones en el diámetro interno, arrugas o cualquier otras distorsión apreciable alrededor de la tubería.

5.3.2.2 Accesorios

Los accesorios utilizados en sistemas que utilicen agua deben de cumplir o exceder las especificaciones de la Tabla 5.2. En las secciones secas del tubing en sistemas autoabastecidos, los

accesorios ferrosos deben de ser de acero, hierro maleable o dúctil. Se deben de utilizar accesorios galvanizados en tuberías galvanizadas. También se permite el uso de accesorios de agua que no estén en la Tabla 5.2, siempre y cuando cumplan con las especificaciones de su listado, incluyendo las instrucciones de instalación.

Tabla 5.1 Especificaciones de Tubería o Conductos

Materiales y Dimensiones	Norma
<i>Tuberías ferrosas (soldadas y sin costura)</i>	
Tubería de acero inoxidable	ANSI B 36.19M
Especificación normalizada para tuberías de acero inoxidable sin costuras y soldadura austenítica.	ASTM A 312
Especificación normalizada para tubería negra y tubería de acero soldada sin costura cubierta de cinc por inmersión caliente (galvanizada). Para uso en protección contra incendios*	ASTM A 795
Especificación normalizada para tubería de acero, negra y cubierta de cinc por inmersión caliente, soldada y sin costuras*	ASTM A 53
Tubería en acero forjado y sin costura	ANSI B36.10M
Especificación normalizada para tuberías de acero soldadas por resistencia eléctrica	ASTM A 135
<i>Tubo de Cobre (Estirado, Sin Costuras)</i>	
Especificación normalizada para Tubo de cobre sin costuras *	ASTM B 75
Especificación normalizada para tubería de agua en cobre sin costuras*	ASTM B 88
Especificación normalizada para requerimientos generales para tubería forjada de cobre sin costuras y tubo de aleación de cobre	ASTM B 251
Especificación normalizada para metales de relleno con soldadura fuerte y soldadura de bronce (clasificación BCuP-3 o BCuP-4)	AWS A5.8

*Indica tubería o entubado apropiado para ser doblado según las normas ASTM

Coples y uniones

Las uniones roscadas no deben de usarse en tuberías de diámetro mayor a las 2pg (50 mm). Las uniones o coples deben de ser específicamente de los tipos listados para el uso en sistemas de aspersores de agua o sistemas de rociadores.

Reducciones y bujes

Se debe de usar una reducción de una pieza siempre que se haga un cambio en el tamaño de la tubería. En caso de que no existan accesorios del tamaño de la reducción, se permite el uso de bujes de cara o hexagonales.

5.3.2.3 Uniones de tubería y accesorios

Tubería y accesorios roscados

Todas las tuberías y sus accesorios deben de tener los cortes de su rosca de acuerdo con ANSI/ASME B1.20.1 *Tuberías Roscadas, Uso General (Pipe Threads, General Purpose)*.

La tubería de acero con un espesor menor al de la Cédula 30 (tubería de 8pg [200mm] y de mayor diámetro) o Cédula 40 (en tuberías con diámetro menor a 8pg [200mm]) no se deben unir con accesorios roscados

Tubería y accesorios soldados

Fabricación

Cuando se suelde o corte tubería en el campo, se debe de llenar de manera segura, de acuerdo con NFPA 15 B, *Norma para la protección contra incendio mientras se suelda, corta o se realizan otros trabajos con calor (Standard for fire prevention during welding, cutting and other hot works)*.

La soldadura no debe de aplicarse cuando esté lloviendo, nevando, cayendo aguanieve o exista un fuerte viento en el área donde se va a llevar a cabo la soldadura. No se permite cortar o soldar con soplete cuando se quiera modificar o reparar el sistema aspersor de agua.

Cuando se va a soldar una tubería galvanizada, la tubería debe de fabricarse en secciones bobinadas y se debe de galvanizar después de su fabricación.

Accesorios

Los accesorios usados para unir tuberías aplicando soldadura deben de ser accesorios fabricados que estén listados o accesorios elaborados de acuerdo con las especificaciones de la Tabla 5.2.

Requerimientos para soldar

La soldadura entre la tubería y los accesorios externos está permitida de penetración completa, parcial o de filete.

Tabla 5.2 Materiales y Dimensión de Accesorios

Materiales y Dimensiones	Norma
Hierro Fundido	
Accesorios roscados en hierro gris clase 125 y 250	ANSI B16.4
Bridas para tuberías de hierro fundido y accesorios bridados	ANSI B16.1
Hierro Maleable	
Accesorios para hierro maleable, clase 150 y 300	ANSI B16.3
Acero	
Accesorios de acero forjado soldados a tope hechos en fábrica	ANSI B16.9
Terminales soldados al tope	ANSI B16.25
Especificación normalizada para accesorios de tubería en acero forjado y carbono y acero aleado para temperaturas moderadas y elevadas	ASTM A 234
Tubería y accesorios bridados	ANSI B16.5
Accesorios forjados, de soldadura de campana y roscados	ANSI B16.11
Cobre	
Accesorios para uniones de presión soldadas en aleación de cobre y cobre forjado	ANSI B16.22
Accesorios para uniones de presión soldadas en aleación de cobre estampado	ANSI B16.18
Hierro Dúctil	
Especificación normalizada para fundiciones de hierro dúctil	ASTM A 536
Acero Inoxidable	
Especificación normalizada para bridas de tubería de acero forjado o laminado aleado, accesorios forjados, válvulas y partes para servicio de alta temperatura	ASTM A 182

En el lugar donde se vaya a llevar a cabo una soldadura, ésta se debe de aplicar bajo los siguientes puntos:

1. Los agujeros que se cortan en la tubería para usarse como salidas, deben de cortarse para el diámetro interno completo del accesorio antes de soldar los accesorios.
2. Deben de retirarse los discos
3. Las aberturas cortadas en la tubería deben de suavizarse y debe de removerse toda la escoria de la tubería, así como los residuos de la soldadura.
4. Los accesorios no deben de penetrar el diámetro interno de la tubería.
5. No se deben de soldar placas de acero en los extremos de la tubería o de los accesorios.
6. No se deben de modificar los accesorios
7. No se deben de soldar, a la tubería o los accesorios tuercas, grapas, varillas, soportes angulares o cualquier otro sujetador.
8. Las soldaduras terminadas deben de estar libres de grietas, fusiones incompletas, porosidad superficial mayor a $\frac{1}{16}$ pg (1.5mm) de diámetro y rebajes más profundos que el 25% del espesor de pared o $\frac{1}{32}$ pg(0.8mm)
9. Los refuerzos hechos en los extremos con forma circular no deben de exceder de $\frac{3}{32}$ pg (2.4mm).

Uniones con bronce

Las uniones para la conexión de tuberías de cobre deben de ser de soldadura de bronce usando el material de bronce listado.

Las soldaduras de bronce deben de llevarse a cabo, de acuerdo con lo siguiente:

1. Los accesorios y las conexiones ramificadas no deben de penetrar el diámetro interno de la tubería.
2. No se deben de soldar placas de cobre en los extremos de la tubería o los accesorios.
3. No se deben de modificar los accesorios.
4. No se deben de soldar, a la tubería o accesorios, tuercas, varillas, soportes angulares o cualquier otro sujetador.

5.3.2.4 Sujetadores

Los tipos de sujetadores deben de estar de acuerdo con los requerimientos de la NFPA 13, *Norma para la instalación de sistemas de rociadores (Standard for the Installation of Sprinkler Systems)*.

Los sujetadores utilizados en exteriores o en locales donde existan condiciones corrosivas deben de ser galvanizados, recubierto o fabricados con materiales resistentes a la corrosión.

5.3.2.5 Válvulas

Válvulas de control

Todas las válvulas que controlar las conexiones a los suministros de agua y suministran de agua a los sistemas de aspersores de agua, deben de ser válvulas indicadoras listadas.

Las válvulas de control no deben de cerrar en menos de 5 segundos cuando operan a la velocidad máxima posible cuando se encuentran totalmente abiertas.

Válvulas de activación del sistema

Las válvulas de activación, al igual que sus accesorios, deben de ser listadas, además deben de tener medios de activación manual, independientes del sistema automático y los dispositivos de detección. Los controles manuales de las válvulas de activación no deben de requerir el uso de una fuerza mayor a 40 lb_f (178 N) o un movimiento de más de 14pg (356mm) para una operación segura.

5.4 Requerimientos de instalación

5.4.1 Distanciamiento eléctrico

Todos los componentes del sistema deben de colocarse de tal manera que mantenga una distancia mínima a las conexiones eléctricas.

La tabla 5.3 muestra algunas separaciones eléctricas que son aplicables para altitudes de 1000m (3300 pies) o menores. Para altitudes que excedan los 1000m, la separación eléctrica debe de aumentarse en un 1% por cada 100m (330 pies).

5.4.2 Boquillas aspersoras de agua

5.4.2.1 Selección

La selección del tipo y tamaño de las boquillas aspersoras de agua se debe de hacer tomando en cuenta las consideraciones apropiadas debido a la gran cantidad de factores, tales como características de descarga, carácter físico del riesgo involucrado, condiciones ambientales, materiales que podrían arder y los objetivos de diseño del sistema.

Las boquillas aspersoras de agua deben de permitir colocarlas en cualquier posición, con sus limitaciones listadas, para obtener una cobertura apropiada del área que se va a proteger.

Tabla 5.3 Separaciones Eléctricas desde equipos de agua pulverizada hasta componentes eléctricos vivos no aislados

Voltaje nominal del sistema (kV)	Voltaje máximo del sistema (kV)	Diseño BIL (kV)	Separación Mínima*		
			(μ g)	(mm)	
Hasta	13.8	14.5	110	7	178
	23.0	24.3	150	10	254
	34.5	36.5	200	13	330
	46.0	48.3	250	17	432
	69.0	72.5	350	25	635
	115.0	121.0	550	42	1067
	138.0	145.0	650	50	1270
	161.0	169.0	750	58	1473
	230.0	242.0	900	76	1930
			1050	84	2134
	343.0	362.0	1050	84	2134
			1300	104	2642
	500.0	550.0	1500	124	3150
			1800	144	3658
	765.0	800.0	2050	167	4242

Nota: los valores BIL se expresan como kilovoltios (kV), siendo el número el valor de cresta de impulso total de ondas que el equipo está diseñado para soportar. Para los valores BIL que no aparecen listados en la tabla, los espacios pueden definirse por interpolación.

*Para voltajes hasta 161 kV, las separaciones están tomadas de la NFPA 70, National Electrical Code. Para voltajes de 230 kV y mayores, las separaciones se toman de la tabla 124 de ANSI C2, National Electrical Safety Code.

La posición de las boquillas aspersoras de agua debe de incluir una evaluación de los siguientes factores:

1. La forma y el tamaño del área protegida.
2. El diseño de la boquilla y las características del patrón de aspersión producido.
3. El efecto del viento y la corriente de fuego en gotas de tamaño muy pequeño o en gotas de gran tamaño con una baja velocidad inicial.
4. La probabilidad de no acertar en la superficie objetivo e incrementar el desperdicio de agua.
5. Efectos de la orientación de la boquilla sobre las características de la cobertura.
6. La posibilidad de daño mecánico.

5.4.3 Instalación de tuberías

5.4.3.1 Válvulas

Válvulas de control del suministro de agua

Cada sistema debe de proveerse de una válvula de control localizada en un área de fácil acceso, ya sea en la zona protegida por el sistema durante el incendio o cualquier área adyacente o, en caso de que el sistema sea instalado para la prevención de incendios, durante la contingencia para la cual se diseñó el sistema.

Válvula de supervisión

Las válvulas que controlan el suministro de agua a los sistemas aspersores de agua deben de supervisarse en la posición de abertura normal, por alguno de los siguientes métodos:

1. Servicio de alarma de la estación central propia o un servicio de alarma remota.
2. Servicio de alarma local que pueda causar la activación de una señal audible en un punto concurrido.
3. Cerrando las válvulas abiertas.
4. Sellando las válvulas y aprobando un control semanal documentado, de las válvulas que se encuentran en enrejados controlados por el propietario.

Localización de las válvulas de activación del sistema

Las válvulas de activación del sistema deben de encontrarse cerca del riesgo protegido, así como ser de fácil acceso durante la emergencia.

La localización de las válvulas de activación del sistema debe de llevarse a cabo evaluando los siguientes factores:

1. Calor radiante por la exposición al fuego.
2. La probabilidad de que ocurran explosiones.
3. La localización y arreglo de las instalaciones de drenaje, incluyendo diques, zanjas y cuencas de depósito.
4. La posibilidad de daño mecánico o congelación
5. Accesibilidad
6. Tiempo de descarga del sistema

5.4.3.2 Soporte de la tubería

El sistema de tuberías debe de utilizar soportes para mantener su integridad en un incendio. Los soportes para la tubería pueden ser de acero, miembros estructurales de concreto y bases para tubería.

Las bases utilizadas para soportar las tuberías deben de estar de acuerdo con la Tabla 5.4, para determinar las alturas máximas para las bases que soportan varios diámetros de tuberías lazadas.

Tabla 5.4 Alturas máximas de tuberías verticales

<i>Diámetro de la tubería</i>	<i>Diámetro del soporte</i>				
	1 ½ pg	2 pg	2 ½ pg	3 pg	4 pg
1 ½ pg	10 pies	14 pies	18 pies	28 pies	30 pies
2 pg	8 pies	12 pies	16 pies	26 pies	30 pies
2 ½ pg	6 pies	10 pies	14 pies	24 pies	30 pies
3 pg	-	8 pies	12 pies	22 pies	30 pies
>3pg	-	-	-	-	10 pies

Nota: Para unidades SI, 1 pulgada = 25.4 mm, 1 pie = 0.305 m

Se permiten distancias que excedan las mostradas en la Tabla 5.4, en la Tabla 5.5 se muestran distancias que pueden ser utilizadas cuando se agregue un ángulo de 45° entre la base de soporte y la tubería lazada. Mirar Fig. 5.3.

Tabla 5.5 Distancia de los soportes de tubería

<i>Tamaño del bucle</i>	<i>Distancia entre soportes de tuberías</i>		
	pulgadas	mm	pies
1	25	10	3048
1 ½	40	12	3658
2	50	14	4267
2 ½ - 8	65-200	15	4572

Las bases para tubería deben de construirse de tubería roscada Cédula 40, hierro maleable en la base de la brida y una tapa superior con rosca.

Los soportes para tubería pueden sujetarse directamente a recipiente u otro equipo, siempre y cuando el equipo sea capaz de soportar el sistema y el sistema esté certificado por un ingeniero registrado.

La tubería debe de soportarse y sujetarse para restringir el movimiento causado por la reacción de la boquilla y la salida del agua para que el sistema funcione y mantenga su integridad.

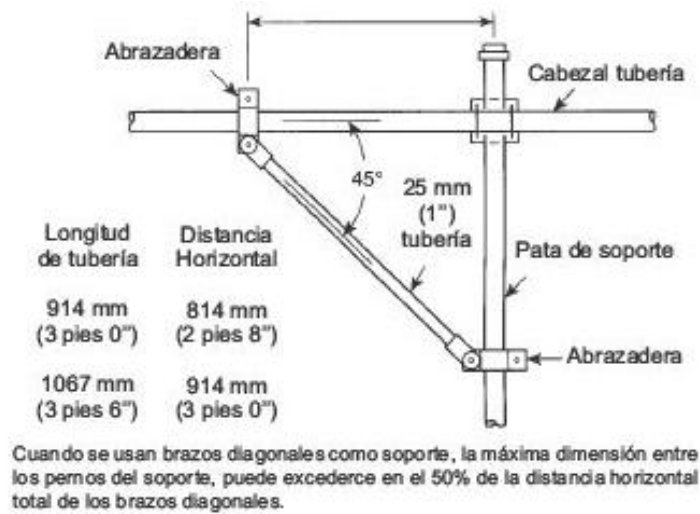


Fig. 5.3 Brazo de soporte

5.4.3.3 Drenaje para las tuberías

Todo sistema aspersor de agua, tuberías y accesorios, deben de instalarse de manera que el sistema pueda drenarse. Los drenajes deben de descargar a una locación segura con válvulas de drene accesibles. El drenaje no debe de interconectarse con otros sistemas de coladeras.

Las conexiones de drenaje deben dimensionarse como se muestra en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Diámetros de drenaje

Tamaño de tubería vertical o maestra (pg)	Tamaño de la conexión para drenaje (pg)
Hasta 2	¾ o mayor
2 ½, 3, 3 ½	1 ¼ o mayor
4 y mayor	2 solamente

5.4.4 Equipo de detección automática

5.4.4.1 Protección

Protección contra la corrosión. El equipo de detección instalado en el exterior o en presencia de posibles vapores o atmósferas corrosivas, debe de protegerse de la corrosión con materiales apropiados en su construcción o con recubrimientos especiales aplicados al equipo por el fabricante.

Toldo protector. Al equipo de detección que requiere de protección contra el clima se le debe de proporcionar un toldo o cubierta o cualquier otra protección apropiada.

Daño mecánico. El equipo de detección debe de colocarse donde pueda protegerse del daño mecánico.

Montaje. Los detectores deben, en todos los casos, de sostenerse independientemente de sus cables de acoplamiento o tubería.

Rociadores piloto. Los rociadores automáticos de tipo piloto pueden estar sostenidos por su tubería o tubing.

5.4.4.2 Selección, localización y espaciamiento de los detectores

La selección, localización y espaciamiento de los detectores automáticos de incendios para sistemas fijos de aspersores de agua, deben cumplir o exceder los requerimientos aplicables de la NFPA 72, *Código Nacional de Alarmas para Incendios (National Fire Alarm and Signaling Code)*, y ser consistente con lo siguiente:

1. Información obtenida de la experiencia en campo.
2. Pruebas.
3. Estudios de ingeniería.
4. Recomendaciones del fabricante.
5. Criterios listados de detección.
6. Naturaleza del riesgo a ser protegido.
7. Velocidad normal y anormal del aire.
8. Rango previsto de temperaturas.
9. Tasa de cambios de temperaturas máximas bajo condiciones normales.
10. Número y altura de los niveles estructurales.
11. Precipitaciones (agua y nieve).
12. Presencia y magnitud de la interferencia electromagnética.
13. Presencia de obstrucciones que puedan retardar o mitigar temporalmente la detección.
14. Otras condiciones que puedan afectar la eficiencia de la detección usada.

Los detectores automáticos se deben de colocar de modo tal, que den una respuesta rápida al fuego, liberación de gases inflamables u otras condiciones de diseño. Así como también deben de cubrir el perímetro del riesgo evitando que alguna zona de riesgo se escape del perímetro de los detectores.

Cuando los detectores se encuentran en el exterior o en un espacio abierto de temperatura fija, el espaciamiento entre detectores debe de reducirse por lo menos un 50% de los espacios en techos lisos listados.

Rociadores del tipo piloto

El espaciamiento máximo interior no debe de exceder de los 12 pies (3.7m).

Los rociadores localizados en el exterior, así como en estructuras de proceso abiertas, deben espaciarse tanto que la elevación de un nivel simple de rociadores pilotos y de los demás niveles de rociadores piloto no deben de exceder de los 17 pies (5.2m), la distancia horizontal no debe de exceder los 8 pies (2.5m).

5.5 Objetivos de diseño

5.5.1 Diseño del sistema

Los sistemas deben de instalarse para su operación automática con medios suplementarios para su activación manual. Esta operación manual debe de permitirse donde la operación automática del sistema presente riesgos para el personal, además debe de llevarse a cabo en un lugar aislado por personal entrenado.

El sistema y los suministros de agua deben de diseñarse para la admisión de agua en la tubería.

El espaciamiento entre las boquillas no debe de exceder los 10 pies (3m), vertical u horizontalmente.

5.5.1.1 Tamaño del sistema y demanda de agua

Un sistema simple no debe de proteger más de un área de incendio.

El número de sistemas que se espera funcionen simultáneamente debe de evaluarse tomando en cuenta los siguientes factores:

1. El posible flujo de combustible líquido ardiendo entre las áreas, antes o durante la activación de los sistemas de aspersores de agua.
2. El posible flujo de gases calientes entre las zonas de incendio que pueda activar los sistemas adyacentes, incrementando de ese modo la demanda de agua.
3. Fijar la detección de gases inflamables para activar los sistemas automáticamente.
4. Operación manual de varios sistemas.
5. Otros factores que pueden llegar a activar los sistemas fuera del área principal de incendio.

5.5.2 Extinción

Los sistemas deben de diseñarse para completar la extinción y enfriar las superficies protegidas para prevenir un flashback después del cierre del sistema.

La extinción del fuego con agua asperjada puede llevarse a cabo por uno o una combinación de los siguientes métodos:

1. Enfriamiento de la superficie.
2. Disminuyendo los vapores producidos.
3. Emulsificación.
4. Dilución.
5. Otros factores.

Los rangos generales de los gastos de aplicación del agua asperjada que deben aplicarse a la mayoría de los combustibles sólidos y líquidos ardiendo, debe de ser desde 0.15 a 0.5 gpm/pie² (6.1 a 20.4 [l/min]/m²) de superficie protegida. La densidad específica de diseño para la extinción debe de basarse en datos de pruebas o conocimiento referente a condiciones similares a las que requiere la instalación del sistema actual.

5.5.2.1 Acometidas y charolas de cables

Cuando un alambrado y cables aislados o tubería no metálica van a ser protegidos un sistema de aspersión de agua automático (boquilla abierta) diseñado para la extinción del fuego que se origina en el cable o tubería, el sistema debe de ser hidráulicamente diseñado para impactar el agua en cada charola o grupo de cables o tubería a un gasto neto de 0.15 gpm/pie² (6.1 [l/m]/m²) en el plano protegido que contiene cable, tubería o la charola.

5.5.2.2 Bandas transportadoras

Las boquillas abiertas deben de dispersarse de tal forma que dirijan el agua asperjada a las superficies para extinguir el fuego en el aceite hidráulico, la banda transportadora, los objetos en la banda o el motor. El agua asperjada que llegue a impactar en os elementos estructurales debe de proveer protección al equipo contra el calor radiante o afectar a la flama.

El sistema debe de ser capaz de suplir el gasto de diseño y 250 gpm (946 L/min) para los chorros de agua de las mangueras por una duración mínima de una hora.

Motor

El sistema de aspersión de agua debe de instalarse para proteger los rodillos transportadores, los rodillos de ascenso, las unidades de energía y la unidad de aceite hidráulico.

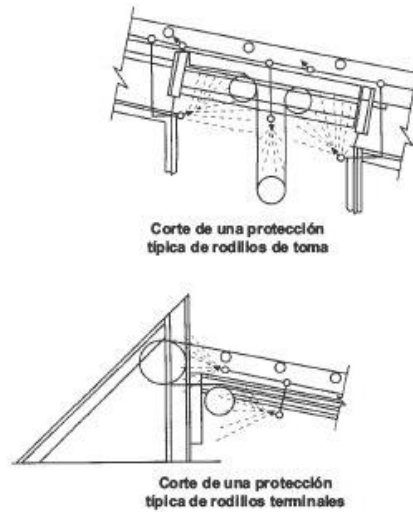


Fig. 5.4 Protección típica de los rodillos

Banda de transporte

El sistema aspersor de agua debe de instalarse para humedecer automáticamente la banda superior, su contenido y la banda de retorno.

La protección a base de sistemas aspersores de agua para bandas transportadoras debe de cumplir con alguno de los siguientes puntos:

1. Extenderse sobre las correas de transferencia, el equipo de transferencia y las instalaciones de transferencia.
2. Conectarse de modo que el sistema aspersor de agua que proteja la correa de alimentación active automáticamente el sistema aspersor de agua que protege el primer segmento del equipo que se encuentra al final de la línea de producción.

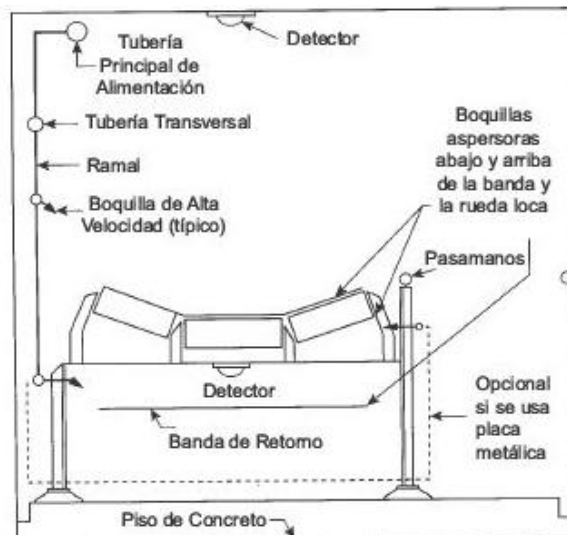


Fig.5.5 Protección típica de la banda transportadora

5.5.3 Control de incendio

Un sistema para el control de incendio deben de funcionar de alguna de las siguientes formas:

- Funcionar hasta que haya transcurrido cierto tiempo y el material ardiendo se consuma.
- Por etapas, para poder cortar el flujo del material que se está escapando.
- Hasta que el material ardiendo puede extinguirse de otra forma.

