

25/...



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

## ABATIMIENTO DE LA CONTAMINACION POR EVAPORACION EN LAS TERMINALES DE ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCION DE PRODUCTOS DESTILADOS



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

### T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO

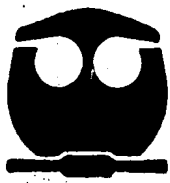
P R E S E N T A :

LUIS GERARDO BECERRA NAVA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1994





## **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 está 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.

## **Jurado Asignado**

- Presidente** : Prof. Alejandro Anaya Durand  
**Vocal** : Prof. Caritino Moreno Padilla  
**Secretario** : Prof. José Agustín Texta Mena  
**1er. Suplente** : Prof. Manuel Vázquez Islas  
**2do. Suplente** : Prof. Manuel Jesús Agullar Gómez

**Sitio donde se desarrolló el Tema:**

**Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)**

**ASESOR**



---

**I.Q. José Agustín Texta Mena**

**SUSTENTANTE**



---

**Luis Gerardo Becerra Nava**

**A papá y mamá**

**Les dedico esta tesis con el profundo amor que un hijo le puede tener a sus padres, con mi más profundo y sincero agradecimiento por todo el apoyo, confianza y cariño recibido en lo que va de mi existencia, por comprenderme y tener tanta paciencia conmigo.**

**Gerardo Becerra**

### **A mi esposa**

Por ser mi compañera, con quien inició una nueva familia. Le dedico la presente con mucho amor y cariño.

### **A mi hija Claudia Paola**

Quien será la luz que ilumine mi vida. Esta tesis te la dedico con todo el amor que un padre siente por su hija.

### **A mi abuelita**

Por darme todo su cariño, comprensión y paciencia.

### **Con todo mi cariño a mis hermanos**

Jaime, José Antonio, Héctor Hugo, Alejandro Francisco y Moisés Arturo, a todos mil gracias.

### **A mis pequeños, que son la alegría de casa**

Fabiola, Alejandro, Canito, Chucha y Arturito.

### **A mis amigos**

Gracias a Alberto, Adolfo, Juanjo, Isabel, José Luis, Sergio, Rafael, Norma, Paco y Samuel por su amistad y por todos los momentos agradables que pasamos juntos.

### **A los Ingenieros**

Jorge Pérez Jiménez, y especialmente al Ing. José Agustín Texta Mena que gracias a él fue posible realizar este trabajo.

## **Gracias a DIOS por darme la vida**

"Gracias, por caminar conmigo, por hacerme con tu afecto más fácil el camino. Gracias, por el tiempo que me das, y al escucharme aligeras el peso normal de mi existencia. Gracias, por darme algunas veces ocasión de darte algo de mi mismo, haciéndote sentir que me eres importante. Por ello y mucho más, GRACIAS"

RTIK

**GRACIAS**

# INDICE

CAPITULO	DESCRIPCION	PAGINA
I	INTRODUCCION	1
II	GENERALIDADES	4
	2.1 Definición de Términos Fundamentales	4
	2.1.1 Presión de Vapor de un Líquido	4
	2.1.2 Presión de Vapor Verdadera de un Líquido	4
	2.1.3 Presión de Vapor Reid de un Líquido	5
	2.1.4 Presión Parcial de Vapor	6
	2.1.5 Saturación del Espacio-Vapor	7
	2.1.6 Difusión en el Espacio-Vapor	7
	2.1.7 Vaporización	7
	2.1.8 Condensación	8
	2.1.9 Conducción	8
	2.1.10 Convección	8
	2.2 Pérdidas por Evaporación	9
	2.2.1 Pérdidas por Venteo	9
	2.2.2 Pérdidas por Almacenamiento Estático	10
	2.2.3 Pérdidas por Llenado del Tanque	10
	2.2.4 Pérdidas por Vaciado del Tanque	11
	2.2.5 Pérdidas por Evaporación	12
	2.2.6 Pérdidas por Adherencia	12
	2.3 Factores que Afectan las Pérdidas por Evaporación en Tanques de Almacenamiento	13
	2.3.1 Presión de Vapor Verdadera de un Líquido	13
	2.3.2 Cambios de Temperatura en el Tanque	14
	2.3.3 Interrupción de Servicios en el Tanque	14
	2.3.4 Diámetro del Tanque	15
	2.3.5 Programa de Llenado y Vaciado del Tanque	15
	2.3.6 Condiciones del Tanque	15
	2.3.7 Tipo de Tanque	16
	2.3.8 Dimensiones del Tanque	16
	2.3.9 Nivel del Líquido en el Tanque	16