Las boquillas deben de posicionarse de tal modo que el agua impacte directamente en las áreas de la fuente de incendio y donde los derrames puedan expandirse o acumularse. El gasto de aplicación de agua no debe de ser menos de 0.5 gpm/pie^2 ($12.2 \text{ [l/min]} \text{m}^2$) de área protegida.

5.5.4 Protección contra la exposición

Un sistema que protege de la exposición debe de operar como se ha planeado, para anticipar la duración de la exposición al fuego.

5.5.4.1 Recipientes

El agua asperjada debe de aplicarse a las superficies de los recipientes (incluyendo superficies de la parte superior e inferior en recipientes verticales) a un gasto neto de no menos de 0.25 gpm/pie^2 ($10.2 \text{ [l/min]} \text{m}^2$) de superficie expuesta.

Cuando se tiene contemplado un plano inclinado, las distancias entre las boquillas a diferentes niveles o elevaciones, protegiendo superficies verticales o inclinadas, no debe de exceder de los 12 pies (3.7m) medidos a lo largo de la superficie.

La distancia entre las boquillas debe de ser tal que los patrones de aspersión concuerden o sobrepasen la superficie protegida.

Cuando las salientes (bridas, soportes, válvulas de alivio, etc.) obstruyan la cobertura del agua asperjada, incluyendo pendientes en superficies verticales, se deben de instalar boquillas adicionales alrededor de las salientes para mantener el patrón de humectación que de otra manera podría interrumpirse severamente.

5.6 Planos y Cálculos hidráulicos

Los cálculos hidráulicos deben de llevarse a cabo como parte del diseño del sistema de tuberías para determinar la presión requerida y que el flujo esté disponible en cada boquilla.

La presión mínima de operación de cualquier boquilla protegiendo riesgos exteriores debe de ser de 20 psi (14 bares). Las boquillas que protegen riesgos interiores deben de tener presiones mínimas de operación de acuerdo con sus listados.

Se permite que en los cálculos se ignoren las correcciones en la presión por velocidad cuando la presión por velocidad no exceda del 5% de la presión total en cada punto de conexión. En caso contrario deben de calcularse las correcciones.

5.6.1 Planos de trabajo

Los planos de trabajo deben de presentarse a la autoridad competente antes de llevar a cabo la remodelación o instalación de cualquier equipo.

Los planos de trabajo, incluyendo elevaciones, deben de dibujarse en una escala indicada, mostrar todos los detalles esenciales e incluir como mínimo la siguiente información:

1. Fechas de revisión así como la de la entrega inicial.
2. El nombre del propietario y del ocupante.
3. El nombre y dirección del contratista y del técnico de diseño.
4. La localización, incluyendo la dirección completa.
5. El norte geográfico.
6. El corte transversal completo.
7. Las alturas relativas de las boquillas, puntos de conexión y suministro o puntos de referencia.
8. Las características estructurales.
9. Información completa concerniente a suministros de agua, incluyendo objetos como bombas, suministros subterráneos, protección contra terremotos y resultados de las pruebas de flujo.
10. La marca, tamaño, tipo, localización, posición y dirección de las boquillas aspersoras.
11. La marca, tipo, modelo y tamaño de la válvula de activación del sistema, válvula de control o la válvula especial del sistema. El método para la supervisión de la válvula de control debe indicarse en los planos.
12. El tipo y la localización de los dispositivos de alarma de los que el sistema será provisto.
13. Número de las boquillas aspersoras de cada tamaño y cada tipo en cada sistema.
14. Tipo de tubería, Cédula del espesor de pared, longitudes de la tubería y ya sea que muestren las longitudes de centro a centro o las longitudes de corte.
15. El tamaño y tipo de todos los accesorios, las dimensiones y las localizaciones de las secciones soldadas en fábrica.
16. Los dispositivos sensibles para la detección, incluyendo tipo, arreglo y localización.
17. Los puntos de referencia hidráulica mostrados en el plano deben de corresponder a los puntos de referencia en las hojas de cálculos hidráulicos.
18. La demanda calculada de sistema referenciada a un punto.

19. La demanda de agua total de diseño con el número de sistemas diseñados para operar simultáneamente, referenciados a un punto, preferentemente la fuente de suministro, incluyendo chorros de las mangueras y otros equipos de protección contra incendios.
20. Los requerimientos de densidad y los cálculos de la superficie de riesgo, donde sea aplicable.
21. El objetivo de diseño del sistema.
22. La marca, el tipo y la localización de los colgadores, soportes, mangos de soporte, estabilizadores e insertos.
23. Las válvulas de retención y de control, coladeras, tuberías de drenaje y tuberías de prueba.
24. Una representación gráfica de la escala usada en todos los planos.
25. El peso o clase, revestimiento y tamaño de la tubería subterránea y la profundidad a la que la parte superior de la tubería se encuentra por debajo del nivel.
26. Suministros para el lavado de la tubería subterránea.
27. Un plano completo y preciso del riesgo a ser protegido.

El plano de trabajo entregado debe de incluir las instrucciones de instalación del fabricante para cualquier equipo listado especialmente, incluyendo descripciones, aplicaciones y limitaciones para cualquiera de las boquillas, dispositivos, tuberías, accesorios, soportes y materiales de refuerzo.

5.6.2 Cálculos hidráulicos

Los cálculos hidráulicos deben de prepararse en formas que incluyen una hoja de resumen, hoja de trabajo detallada y la hoja con las gráficas.

La hoja de resumen debe de contener toda la siguiente información:

1. Fecha.
2. La localización.
3. El nombre del propietario y del ocupante.
4. El edificio o número de piso.
5. La descripción del riesgo.
6. Nombre y dirección del contratista y la persona que hizo los cálculos.
7. Nombre de la autoridad que tiene jurisdicción.
8. El propósito de diseño.
9. Gastos de aplicación del agua y áreas de aplicación en gpm/ft^2 ($[\text{l/min}])\text{m}^2$).
10. El requerimiento total de agua del sistema que se ha calculado incluyendo los chochos para mangueras y otros equipos de protección contra incendio.
11. La demanda de agua total del sistema de diseño, de los sistemas diseñados para operar automáticamente referenciados a un punto, preferentemente la fuente de suministro, incluyendo chorros de mangueras y otros equipos de protección contra incendio.
12. Información del suministro de agua.

La hoja de trabajo detallada o las hojas impresas de los cálculos deben de contener toda la información que se muestra a continuación:

1. Número de hoja, fecha, número de trabajo y portada de identificación de los cálculos.
2. Descripción del coeficiente de descarga (k) o proveer la tabla de descarga o la gráfica para cada tipo de boquilla.
3. Puntos de referencia hidráulicos.
4. Flujo en gpm (L/min).
5. Tamaño de la tubería en pulgadas (mm).
6. Longitudes de las tuberías del centro al centro de los accesorios (o longitudes de corte) en pies (m).
7. Longitudes equivalentes para accesorios y dispositivos en pies (m).
8. Pérdidas por fricción en psi (bar) entre puntos de referencia.
9. Pérdidas por fricción totales en psi (bar) entre puntos de referencia.
10. La cabeza piezométrica en psi (bar) entre puntos de referencia.
11. La presión requerida en psi (bar) en cada punto de referencia.
12. Presión por velocidad y presión normal si se incluye en los cálculos.
13. Notas que indiquen los puntos de inicio, referenciados a otras hojas para esclarecer la información mostrada.
14. Los cálculos combinados de los coeficientes de descarga (k) en bajantes, brazos y ramales, donde los cálculos no comiencen en las boquillas.
15. Cuando se amplíe el equipo existente, los cálculos hidráulicos indicando el anterior diseño, volumen y presión en los puntos de conexión y los cálculos adicionales adecuados que indiquen el efecto en los sistemas existentes.

La hoja de gráficas se debe de dibujar en papel semilogarítmico para graficar ($Q^{1.85}$).

5.6.3 Información del suministro de agua

La siguiente información debe de incluirse en los planos y los cálculos:

1. Localización y elevación de las pruebas de medición estática y residual, con relación al punto de referencia de la válvula de activación del sistema.
2. Localización del flujo.
3. Presión estática, psi (bar).
4. Presión residual, psi (bar).
5. Gasto, gpm (L/min).
6. Fecha.
7. Hora.
8. Información de las pruebas de la fuente de suministro de agua.
9. Otras fuentes de suministro de agua, con presión o elevación.

5.6.4 Procedimientos para los cálculos hidráulicos

5.6.4.1 Fórmulas

Fórmula de pérdida por fricción. Las pérdidas por fricción en la tubería deben determinarse sobre la base de la fórmula de Hazen y Williams:

$$p = \frac{4.52Q^{1.85}}{C^{1.85}d^{4.87}}$$

Donde:

P = resistencia a la fricción en psi por pie de tubería

Q = gasto en gpm

C = Coeficiente de pérdida por fricción

d = diámetro interno real de la tubería en pulgadas o en unidades SI.

$$P_m = 6.05x \frac{Q_m^{1.85}}{C^{1.85}d_m^{4.87}} x 10^3$$

Donde:

P_m = resistencia a la fricción en bares por metro de tubería

Q_m = gasto en l/min

C = Coeficiente de pérdida por fricción

d_m = diámetro interno real en mm

Fórmula de presión por Velocidad. La presión de velocidad se determina sobre la base de la fórmula:

$$P_v = \frac{0.001123Q^2}{D^4}$$

Donde:

P_v = Presión de velocidad en psi

Q = gasto en gpm

D = diámetro interno en pulgadas

Fórmula de presión normal. La presión normal será determinada sobre la base de la fórmula:

$$P_n = P_t - P_v$$

Donde

P_n = presión normal en psi o bares

P_t = presión total en psi o bares

P_v = presión de velocidad en psi o bares

Puntos de conexión hidráulica

Los cálculos sobre puntos de conexión hidráulica deben ser equilibrados dentro de 0.5 psi (0.03 bares).

Los cálculos de los puntos de conexión hidráulica, excepto para las curvas, deben equilibrarse a la presión más alta con la formula (corregida para elevaciones):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}$$

Fórmula para la descarga de boquillas

La descarga de una boquilla debe calcularse por la fórmula:

$$Q = K\sqrt{P}$$

Donde

Q = flujo en gpm desde la boquilla

K = coeficiente K de la boquilla

P = presión total en psi para el flujo Q o en unidades SI:

$$Q_m = K_m\sqrt{P_m}$$

Donde

Q_m = flujo en l/min desde la boquilla

K_m = coeficiente K de la boquilla (donde K_m equivale a 14.4K)

P_m = presión total en bares para el flujo Q_m

5.6.5 Longitudes equivalentes en tubería de válvulas y accesorios

La Tabla 5.7 debe de usarse para determinar las longitudes equivalentes de las válvulas y accesorios, a menos que los datos de pruebas del fabricante indiquen que son apropiados otros factores.

Tabla 5.7 Carta de equivalencia de longitudes de tubería

Accesorios y válvulas expresados en pies y metros equivalentes														
Accesorios y válvulas	¾ pg		1 pg		1 ¼ pg		1 ½ pg		2 pg		2 ½ pg		3 pg	
	pies	m	pies	m	pies	m	pies	m	pies	m	pies	m	pies	m
Codos de 45°	1	0.3	1	0.3	1	0.3	2	0.6	2	0.6	3	0.9	3	0.9
Codo estándar de 90°	2	0.6	2	0.6	3	0.9	4	1.2	5	1.5	6	1.8	7	2.1
Codo de vuelta larga 90°	1	0.3	2	0.6	2	0.6	2	0.6	3	0.9	4	1.2	5	1.5
Te o Cruz (flujo a 90°)	4	1.2	5	1.5	6	1.8	8	2.4	10	3.1	12	3.7	15	4.6
Válvula de compuerta	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.3	1	0.3	1	0.3
Válvula mariposa	-	-	-	-	-	-	-	-	6	1.8	7	2.1	10	3.1
Válvula de retención*	4	1.2	5	1.5	7	2.1	9	2.7	15	3.4	14	4.3	16	4.9

Accesorios y válvulas expresados en pies y metros equivalentes														
Accesorios y válvulas	3 ½ pg		4 pg		5 pg		6 pg		8 pg		10 pg		12 pg	
	pies	m	pies	m	pies	m	pies	m	pies	m	pies	m	pies	m
Codos de 45°	3	0.9	4	1.2	5	1.5	7	2.1	9	2.7	15	3.4	13	4.0
Codo estándar de 90°	8	2.4	10	3.1	12	3.7	14	4.3	18	5.5	22	6.7	27	8.2
Codo de vuelta larga 90°	5	1.5	6	1.8	8	2.4	9	2.7	13	4.0	16	4.9	18	5.5
Te o Cruz (flujo a 90°)	17	5.2	20	6.1	25	7.6	30	9.2	35	10.7	50	15.3	60	18.3
Válvula de compuerta	1	0.3	2	0.6	2	0.6	3	0.9	4	1.2	5	1.5	6	1.8
Válvula mariposa	-	-	12	3.7	9	2.7	10	3.1	12	3.7	19	5.8	21	6.4
Válvula de retención	19	5.8	22	6.7	27	8.2	32	9.8	45	13.7	55	16.8	65	19.8

*Debido a las variaciones en el diseño de las válvulas, las equivalencias de tubería indicadas en esta carta deben considerarse como promedio.

Notas:

- Usar el valor equivalente en pies (m) para el "codo estándar" en cualquier giro abrupto de 90° tal como el codo de tipo atornillado. Para el "codo de vuelta larga" en cualquier giro abrupto de 90° como bridas, soldaduras o uniones mecánicas tipo codo.
- Para diámetros internos diferentes a tubería de acero Cédula 40 la equivalencia en pies mostrados debe de multiplicarse por la fórmula siguiente:

$$\left[\frac{\text{Diámetro interno actual}}{\text{Diámetro interno e la tubería de acero Cédula 40}} \right]^{4.87} = \text{Factor}$$

La Tabla 5.7 debe usarse con un factor *C* Hazen y Williams de 120 solamente. Para los valores de *C*, los valores de la tabla deben multiplicarse por los siguientes factores:

Valor de <i>C</i>	100	120	130	140	150
Factor multiplicador	0.713	1.0	1.16	1.33	1.51

Notas:

- (1) Esto está basado en la pérdida de fricción a través de los accesorios independientes del factor *C* aplicable a la tubería.
- (2) Los valores de pérdida específica por fricción o equivalencia en longitudes de tubería para válvulas de alarma, válvulas de tubería seca, válvulas de inundación, tamices disponibles y otros dispositivos o accesorios deben estar a disposición de la autoridad competente

5.6.5.1 Procedimiento de cálculo

Las pérdidas por fricción para todas las tuberías y dispositivos como válvulas, medidores y drenajes deben de incluirse en los cálculos.

Las pérdidas por todos los accesorios deben de calcularse donde ocurra un cambio en la dirección del flujo, como se muestra a continuación:

1. La pérdida para una T o una cruz deben de calcularse donde ocurra una desviación en el flujo, basadas en la longitud equivalente en tubería para el tamaño menor de la T o la cruz en el camino o desviación del flujo. La pérdida para la parte del flujo que pasa directamente sin disminución en el tamaño de la T o la cruz, no debe de incluirse.
2. Las pérdidas en los codos reductores deben de calcularse basadas en el valor de la longitud equivalente de la salida más pequeña.
3. Las pérdidas por fricción deben de excluir reductores que disminuyan gradualmente su tamaño y en los accesorios que suministran directamente a la boquilla aspersora.

Los cambios en la elevación que afecten la descarga o el total de la presión requerida, o ambas, deben de incluirse en los cálculos en el punto que sea afectado.

5.7 Suministro de agua

Cada sistema aspersor de agua debe de tener por lo menos un suministro automático de agua.

El agua para los sistemas de aspersión de agua debe de provenir de uno o más suministros, como los siguientes:

1. Conexiones para sistemas que trabajan con agua, de acuerdo con la NFPA 24, *Norma para la instalación de tuberías para el suministro de sistemas privados contra incendio y sus*

accesorios (Standar for the Installation of Private Fire Sevice of Mains and Their Appurtenances).

2. Tanques de gravedad, de acuerdo con la NFPA 22, *Norma para tanques de agua de uso privado para la protección contra incendios(Standard for Water Tanks for Private Fire Protection).*
3. Bombas para incendio con un suministro de agua adecuado, de acuerdo con la NFPA 20, *Norma para la instalación de bombas estacionarias para la protección contra incendios.*
4. Tanques a presión, de acuerdo con la NFPA 22, *Norma para tanques de agua de uso privado para la protección contra incendios (Standard for Water Tanks for Private Fire Protection),* y la NFPA 13, *Norma para la instalación de sistemas de rociadores (Standard for the Installation of Sprinkler Systems).*

5.8 Sistemas de aspersión de agua a velocidad ultra-alta

Los sistemas aspersores de agua a velocidad ultra-alta deben de utilizarse para la extinción o control de deflagraciones en áreas abiertas, no confinadas o con los equipos de proceso. Este tipo de sistemas no debe de utilizarse para la extinción o control de detonaciones o para el control de una deflagración en un lugar cerrado o en recipientes confinados con el propósito de evitar que se sobrepresurice.

5.8.1 Tiempo de respuesta


Los sistemas de pulverización de agua a velocidad ultra-alta deben de diseñarse para tener un tiempo de respuesta no mayor a 100 milisegundos. Este tiempo de respuesta debe de ser el tiempo medido desde que se presenta una fuente de energía que active el detector hasta que el agua fluya hasta la boquilla aspersora que es probada.

Para concordar con los criterios de tiempo de respuesta, los sistemas aspersores de agua a velocidad ultra-alta deben de usarse con la tubería llena.

5.8.2 Consideraciones de diseño

5.8.2.1 Tipos de sistemas

Sistemas de aspersores de agua a velocidad ultra-alta de aplicación local. La boquilla o boquillas deben de colocarse tan cerca del punto de ignición como sea posible.

-  **Sistemas de aspersores de agua a velocidad ultra-alta de aplicación areal.** Las boquillas deben de espaciarse de tal modo que se aplique la densidad mínima uniformemente en toda el área de riesgo protegida.

- ✚ **Sistemas de aplicación doble.** Se permiten sistemas que unan los conceptos de aplicación local y areal.
- ✚ **Protección para el personal.** Donde se requiere protección para el personal, la cobertura del sistema debe de incluir aquellos lugares donde se espera que se encuentre el personal en el área de riesgo y su medio inmediato de evacuación.

5.8.2.2 Gasto y Densidad

El diseño debe de producir un gasto de flujo no menor a 25 gpm (95 L/min) por boquilla en el punto de aplicación del agua.

La densidad mínima de diseño debe de ser 0.50 gpm/pie² de area cubierta por el sistema de aspersión de agua a velocidad ultra-alta.

5.8.2.3 Presión de diseño

La presión de operación en la boquilla hidráulicamente más remota no debe de ser menos de 50 psi (3.5 bares).

La presión estática mantenida en el sistema antes de que el sistema se active, no debe de ser menor a 50 psi (3.5 bares).

5.8.2.4 Limitaciones de volumen del sistema

Una válvula de activación del sistema no debe de controlar capacidades mayores a los 500 gal (1893 L).

5.8.2.5 Duración

La duración del sistema en funcionamiento no debe de ser menor a 15 min, a menos que se requiera un tiempo mayor a 15 min para la evacuación del personal, se tomará como tiempo de duración del sistema al tiempo de evacuación.

5.8.2.6 Detección

Los sistemas de detección deben de estar de acuerdo con la NFPA 72, *Código nacional de alarmas contra incendios (National Fire Alarm Code)*.

Los dispositivos sensibles deben de ser:

1. Características de respuesta:
 - a) Dispositivos sensibles a la energía radiante capaces de sentir la longitud de onda esperada de las emisiones de los materiales en combustión.
 - b) Otro tipo de dispositivos sensibles que tengan el mismo tipo de características de respuesta que los dispositivos sensibles a la energía radiante, se permite su uso.
2. Protegidos contra el daño físico.
3. Compatibles con la instalación eléctrica del área donde se instalarán.
4. De fácil acceso para pruebas, limpieza y mantenimiento.
5. Calibrados y ajustados para evitar su activación en falso.

6 Principios de Diseño de Recipientes a Presión

6.1 El Código ASME Sección VIII División 1

Los recipientes a presión son contenedores que se mantienen a presión, ya sea interna o externa. Esta presión puede ser obtenida de una fuente externa o a través de la aplicación de calor de una fuente directa o indirecta, o cualquier combinación de las anteriores.

La División VIII contiene requerimientos obligatorios, prohibiciones específicas y una guía no obligatoria para materiales usados en recipientes a presión, diseño, fabricación, examinación, inspección, prueba, certificación y liberación de presión.

La División VIII está dividida en tres subsecciones, apéndices obligatorios y no obligatorios. La Subsección A cubre los requerimientos generales aplicables a todos los recipientes a presión. La Subsección B cubre requerimientos específicos que son aplicables a varios métodos utilizados en la fabricación de recipientes a presión. La Subsección C cubre requerimientos específicos aplicables a muchas clases de materiales utilizados en la construcción de recipientes a presión, como lo son aceros de carbono y de baja aleación, metales no ferrosos, aceros de alta aleación, hierro fundido, material recubierto, hierro dúctil fundido, aceros férricos con propiedades mejoradas por tratamiento térmico, construcción en capas y materiales de baja temperatura. La Sección II Parte D del código ASME también contiene las tablas del esfuerzo máximo permitido para estas clases de materiales.

Las siguientes clases de recipientes no están incluidos en el alcance de esta División; de cualquier forma, todo recipiente a presión que cumpla con todos los requerimientos aplicables de esta División puede ser estampado con el Símbolo U del Código:

- a) Aquellos que están cubiertos por otras secciones.
- b) Calderas tubulares sometidas a fuego.
- c) Contenedores a presión que son partes integrales o componentes de dispositivos mecánicos rotantes u oscilatorios, como bombas, compresores, turbinas, generadores, motores y cilindros hidráulicos o neumáticos donde las principales consideraciones de diseño y/o esfuerzos están derivados de los requerimientos funcionales del dispositivo.
- d) Exceptuando por el párrafo U-1(f) de la Sección VIII División 1 del código ASME, estructuras cuya función principal es el transporte de fluidos de una locación a otra junto a un sistema que es una parte integral de sistemas de tuberías.

- e) Componentes de tuberías, como lo son tubos, bridas, tornillos, uniones, válvulas, uniones de expansión, accesorios y partes a presión de otros componentes, como lo son coladeras y dispositivos que sirven para mezclar, separar, distribuir, medir, etc.
- f) Un recipiente que contenga agua bajo presión, incluidos aquellos que contienen una almohada de aire, cuando no se excede ninguna de las siguientes limitaciones:
 - 1. Presión de diseño de 300 psi (2MPa).
 - 2. Temperatura de diseño de 210°F(99°C).
- g) Un tanque calentado para el suministro de agua caliente a través de una corriente o cualquier otro medio indirecto cuando no se excede ninguna de las siguientes limitaciones:
 - 1. Entrada de calor de 200,000 Btu/h (58.6 kW).
 - 2. Una temperatura del agua de 210°F (99°C).
 - 3. Capacidad nominal para contener agua de 120 gal (450 L).
- h) Recipientes que poseen una presión interna o externa de operación que no excede de 15 psi (100 kPa) sin limitaciones en el tamaño.
- i) Recipientes que tienen un diámetro interno, ancho, altura o corte transversal que no excede de las 6pg (152mm), sin limitaciones en la longitud del recipiente o la presión.
- j) Recipientes a presión para ocupación humana.

Las reglas de esta División se han formulado en la base de los principios de diseño y las prácticas de construcción aplicables a recipientes diseñados para presiones que no exceden 3000 psi (20 MPa).

Los siguientes recipientes en los cuales se genera una corriente deben de construirse de acuerdo a las reglas de esta División:

1. Recipientes que se conocen como evaporadores o intercambiadores de calor.
2. Recipientes en los cuales se genera una corriente por el uso del calor resultante de una operación de un equipo de procesamiento que contiene un número de recipientes a presión como los que se usan en la fabricación de químicos y productos del petróleo.
3. Recipientes donde se genera una corriente pero no es retirada para uso externo.

El usuario debe de establecer los requerimientos de diseño para los recipientes a presión, tomando en consideración factores asociados con la operación normal, así como otras operaciones como lo es el arranque y el cierre o apagado, condiciones anormales que pueden convertirse en las consideraciones principales de diseño.

Dichas consideraciones deben de incluir pero no deben de limitarse a lo siguiente:

1. La necesidad de consideraciones por corrosión.
2. La definición de los usos letales.
3. La necesidad de un tratamiento a calor después de soldar más allá de los requerimientos de ésta División y dependiente de las condiciones de uso.

4. Para recipientes a presión en los que se genera una corriente, o se calienta agua, la necesidad de tuberías, válvulas, instrumentos y accesorios para llevar a cabo las funciones cubiertas por los párrafos PG-59 a PG-61 de la Sección I del código ASME.

Un recipiente puede ser diseñado y construido, usando cualquier combinación de los métodos de fabricación y tipos de materiales cubiertos por esta División provista de las reglas aplicables a cada método y material que las cumpla, y el recipiente debe de ser marcado como lo requiere el párrafo UG-116.

6.1.1 Materiales

Otros materiales diferentes a los que son permitidos por ésta División no deben de utilizarse, a menos que haya información que se haya enviado información y ésta haya sido aprobada por el Comité de Calderas y Recipientes a Presión de acuerdo con el Apéndice 5 de la Sección II del Código ASME, Parte D.

Se recomienda al usuario que los materiales usados para la construcción de los recipientes sea compatible para el uso recomendado con respecto a la conservación satisfactoria de sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, erosión, oxidación y cualquier otra forma de deterioro durante su vida de uso recomendada.

6.1.1.1 Placa

La placa¹ utilizada en la construcción de partes a presión de recipientes a presión debe de cumplir con una de las especificaciones en la Sección II del Código ASME para cada valor de esfuerzo permitido dados en las tablas.

6.1.2 Diseño

El diseño de recipientes a presión y partes de los recipientes deben de estar conforme a los requerimientos generales de diseño dados en las partes de aplicación de las Subsecciones B y C.

El espesor mínimo de componentes que retienen presión, exceptuando las provisiones especiales listadas abajo, el espesor mínimo permitido para armazones y tapas, después de ser forjadas y sin importar la forma del producto y el material, debe de ser $1/16$ pg (1.5mm). Las excepciones son:

1. El espesor mínimo no aplica a charolas de transferencia de calor o a intercambiadores de calor de tipo plato.

¹ El término placa, para los propósitos aquí utilizados incluye hoja y cinta.

2. El espesor mínimo no aplica a la tubería interna de intercambiadores de calor de doble tubería ni a los tubos en intercambiadores de calor de armazón y tubería, donde dichas tuberías o tubos son de un tamaño nominal de 6 (diámetro nominal 150) y menores. Esta excepción aplica se construya o no la tubería o armazón externo bajo las reglas del Código ASME. Todas las demás partes a presión deben de cumplir el $\frac{1}{16}$ pg (1.5mm) de espesor mínimo requerido.
3. El espesor mínimo de armazones y tapas de calderas de vapor no sometidos a fuego debe de ser $\frac{1}{4}$ pg (6mm).
4. El espesor mínimo de armazones y tapas utilizados para aire comprimido, vapor y agua, hechos de materiales listados, debe de ser $\frac{3}{32}$ pg (2.5mm).
5. Este espesor mínimo no aplica en tuberías de aire acondicionado y torres de enfriamiento, si se cumple con las siguientes previsiones:
 - a) Los tubos no deben de tener aplicaciones de uso letal.
 - b) Los tubos deben de protegerse para finos y otros medios mecánicos.
 - c) El diámetro externo del tubo debe de ser mínimo de $\frac{3}{8}$ pg (10mm) y un máximo de $1\frac{1}{2}$ pg (38mm).
 - d) El espesor mínimo utilizado no debe de ser menos que el que se calcule con el uso de fórmulas y en ningún caso debe ser menos que el mayor de los espesores mínimos calculados utilizando una presión de diseño de 500 psi (3.5MPa) a 70°F (20°C) o 0.022 pg (0.5mm).

6.1.2.1 Temperatura de diseño

La temperatura máxima de diseño no debe de ser menor a la temperatura media del metal (a través del espesor) esperada bajo condiciones de operación para la parte considerada.

La temperatura mínima del metal utilizada en el diseño debe ser menor a la que se espera durante su uso exceptuando cuando las bajas temperaturas estén permitidas por las reglas de ésta División. Las consideraciones deben incluir la menor temperatura de operación, alteraciones operacionales, autorefrigeración, temperatura ambiente y otras fuentes de enfriamiento.

6.1.2.2 Presión de diseño

Los recipientes que caen dentro de esta División de la Sección VIII deben de ser diseñados por lo menos para la condición más severa donde coinciden la presión y temperatura esperadas en la operación normal.

6.1.2.3 Cargas

Las cargas a ser consideradas en el diseño incluyen las de:

- a) La presión de diseño interna o externa.
- b) Peso del recipiente, contenidos normales bajo operación o condiciones de prueba (esto incluye adicionalmente la presión debida al nivel estático de los líquidos).
- c) Superposición de las reacciones estáticas del peso del equipo adjunto, como lo son motores, maquinaria, otros recipientes, tuberías y material aislante.
- d) La unión de:
 1. Partes internas.
 2. Soportes de recipientes.
- e) Variaciones cíclicas o dinámicas debidas a la presión o a variaciones térmicas o de equipo montado en el recipiente y a cargas mecánicas.
- f) Viento, nieve y reacciones sísmicas, donde sea requerido.
- g) Reacciones de impacto como las ocasionadas por el choque de los fluidos.
- h) Gradientes de temperatura y diferenciales de expansión térmica.
- i) Presiones anormales, como las que se causan por las deflagraciones.

6.1.3 Esfuerzo permitido

El Código ASME para Calderas y Recipientes a presión, Sección VIII, es un documento vivo y progresivo. Con esfuerzos por contener las reglas de diseño y construcción para recipientes a presión componentes de los recipientes e intercambiadores de calor; más actuales, seguras y económicas. Una mayor mejora fue hecha en el año 2000 con el cambio del margen de diseño en la fuerza de tensión de 4.0 a 3.5. Ésta reducción en el margen permite un incremento en el esfuerzo permitido para muchos materiales dando como resultado un decremento en el espesor mínimo requerido. Esta fue la primera reducción en éste margen de diseño en 50 años y se basó en las muchas mejoras en las propiedades de los materiales, métodos de diseño y procedimientos de inspección durante ese tiempo.

Los criterios que establecen los esfuerzos permitidos en la Sección VIII División 1 y Sección II parte D del Código ASME están detallados en el Apéndice P y el Apéndice 1, respectivamente, y se encuentran resumidos en la Tabla 6.1. El esfuerzo permitido a temperatura de diseño para la mayoría de los materiales es menor a $1/3.5$ del esfuerzo efectivo de tensión mínimo o $2/3$ el esfuerzo mínimo de cedencia para temperaturas por debajo de los valores de deformación y ruptura. El esfuerzo mínimo de tensión permitido a temperaturas elevadas se obtiene de la curva actual de esfuerzo de tensión con algunos ajustes. El valor del esfuerzo de tensión obtenido por la curva actual a una temperatura dada es multiplicado por el factor 1.0 o la relación del esfuerzo mínimo de tensión a temperatura de cuarto obtenido de las especificaciones ASTM para el material dado. Y después esta cantidad se multiplica por un factor de 1.1.

El factor 1.1 discutido anteriormente, es una constante establecida por el Comité del Código ASME. Esa constante está basada en un juicio ingenieril que toma en consideración muchos factores. Algunas de estas consideraciones incrementan la fuerza de tensión para la mayoría de los aceros al carbón y de baja aleación entre la temperatura elevada y de cuarto, el deseo de mantener constante el nivel del esfuerzo permitido entre la temperatura del cuarto y 500°F (260°C) o más para aceros al carbón.

Tabla 6.1 Criterio para establecer el esfuerzo permitido para la Sección VIII División 1 del Código ASME (basado en la Sección II Parte D)

Producto / Material	Por debajo de la temperatura del cuarto		A temperatura de cuarto y mayor						
	Fuerza de tensión	Esfuerzo de Cedencia	Fuerza de tensión	Esfuerzo de Cedencia	Esfuerzo de ruptura	Tasa de deformación			
Forjados o fundidos ferrosos y no ferrosos	$\frac{S_y}{3.5}$	$\frac{2}{3}S_y$	$\frac{S_y}{3.5}$	$\frac{1.1}{3.5}S_yR_T$	$\frac{2}{3}S_y$	$\frac{2}{3}S_y$ ó $0.9S_yR_T$ [Nota (1)]	$F_{prom}S_{R\ prom}$	$0.8S_{R\ min}$	$\frac{2}{3}x0.85S_y$
Tubo o tubería soldada, ferrosa y no ferrosa	$\frac{0.85}{3.5}S_T$	$\frac{2}{3}x0.85S_y$	$\frac{0.85}{3.5}S_T$	$\frac{(1.1x0.85)}{3.5}S_T R_T$	$\frac{2}{3}x0.85S_y$	$\frac{2}{3}x0.85S_y$ ó $0.9x0.85S_y$ [Nota (1)]	$(F_{prom}x0.85)S_{R\ prom}$	$(0.8x0.85)S_{R\ min}$	$\frac{2}{3}x0.85S_y$

Nota:

- (1) Dos sets de valores de esfuerzo permitido se proveen en la tabla 1A para aceros y la tabla 1B del Código ASME, para aleaciones no ferrosas específicas. Los valores bajos no están específicamente identificados por una nota al final. Estos valores bajos no exceden dos tercios del esfuerzo mínimo de cedencia a la temperatura dada. La mejor alternativa de esfuerzos permitidos están identificados con una nota al final. Estos esfuerzos mayores pueden exceder los dos tercios, pero no exceden el 90% del esfuerzo mínimo de cedencia a la temperatura dada. Los valores más grandes deben de utilizarse solo cuando existe una mayor deformación que no es ligeramente objetable por sí misma. Estos mayores esfuerzos no están recomendados para el diseño de bridas u otras aplicaciones sensitivas al esfuerzo.

Nomenclatura:

- R_T = Relación del promedio de dependiente del valor de la pendiente de la curva de fuerza de tensión a temperatura del cuarto, fuerza de tensión.
- R_y = Relación del promedio de dependiente del valor de la pendiente de la curva de esfuerzo de cedencia a temperatura del cuarto, esfuerzo de cedencia.
- $S_{R\ prom}$ = Esfuerzo promedio que causa la ruptura al final de 100,000 h.
- $S_{R\ min}$ = Esfuerzo mínimo que causa la ruptura al final de 100,000 h.
- S_T = Fuerza de tensión mínima específica a temperatura ambiente, ksi.
- S_y = Esfuerzo de cedencia mínimo específico a temperatura ambiente.

6.1.3.1 Esfuerzo máximo permitido

El valor del esfuerzo máximo permitido es la máxima unidad de esfuerzo permitido en un material dado utilizado en recipientes construidos bajo estas reglas.

El máximo esfuerzo compresivo longitudinal que se utiliza en el diseño de armazones o tubos cilíndricos, sin costuras o soldados, sujetos a cargas que producen compresión longitudinal en el armazón o tubo debe de ser menor a los siguientes valores:

1. El máximo esfuerzo de tensión permitido.
2. El valor del factor B determinado por el siguiente procedimiento donde:

t = El espesor mínimo del armazón o tubo cilíndrico, pulgadas.

R_0 = El radio externo del armazón o tubo cilíndrico, pulgadas.

E = El módulo de la elasticidad del material a temperatura de diseño. El módulo de la elasticidad debe de tomarse de la gráfica de materiales aplicables en la Sección II, Parte D, Subparte 3, del Código ASME (Se puede hacer una interpolación entre líneas para temperaturas intermedias).

El valor de la eficiencia de la unión para uniones soldadas debe de tomar se como la unidad.

El valor de B debe de determinarse de la siguiente forma:

Paso 1. Usando los valores seleccionados de t y R_0 , calcular el valor del factor A utilizando la siguiente fórmula:

$$A = \frac{0.125}{(R_0/t)}$$

Donde:

A = tensión, ksi.

Paso2. Usando el valor de A calculado en el Paso1, entrar a la gráfica aplicable del material en la Sección II, Parte D, Subparte 3 del Código ASME para el material en consideración. Muévase verticalmente a la intersección con la línea de temperatura del material. Se puede realizar una interpolación entre líneas para temperaturas intermedias. Si los valores tabulares en la Subparte 3 de la Sección II, Parte D del código ASME son utilizados, una interpolación lineal o cualquier otro método de interpolación racional puede utilizarse para determinar el calor de B que caiga entre dos valores tabulares adyacentes para una temperatura específica. Dicha interpolación debe también de utilizarse para obtener el valor de B que caiga entre dos sets de valores tabulares, después de determinar una B para cada set de valores tabulares.

En los casos en que el valor de A caiga a la derecha del final de la línea de temperatura del material, se asume una intersección con la proyección horizontal del límite superior de la línea de temperatura del material, ver *Paso4*.

Paso3. De la intersección obtenida en el *Paso2*, muévase horizontalmente a la derecha y lea el valor del factor B . Este es el máximo esfuerzo compresivo permitido para los valores de t y R_0 utilizados en el Paso1.

Paso4. Para valores de A que caen a la izquierda de la línea de temperatura del material aplicable, el valor de B debe de calcularse utilizando la siguiente fórmula:

$$B = \frac{AE}{2}$$

Donde:

B = Esfuerzo compresivo, psi.

Paso5. Compare el valor de B determinado en los Pasos 3 ó 4 con el esfuerzo compresivo longitudinal calculado en el tubo o armazón cilíndrica, usando los valores seleccionados de t y R_0 . Si el valor de B es menor que el esfuerzo compresivo calculado, se debe de elegir un valor mayor de t y repetir el procedimiento hasta que el valor de B que se obtenga sea mayor al valor del esfuerzo compresivo calculado para la carga en el armazón o tubo cilíndrico.

El esfuerzo máximo permitido que va a ser utilizado en los cálculos del espesor debe de tomarse de las tablas a la temperatura que se espera se mantenga el metal bajo las condiciones de carga que van a ser consideradas.

6.2 Armazones Cilíndricas

Las reglas para el diseño de armazones cilíndricas se encuentran en la Sección VIII División 1 del Código ASME que toma en consideración presión interna, presión externa y cargas axiales. Las reglas de diseño asumen un espesor uniforme en la sección radial y longitudinal. Los requerimientos de diseño no están disponibles para cilindros elípticos o cilindros con espesor variable y propiedades del material.

6.2.1 Fuerzas de tensión

Las fuerzas de tensión surgen de varias cargas algunas de ellas son la presión interna, el viento y fuerzas generadas por un terremoto.

6.2.1.1 Armazones cilíndricas delgadas

El espesor requerido de un armazón cilíndrico debido a la presión interna en la dirección de la circunferencia está dada como:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \text{ cuando } t < 0.5R \text{ ó } P < 0.358SE \quad \dots (\text{ec. 6.1})$$

Donde:

E = Factor de eficiencia de la unión

P = Presión interna, psi.

R = Radio interno, pulgadas.

S = Tensión permitida en el material, psi.

t = Espesor del cilindro, pulgadas.

Esta ecuación puede reescribirse para calcular la presión máxima cuando el espesor se conoce, tomando la forma de:

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t} \dots (ec. 6.2)$$

Esta ec. 6.1 tiene una similitud con la ecuación clásica para esfuerzos en membranas circulares en un cilindro delgado (Beer and Johnston, 1992), dada por:

$$t = \frac{PR}{SE} \dots (ec. 6.3)$$

La diferencia se encuentra en el término adicional de $0.6P$ en el denominador. Éste término fue agregado por el ASME para tomar en consideración el esfuerzo no lineal que trabaja en el espesor de los cilindros, cuando el espesor de un cilindro excede $0.1R$. Esto se demuestra en la Fig. 6.1 para tensión en una circunferencia calculada por 3 diferentes métodos. El primero viene de la (ec. 6.3), la ecuación teórica para cilindros delgados, el segundo es de la (ec. 6.1) y el tercero es de la ecuación teórica de Lamé para cilindros con espesor que se muestra después como la (ec. 6.12).

Similarmente, la ecuación para el espesor requerido en la dirección longitudinal debido a la presión interna está dada por:

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.4P} \text{ cuando } t < 0.5R \text{ ó } P < 1.25SE \dots (ec. 6.4)$$

O en términos de la presión:

$$P = \frac{2SEt}{R + 0.4t} \dots (ec. 6.5)$$

Donde:

E = Factor de eficiencia de la unión

P = Presión interna, psi.

R = Radio interno, pulgadas.

S = Tensión permitida en el material, psi.

t = Espesor del cilindro, pulgadas.

Nótese de nuevo la similitud entre la (ec. 6.4) y la ecuación clásica para esfuerzos longitudinales en un cilindro delgado dada por:

$$t = \frac{PR}{2SE} \dots (ec. 6.6)$$

Las ecuaciones 6.1 y 6.4 están en términos del radio interno del cilindro. Algunas veces el radio interno ya es conocido. En este caso, la ecuación principal para el esfuerzo tangencial esta expresado en términos del radio externo R_0 . Esta ecuación, la cual se obtiene de la (ec. 6.1) a partir de sustituir (R_0-t) por R, está dada como:

$$t = \frac{PR_0}{SE + 0.4P} \text{ cuando } t < 0.5R_0 \text{ ó } P < 0.358SE \text{ ... (ec. 6.7)}$$

$$P = \frac{SEt}{R_0 - 0.4t} \text{ ... (ec. 6.8)}$$

La sección VII-1 del código ASME no da una ecuación para el espesor en la dirección longitudinal en términos del radio externo R_0 . Dicha expresión puede obtenerse de la (ec. 6.4) como:

$$t = \frac{PR_0}{2SE + 1.4P} \text{ ... (ec. 6.9)}$$

O en términos de P:

$$P = \frac{2SEt}{R_0 - 1.4t} \text{ ... (ec. 6.10)}$$

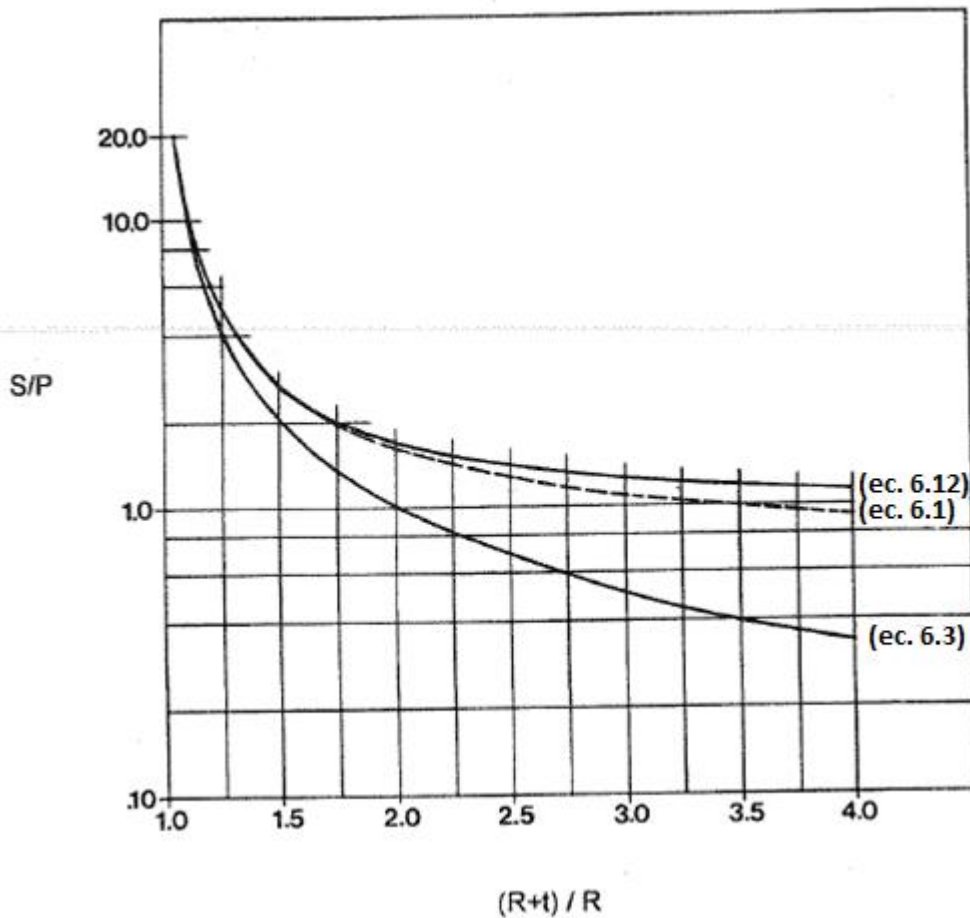


Fig. 6.1 Comparación de las ecuaciones para esfuerzos en aros para armazones cilíndricos

Las ecuaciones 6.1 a la 6.10 son aplicables a paredes sólidas tanto como para la construcción de paredes en capas. Los recipientes con capas consisten en delgados cilindros envueltos uno en el otro para formar un cilindro más grueso, Fig. 6.2. A cualquier corte transversal, a-a, el espesor total consiste en un plato de material tan bien soldado como lo estén sus uniones. El factor de eficiencia de las uniones para todo el espesor del recipiente en capas se calcula de la relación:

$$E = \frac{\sum E_i t_i}{t} \dots (ec. 6.11)$$

Donde:

E = Factor de eficiencia de las uniones total para el cilindro en capas.

E_i = Factor de eficiencia de la unión en una capa dada.

t = Espesor total del cilindro en capas, pulgadas.

t_i = Espesor de una de las capas, pulgadas.

Las reglas en la Sección VIII División 1 asumen que las soldaduras longitudinales están empalmadas de tal manera que E en (ec. 6.11) es esencialmente igual a 1.0.

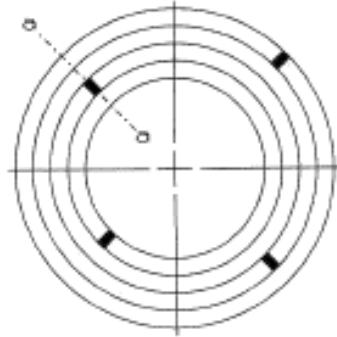


Fig. 6.2 Corte transversal a una armazón cilíndrica

6.2.1.2 Armazones cilíndricas gruesas

En la Sección VIII División 1 del Código ASME es rutinario referenciar la construcción de recipientes con presiones internas mayores a las 3000 psi. Como la relación entre t y R incrementa más allá de 0.5, el espesor dado en la (ec. 6.1) se hace imprudente, como se ilustra en la Fig. 6.1. Una ecuación más precisa que determina el espesor en un cilindro grueso, llamada ecuación de Lamé, está dada por:

$$SE = \frac{P(R_0^2 + R^2)}{R_0^2 - R^2} \dots (ec. 6.12)$$

Donde R_0 y R son los radios externo e interno, respectivamente. Sustituyendo la relación $R_0 = R + t$ en esta expresión, la (ec. 6.12) se convierte:

$$t = R \left(Z^{\frac{1}{2}} - 1 \right) \dots (ec. 6.13)$$

Donde

$$Z = \frac{SE + P}{SE - P}$$

Donde:

E = Factor de eficiencia de la unión

P = Presión interna, psi.

R = Radio interno, pulgadas.

R_0 = Radio interno, pulgadas.

S = Tensión permitida en el material, psi.

t = Espesor del cilindro, pulgadas.

La (ec. 6.13) se usa en el Apéndice 1-2 de la Sección VIII División 1 para determinar el espesor requerido en cilindros gruesos para las condiciones $t > 0.5R$ o $P > 0.385SE$. Esta ecuación puede escribirse también en términos de la presión como:

$$P = SE \left[\frac{Z - 1}{Z + 1} \right] \dots (ec. 6.14)$$

Donde

$$Z = \left[\frac{R + t}{R} \right]^2$$

Para el esfuerzo longitudinal:

$$t = R \left(Z^{\frac{1}{2}} - 1 \right) \text{ con } t > 0.5R \text{ ó } P > 1.25SE \dots (ec. 6.15)$$

Donde

$$Z = \left[\frac{P}{SE} \right] + 1$$

La (ec. 6.15) puede escribirse en términos de la presión, P , como:

$$P = SE (Z - 1) \dots (ec. 6.16)$$

Donde

$$Z = \left[\frac{R + t}{R} \right]^2$$

Donde:

E = Factor de eficiencia de la unión

P = Presión interna, psi.

R = Radio interno, pulgadas.

S = Tensión permitida en el material, psi.

t = Espesor del cilindro, pulgadas.

Las expresiones para un cilindro grueso dadas por las ecuaciones 6.12 hasta la 6.15 pueden expresarse en términos del radio externo se muestra a continuación.