<b>CAPITULO</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>PAGINA</b>
<b>III</b>	<b>DESCRIPCION DE TANQUES</b>	<b>17</b>
	<b>3.1 Tanques con Techo Flotante Externo</b>	<b>19</b>
	3.1.1 General	19
	3.1.2 Techos Flotantes	19
	3.1.3 Sellos Perimetrales	26
	3.1.4 Accesorios del Techo	34
	<b>3.2 Tanques con Techo Flotante Interno</b>	<b>43</b>
	3.2.1 General	43
	3.2.2 Cubiertas Flotantes	44
	3.2.3 Sellos Perimetrales	48
	3.2.4 Accesorios de la Cubierta	50
	<b>3.3 Tanques con Techo Fijo</b>	<b>53</b>
	3.3.1 General	53
	3.3.2 Accesorios del Tanque	54
	3.3.3 Aislamiento	56
	3.3.4 Selección de Pintura	57
<b>IV</b>	<b>PROCEDIMIENTOS PARA EL CALCULO DE PERDIDAS POR EVAPORACION</b>	<b>58</b>
	4.1 General	58
	4.2 Parámetros comunes	59
	4.2.1 Datos de las Condiciones Locales	59
	4.2.2 Datos del Tanque	59
	4.2.3 Datos del Producto	59
	4.3 Tanques con Techo Flotante Externo	60
	4.3.1 Ecuaciones de Pérdidas	60
	4.3.2 Discusión de Variables	63
	4.4 Tanques con Techo Flotante Interno	70
	4.4.1 Ecuaciones de Pérdidas	71
	4.4.2 Discusión de Variables	74
	4.5 Tanques con Techo Fijo	80
	4.5.1 Ecuaciones de Pérdidas	80
	4.5.2 Discusión de Variables	83
	Tablas. Resumen de los procedimientos para la evaluación de pérdidas por evaporación	91



<b>CAPITULO</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>PAGINA</b>
<b>V</b>	<b>EVALUACION DE PERDIDAS POR EVAPORACION</b>	<b>100</b>
	<b>5.1 Problemas resueltos para la Evaluación de Pérdidas por Evaporación</b>	<b>101</b>
	5.1.1 Tanque con Techo Flotante Externo	101
	5.1.2 Tanque con Techo Flotante Interno	106
	5.1.3 Tanque con Techo Fijo	111
	<b>5.2 Evaluación de Pérdidas por Evaporación</b>	<b>117</b>
	5.2.1 Tanques con Techo Flotante Externo	118
	5.2.2 Tanques con Techo Flotante Interno	126
	5.2.3 Tanques con Techo Fijo	134
<b>VI</b>	<b>COMPARACION ECONOMICA</b>	<b>135</b>
	6.1 Costos de Tanques de Almacenamiento	135
	6.2 Comparación Económica	137
<b>VII</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>152</b>
<b>VIII</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>156</b>

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

El petróleo es un recurso natural muy importante, por lo que la industria petrolera ha estado interesada acerca de la evaporación del petróleo crudo y sus derivados por mucho tiempo. A través de los años, las compañías han estudiado problemas específicos de pérdidas, y han tomado numerosas medidas para reducir las pérdidas por evaporación.

La evaporación en tanques de almacenamiento es una fuente común de pérdidas por evaporación en todas las ramas de la industria. Anteriormente los diseños inadecuados, la construcción y los materiales impedían el control de las pérdidas. Los tanques modernos y el desarrollo de equipos especiales de conservación de vapores ha dado a la industria una buena selección de las medidas de control. Sin embargo, cada problema de pérdidas, requiere de un análisis individual para determinar que medida de control es la que mejor se ajusta.

La razón de pérdidas por evaporación depende de varios factores, la Presión de Vapor Verdadera es la fuerza causante de la vaporización y, generalmente las pérdidas son consideradas a ser directamente proporcional a esta presión. La tendencia a evaporar en casos de almacenamiento es una función de la presión de vapor, la altitud, la presión barométrica y la temperatura de la superficie del líquido. Los cambios atmosféricos y del calor solar causan el espacio-vapor en el tanque, y el volumen del espacio-vapor afecta la cantidad de ventilación.

Recientemente, las consideraciones ambientales han tenido mucho más peso, y la necesidad de cumplir con la Ley de Protección Ambiental ha provocado que los dispositivos de conservación de vapores han tenido que ser usados en situaciones, en donde de otra forma no pueden ser usados.

Una manera directa de contribuir a preservar la ecología es evitar al máximo las emisiones de gases derivados de hidrocarburos almacenados en tanques.