Para el esfuerzo en dirección de la circunferencia:

$$t = \frac{R_0 \left(Z^{\frac{1}{2}} - 1 \right)}{Z^{\frac{1}{2}}} \text{ con } t > 0.5R \text{ ó } P > 0.385SE \dots (\text{ec. 6.17})$$

Donde

$$Z = \frac{SE + P}{SE - P}$$

O en términos de la presión:

$$P = SE \left[\frac{Z - 1}{Z + 1} \right] \dots (\text{ec. 6.18})$$

Donde

$$Z = \left[\frac{R_0}{R} \right]^2 = \left[\frac{R_0}{R_0 - t} \right]^2$$

Para el esfuerzo longitudinal con $t > 0.5R$ ó $P > 1.25SE$:

$$t = \frac{R_0 \left(Z^{\frac{1}{2}} - 1 \right)}{Z^{\frac{1}{2}}} \dots (\text{ec. 6.19})$$

Donde

$$Z = \frac{P}{SE} + 1$$

O en términos de la presión, P:

$$P = SE[Z - 1] \dots (ec. 6.20)$$

Donde

$$Z = \left[\frac{R_0}{R} \right]^2 = \left[\frac{R_0}{R_0 - t} \right]^2$$

Donde:

E = Factor de eficiencia de la unión

P = Presión interna, psi.

R = Radio interno, pulgadas.

R_0 = Radio interno, pulgadas.

S = Tensión permitida en el material, psi.

t = Espesor del cilindro, pulgadas.

Todas las ecuaciones dadas están únicamente en términos de la presión interna. La Sección VIII División 1 del Código ASME no brinda ninguna ecuación para el cálculo de esfuerzos en cilindros que provengan de cargas generadas por el viento o un terremoto.

6.2.2 Compresión axial

Los componentes de los recipientes están comúnmente sujetos a esfuerzos compresivos axiales causados por el viento, cargas muertas, terremotos y cargas de las boquillas. El esfuerzo compresivo máximo está limitado por el esfuerzo de tensión permitido, usando un factor de eficiencia de la unión de 1.0, y el esfuerzo compresivo permitido, tomando como límite el que sea menor de los dos. El esfuerzo de tensión permitido controla a los cilindros gruesos, mientras que el esfuerzo de compresión permitido controla los cilindros delgados. El procedimiento para calcular el esfuerzo axial compresivo permitido está basado en una ecuación teórica con largo L/D radio (Jawad, 1994). La ecuación consiste en el cálculo de la cantidad:

$$A = \frac{0.125}{(R_0/t)} \dots (ec. 6.21)$$

Donde:

A = tensión, ksi.

R_0 = Radio externo del cilindro, pulgadas.

t = Espesor, pulgadas.

Y después usando el diagrama de esfuerzo-tensión diseñado por el ASME para determinar el esfuerzo axial permisible, B. El ASME dibujó las gráficas de los diagramas de esfuerzo-tensión, llamadas gráficas de presión externas, para varios materiales a diferentes temperaturas en escala doble logarítmica. Una de éstas gráficas para aceros al carbón se muestra en la Fig. 6.3. La tensión, A, está graficada a lo largo del eje horizontal y el esfuerzo, B, a lo largo del eje vertical. En la Tabla 6.2 se muestran los valores tabulares de las curvas mostradas en la Fig. 6.3.

Si el valor calculado de A cae a la izquierda de la línea de esfuerzo de tensión a una presión externa dada en una gráfica, entonces B deberá ser calculada de la ecuación:

$$B = \frac{AE}{2} \dots (\text{ec. 6.22})$$

Donde

B = Esfuerzo de compresión, psi.

E = Módulo de la elasticidad del material a temperatura de diseño, psi.

El módulo de la elasticidad, E, en (ec. 6.22) se obtiene de los diagramas actuales diseñados por el ASME.

Es importante notar que el esfuerzo B en la gráfica de presión externa, Fig. 6.3, tiene un valor de la mitad del esfuerzo obtenido de la curva actual de esfuerzo-tensión de un material dado. Esto lo hizo el ASME para utilizar estas gráficas para otras condiciones de carga, como la presión externa en armazones cilíndricas así como para la compresión axial y el vacío en tapas con diferentes formas. De este modo, el esfuerzo, B, de la Fig. 6.3 para un acero al carbón a la temperatura del cuarto correspondiente a una tensión, A, de 0.1 pg/pg es 17.8 ksi. Esto es la mitad del esfuerzo de cedencia de 35.6 ksi para este material, obtenido de la curva actual de esfuerzo-tensión. También el valor del módulo de la elasticidad obtenido de la porción elástica de la curva encontrando la pendiente entre dos puntos correspondientes a la curva, cualesquiera, es la mitad del actual valor indicado.

Si sustituimos (ec. 6.21) en la (ec. 6.22), encontraremos que en el rango elástico, la ecuación de torsión para diseño se convierte en:

$$B = \frac{E}{16(R_0/t)}$$

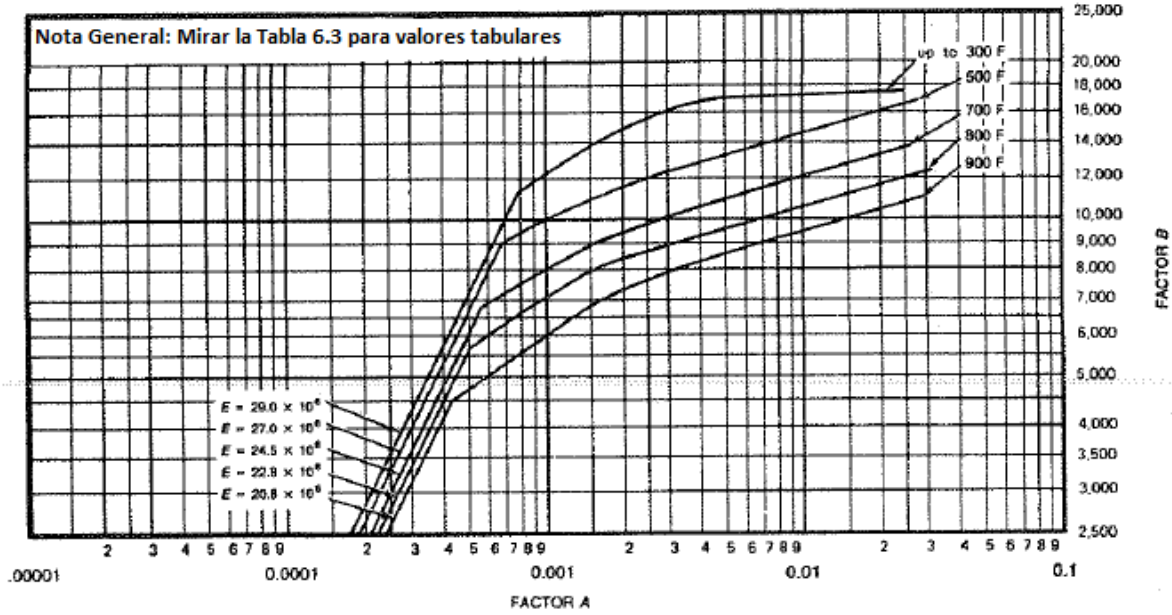


Fig. 6.3 Gráfica para aceros de carbón y de baja aleación, con esfuerzo de cedencia de 30 ksi y más, y para aceros inoxidables del tipo 405 y 410.

Que también se puede escribir de la siguiente forma:

$$B = \frac{0.0625E}{(R_0/t)} \dots (ec. 6.23)$$

La ecuación teórica para el esfuerzo axial crítico de torsión usada por el ASME está dada por:

$$\sigma_{cr} = \frac{0.06E}{(R_0/t)} \dots (ec. 6.24)$$

Donde:

B= esfuerzo de compresión, psi.

E = Módulo de la elasticidad del material, psi.

σ_{cr} = esfuerzo axial crítico de torsión, psi.

R_0 = radio externo del cilindro, pulgadas.

t= espesor, pulgadas.

Una comparación entre la (ec. 6.23) y el esfuerzo axial crítico de torsión (ec. 6.24) indica que un factor de seguridad de cerca de 10 fue usado por el ASME. De cualquier forma, se diseñaron

experimentos subsecuentemente a la publicación de la (ec. 6.24) que mostraron que una ecuación de esfuerzo axial crítico de torsión más realista es de la forma:

$$\sigma_{cr} = \frac{0.06CE}{(R_0/t)} \dots (ec. 6.25)$$

Donde:

C= factor de seguridad.

Una comparación entre la (ec. 6.23) y la (ec. 6.25) indica que el factor de seguridad varía desde un valor conservador de 10.0 para valores pequeños de R_0/t hasta un valor poco conservador de 1.0 para valores grandes de relaciones de R_0/t . Este factor debe de considerarse cuando se diseñan cilindros con un gran valor en la relación diámetro-espesor.

La Sección VIII División 1 del código ASME permite un incremento del 20% del valor de B obtenido de la Fig. 6.3 o calculado de la (ec. 6.22) cuando cargas activas, como el vientos y terremotos, se consideran. Las cargas por vientos y terremotos se obtienen comúnmente de algunos códigos, como el ASCE-7.

6.2.3 Presión Externa

La presión externa en las armazones cilíndricas genera fuerzas compresivas que pueden llevar a la deformación. Las ecuaciones para la torsión de armazones cilíndricas bajo presión son inútiles para usarse directamente en el diseño (Jawad 1994). De todos modos, estas ecuaciones pueden simplificarse para propósitos de diseño cuando se grafican, es por esto que la mínima fuerza de torsión se expresa en términos de la longitud, el diámetro y el espesor del cilindro. Estas gráficas son utilizadas por el ASME y discutidas a continuación. Las reglas y factores de seguridad en el código ASME Sección VIII División 1 tanto como en la División 2 son idénticas para presiones externas. De acuerdo a esto, las referencias en esta sección únicamente se realizan sobre párrafos en la Sección VIII División 1.

6.2.3.1 Presión externa para cilindros con $D_0/t \geq 10$

El ASME utiliza gráficos para expresar la menor tensión crítica, A, en términos de las relaciones L/D_0 y D_0/t del cilindro, como se muestra en la Fig. 6.4. El diseñador calcula los valores conocidos de L/D_0 y D_0/t y después usa la figura para determinar la fuerza de torsión, A. Para correlacionar la fuerza de torsión con la presión externa permitida, el diseñador usa el diagrama esfuerzo-tensión de la Fig. 6.3 para obtener un valor de B. La presión externa permitida se puede determinar de éste valor de B, como se explica a continuación. De acuerdo con el procedimiento en el código

ASME Sección VIII División 1 párrafo UG-28 para determina la presión externa permitida para cilindros para relaciones D_0/t mayores o iguales que 10, consiste en los siguientes pasos:

1. Asumir un valor de t para el cilindro y determinar las relaciones L/D_0 y D_0/t .
2. Entrar a la Fig. 6.4 en el valor calculado de L/D_0 determinado en el paso anterior. Para valores de L/D_0 mayores a 50, entrar en la gráfica en el valor de $L/D_0 = 50$. Para valores de L/D_0 menores a 0.05, entrar a la gráfica en el valor de $L/D_0 = 0.05$.
3. Moverse horizontalmente hasta la línea de valores de D_0/t determinados en el paso 1. Se puede realizar una interpolación para valores intermedios de D_0/t . De este punto de intersección muévase verticalmente hacia abajo para determinar el valor del factor A.
4. Utilizando el valor de A calculado en el paso anterior, entrar a la gráfica del material correspondiente en la Subparte 3 de la Sección II del Código ASME, Parte D. Moverse verticalmente hasta la intersección con la línea de temperatura del material. Se puede realizar una interpolación entre líneas para valores intermedios de temperatura. Si se usan los valores tabulares de la Subparte 3 de la Sección II del Código ASME, Parte D, se puede utilizar una interpolación lineal u otro tipo de interpolación racional para determinar el valor de B que cae entre dos valores tabulares adyacentes para una temperatura específica. Dicha interpolación debe hacerse para interpolar el valor de B, después de haber calculado un valor de B para cada set de valores tabulares.

En casos en los que A caiga a la derecha de del final de la línea de temperatura del material, asuma una intersección con la protección horizontal del extremo superior de la línea de temperatura del material. Si se utilizan valores tabulares, se debe de utilizar el último (máximo) valor tabulado. Para valores que caigan a la izquierda de la temperatura del material, ver el paso 7.

5. De la intersección obtenida en el paso 4, muévase horizontalmente a la derecha y lea el valor del factor B.
6. Utilizando este valor de B, calcule el valor de la máxima presión externa de trabajo permitida, usando la siguiente fórmula:

$$P_a = \frac{4}{3} \frac{B}{(D_0/t)} \dots (ec. 6.26)$$

Donde:

P_a = presión externa de trabajo máxima, psi.

B= esfuerzo compresivo, psi.

D_0 = diámetro externo, pulgadas.

t = espesor, pulgadas.

7. Cuando A caiga a la izquierda de las curvas, el valor de P_a puede calcularse de la siguiente forma:

$$P_a = \frac{2}{3} \frac{AE}{(D_0/t)} \dots (ec. 6.27)$$

Donde:

P_a = presión externa de trabajo máxima, psi.

A= tensión, ksi.

D_0 = diámetro externo, pulgadas.

t = espesor, pulgadas.

E = modulo de elasticidad del material, psi.

Donde E es el módulo de la elasticidad. Si se usan valores tabulares, determine B como en el paso 4 y aplique la (ec. 6.26).

8. Compare el valor calculado de P_a obtenido en los pasos 6 ó 7 con la presión externa de diseño (P). Si P_a es menor que P , seleccione un valor mayor de t y repita el procedimiento de diseño hasta que la P_a obtenía sea igual o mayor que P .

Tabla 6.2 Valores tabulares para la Fig. 6.3

$^{\circ}F$	A	B, psi	$^{\circ}F$	A	B, psi	
300	0.100-04	0.145+03	700	0.100-04	0.124-03	
	0.765-03	0.111		0.559-03	0.685+04	
	0.800	0.114		0.100-02	0.808	
	0.900	0.119		0.300	0.101+05	
	0.100-02	0.123		0.100-01	0.122	
	0.200	0.150		0.250	0.139	
	0.300	0.163		0.100+00	0.139	
	0.400	0.170		800	0.100-04	0.114+03
	0.500	0.172			0.499-03	0.569+04
	0.25 -01	0.178			0.100-02	0.717
0.100+00	0.178	0.150	0.805			
500	0.100-04	0.135+03	900	0.200	0.849	
	0.663-03	0.895+04		0.300	0.897	
	0.900	0.965		0.300-01	0.124+05	
	0.100-02	0.101		0.100+00	0.124	
	0.250	0.121		0.100-04	0.104+03	
	0.300	0.124		0.247-03	0.444+04	
	0.800	0.143		0.100-2	0.605	
	0.100-01	0.147		0.150	0.689	
	0.150	0.155		0.200	0.742	
	0.200	0.163		0.300	0.795	
0.272	0.170	0.800	0.927			
0.100+00	0.170	0.300-1	0.112+05			
		0.100+00	0.112			

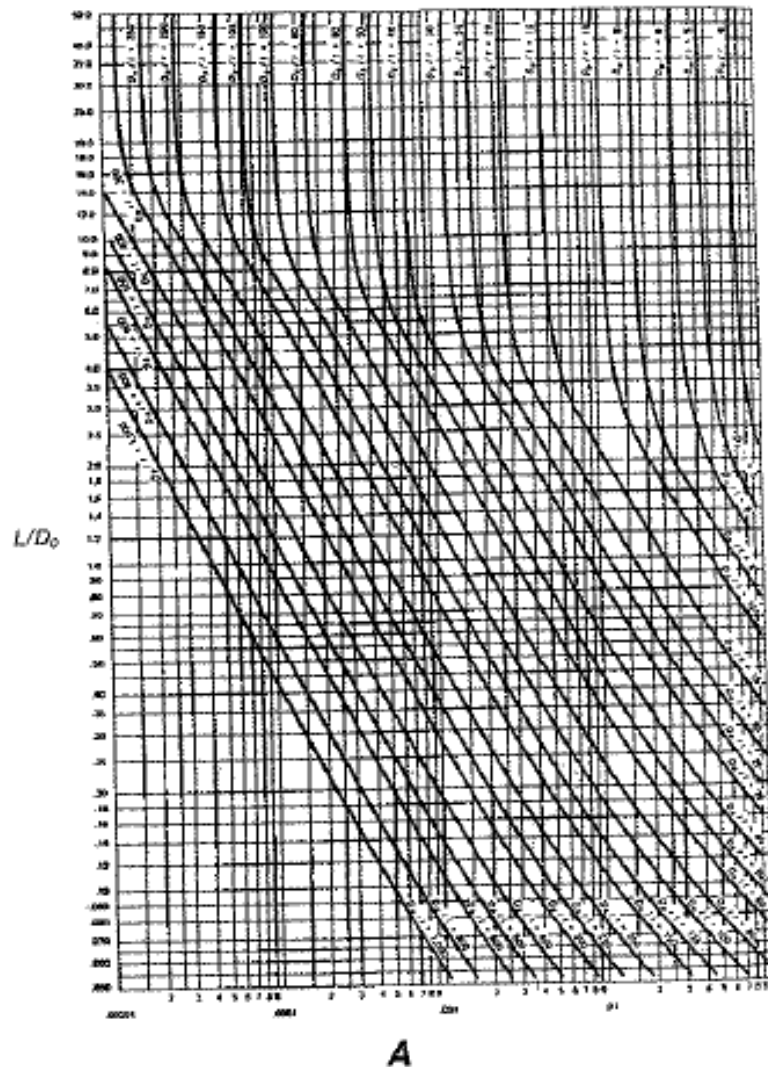
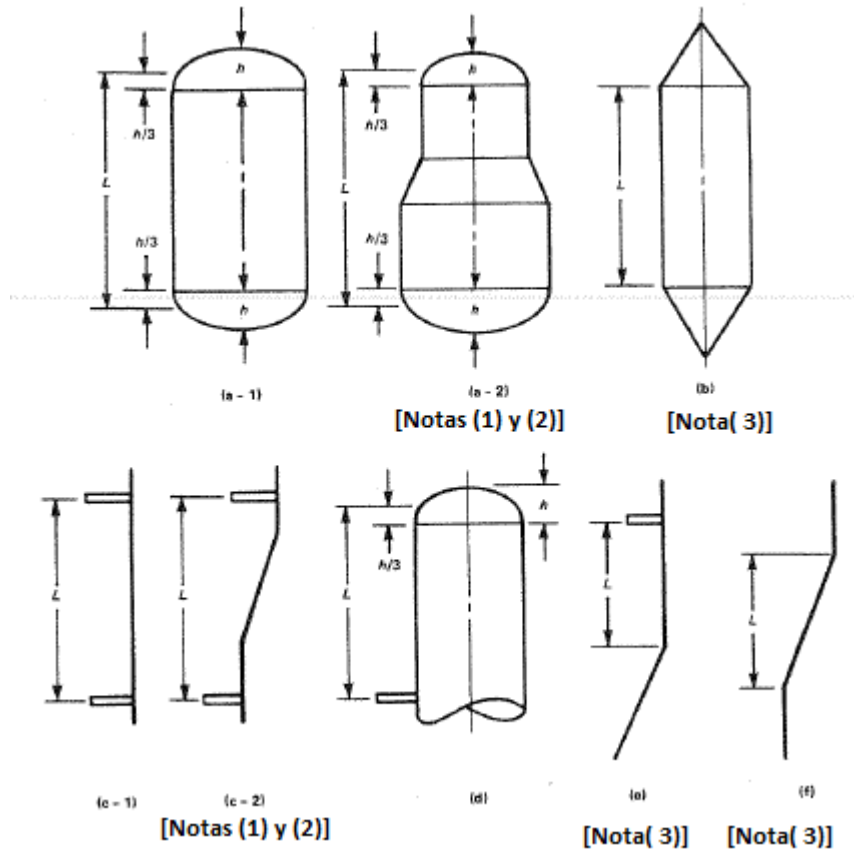


Fig. 6.4 Gráfica geométrica para recipientes cilíndricos sometidos a presión externa (Jawad & Farr, 1989).

Nótese que las curvas en la Fig. 6.4 están basadas en cilindros delgados con soporte simple al final con una presión externa actuando lateralmente y en los extremos. Estas curvas pueden usarse también, conservadoramente, para casos donde la presión esta solamente en los extremos, como es el caso con los recipientes encaquetados. Estas curvas pueden usarse también, conservadoramente, para cilindros con arreglos mejores que un soporte simple al final.

La longitud efectiva de un cilindro, L , necesita el uso de la Fig. 6.4, algunas veces puede ser difícil de establecer cuando el cilindro trae consigo otros componentes, como lo son secciones de transmisión y tapas. La Fig. 6.5 está dada por la Sección VIII División 1 del código ASME para definir la longitud efectiva de algunos de los cilindros encontrados. Las longitudes efectivas de los cilindros con espirales endurecidas o con espesores variables entre los soportes no están citadas por la Sección VIII División 1 del código ASME.



Notas:

- (1) Cuando la unión cono-cilindro o codo-cilindro no es una línea de soporte, el espesor nominal del cono, codo o sección tricónica no debe de ser menor del requerido para la siguiente sección de la armazón del cilindro.
- (2) Los cálculos deben de hacerse utilizando el diámetro y el espesor correspondiente de cada sección junto con la dimensión L como se muestra.
- (3) Cuando la unión cono-cilindro o codo-cilindro es una línea de soporte, el momento de inercia debe de proveerse de acuerdo con 1-8.

Fig. 6.5 Algunas líneas de soporte para armazones cilíndricos bajo presión externa (Código ASME Sección VIII División 1)

El factor de seguridad para la presión externa permisible obtenida usando las ecuaciones 6.26 ó 6.27 es 3 contra el efecto de torsión y también contra la cendencia.

6.2.3.2 Presión externa para cilindros con $D_0/t < 10$

Cuando D_0/t es menor que 10, la presión externa permisible se toma como el menor valor de las siguientes dos ecuaciones:

$$P_{a1} = \left[\frac{2.167}{(D_0/t)} - 0.0833 \right] B \quad \dots (ec. 6.28)$$

$$P_{a2} = \frac{2S}{(D_0/t)} \left[1 - \frac{1}{(D_0/t)} \right] \quad \dots (ec. 6.29)$$

Donde B se obtiene como se discutió anteriormente. Para los valores de (D_0/t) menores o iguales a 4, el valor de A se calcula de:

$$A = \frac{1.1}{(D_0/t)^2} \dots (ec. 6.30)$$

Donde:

Pa1 y Pa2= Presión externa permisible, psi.

A= tensión, ksi.

D₀= Diámetro externo del recipiente, pulgadas.

t= espesor, pulgadas.

Para valores de A mayores que 0.10, se utiliza un valor de 0.10. El valor de S se toma como el menor de dos veces el esfuerzo de tensión ó 0.9 veces el esfuerzo de cedencia del material a temperatura de diseño. El esfuerzo de cedencia se obtiene de la gráfica de presión externa del material usando de nuevo el valor de B obtenido del extremo del lado derecho del punto final de la curva apropiada de temperatura.

El factor de seguridad en las ecuaciones 6.28 y 6.29 varía de 3 para (D₀/t) = 10 hasta cerca de 1.67 para (D₀/t) = 2. Esta reducción gradual en el factor de seguridad cuando el cilindro se hace más grueso se justifica desde que el efecto de torsión deja de tomarse en consideración y el factor de seguridad para presión externa se maneja como el mismo que se usa para presión interna, que es 2/3 S_y.

Pasos para el diseño de cilindros con D₀/t < 10:

- 1) Usando el mismo procedimiento que en D₀/t > 10 para obtener el valor de B. Para valores de D₀/t menores a 4, el valor de A puede calcularse utilizando la (ec. 6.30). Para valores de A mayores a 0.10, use un valor de 0.10.
- 2) Utilizando el valor de B obtenido en el paso 1, calcular el valor de P_{a1} usando la (ec. 6.28).
- 3) Calcule el valor de P_{a2} utilizando la (ec. 6.29). Donde S dos veces el máximo esfuerzo de tensión permitido a temperatura de diseño ó 0.9 veces la fuerza de cedencia del material a temperatura de diseño, el que sea menor. La fuerza de cedencia se obtiene de las gráficas apropiadas de presión externa de la siguiente manera:
 - a) Para una curva de temperatura dada, determine el valor de B que corresponda al punto al extremo derecho de la curva.
 - b) El esfuerzo de cedencia es dos veces el esfuerzo obtenido en a).
- 4) El menor de los valores de P_{a1} calculado en el paso 2 ó P_{a2} calculado en el paso 3 debe de utilizarse para la máxima presión externa de trabajo permitida P_a. Compare el valor calculado de P_a con el de P. Si P_a es menor que P, seleccione un valor mayor de t y repita el procedimiento de diseño hasta que la P_a obtenía sea igual o mayor que P.

6.2.3.3 Ecuaciones empíricas

Es de interés notar que la Fig. 6.4 se puede utilizar únicamente para (D_0/t) hasta 1000. Valores más grandes no están permitidos actualmente por la sección VIII del código ASME. Una ecuación aproximada (Jawad, 1994) que es usada frecuentemente por diseñadores para grandes relaciones (D_0/t) , fue elaborada por la Marina de Estados Unidos y está dada por:

$$P = 0.866 \frac{E}{(L/D_0)(D_0/t)^{2.5}} \dots (ec. 6.31)$$

Donde:

E = Módulo de la elasticidad, psi

P = Presión externa permisible, psi

Esta ecuación integra un factor de seguridad de 3 y una relación de Poisson de 0.30.

Varios recipientes a presión están sujetos rutinariamente al vacío así como también a las cargas axiales del viento y el peso muerto. La sección VIII del código ASME no brinda algún método para el cálculo del esfuerzo compresivo permisible combinado con el efecto del vacío y las cargas axiales. Un método para esto está dado por Bergman (Bergman, 1955). Éste método usa un equivalente de la presión externa para explicar el efecto de la compresión axial en la presión externa. Otro método que es usado para combinar la compresión axial y la presión externa es el de Gilbert (Gilbert and Polani, 1979). Este método usa una ecuación interactiva similar a la que se utiliza para calcular el efecto de torsión en la viga de una columna.

6.2.3.4 Anillos De refuerzo

El espesor requerido de una armazón con un diámetro dado bajo una presión externa específica puede normalmente reducirse cuando se acorta la longitud efectiva del armazón. La longitud se puede reducir con la colocación de anillos de refuerzo en varios intervalos, como se muestra en la Fig. 6.5 el momento requerido de inercia en dichos anillos² se determina de:

$$I_s = \frac{D_0^2 L_s (t + A_s/L_s)}{14} \dots (ec. 6.32)$$

O

$$I'_s = \frac{D_0^2 L_s (t + A_s/L_s) A}{10.9} \dots (ec. 6.33)$$

² **NOTA DE PRECAUSIÓN:** Los anillos de refuerzo pueden someterse a deformaciones laterales. Esto debe de considerarse en adición a los requerimientos para I_s e I'_s .

Donde:

I_s = Momento de inercia requerido, Fig. 6.6 (a), de un corte transversal de la sección del anillo sobre su eje neutral, pg^4

I'_s = Momento de inercia requerido, Fig. 6.6 (b), de un corte transversal de la sección del anillo y la capa efectiva sobre su eje neutral combinado, pg^4 . La longitud efectiva del armazón se toma como $1.10(D_0 t_s)^{1/2}$.

L_s = La mitad de la distancia de la línea central del anillo de refuerzo hasta la siguiente línea de soporte de un lado. Una línea de soporte es (1) un anillo de refuerzo, (2) barra de la camisa, (3) línea de circunferencia en la tapa a un tercio de la profundidad de la tapa, (4) una unión cónica al cilindro.

A_s = Área del anillo de refuerzo, pg^2 .

t = Espesor mínimo del armazón, pulgadas.

t_s = Espesor nominal del armazón, pulgadas.

Pasos para diseñar un anillo de refuerzo:

1. Asumiendo que el armazón ha sido diseñado y que se conocen D_0 , L_s y t , seleccionar un miembro para utilizar el anillo de refuerzo y determinar el área transversal A_s . Después calcular el factor B utilizando la siguiente fórmula:

$$B = 0.75 \left[\frac{PD_0}{t + (A_s/L_s)} \right] \dots (ec. 6.34)$$

Donde:

B= esfuerzo de compresión, psi.

P= presión de diseño, psi.

2. (a) Si se utilizan valores tabulares de la Subparte 3 de la Sección II del Código ASME, Parte D, se puede utilizar una interpolación lineal o cualquier otro método racional de interpolación puede utilizarse para obtener el valor de A que caiga entre dos valores tabulares adyacentes para una temperatura específica. El valor de A determinado se aplica en la ecuación para I_s o I'_s en los pasos 6 (a) ó (b).
(b) Si se usan gráficas de Subparte 3 de la Sección II del Código ASME, Parte D, entre a la derecha de la gráfica apropiada del material bajo consideración en el valor de B calculado en el paso 1. Si se utilizan diferentes materiales para el armazón y el anillo de refuerzo, use la gráfica que arroje el resultado más grande de A en el paso 4.
3. Muévase horizontalmente a la izquierda de la línea de temperatura del material para la temperatura de diseño del material. Para valores de B que caigan por debajo de los valores del final izquierdo de la temperatura vea el paso 5.
4. Muévase verticalmente al final de la gráfica y lea el valor de A.

5. Para valores de B que caigan por debajo del extremo izquierdo de la línea de temperatura del material a la temperatura de diseño, el valor de A puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{2B}{E} \dots (\text{ec. 6.35})$$

Donde:

A= tensión, ksi.

E= módulo de elasticidad del material.

6. (a) En los casos donde solo se considera el anillo de refuerzo, calcule el momento de inercia requerido con la fórmula de I_s antes mostrada.
(b) En los casos en que se considere una combinación de anillos de refuerzo, el cálculo del momento de inercia requerido se hace con la fórmula de I_s' antes mostrada.
7. (a) En estos casos donde solo se considera el anillo de refuerzo, determine el momento de inercia I como se ha dado en las definiciones.
(b) En estos casos donde se considera el anillo y el armazón, determine el momento de inercia I' como se ha dado en las definiciones.
8. Si el momento de inercia es mayor que el disponible para la sección elegida, en estos casos donde el anillo de refuerzo no está unido o donde no se consideraron anillos de refuerzo combinados, se debe de seleccionar una sección con un mayor momento de inercia; el anillo debe de unirse a el armazón y se debe de considerar la combinación; o la combinación anillo-armazón que no se consideró junta anteriormente debe de considerarse. Si se requiere un momento de inercia mayor al disponible, en estos casos donde el anillo y el armazón combinados se consideraron, una nueva sección del anillo con un mayor momento de inercia debe de seleccionarse. En cualquier caso, cuando se utiliza una nueva sección, todos los cálculos deben de ser repetidos utilizando las propiedades de la nueva sección del anillo o la combinación anillo-armazón.

Acoplamiento de los anillos de refuerzo

Detalles del acoplamiento de los anillos de refuerzo al armazón se dan en la Fig. UG-30 de la Sección VIII División 1 del código ASME, la cual se reproduce en la Fig. 6.6. Las soldaduras deben ser capases de soportar la presión de la carga radial del armazón de PL_s . Esto está basado en el código suponiendo que los anillos de refuerzo deben de soportar la carga total lateral si los segmentos de armazón entre los anillos colapsan. También, el código requiere que las que las soldaduras soporten una carga de corte de $0.01PL_sD_0$. Esta carga de corte es arbitraria y está basada en la suposición que si el anillo se tuerce, los momentos de torsión se generan y crean fuerzas de corte. La Sección VIII División 1 del código ASME también posee otros requerimientos con respecto a los puntos de la soldadura y los espacios entre los anillos y el armazón.

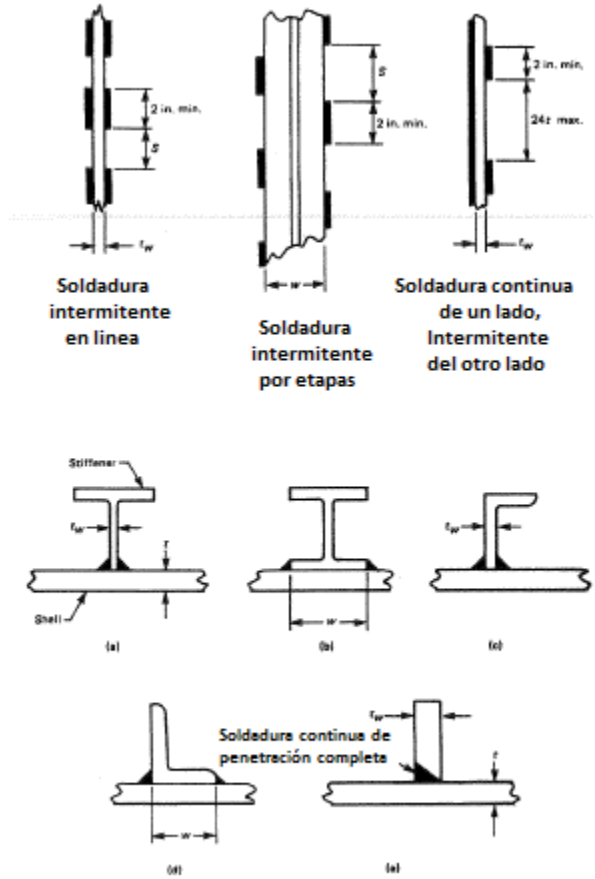


Fig 6.6 Algunos detalles del acoplamiento de los anillos De refuerzo (Código ASME Sección VIII División 1).

6.3 Armazones esféricas y tapas semiesféricas

6.3.1 Presión interna en armazones esféricas y presión en el lado cóncavo de las tapas semiesféricas

El espesor requerido en una armazón esférica delgada debido a la presión interna esta listado en el párrafo UG-27 de la Sección VIII División 1 del código ASME y está dado por:

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}, \text{ cuando } t < 0.356R \text{ ó } P < 0.665SE \dots (\text{ec. 6.36})$$

Donde:

E = Factor de eficiencia de la unión.

P = Presión interna, psi.

R = Radio interno, pulgadas.

S = Tensión en el material, psi.

t = Espesor de la tapa, pulgadas.

Esta ecuación se puede reescribir para calcular la presión máxima cuando el espesor es conocido. Tomando la forma de:

$$P = \frac{2SEt}{(R + 0.2t)} \dots (ec. 6.37)$$

Nótese la similitud entre la (ec. 6.36) y la ecuación clásica para esfuerzos en membrana en armazones esféricas (Beer and Jhonston, 1992), dada por:

$$t = \frac{PR}{2SE} \dots (ec. 6.38)$$

La diferencia está en el término adicional de 0.2P en el denominador. Este término fue agregado por el ASME para tomar en consideración la no linealidad del esfuerzo que se genera en armazones esféricas con espesor.

El diseñador debe estar consciente que la (ec. 6.36) determina el espesor basada únicamente en la presión. Armazones esféricas más grandes para almacenamiento de líquido comúnmente tienen baja presión interna. Esto se debe a que el factor predominante en el espesor está controlado por el peso del líquido más que por la (ec. 6.36). Un método para determinar el espesor en dichas esferas está dado en (API 620, 1990).

En algunos casos, el radio externo del armazón se conoce más fácilmente que el radio interno. En este caso la ecuación para el cálculo del espesor (ec. 6.36) se reemplaza R por $R_0 - t$. La ecuación resultante está dada en la Sección VIII División 1, Apéndice 1, Artículo 1-1, como:

$$t = \frac{PR_0}{2SE + 0.8P}, \text{ cuando } t < 0.356R \text{ ó } P < 0.665SE \dots (ec. 6.39)$$

O

$$P = \frac{2SEt}{(R_0 - 0.8t)} \dots (ec. 6.40)$$

Donde:

E = Factor de eficiencia de la unión.

P = Presión interna, psi.

R = Radio interno, pulgadas.

S = Tensión en el material, psi.

t = Espesor de la tapa, pulgadas.

Cuando la relación de t/R incrementa más allá de 0.356, el espesor dado por la (ec. 6.36) se hace no conservativo. Esto es similar al caso para armazones cilíndricas que se comentó anteriormente. La ecuación del Código ASME Sección VIII División 1 para armazones esféricas gruesas está dada por:

$$t = R \left(Y^{1/3} - 1 \right) \dots (ec. 6.41)$$

Donde:

$$Y = \frac{2(SE + P)}{2SE - P}$$

La (ec. 6.41) se usa en el Apéndice 1-3 de la Sección VIII División 1 del código ASME para determinar el espesor requerido en armazones esféricos para las condiciones donde $t > 0.356R$ ó $P > 0.665SE$. Esta ecuación puede escribirse también en términos de la presión como:

$$P = \frac{2SE(Y - 1)}{Y + 2} \dots (ec. 6.42)$$

Donde:

$$Y = \left[\frac{R + t}{R} \right]^3$$

Las expresiones para armazones gruesas dadas por las ecuaciones 6.41 y 6.42 pueden establecerse en términos del radio externo como:

$$t = R_0 \left(Y^{1/3} - 1 \right) Y^{1/3}, \text{ con } t > 0.356R \text{ o } P > 0.665SE \dots (ec. 6.43)$$

Donde:

$$Y = \frac{2(SE + P)}{2SE - P}$$

O en términos de la presión:

$$P = \frac{2SE(Y - 1)}{Y + 2} \dots (ec. 6.44)$$

Donde:

$$Y = \left[\frac{R_0}{R} \right]^3 = \left[\frac{R_0}{R_0 - 1} \right]^3$$

6.3.2 Presión externa en armazones esféricas y presión en el lado convexo de las tapas semiesféricas

El procedimiento para el cálculo de la presión externa en armazones esféricas esta dado en el Párrafo UG-28 (d) del código ASME Sección VIII División 1 y consiste en el cálculo de la cantidad:

$$A = \frac{0.125}{(R_o/t)} \dots (ec. 6.45)$$

Donde:

A = tensión, ksi.

R_o = Radio externo del armazón esférico, pulgadas.

t = espesor, pulgadas.

y después usando un diagrama de esfuerzo-tensión similar al de la Fig. 6.3 para determinar el valor de B. La presión externa permisible se calcula de:

$$P_a = \frac{B}{(R_o/t)} \dots (ec. 6.46)$$

Si el valor calculado de A cae a la izquierda de la línea de esfuerzo-tensión en una gráfica de presión externa dada, entonces P_a debe de calcularse de la siguiente expresión:

$$P_a = \frac{0.0625E}{(R_o/t)^2} \dots (ec. 6.46)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad del material a temperatura de diseño, psi.

B= esfuerzo de compresión, psi.

P_a = presión externa permisible, psi.

Las ecuaciones 6.45 y 6.46 también son aplicables a tapas semiesféricas con presión en el lado convexo. Esto se ilustra en la Fig. 6. Para una presión interna en compartimiento B, la tapa semiesférica def está sujeta a una presión y las ecuaciones 6.45 y 6.46 pueden utilizarse.

6.4 Tapas elipsoidales

6.4.1 Presión en el lado cóncavo

Comúnmente las tapas elipsoidales utilizadas tienen una relación del radio de la base a la profundidad de 2:1 (Fig. 6.8 a). La forma puede ser aproximada por un radio esférico de $0.9D$ y un radio de la esquina interna de $0.17D$ como se muestra en la (Fig. 6.8 b). El espesor requerido de tapas 2:1 debido a la presión en la parte cóncava está dado en el Párrafo UG-32(d) de la sección VII-1 del código ASME. El espesor se obtiene de la siguiente expresión:

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P} \quad \dots (ec. 6.47)$$

O en términos de la presión

$$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t} \quad \dots (ec. 6.48)$$

Donde:

D = diámetro interno de la base, pulgadas.

E = Factor de eficiencia de la unión.

P = Presión en el lado cóncavo de la tapa, psi.

S = Esfuerzo permisible para el material, psi.

t = Espesor de la tapa, pulgadas.

Las tapas elipsoidales con una relación de radio y profundidad diferente de 2:1 pueden también diseñarse. Las ecuaciones necesarias se dan él en Apéndice 1-4 de la Sección VIII División 1 del código ASME como:

$$t = \frac{PDK}{2SE + 0.2P} \quad \dots (ec. 6.49)$$

Donde

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right]$$

Y $D/2h$ varía entre 1.0 entre 3.0. El factor 1.0 corresponde a una tapa semiesférica. La ecuación K se encuentra en el Artículo 1-4(c) del Apéndice 1 de la Sección VIII División 1 del código ASME.

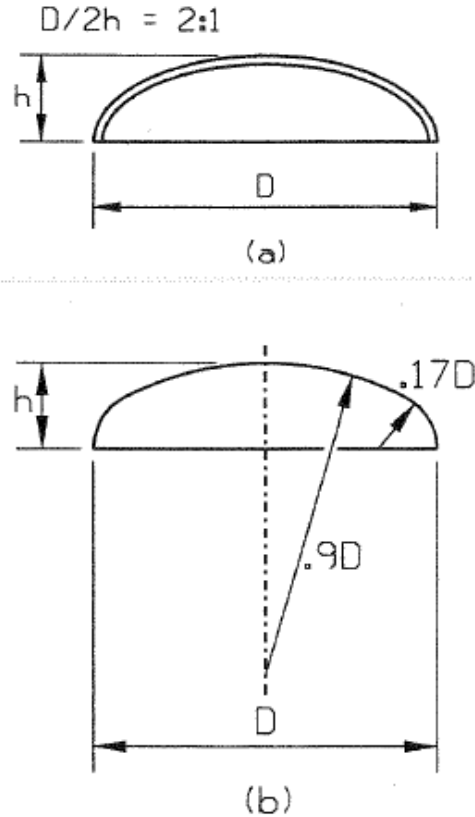


Fig. 6.8 Tapas elipsoidales

La (ec. 6.49) puede expresarse en términos de la presión requerida como:

$$P = \frac{2SEt}{KD + 0.2P} \quad \dots (ec. 6.50)$$

Estas ecuaciones pueden también escribirse en términos del diámetro externo, D_0 . Quedando así:

$$t = \frac{PD_0K}{2SE + 2P(K - 0.1)} \quad \dots (ec. 6.51)$$

O en términos de la presión requerida:

$$P = \frac{2SEt}{KD_0 + 2t(K - 0.1)} \quad \dots (ec. 6.52)$$

Es importante decir que la Sección VIII División 1 no brinda ninguna limitación P/S para las ecuaciones anteriores. Tampoco posee alguna regla para tapas elipsoidales cuando la relación P/S es amplia.

Donde:

D = diámetro interno de la base, pulgadas.

E = Factor de eficiencia de la unión.

P = Presión en el lado cóncavo de la tapa, psi.

S = Esfuerzo permisible para el material, psi.

t = Espesor de la tapa, pulgadas.

6.4.2 Presión en el lado convexo

El espesor necesario para resistir la presión el lado convexo de una tapa está dado en el Párrafo UG-33 de la Sección VIII División 1 del código ASME. El espesor requerido es el mayor de los dos espesores determinados de los pasos a continuación:

1. Multiplicar la presión de diseño en el lado convexo por el factor de 1.67. Después usar esta nueva presión y un factor de eficiencia de la unión de $E = 1.0$ en las ecuaciones apropiadas de las ecuaciones 6.47 a la 6.52 para determinar el espesor requerido
2. Determinar el radio mayor de la tapa elipsoidal. Después utilizar este valor como un radio esférico equivalente para calcular la presión externa permisible de manera similar al procedimiento dado para armazones esféricas en la sección 6.5.2. El procedimiento consiste en el cálculo de la cantidad:

$$A = \frac{0.125}{(K_0 D_0 / t)} \dots (ec. 6.53)$$

Donde

A = Tensión, ksi.

K_0 = Función de la relación $D_0/2h_0$ y se obtiene de la Tabla 6.5

D_0 = Diámetro externo de la tapa elipsoidal, pulgadas.

t = Espesor, pulgadas.

Después, usando un diagrama similar al de la Fig. 6.3 de esfuerzo-tensión, determinar el valor de B. La presión permisible se calcula de:

$$P_a = \frac{B}{(K_0 D_0 / t)} \dots (ec. 6.54)$$

Si el valor calculado de A cae a la izquierda de la línea de esfuerzo-tensión en una gráfica dada de presión externa, entonces P_a debe de calcularse de la ecuación:

$$P_a = \frac{0.0625}{(K_0 D_0 / t)^2} \dots (ec. 6.55)$$

Donde

P_a = presión permisible, psi.

E = módulo elástico del material a temperatura de diseño

Tabla 6.5 Factor K_0 para tapas elipsoidales con presión en el lado convexo

$D_a/2h_0$	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0
K_0	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.9
$D_a/2h_0$	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	
K_0	0.81	0.73	0.65	0.57	0.5	

6.5 Tapas torisféricas

6.5.1 Presión en el lado cóncavo

Las tapas poco profundas, a las que se refiere comúnmente como achatadas, pueden también construirse bajo las reglas de la Sección VIII División 1 del Código ASME, de acuerdo con el Párrafo UG-32(e). Las cabezas de este tipo más utilizadas pueden acercarse a un radio esférico, L , de 1.0D y un radio de esquina interna, r , de 0.006D, como se muestra en la Fig. 6.9. El espesor requerido para dicho tipo de cabezas debido a la presión en el lado cóncavo se obtiene de:

$$t = \frac{0.885PL}{SE + 0.1P} \quad \dots (ec. 6.56)$$

O en términos de la presión:

$$P = \frac{2SEt}{0.885L + 0.1t} \quad \dots (ec. 6.57)$$

Donde:

L = radio esférico interno, pulgadas.

E = Factor de eficiencia de la unión

P = Presión en el lado cóncavo de la tapa, psi.

S = Esfuerzo permisible para el material, psi.

t = Espesor de la tapa, pulgadas.

Las tapas torisféricas con varios radios esféricos y de esquina interna pueden también diseñarse bajo los requerimientos de la Sección VIII División 1 del Código ASME. Estas ecuaciones se encuentran en el Apéndice 1-4 como:

$$t = \frac{PLM}{2SE + 0.2P} \quad \dots (ec. 6.58)$$

Donde:

$$M = \frac{1}{4} \left[3 + \left(\frac{L}{r} \right)^{1/2} \right]$$

Donde:

L = radio esférico interno, pulgadas.

r = radio de esquina interna, pulgadas.

E = Factor de eficiencia de la unión

P = Presión en el lado cóncavo de la tapa, psi.

S = Esfuerzo permisible para el material, psi.

t = Espesor de la tapa, pulgadas.

Y L/r varía entre 1.0 y 16.67. La relación de 1.0 corresponde a una armazón semiesférica. La ecuación de M está dada en el Artículo 1-4(d) del Apéndice 1 de la Sección VIII División 1 del Código ASME.

La (ec. 6.58) puede expresarse en términos de la presión requerida como:

$$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t} \quad \dots (ec. 6.59)$$

Estas ecuaciones a su vez pueden escribirse en función del radio externo, L_0 , como:

$$t = \frac{PL_0M}{2SE + P(M - 0.2)} \quad \dots (ec. 6.60)$$

O en términos de la presión requerida

$$P = \frac{2SEt}{L_0M + t(M - 0.2)} \quad \dots (ec. 6.61)$$

La distribución del esfuerzo de membrana teórico en las direcciones circular, N_θ , y meridional, N_ϕ , en tapas poco profundas debido a la presión interna se muestran en la Fig. 6.10. Ambos esfuerzos en la cima de la tapa son de tensión con una magnitud de $S = Pa^2/2bt$. De cualquier forma, en la base de la tapa, el esfuerzo meridional es de tensión con una magnitud de $S = Pa/2$, mientras que el esfuerzo tangencial es compresivo con un valor de $S = (Pa/2t)[2 - (a/b)^2]$. Este esfuerzo compresivo el cual no se considera en la (ec. 6.58), puede causar una torsión en la tapa con él aumento de la relación D/t. Una forma de evitar dicha falla es calculando el espesor basado en una ecuación que tome en cuenta el efecto de torsión (Shield y Drucker, 1961) y se expresa como:

$$\frac{nP}{S_y} = \left(0.33 + \frac{5.5r}{D} \right) \left(\frac{t}{L} \right) + 28 \left(1 + \frac{2.2r}{D} \right) \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0.0006$$

Donde:

D = Diámetro de la base, pulgadas.

L = Radio esférico de la tapa, pulgadas.

n = Factor de seguridad

P = Presión de diseño, psi.

r = Radio de esquina interna, pg.

S_y = Esfuerzo de cedencia del material, psi

t = Espesor, pulgadas.

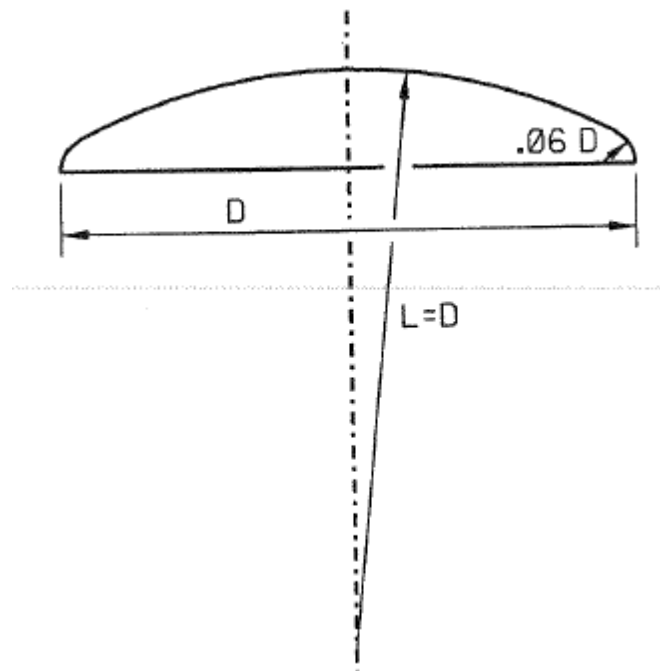


Fig. 6.9 Tapas torisféricas

Esta ecuación normalmente resulta en un espesor que es mayor al calculado de las ecuaciones 6.56, 6.58 ó 6.60 para tapas poco profundas con relaciones grandes de D/t.