Por lo que es responsabilidad de la industria petrolera buscar el mejoramiento, en cuanto diseño, construcción, operación y seguridad en sus instalaciones, tal es el caso del almacenamiento en tanques para reducir pérdidas por evaporación de los productos, ahorrando grandes cantidades de energía y disminuyendo en forma preponderante el deterioro del medio ambiente.

Para el almacenamiento del petróleo y sus productos, dependiendo de la naturaleza del líquido a almacenar, existen cuatro tipos de tanques:

- Tanques con techo fijo.
- Tanques con techo flotante interno.
- Tanques con techo flotante externo.
- Tanques a presión.

Cada tipo es diseñado por requerimientos específicos de almacenamiento; el problema actual del almacenamiento lo determina el tipo de tanque seleccionado. En muchos casos, el tanque más económico es seleccionado después de un estudio detallado comparando pérdidas y costos de diferentes tanques. Los cálculos económicos toman en cuenta variables tales como: el valor del producto almacenado, la volatilidad del producto, la cantidad y las variaciones en la temperatura y la presión atmosférica. El resultado de tales cálculos dictamina el uso de un tanque con techo fijo, de almacenamiento a presión, con techo flotante o un sistema de recuperación de vapores.

Para un almacenamiento teniendo una presión de vapor verdadera baja, menor de 2 psia, el tanque con techo fijo es la mejor selección económica.

Para el almacenamiento de gasolinas de motor en grandes cantidades, el tanque con techo flotante generalmente es la mejor elección, mientras que para un almacenamiento donde hay evaporación a presión atmosférica y a la temperatura de almacenamiento, los tanques a presión son los mejores. Sin embargo en algunos casos el uso de tanques de techo fijo en conjunto con un sistema de recuperación de vapores puede ofrecer mayores ventajas.

El control de las pérdidas por evaporación requiere de una continua atención, dado el procedimiento de operación y mantenimiento del equipo.

La industria del petróleo produce gasolinas de dos categorías, normal y especial, y además suministra gasolina con bajo contenido en plomo, para cumplir con las normas anticontaminación.

La diferencia principal entre los combustibles normales y especiales es su comportamiento antidetonante. En 1973 el número de octano, según el método de investigación del número de octano NOI fue alrededor de 94 para las gasolinas normales y alrededor de 99 para las gasolinas especiales. El número de octano NOI para las gasolinas con un contenido de plomo bajo, fue alrededor de 91.

Las gasolinas son una mezcla compleja de hidrocarburos con un intervalo de ebullición de 100 a 400 °F. Los componentes se mezclan para proporcionar una elevada calidad antidetonante, un fácil arranque, un rápido calentamiento, una baja tendencia a la formación de bolsas de vapor y un bajo contenido de depósitos en el motor.

Existen varias propiedades importantes de la gasolina, pero las dos que tienen efectos mayores son el intervalo de ebullición y las características antidetonantes. La altitud afecta a varias propiedades de la gasolina, las más importantes son las pérdidas por evaporación y la demanda de octanaje.

# **CAPITULO II**

## **GENERALIDADES**

### **2.1 DEFINICION DE TERMINOS FUNDAMENTALES**

En esta sección se darán algunos términos relacionados con las principales pérdidas por evaporación, las cuales gobiernan la razón de pérdidas.

#### **2.1.1 Presión de Vapor de un Líquido**

La presión de vapor es la medida usada para indicarnos la volatilidad, o sea la presión de vapor es una medida de la fuerza que tiende a vaporizar cualquier líquido volátil, tales como los productos del petróleo. El movimiento molecular dentro del líquido es responsabilidad de esta fuerza y es afín a la composición del líquido, éstas moléculas son pequeñas y por lo tanto más activas; de esta manera, la presión de vapor aumenta en la proporción de esta baja evaporación (moléculas pequeñas). Las temperaturas altas también estimulan el movimiento de las moléculas y la presión de vapor aumenta.

En pérdidas por evaporación de trabajo, los productos del petróleo frecuentemente están en contacto con el espacio-vapor. Al mismo tiempo, algunas de las moléculas en el espacio-vapor regresan al líquido. El equilibrio es establecido cuando las moléculas dejan y regresan al líquido en la misma proporción. En cualquier almacenamiento a presión, el porcentaje de equilibrio del vapor de hidrocarburos en el espacio-vapor, es directamente proporcional a la presión de vapor de un líquido.