El Párrafo UG-32(e) de la Sección VIII División 1 del Código ASME establece que el máximo esfuerzo permitido para calcular el espesor de una tapa torisférica no puede exceder los 20 ksi, a pesar de la resistencia del material. Este requerimiento se introdujo en el código para prevenir la posibilidad de la torsión de las tapas donde el espesor se reduce para utilizar materiales con mayor resistencia.

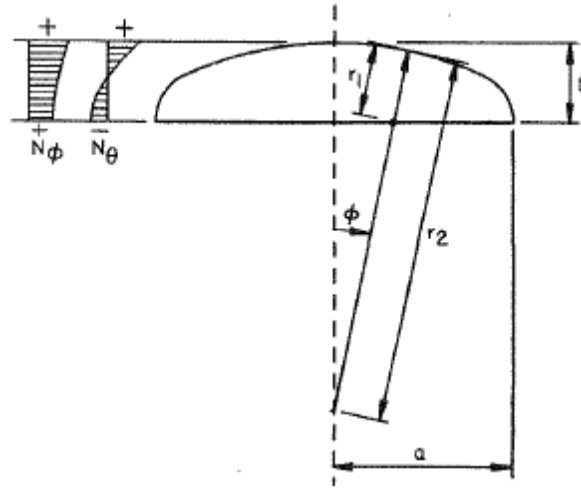


Fig. 6.10 Distribución de los esfuerzos en la tapa toriesférica

6.5.2 Presión en el lado convexo

Para el diseño de la presión en el lado convexo, las reglas de torsión para el cálculo de espesores en éste tipo de tapas es el mismo que para tapas elipsoidales, con la excepción de que el radio máximo de las tapas achatadas se utiliza en lugar de la cantidad $K_0 D_0$.

7 Diseño de Aspersores de Agua para Protección Contra Incendio de Recipientes a Presión

7.1 Diseño de un separador de gas y aceite

Las capacidades para separadores de gas y aceite pueden variar, según varíen estos factores:

1. Tamaño (diámetro y longitud) del separador.
2. Diseño y arreglo de las partes internas del separador.
3. Número de etapas de separación.
4. Presión de operación y temperatura del separador.
5. Características físicas y químicas de los fluidos del pozo (densidad, viscosidad, equilibrio de las fases, etc.).
6. Variaciones en la relación gas/líquido.
7. Tamaño y distribución de las partículas de líquido en la corriente de gas que pasa por el extractor de niebla.
8. Nivel de líquido mantenido en el separador.
9. Patrón de flujo del pozo, estacionario o en transición.
10. Material extraño contenido en el fluido del pozo.
11. Tendencia del aceite a formar espumas.
12. Condición física del separador y sus componentes.
13. Otros factores.

Los puntos del 5 al 7, generalmente, no se conocen con suficiente detalle y precisión para permitir cálculos precisos del tamaño o diseño de un separador. De cualquier forma, dichos cálculos pueden basarse en datos empíricos y suposiciones para propósitos comparativos y económicos.

7.1.2 Método del Arnold

7.1.2.1 Separadores verticales

Fórmula para la capacidad del Gas

$$D_i^2 = 504k \left(\frac{Tzq_g}{P_{sep}} \right) \dots (ec. 8.1)$$

Donde:

D_i = Diámetro interno del recipiente, pg.

T = Temperatura, °R.

q_g = Gasto de gas, MMPCD.

P_{sep} = Presión de separación, psi.

z = Factor de desviación del gas.

La k es una constante que depende de las propiedades del gas y del líquido. Está definida de la siguiente manera:

$$k = \left[\frac{\left(\frac{C_d}{d_m} \right) \rho_g}{\rho_L - \rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \dots (ec. 8.2)$$

Donde:

C_d = coeficiente de arrastre.

d_m = Diámetro de las gotas de líquido a separar, micras.

ρ_g = Densidad del gas, lb/pie³.

ρ_L = Densidad del líquido, lb/pie³.

Cuando las gotas tienen tamaño de 100 micras, k puede determinarse utilizando la siguiente gráfica:

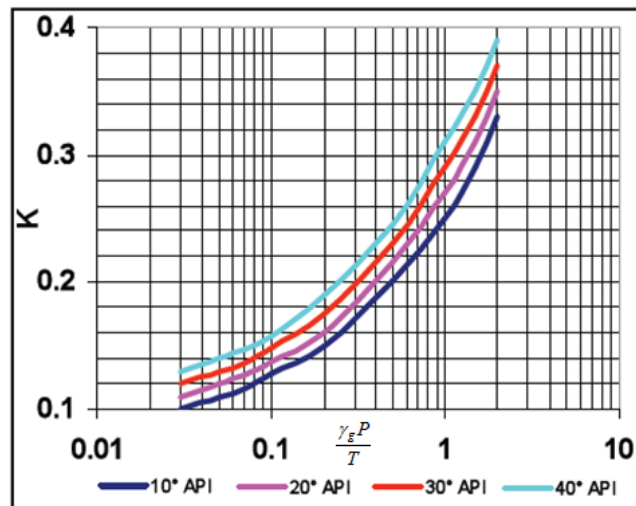


Fig. 7.1 Gráfica para calcular k para diferentes densidades API

Fórmula para la capacidad de líquido

$$D_i^2 h = \frac{t_r q_L}{0.12} \dots (ec. 8.3)$$

Donde:

h = Altura del volumen de líquido, pg.

t_r = Tiempo de residencia del líquido, min.

q_L = Gasto de Líquido, BPD.

Longitud de tapa a tapa

$$L_{s-s} = h + \frac{76}{0.12} \dots (ec. 8.4)$$

Donde:

L_{s-s} = longitud de tapa a tapa, pies.

Relación de esbeltez

Para el método de Arnold esta relación debe de encontrarse entre 3 y 4 ($3 < R_{es} < 4$). Y se calcula de la siguiente manera:

$$R_{es} = \frac{12 L_{s-s}}{d} \dots (ec. 8.5)$$

7.1.1.2 Separadores horizontales**Fórmula de la capacidad del gas**

$$D_i L_{eff} = 42k \left(\frac{Tzq_g}{P_{sep}} \right) \dots (ec. 8.6)$$

Donde:

D_i = Diámetro interno del recipiente, pg.

T = Temperatura, °R.

q_g = Gasto de gas, MMPCD.

P_{sep} = Presión de separación, psi.

z = Factor de desviación del gas.

Fórmula de la capacidad de líquido

$$D_i^2 L_{eff} = \frac{t_r q_L}{0.7} \dots (ec. 8.7)$$

Donde:

h = Altura de volumen de líquido, pg.

t_r = Tiempo de residencia del líquido, min.

q_L = Gasto de Líquido, BPD.

L_{eff} = longitud efectiva, pies.

Longitud de tapa a tapa

$$L_{s-s} = L_{eff} + \frac{d}{12} \dots (ec. 8.8)$$

Aunque, para permitir la turbulencia en la entrada y la colocación de la boquilla en la salida, la longitud efectiva puede aproximarse al valor de 0.75 veces la longitud de tapa a tapa:

$$L_{eff} = \frac{3}{4} L_{s-s} \dots (ec. 8.9)$$

Despejando obtenemos que:

$$L_{s-s} = \frac{4}{3} L_{eff} \dots (ec. 8.10)$$

Donde:

L_{s-s} = longitud de tapa a tapa, pies.

L_{eff} = longitud efectiva, pies.

Relación de esbeltez

La relación de esbeltez para separadores horizontales respeta las mismas reglas que para los separadores verticales y se calcula de la misma forma con la (ec. 8.5).

7.1.1.3 Ejemplo de dimensionamiento de un separador

Determinar las dimensiones de un separador horizontal con una presión de operación de 1000 psia. A una temperatura de 60°F, manejando una producción de 2000 bl_o/día @ c.s. y 10 MMPCD

@ c.s. de gas. La densidad relativa del gas es de 0.6 y la del aceite de 40°API, z para el gas es de 0.84.

Calculando K de forma gráfica:

$$\frac{\gamma_g P}{T} = \frac{(0.6)(1000)}{60 + 460} = 1.1538 \left[\frac{psia}{^\circ R} \right]$$

Con el valor de $\frac{\gamma_g P}{T}$, usamos la Fig. 7.1 para calcular el valor de K.

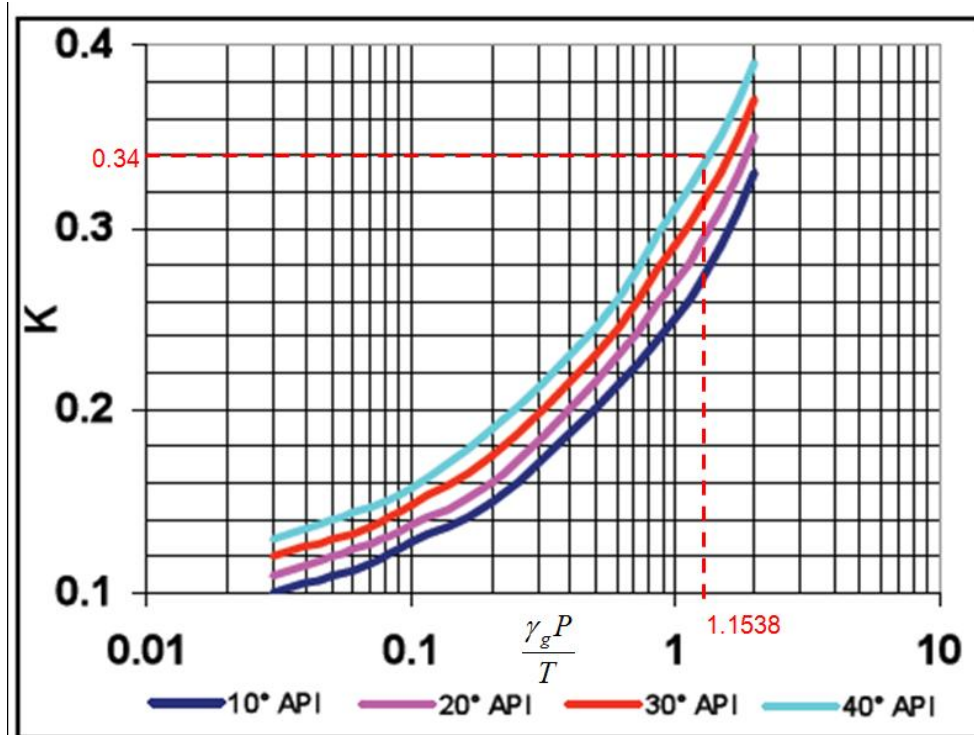


Fig. 7.2 Ejemplo de cálculo de K

De la Fig. 7.2 observamos que $K \approx 0.34$.

Ahora con la fórmula de la (ec. 8.6) se realizará el cálculo de la capacidad del gas:

$$D_i L_{eff} = 42k \left(\frac{Tzq_g}{P_{sep}} \right) = 42(0.34) \left(\frac{(60 + 460)(0.84)(10)}{1000} \right) = 62.375 [pie^2]$$

Ahora despejando la (ec. 8.6), suponiendo diámetros internos del recipiente y utilizando la (ec. 8.8), se calculan los puntos para graficar la curva de manejo del gas de la siguiente manera:

$$L_{eff} = \frac{62.375}{D_i} = \frac{62.375}{16} = 3.898 [pie]$$

$$L_{s-s} = L_{eff} + \frac{d}{12} = 3.898 + \frac{16}{12} = 5.231 [pie]$$

Quedando los valores de la siguiente manera:

D_i pg	$L_{eff} = \frac{62.375}{D_i}$ pie	$L_{s-s} = L_{eff} + \frac{d}{12}$ pie
16	3.898	5.232
20	3.119	4.785
24	2.599	4.599
28	2.228	4.561
30	2.079	4.579
36	1.733	4.733
42	1.485	4.985

Ahora con las ecuaciones 8.5, 8.7 y 8.10; suponemos D_i y t_r para obtener los valores para las curvas:

$$L_{eff} = \frac{t_r q_L}{0.7 D_i^2} = \frac{(3)(2000)}{(0.7)(24^2)} = 14.881 [pie]$$

$$L_{s-s} = \frac{4}{3} L_{eff} = \frac{4}{3} (14.881) = 19.841 [pie]$$

$$R_{es} = \frac{12 L_{s-s}}{d} = \frac{12 (19.841)}{24} = 9.921$$

Tiempo de residencia	Di	$L_{eff} = \frac{t_r q_L}{0.7 D_i^2}$	$L_{s-s} = \frac{4}{3} L_{eff}$	$R_{es} = \frac{12 L_{s-s}}{d}$
s	pg	pie	pie	
3	24	14.881	19.841	9.921
3	30	9.524	12.698	5.079
3	36	6.614	8.818	2.939
3	42	4.859	6.479	1.851
2	24	9.921	13.228	6.614
2	30	6.349	8.466	3.386
2	36	4.409	5.879	1.960
1	20	7.143	9.524	5.714
1	24	4.960	6.614	3.307
1	28	3.644	4.859	2.082

Las dimensiones del separador seleccionado, D_i y L_{s-s} , deben de caer dentro del área dibujadas por las líneas de la relación de esbeltez, R_{es} , además de tener en cuenta los diámetros nominales, utilizados anteriormente en las tablas.

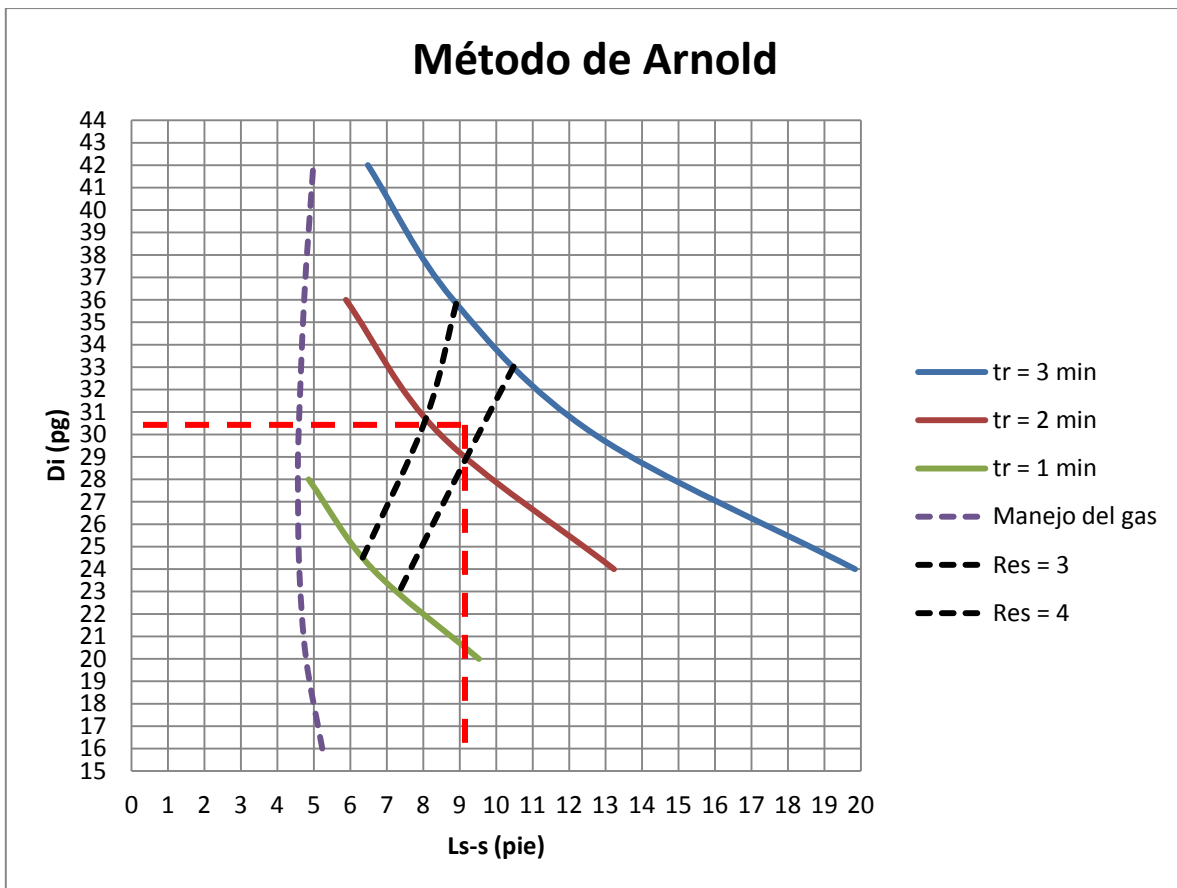


Fig. 7.3 Ejemplo de cálculo del Método de Arnold

De este modo, $D_i = 30$ pulgadas y $L_{s-s} = 9$ pies (Fig. 7.4).

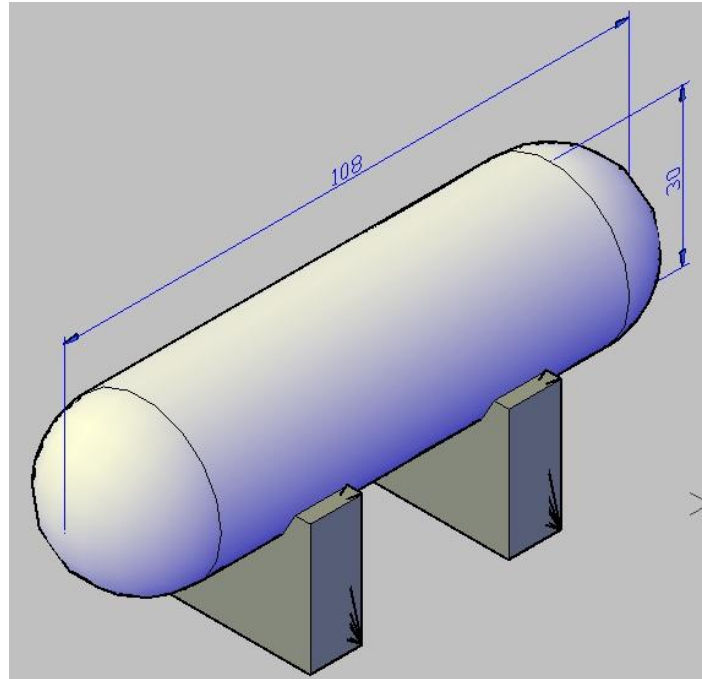


Fig. 7.4 Representación isométrica del separador diseñado

7.2 Diseño del sistema de aspersores para recipientes a presión

7.2.1 Distribución de las boquillas

La localización de las boquillas debe de ser preferentemente en lados alternados de la estructura de acero horizontal.

Los sistemas de aspersores de agua diseñados para extinguir, proteger contra la exposición o controlar el incendio pueden dispersar gases inflamables para la prevención del incendio, considerando lo siguiente:

1. Las boquillas aspersoras deben de ser del tamaño y tipo para una densa descarga de agua en gotitas en el área donde se puedan liberar posibles vapores inflamables a una velocidad lo suficientemente rápida para diluir los vapores inflamables a un nivel por debajo del límite inferior de inflamabilidad.

- Las boquillas aspersoras deben de proporcionarse para proveer cobertura a las posibles fuentes de derrame como bridas, conexiones flexibles, bombas, recipientes, válvulas, contenedores, etc.

La separación recomendada para los aspersores se muestra en la Fig. 7.5 para separadores verticales y para separadores horizontales.

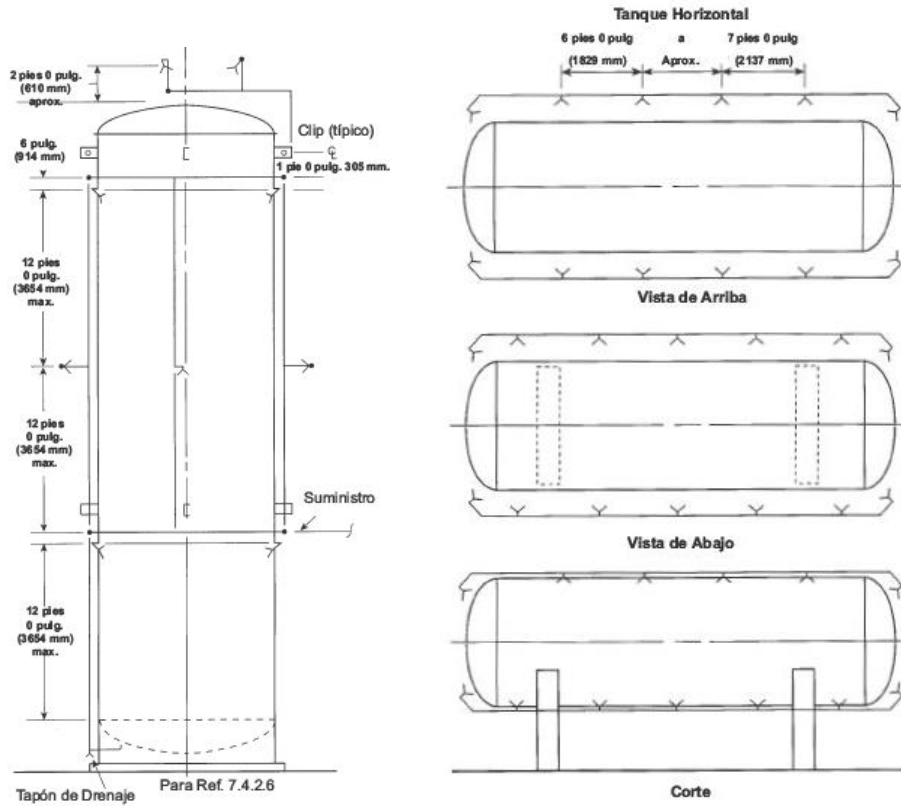


Fig. 7.5 Distanciamiento entre boquillas para separadores verticales y horizontales

7.2.2 Presión por velocidad

La presión por velocidad P_v , es la medida de la energía requerida para mantener el agua de la tubería en movimiento al final de la boquilla, o en la sección final del sistema a la presión total disponible en la tubería a ese punto debe de considerarse como la causante del flujo. De cualquier modo, en otras boquillas o puntos de unión, la presión que genera el flujo es la presión normal, que es la presión total menos la presión por velocidad. La presión por velocidad puede obtenerse de la fórmula de la presión total (P_t), de la siguiente manera:

$$P_v = P_t - P_n$$

Y como se comentó en el capítulo 5, se permite que en los cálculos se ignoren las correcciones en la presión por velocidad cuando la presión por velocidad no exceda del 5% de la presión total en cada punto de conexión. En caso contrario deben de calcularse las correcciones.

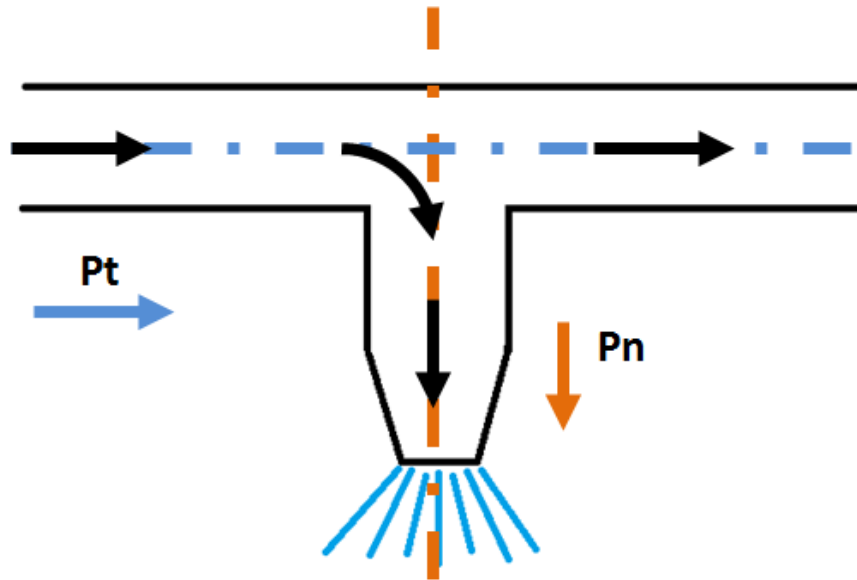


Fig. 7.6 Presiones que actúan sobre la boquilla

Se requiere una presión mínima de operación para desarrollar el patrón de asperción adecuado y para superar los efectos causados por el viento. Para boquillas con orificios de $\frac{3}{8}$ pg (9.5mm) o menos, se recomienda una presión mínima de 30 psi (1.5kPa).

Si $v \leq 2.5 \sqrt{P_t}$ entonces la presión por velocidad no necesita calcularse, donde v es la velocidad (pie/s) y P_t es la presión total (psi).

La ecuación inicial es la fórmula básica para el cálculo de la presión por velocidad donde el gasto esta en gpm, el diámetro en pg y la presión por velocidad está en psi.

$$P_v = \frac{0.001123Q^2}{D^4}$$

$$P_v \geq 0.05P_t$$

$$0.05P_t = \frac{0.001123Q^2}{D^4}$$

$$P_t = 0.02246 \frac{Q^2}{D^4}$$

$$P_t = 0.02246 \frac{\left(\frac{1}{0.002228}\right)^2 Q^2}{D^4} = 4525 \frac{Q^2}{D^4}$$

$$P_t = \frac{4525Q^2}{(12)^4 D^4} = 0.218 \frac{Q^2}{D^4}$$

$$P_t = 0.218 \frac{(0.7854D^2)^2 v^2}{D^4} = 0.134v^2$$

$$v^2 = 7.46P_t$$

$$v \leq 2.7\sqrt{P_t}$$

Donde:

P_v = Presión por velocidad, psi

Q = Gasto, gpm

D = Diámetro interior de la tubería, pg

P_t = Presión total, psi

v = velocidad, pie/s

A = Área transversal, pg²

P_v se determina por prueba y error. Se necesita estimar el gasto, Q , en la tubería corriente arriba de la boquilla, que se utiliza para determinar una P_v de prueba, q de prueba y Q de prueba. Después de determinar Q de prueba, se utiliza este valor para determinar una nueva P_v . Si la nueva P_v es aproximadamente igual a la P_v de prueba, hay que calcular un nuevo Q y seguir con las correcciones hasta que la P_v actual y la P_v de prueba coincidan.

Las Figs. 7.7 y 7.8 pueden utilizarse para determinar las presiones por velocidad o la presión por velocidad puede determinarse dividiendo el gasto en gpm al cuadrado por la constante apropiada en la Tabla 7.1.

Las siguientes suposiciones son aplicadas en la presión por velocidad para los cálculos:

1. En cualquier boquilla a lo largo de la tubería, exceptuando la final, la presión normal es la que actúa sobre cada boquilla. En la boquilla final actúa la presión total.
2. En cualquier boquilla a lo largo de la tubería, exceptuando la última, la presión que causa el flujo es igual a la presión total menos la presión por velocidad corriente abajo.
3. Para encontrar la presión normal en cualquier boquilla, exceptuando la última, se asume un gasto en la boquilla en cuestión y se determina la presión por velocidad para el gasto

total corriente arriba. Debido a que la presión normal es igual al gasto supuesto. Si no, se debe de asumir un nuevo valor y repetir los cálculos.

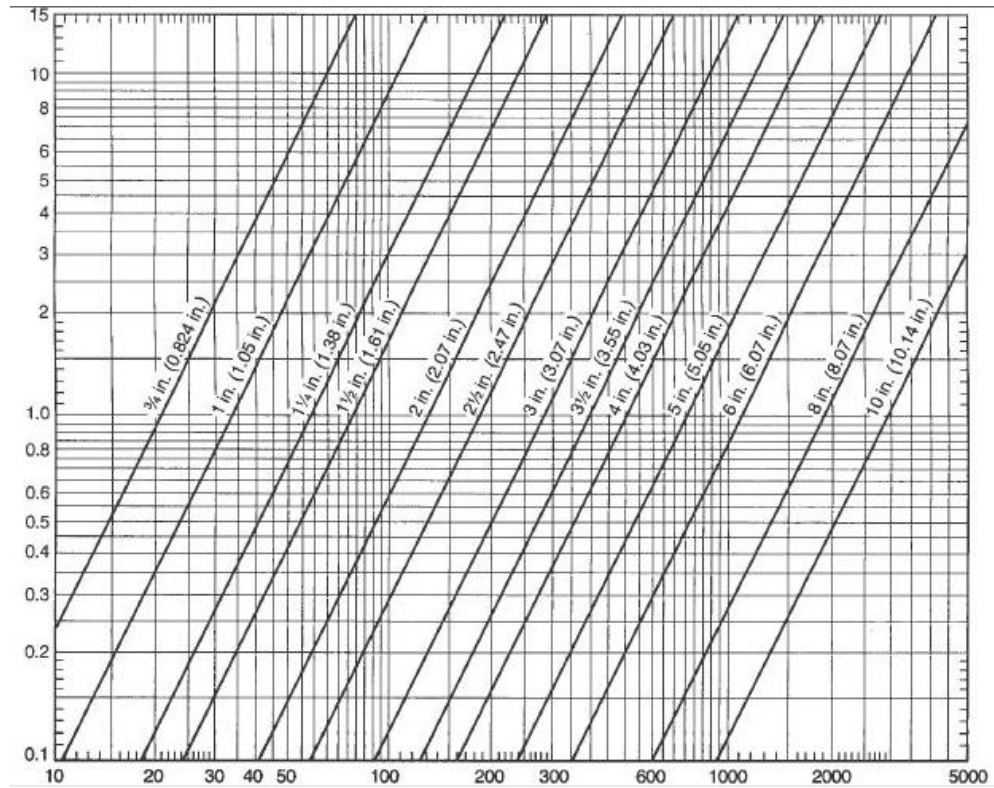


Fig. 7.7 Gráfica de gasto-presión para el cálculo de presiones por velocidad en sistema inglés

La presión por velocidad tiene el efecto de reducir el gasto a la salida de una unión. Ignorar la velocidad puede introducir errores significativos, que conlleven a una presión en la boquilla menor a la requerida. Esto es cierto, especialmente cuando las velocidades son altas (exceden de 20 pie/s).

El gasto de las boquillas puede obtenerse de las curvas de descarga en lugar de los cálculos individuales, como prefiera el que realice los cálculos. De manera similar, las características del flujo de las líneas o secciones de los sistemas pueden obtenerse graficando los resultados en $N^{1.85}$ en lugar de calcular los coeficientes de descarga (valores de K).

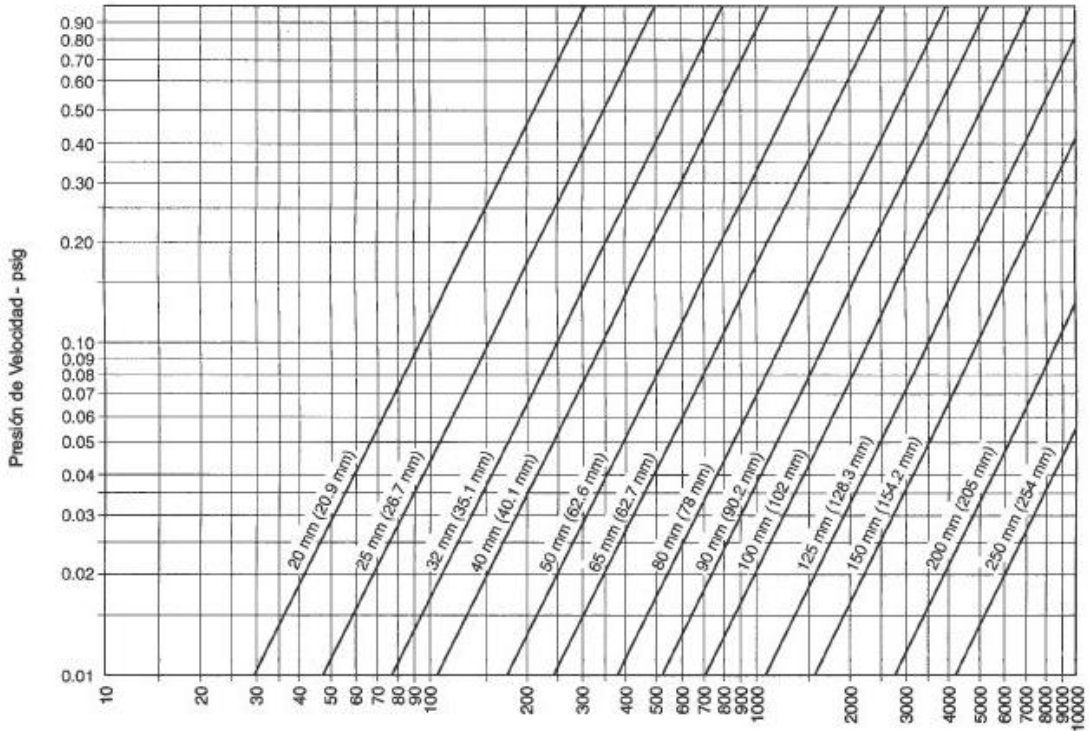


Fig. 7.8 Gráfica de gasto-presión para el cálculo de presiones por velocidad en unidades SI

Tabla 7.1 Constantes para el cálculo de la presión por velocidad

<i>Cédula de la tubería</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Constante basada en el diámetro interno (ID) real</i>
40	1	1,080
40	1 ¼	3,230
40	1 ½	5,980
40	2	16,200
40	2 ½	33,100
40	3	78,800
40	3 ½	141,000
40	4	234,000
40	5	577,000
40	6	1,204,000
30	8	3,780,000
40	8	3,620,000

7.2.3 La Norma NRF-016-PEMEX-2010

Esta es la norma que establece PEMEX para el diseño de redes contra incendio para instalaciones terrestres. Está basada en las normas NFPA, aunque sus requerimientos son un poco más estrictos, los comentaremos a continuación la parte referente a sistemas de aspersión.

Para la instalación de estos sistemas debe de considerarse:

- La extinción de los incendios
- Control de la combustión
- Protección de la explosión
- Prevención de incendios
- Mitigación de nubes tóxicas

Cada sistema de aspersión se debe de diseñar con dos alimentaciones, conectadas opuestamente y de tomas diferentes de la red de agua contra incendio. Se debe de considerar la instalación de filtros tipo “y”, uno por cada tubería de alimentación a los sistemas de aspersores, que no permita el paso de partículas mayores a $\frac{1}{8}$ pg (3mm), por lo que se deben de instalar antes de la válvula de control automático y en la alimentación manual después de la válvula de apertura y cierre rápido.

La válvula de control automático se debe de localizar como mínimo a 10 metros de las instalaciones que pudieran afectarla en caso de incendio o explosión. La válvula de alimentación manual debe de localizar por lo menos a 15 metros de distancia de las instalaciones que protege el sistema de aspersión.

En la alimentación de agua por la válvula de control automático como por la válvula de operación manual, deben instalarse en el punto más bajo válvulas de compuerta con diámetro mínimo de $\frac{3}{4}$ pg NPS para el vaciado del agua acumulada en los cabezales, cumpliendo con lo establecido en la sección 6.3.3 de la NFPA 15, edición 2007 o equivalente en su última edición.

Los cálculos hidráulicos para el diseño de la tubería deben determinar el diámetro necesario que permita que la presión y el gasto estén disponibles en todas y cada una de las boquillas que integren el sistema conforme el requerimiento de protección del área o equipo. El diámetro de la tubería del cabezal de distribución de agua no debe de ser menor a 2 pg, aun cuando por diseño este diámetro sea menor. De la misma forma la alimentación a boquillas individuales debe de ser proporcionada por tuberías de no menos de 1 pg para acero al carbón galvanizado y sin galvanizar y de $\frac{3}{4}$ pg para cobre y acero inoxidable.

La velocidad máxima de flujo permitida dentro de las tuberías de los sistemas de aspersión para agua dulce debe de ser de 20 pie/s (6.09 m/s). En el caso de agua salada, dicha velocidad debe de ser como máximo de 15 pie/s (4.57 m/s).

La tubería que alimenta a los sistemas de aspersión debe de diseñarse para resistir una presión de trabajo mínima de trabajo de 150 psi (10.5 kg/cm²).

Las tuberías de los anillos de aspersión deben tener una pendiente de 0.5% hacia el tubo de alimentación para asegurar el drenado de los anillos y cabezales una vez que se concluya la operación del sistema.

En todos los casos, los sistemas de aspersores se deben de diseñar para operar a presiones de trabajo dentro de un rango de 60 a 125 psi (5.62 a 8.79 kg/cm²).

El espaciamiento entre boquillas instaladas vertical u horizontal mente no debe de exceder de 12 pie (3.6 m), asimismo las boquillas se deben de seleccionar para proporcionar una densidad de aplicación mínima de 0.10 gpm/pie² (4.27 [l/min]/m²) a una presión mínima de 60 psi (4.08 kg/cm²) en la boquilla más lejana.

Los arreglos para la alimentación individual de cada aspersor se debe efectuar mediante tuberías localizadas en la parte superior (lomo) de la tubería de distribución (como se muestra en la Fig. 7.9) para evitar obstrucciones en la descarga de las boquillas por acumulaciones de sedimentos.

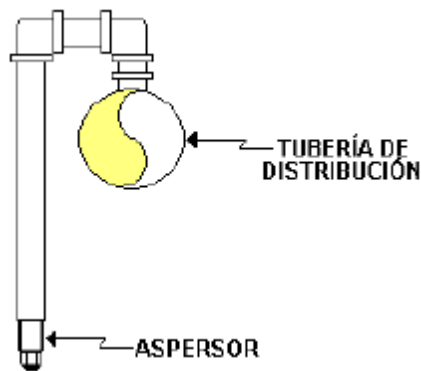


Fig. 7.9 Ejemplo del arreglo de alimentación de las boquillas

Las boquillas de aspersión deben de ser de bronce o acero inoxidable, de cono lleno, no menores de ¾ pg NPS (19 mm DN) con tamaño de orificio no menor a ¼ pg (6.37 mm).

7.2.3.1 Recipientes a presión horizontales

La distribución de agua de enfriamiento por aspersión se debe hacer por medio de un anillo colocado por encima de recipientes para mojar la mitad superior y otro anillo por debajo para mojar la mitad inferior (Fig. 7.10). Las boquillas deben de estar entre 0.6 a 0.9 m de la pared del equipo a mojar, la separación máxima entre boquillas de un mismo anillo no debe de exceder de 6 pies (1.8 m).

7.2.3.2 Recipientes a presión verticales

La protección debe de ser de hasta (12 m) sobre el nivel del piso terminado. El espaciamiento máximo entre anillos no debe de exceder de 12 pie (3.6 m). Para boquillas de un mismo anillo no debe de exceder 6 pie (1.8 m).

El faldón o patas de soporte deben de estar recubiertos con cemento o un recubrimiento resistente al fuego.

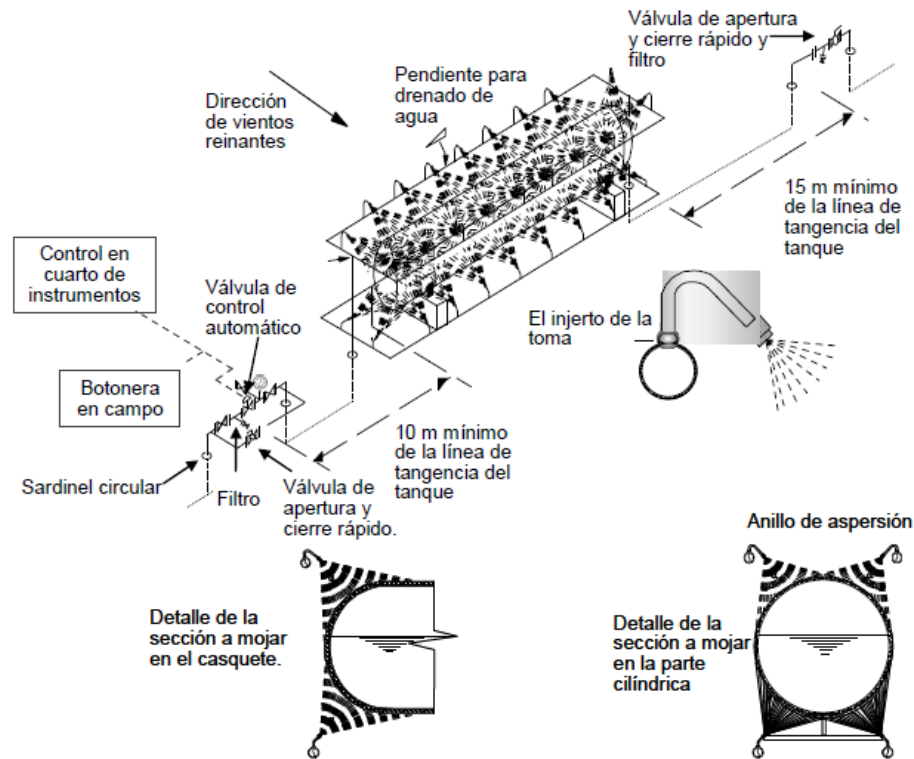


Fig. 7.10 Ejemplo de un sistema de aspersores para un separador horizontal

7.2.4 Ejemplo de diseño

A partir de las dimensiones del separador calculadas en el ejemplo anterior, se procederá a hacer el diseño del sistema de protección contra incendio a base de aspersores de agua.

Primero procederemos a calcular el gasto mínimo de aplicación, para ello requerimos la superficie total del recipiente:

$$S_T = S_c + S_t$$

Donde:

S_T = superficie total, pie^2 .

S_c = superficie del cilindro, pie^2 .

S_t = superficie de las tapas, pie^2 .

Ahora calcularemos S_t y S_c . Como las tapas son semiesféricas utilizaremos la fórmula de la superficie de una esfera para el cálculo de S_t :

$$S_t = 4\pi r^2 = 4\pi \left(\frac{15}{12}\right)^2 = 19.64 [\text{pie}^2]$$

Para el cilindro no tomaremos en cuenta el área de las tapas:

$$S_c = 2\pi r l = 2\pi \left(\frac{15}{12}\right) \left(\frac{78}{12}\right) = 51.1 [\text{pie}^2]$$

La superficie total del recipiente es:

$$S_T = S_c + S_t = 19.64 + 51.1 = 70.74 [\text{pie}^2]$$

Por lo tanto el gasto total mínimo teórico (Q_T) es:

$$Q_T = S_T * 0.52 \left[\frac{\text{gpm}}{\text{pie}^2}\right] = 70.74 * 0.25 = 17.69 [\text{gpm}] \text{ de agua}$$

Ahora utilizando las Figs. 7.5 y 7.10 se da forma y dimensión al sistema, Figs. 7.11 y 7.12 (las dimensiones están en pulgadas).

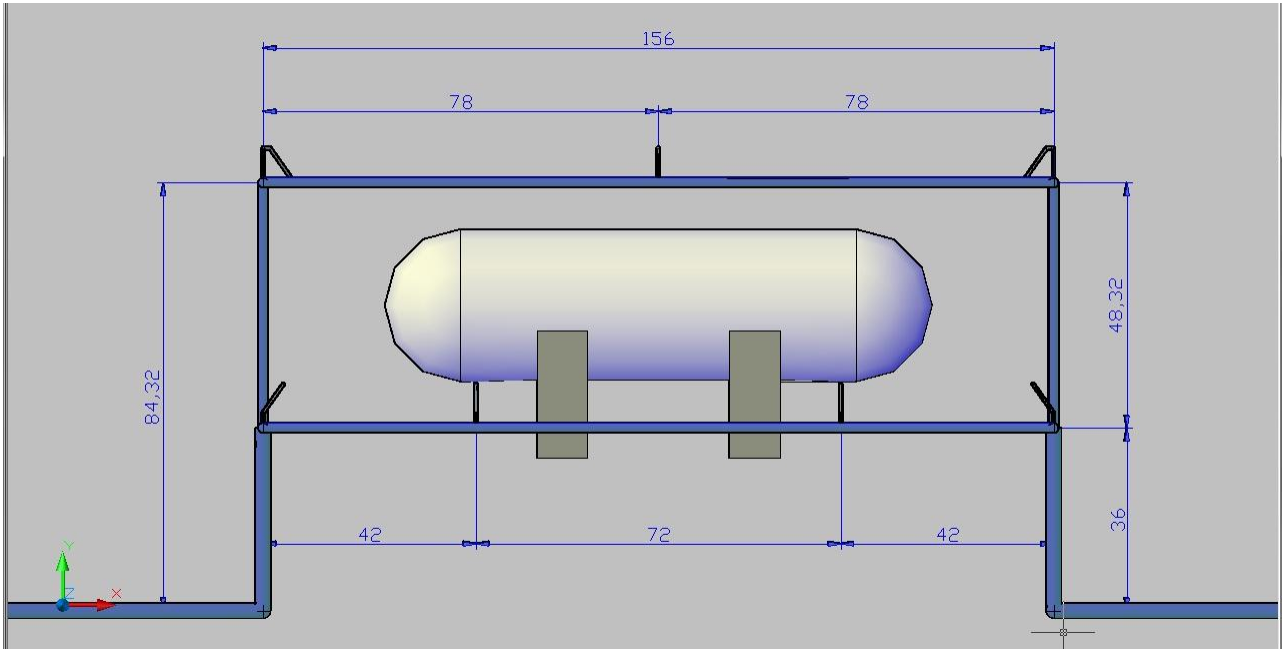


Fig. 7.11 Vista lateral

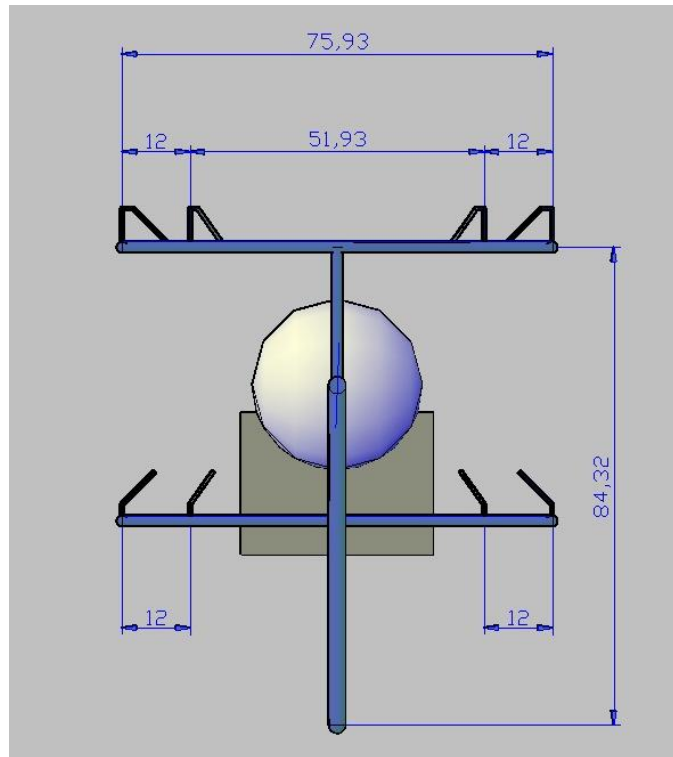


Fig. 7.12 Vista Frontal

El diseño de los anillos se ha hecho según lo pide la norma NRF-016-PEMEX-2010, así como las dos tomas, la más corta (10 m) que corresponde al sistema de activación automática y la más larga (15

m) que corresponde al sistema de activación manual. La Fig. 7.13 muestra la representación del sistema con ambas tomas en vista isométrica.

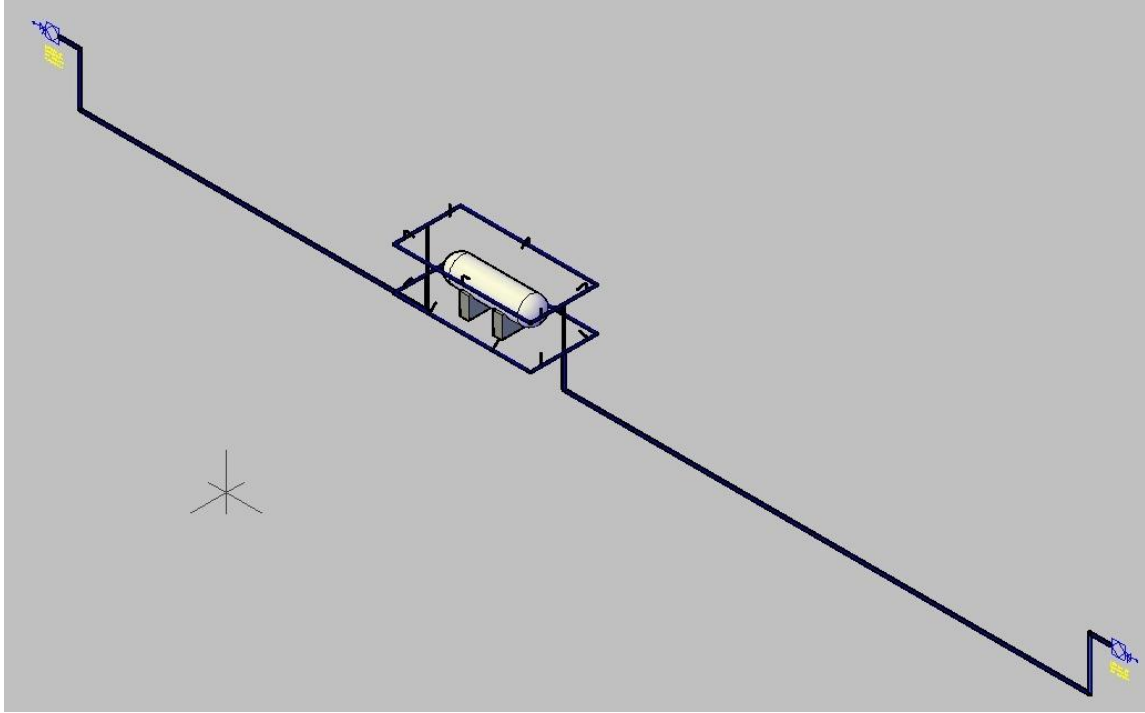


Fig. 7.13 Vista isométrica

Ahora se colocarán los puntos de referencia hidráulica. Para fines de diseño tomaremos la parte más larga del sistema y a partir de ahí haremos los cálculos para los anillos (Fig. 7.14).