#### **2.1.2 Presión de Vapor Verdadera (PVV) de un Líquido**

Si cualquier líquido esta dentro de un recipiente, las moléculas escaparían desde la superficie del líquido debido a su energía cinética para formar vapor. Después, algún vapor se condensaría y finalmente se alcanzaría un estado de equilibrio, el cual permanece a una temperatura constante. La presión observada en unidades absolutas en el espacio-vapor es definida como la Presión de Vapor Verdadera del líquido a una temperatura constante.

La presión de vapor verdadera es la presión de vapor de un líquido a una temperatura específica y sin que la composición cambie por la vaporización ocurrida en los procedimientos usados para medir la presión de vapor. Con mezclas, tales vaporizaciones resultan en un descenso de la medida de la presión de vapor. La presión de vapor verdadera es diferente de la presión de vapor también determinada.

La vaporización de una mezcla de hidrocarburos baja la presión de vapor debido a que los componentes más ligeros se vaporizan más fácilmente, dejando al líquido rico en los componentes más pesados, que son los componentes menos volátiles. De esta manera, para gasolinas de motor, la presión de vapor verdadera a 100 °F puede ser significativamente superior que la Presión de Vapor Reid (PVR), debido a que alguna vaporización es encontrada durante la prueba de Reid. Para un componente puro, en la vaporización del líquido no habrá cambios en la presión de vapor y la Presión de Vapor Verdadera (PVV) será igual a la Presión de Vapor Reid (PVR).

La PVV puede ser estimada de correlaciones relacionadas con la PVR y características de la curva de evaporación de la ASTM.

En pérdidas por evaporación de trabajo, la PVV a temperatura de almacenamiento afecta directamente la razón de pérdidas por evaporación. Aumentando la PVV acelera la velocidad de evaporación dentro del espacio-vapor de cualquier tanque. También en la saturación de un espacio-vapor conteniendo proporcionalmente más vapores de hidrocarburos que aumentan la PVV. Ambos factores incrementan las pérdidas por evaporación de el tanque durante cualquier ciclo específico de venteo o programa de llenado.

### **2.1.3 Presión de Vapor Reid (PVR) de un Líquido**

La Presión de Vapor Reid es la presión absoluta en libras por pulgada cuadrada determinada a 100 °F y una razón del volumen del vapor-líquido de  $V/L=4$ , medida en la bomba Reid.

El aparato para determinar la presión de vapor Reid consiste en dos cámaras, una cámara de aire y la otra de gasolina con una salida, el método para su determinación consiste esencialmente en lo siguiente:

La cámara del aparato de la presión de vapor Reid es llenado con una muestra fría y conectado a la cámara de aire a 100 °F u otra temperatura. El aparato es sumergido a una temperatura constante ( 100 ± 0.2 °F ) y es agitado periódicamente hasta que el equilibrio es alcanzado. La lectura del manómetro correspondiente es la presión de vapor Reid.

Este método esta basado en la saturación parcial del aire de productos con presión de vapor Reid abajo de 26 lb/pulg<sup>2</sup>.

La corrección si la cámara de aire estuvo a otra temperatura que no fue de 100 °F es:

$$\text{Corrección por Temperatura} = \frac{(P - P_t) \cdot (t - 100)}{(460 + t)} = P_{100} - P_t$$

Donde :

t = Temperatura de la cámara de aire al principio de la prueba, °F.

P = Presión barométrica, lb/pulg<sup>2</sup>.

P<sub>t</sub> = Presión de vapor del agua, lb/pulg<sup>2</sup> abs. a t=°F.

P<sub>100</sub> = Presión de vapor del agua lb/pulg<sup>2</sup> abs. a 100°F= 0.95

De esta manera, la PVR es la presión de vapor de una muestra la cual ha tenido cambios en su composición, debido a la vaporización requerida para saturar el espacio-vapor de la bomba. Por consiguiente, la PVR es un poco menor que la PVV de la muestra a 100 °F.

Por correlaciones la PVR de un hidrocarburo líquido bajo investigación puede ser convertida a PVV a cualquier temperatura normal de almacenamiento.

#### 2.1.4 Presión Parcial de Vapor

La presión parcial de vapor de hidrocarburos en un espacio-vapor es una medida de la fuerza ejercida por moléculas del hidrocarburo. Las moléculas en el aire, usualmente presentes en problemas de pérdidas por evaporación, simlamente generan una presión parcial. La suma de todas las presiones parciales es igual a la presión total del sistema; la presión parcial de cualquier componente vapor es proporcional a su fracción volumen en el espacio-vapor.

En pérdidas por evaporación de trabajo, el espacio-vapor normalmente esta en contacto con el líquido, los cuales emiten vapores de hidrocarburos. Un equilibrio existe cuando la presión parcial del vapor de un hidrocarburo es igual a la presión de vapor del líquido y la razón de vaporización y condensación son iguales.