Utilizando las fórmulas del capítulo 5 en la sección de Procedimientos para los cálculos hidráulicos y la tabla 5.7, se realizan los cálculos hidráulicos, para cada punto de referencia. Para el tamaño de la tubería, con los gastos utilizados la Fig. 7.7 nos muestra que no hay pérdidas por presión de velocidad.

Para este ejemplo utilizaremos boquillas marca LIFECO HV-A, con un coeficiente de descarga, k , de 2.24.

La presión mínima para que la boquilla en (1) pueda operar correctamente es de 20 psi, como lo marca la NFPA 17, pero la Norma NRF-016-PEMEX-2010 marca una presión mínima de 60 psi, calculamos el gasto en (1):

$$q_1 = k_1 \sqrt{P_1} = 2.24x\sqrt{60} = 17.4 [gpm]$$

Para el punto (2), k debe de ser corregida por presión para las boquillas subsecuentes:

$$k_2 = \frac{17.4}{\sqrt{67.5}} = 2.11$$

En el punto (6) debe de calcularse una k equivalente para el sistema inferior:

$$k_6 = \frac{145.8}{\sqrt{75.5}} = 16.77$$

Realizados los cálculos hidráulicos (se muestran en las tablas de las páginas siguientes), obtenemos que la demanda del sistema es de **296.9 gpm de agua** y la presión requerida por el sistema es de **130.6 psi**.

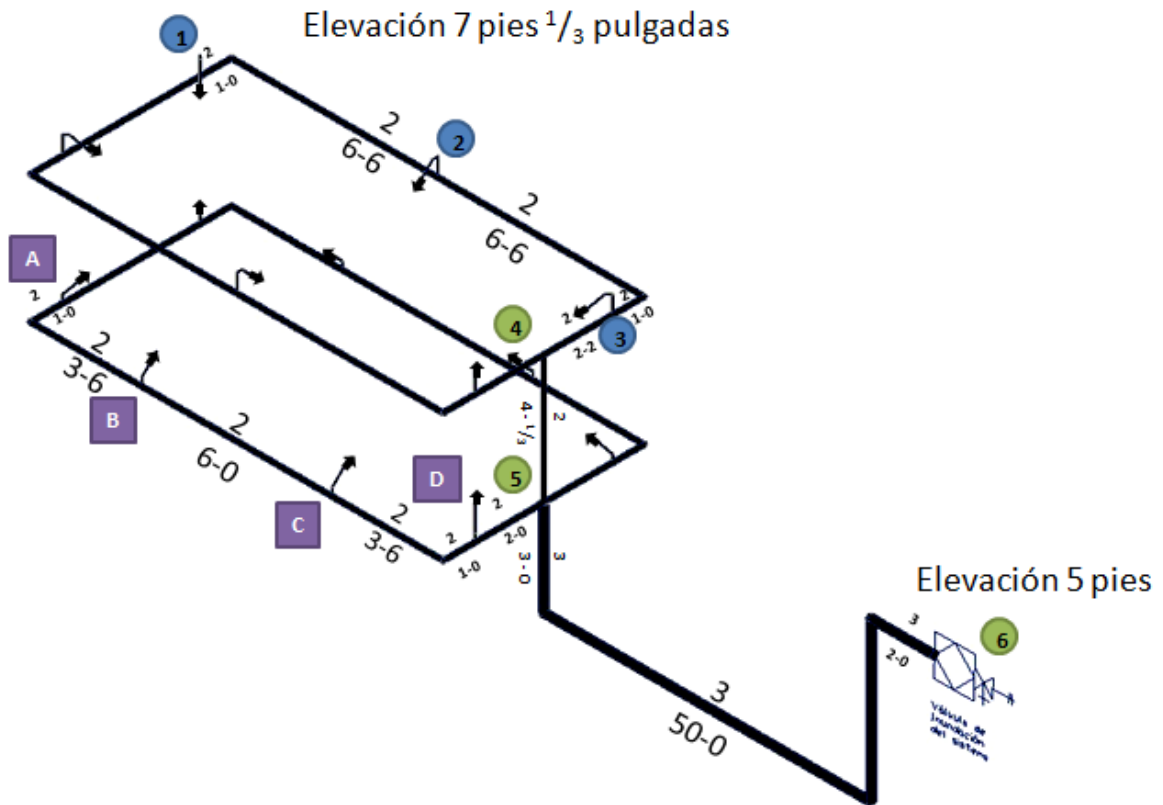


Fig. 7.14 Diagrama del Sistema de Aspersores diseñado

Cálculos Hidráulicos

Para: Sistema Mostrado en la Fig. 7.14

Hoja No. 1 De 2

Todas las Boquillas son de la marca LIFECO Modelo HV-A

(Coeficiente de descarga de las boquillas 2.24)

Ident. Y No. De las boquillas	Gasto (gpm)		Diametro de la tubería	Accesorios y elementos de la tubería		Longitud equivalente de tubería		Coeficiente de fricción psi/pie	Resumen de presiones		Presión Normal		Elevación de la boquilla	Notas
	q			E		Long.			Pt		Pt			
1-HV-A	q	17.4	2	E	5.0	Long.	7.5	0.6	Pt	60.0	Pt	60.0	7'1/3"	
(1)	Q	17.4				Acc.	5.0		Pe	0.0	Pv			
						Tot.	12.5		Pf	7.5	Pn			
1-HV-A	q	17.4	2			Long.	7.5	0.6	Pt	67.5	Pt	67.5		
(2)	Q	34.7				Acc.	0.0		Pe	0.0	Pv			
						Tot.	7.5		Pf	4.5	Pn			
1-HV-A	q	17.9	2	E	5.0	Long.	2.2	0.6	Pt	72.0	Pt	72.0		
(3)	Q	52.6		T	10.0	Acc.	15.0		Pe	0.0	Pv			
						Tot.	17.2		Pf	10.3	Pn			
3-HV-A	q	52.6	2			Long.	4.0	0.6	Pt	82.3	Pt	82.3		
(4)	Q	105.2				Acc.	0.0		Pe	1.9	Pv			
						Tot.	4.0		Pf	2.4	Pn			
8-HV-A	q	191.7	3	3E	21.0	Long.	55.0	0.5	Pt	86.6	Pt	86.6	3'	
(5)	Q	296.9		Del V	10.0	Acc.	31.0		Pe	1.0	Pv			
				DV	1.0	Tot.	86.0		Pf	43.0	Pn			
	q		3			Long.			Pt	130.6	Pt	130.6	5'	
(6)	Q	296.9				Acc.			Pe		Pv			
						Tot.			Pf		Pn			
	q					Long.			Pt		Pt			
	Q					Acc.			Pe		Pv			
						Tot.			Pf		Pn			
	q					Long.			Pt		Pt			
	Q					Acc.			Pe		Pv			
						Tot.			Pf		Pn			
	q					Long.			Pt		Pt			
	Q					Acc.			Pe		Pv			
						Tot.			Pf		Pn			

Cálculos Hidráulicos

Para: Sistema Mostrado en la Fig. 7.14Hoja No. 2 De 2Todas las Boquillas son de la marca LIFECO Modelo HV-A(Coeficiente de descarga de las boquillas 2.24)

Ident. Y No. De las boquillas	Gasto (gpm)		Diametro de la tubería	Accesorios y elementos de la tubería		Longitud equivalente de tubería		Coeficiente de fricción psi/pie	Resumen de presiones		Presión Normal		Elevación de la boquilla	Notas
	q	Q		E		Long.			Pt		Pt			
1-HV-A	q	17.4	2	E	5.0	Long.	4.5	0.5	Pt	60.0	Pt	60.0	2' 1 3/4"	
(A)	Q	17.4				Acc.	5.0		Pe	0.0	Pv			
						Tot.	9.5		Pf	4.8	Pn			
1-HV-A	q	18.0	2			Long.	6.0	0.5	Pt	64.8	Pt	64.8		
(B)	Q	35.4				Acc.	0.0		Pe	0.0	Pv			
						Tot.	6.0		Pf	3.0	Pn			
1-HV-A	q	18.4	2	E	5.0	Long.	4.5	0.5	Pt	67.8	Pt			
(C)	Q	53.8				Acc.	5.0		Pe		Pv			
						Tot.	9.5		Pf	4.8	Pn			
1-HV-A	q	19.1	2	T	10.0	Long.	2.2	0.25	Pt	72.5	Pt	72.5		
(D)	Q	72.9				Acc.	10.0		Pe	0.0	Pv			
						Tot.	12.2		Pf	3.0	Pn			
4-HV-A	q	72.9	2			Long.			Pt	75.5	Pt			
(5')	Q	145.8				Acc.			Pe		Pv			
						Tot.			Pf		Pn			
	q					Long.			Pt		Pt			
	Q					Acc.			Pe		Pv			
						Tot.			Pf		Pn			
	q					Long.			Pt		Pt			
	Q					Acc.			Pe		Pv			
						Tot.			Pf		Pn			
	q					Long.			Pt		Pt			
	Q					Acc.			Pe		Pv			
						Tot.			Pf		Pn			

7.2.5 Caso de aplicación

En PEMEX, región suroeste, muchos de los sistemas de aspersión utilizados en los recipientes a presión van de acuerdo a la NFR-015-PEMEX-2003 y la especificación T9B de la norma K-101. Conteniendo su diseño los siguientes criterios:

- ✚ Densidad de flujo de: 0.25 gpm/pie².
- ✚ Modelo de la boquilla: 1HH11W
 - Ⓢ Ángulo de cobertura: 117°.
 - Ⓢ Gasto por boquilla: 32 gpm.
 - Ⓢ Tipo de aspersión: cobertura amplia.
 - Ⓢ Diámetro del orificio: 0.516 pg.
- ✚ Tamaño mínimo de boquilla: 1 pg.
- ✚ Presión de entrada de la boquilla: 80 psig.
- ✚ Traslape entre las boquillas: 15% mínimo.
- ✚ Distancia entre las boquillas de aspersión y la pared del recipiente: 30 pg.
- ✚ Gasto máximo permitido por el sistema: 3000 gpm.
- ✚ Velocidad máxima en las boquillas aspersoras: 6 @ 10 pie/s.

Para el recipiente de éste caso de estudio (Fig. 7.15), el sistema de aspersión de agua presenta las siguientes características:

1. Gasto total: 637 gpm.
2. Número de boquillas: 24 piezas.
3. Número de anillos 1.

Los requerimientos actuales plasmados en las normas de la NFPA y de PEMEX, hacen que sistemas como el que se menciona en este caso de aplicación, ya no cumplan con los criterios de diseño establecidos por las normas. Es por ello que PEMEX se ha dado a la labor de llevar a cabo la modernización de los sistemas de protección contra incendio a base de aspersores de agua.

A continuación se muestran los cálculos hechos para el rediseño de la instalación de aspersores de agua, así como las características del recipiente de este caso de aplicación:

- Ⓢ Diámetro (D): 10.2 pies.
- Ⓢ Largo (L): 69.4 pies.
- Ⓢ Espesor del cuerpo (t_s): 1.1 pg.
- Ⓢ Espesor de las tapas (t_t): 0.47 pg.
- Ⓢ Capacidad (V): 1066.9 barriles.
- Ⓢ Área de protección (S_T): 2,548.6 pie².

$$\begin{aligned}
 S_T &= S_c + S_t = 2 * \pi * r * L + 2 * \pi * r^2 \\
 &= 2 * \pi * 5.1 * 69.4 + 2 * \pi * 5.1^2 = 2548.6 [pie^2]
 \end{aligned}$$



Fig. 7.15 Tanque de almacenamiento de propano.

Criterios de diseño:

- ✚ Densidad de flujo (ρ_F): 0.25 gpm/pie².
- ✚ Modelo de la boquilla: ¾" HH6W.
 - Ⓢ Ángulo de cobertura: 112°.
 - Ⓢ Gasto por boquilla (Q_{boq}): 17.5 gpm.
 - Ⓢ Tipo de aspersión: cobertura amplia.
 - Ⓢ Diámetro del orificio: 0.391 pg.
- ✚ Tamaño mínimo de boquilla: ¾ pg.
- ✚ Presión de entrada de la boquilla: 80 psig.
- ✚ Traslape entre las boquillas: 15% mínimo.
- ✚ Distancia entre las boquillas de aspersión y la pared del recipiente: 30 pg.
- ✚ Gasto máximo permitido por el sistema: 3000 gpm.
- ✚ Velocidad máxima en las boquillas aspersoras: 6 @ 10 pie/s.

Cálculo del gasto total teórico:

$$Q_T = S_T * \rho_F = 2548.6 * 0.25 = 637 \text{ [gpm]}$$

Con el gasto total teórico, se calcula el número de boquillas teórico (N_{boq}) con base en los parámetros ya dados:

$$N_{boq} = \frac{Q_T}{Q_{boq}} = \frac{637}{17.5} = 37$$

Ahora calcularemos el espaciamiento entre las boquillas. Donde:

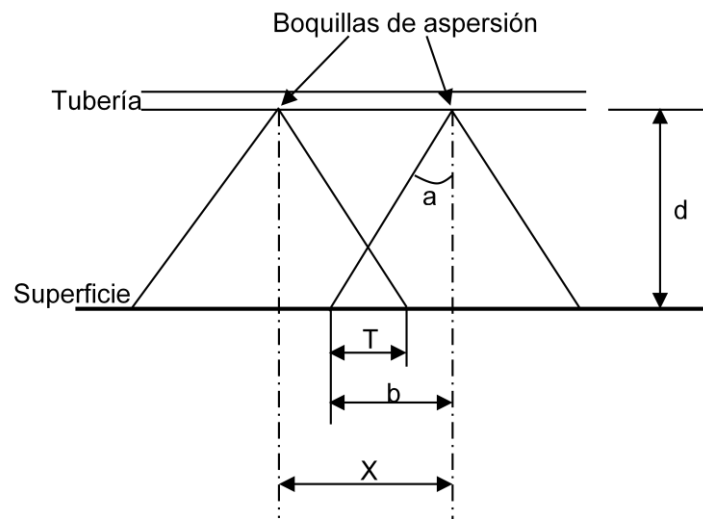


Fig. 7.16 Cálculo de la distancia entre espresas.

R=Radio de cobertura.

T= Taslap.

d= Distancia de la boquilla a la superficie.

a= $\frac{1}{2}$ del ángulo de cobertura.

X= Distancia entre boquillas.

$$b = d * \tan(a) = 2.5 * \tan(56^\circ) = 3.7 \text{ [pie]}$$

$$T = 0.15 * b = 0.15 * 3.7 = 0.555 \text{ [pie]}$$

$$X = 2b - T = 2b - 0.15b = 1.85b$$

$$X = 1.85 * 3.7 = 6.8 \text{ [pie]} = 2.1 \text{ [m]}$$

Es decir que la separación adecuada entre boquillas, que presentan un radio de cobertura de 3.7 pies, es de 6.8 pies.

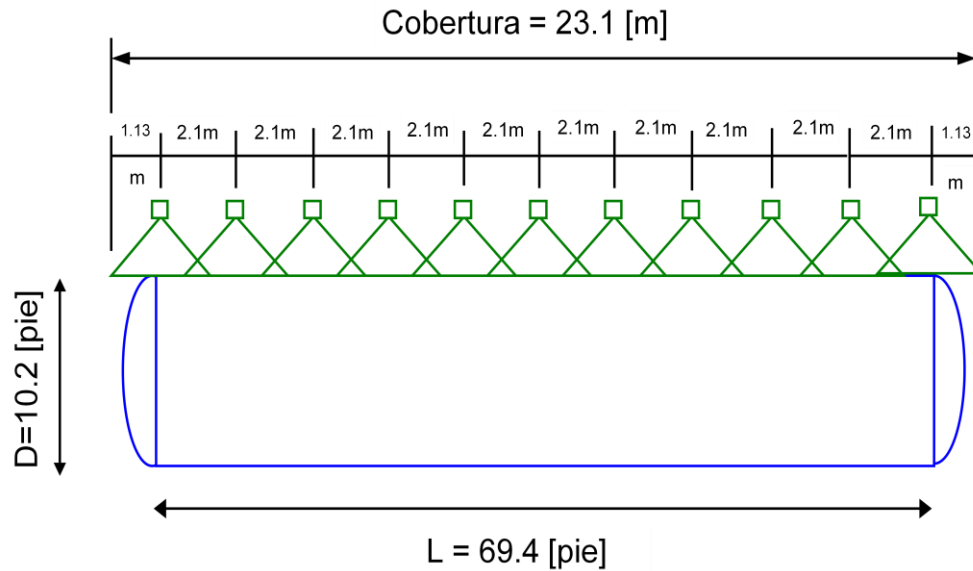


Fig. 7.17 Separación lateral entre boquillas.

Por lo tanto el sistema diseñado actualmente queda conformado por:

- Ⓢ Dos anillos
- Ⓢ 11 boquillas por lado, 22 por anillo y 4 por tapa, lo que nos da un total de 52 boquillas para la protección del recipiente.
- Ⓢ Un gasto de agua de 910 gpm para alimentar las 52 boquillas.
- Ⓢ Una densidad de flujo real de 0.36 gpm/pie^2 generada por cada boquilla, la cual es mayor a la mínima requerida por las normas (0.25 gpm/pie^2).

Conclusiones

- ✚ La protección contra incendios es esencial como medida que va más allá de la prevención, ya que en caso de que se genere un incendio esta nos ayudará a controlarlo o terminarlo, protegiendo al personal y las instalaciones, minimizando las pérdidas materiales.
- ✚ El uso de aspersores de agua como medio de protección contra incendio en separadores de gas y aceite nos va a ayudar a dispersar mejor el calor que pueda absorber el recipiente durante el incendio, debido a que el agua pulverizada presenta una mayor superficie que el agua a chorro, pudiendo así absorber una mayor cantidad de calor en su forma líquida y vaporizarse más rápidamente aumentando aún más su capacidad de absorción de calor.
- ✚ La tasa de absorción del calor cuando se aplica agua asperjada a un separador de gas y aceite durante un incendio disminuye de $20000 \text{ btu/h/pie}^2$ (63000 W/m^2) de superficie expuesta 6000 btu/h/pie^2 (18 W/m^2), lo que nos va a ayudar a que se conserven las propiedades mecánicas del metal evitando que este disminuya su espesor provocando fallas en el recipiente debido al aumentarse la temperatura.
- ✚ La utilización de los aspersores para la protección contra incendios en separadores de gas y aceite, no solo nos va a llevar a evitar las pérdidas de vidas humanas, sino también evitar las pérdidas económicas que pueda traer consigo el incendio, que van desde el cambio del separador hasta pérdidas en la producción de gas y aceite. Ya que el tiempo de producción perdido (cerrar el pozo) puede traer consecuencias que van más allá del cambio del equipo de producción dañado.
- ✚ La generación de una BLEVE (expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición), y todo lo que el término implica, puede evitarse utilizando esta clase de sistemas para la protección contra incendio en baterías de separación.

Recomendaciones

- Ⓜ Se recomienda la renovación de sistemas de aspersores de agua en recipientes a presión de acuerdo a las normas actuales, ya que las anteriores presentan esquemas de protección contra incendio que son menos eficientes ya que la cobertura de los recipientes se hace por escurrimiento.
- Ⓜ Puede que la instalación de los sistemas de aspersores sea costosa, pero no se compara con las pérdidas económicas que puede generar el no tenerlas en caso de que se llegue a

presentar una catástrofe. Por ello se recomienda su instalación en cada uno de los separadores de gas y aceite.

- Ⓢ Para una respuesta más rápida del sistema se recomienda que se tengan las tuberías llenas de agua. Así como chequear que no existan fugas en las boquillas o la tubería.
- Ⓢ Se debe de evitar la instalación de tuberías ajenas (parasitas) a las del sistema de protección contra incendio, ya que estas generarían pérdidas de presión no calculadas, que llevarán al funcionamiento inadecuado del sistema de protección contra incendio a base de aspersores de agua para baterías de separación.

Bibliografía

ASME Boiler and Pressure Vessel Code VIII Division 1, 2004

Bayón, René; La protección contra incendios en la construcción; Editores Técnicos Asociados, S.A., 1978, pp. 2-4, 33

Bradley, Howard B.; Petroleum Engineering Handbook, vol.III, capítulo II; SPE; 1994.

Cote, Arthur E.; Operation of Fire Protection Systems; NFPA, 2003, pp. 273 - 346

Del Río, Jesús; Conformación Plástica de materiales metálicos (en frío y en caliente); Ed. CIE INVERSIONES EDITORIALES DOSSAT 2000; 2005; pp. 33-34

Farr, James; Jawad, Maan; *Guidebook for the design of ASME section VII Pressure Vessels*, Ed. ASME Press, Segunda Edición, 2001

Fernández Nuñez, Rafael; Protección contra incendios; Ed. CIE INVERSIONES EDITORIALES DOSSAT 2000; 2004, pp. 12, 81

Harvey, John F.; Theory and Design of Modern Pressure Vessels; Ed. Van Nostrand Reinhold Company; Segunda Edición, 1974, pp. 1-2

Manning, Francis S.; Thompson, Richard E.; Oilfield Processing of Petroleum: Crude oil; Ed. Penn Well; 1995.

Manual de protección contra incendios NFPA, Ed. MAPFRE, 2001, pp. 15-16, 47-63, 83-84, 741-980.

Manual de seguridad contra incendios; Ed. MAPFRE; 1997; pp.29-103, 342-379.

Moore, Harry D.; Kibbey, Donald R.; Materiales y procesos de fabricación; Ed. Limusa; 1987; pp. 44-45, 58-59.

Moss, Dennis; Pressure Vessel Design Manual; Ed. Gulf Professional Publishing; 2004; pp. 5-10.

NFPA 921, Guía para las investigaciones sobre incendios y explosiones; Ed. MAPFRE; 1995; pp. 10-17.

Norma NFR-016-PEMEX-2010; Diseño de redes contra incendio: Instalaciones terrestres; Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.

Pascual Ponds, Manuel; Tecnología del Fuego, Ed. Printer Industria Gráfica; 1977; pp. 51, 105-116, 195-204.

Schroll, R. Craig; *Industrial fire protection handbook*; Ed. CRC Press, 2002.

Smith, H. Vernon; "Oil and Gas Separators", capítulo 12, *Petroleum Engineering Handbook*; SPE; 1987.

Thielsch, Helmut; Defectos y roturas en recipientes a presión y tuberías; Ed. URMO; 1981; pp. 182-184.

Tuhtar, Dinko; Protección contra el fuego y explosiones: Desarrollo de sistemas; Ed. Paraninfo; 1990; pp. 11-16, 38-41.

Villegas, María Isabel; Apuntes de Conducción y Manejo de la Producción; Facultad de Ingeniería UNAM, 2010-2.

Referencias electrónicas:

http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Matter/Temperature_effects.html

<http://www.bomberos-seguridad.com/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=1694>

<http://seguridadcuatro.blogspot.com/2009/03/que-es-la-pirolisis.html>

<http://www.anb.cl/reptec/flashover.pdf>

http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Biogenic_substance

<http://es.wikipedia.org/wiki/Termopl%C3%A1stico>

http://www.lukor.com/ciencia/radicales_libres.htm

http://www.consumo-inc.es/Seguridad/normativa/363_95/aVParteAa6.htm

<http://es.thefreedictionary.com/pavesas>

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r27548.PDF>

<http://www.famma44.cl/tipos%20de%20fuego.htm>

<http://usuarios.multimania.es/armandotareas/quimica/velocidadymecanismorx.pdf>

http://es.wikipedia.org/wiki/Convecci%C3%B3n_t%C3%A9rmica

http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n_de_calor

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r27548.PDF>