### **2.1.5 Saturación del Espacio-Vapor**

El espacio-vapor de un tanque, respecto a un componente conocido, esta expuesto a ser saturado cuando exista el equilibrio entre este componente en el vapor y la fase líquida dentro de determinadas condiciones de temperatura y presión, y la composición del espacio-vapor es uniforme en todo el espacio. El grado de saturación es un porcentaje de saturación con respecto a un componente determinado, el cual prevalece en cualquier momento dentro de las condiciones normales de equilibrio.

### **2.1.6 Difusión en el Espacio-Vapor**

La difusión es un movimiento molecular en el cual la tendencia es distribuir uniformemente cualquier componente por todo el espacio-vapor. La velocidad de difusión es mayor en las moléculas pequeñas, las cuales viajan rápidamente. De esta manera, el tiempo total para alcanzar el equilibrio depende del tamaño de las moléculas, el tamaño del espacio-vapor y la presión.

En pérdidas por evaporación de trabajo, la difusión es un camino por el cual nuevamente los hidrocarburos vaporizados se distribuyen por todo el espacio-vapor para poder saturarlo. Para componentes de gasolinas en almacenamiento normal y temperatura de operación, el proceso de difusión es relativamente bajo, y por lo mismo ejercen una menor influencia en las pérdidas por evaporación.

### **2.1.7 Vaporización**

La vaporización es un proceso por medio del cual un líquido cambia a vapor, con o sin calentamiento.



### **2.1.8 Condensación**

La condensación es un proceso donde un vapor cambia a líquido. Esto ocurre cuando la presión parcial de un vapor excede la presión de vapor de el líquido debido a un cambio de temperatura del líquido o el volumen del espacio-vapor decrece. Sin embargo, la condensación también puede ocurrir con un cambio de temperatura del vapor, debido a que la temperatura ambiente disminuye. En este caso, la presión parcial del vapor y las gotas del líquido en el espacio-vapor puede ser menor que la presión de vapor de la interfase líquida.

### **2.1.9 Conducción**

La conducción es una transferencia de calor desde una parte del cuerpo a otra parte del mismo, o desde un cuerpo a otro en contacto físico con este, no se aprecia desplazamiento de la partículas del cuerpo. El calor proveniente del exterior pasando a través de la pared por conducción.

### **2.1.10 Convección**

La convección es la transferencia de calor por el movimiento y mezclado de fluidos ocasionado por diferencias de temperaturas. Los gases calientes y líquidos con baja densidad aumentando en un recipiente y los gases fríos y líquidos con alta densidad se sedimentan en un recipiente representando el movimiento de materia por convección. En adición al movimiento de la materia causado por la diferencia de temperaturas (convección térmica), el movimiento puede ser inducido por otros medios, tales como una bomba o el viento. El calor puede ser transferido a/o desde la superficie del tanque por convección causada por el viento y es dependiente de la velocidad del mismo. El calor también puede ser transferido a/o desde la superficie interior del tanque por convección térmica.

## **2.2 PERDIDAS POR EVAPORACION**

Las pérdidas por evaporación son un proceso natural por medio del cual un líquido es convertido a vapor, el cual se pierde en la atmósfera. Por definición las pérdidas por evaporación ocurren únicamente cuando los vapores se escapan a la atmósfera.

Las pérdidas por evaporación son comunes en todas las ramas de la industria del petróleo, debido a que los tanques usados son similares en todas las industrias.

Seis tipos de pérdidas ocurren en el almacenamiento del petróleo y sus productos:

- Pérdidas por venteo
- Pérdidas por almacenamiento estático
- Pérdidas por llenado
- Pérdidas por vaciado
- Pérdidas por evaporación
- Pérdidas por adherencia

### **2.2.1 Pérdidas por Venteo**

Los vapores son expulsados de un tanque debido a la expansión térmica de los vapores existentes y/o por la expansión causada por los cambios de presión barométrica y/o a un incremento en la cantidad de vapor al haber vaporización por falta de cambios en el nivel del líquido; esto es definido como pérdidas por venteo. El término vapor es utilizado en este trabajo para indicar una mezcla de vapor de hidrocarburo y aire. El término vapor de un hidrocarburo se refiere a hidrocarburos en estado gaseoso, independientemente de la presencia o ausencia de aire.

Las pérdidas por venteo toman lugar en todos los tipos de tanques y ocurren cuando, los límites de presión o cambios de volumen son excedidos. Los tanques con techo fijo incluso indican que los tanques de almacenamiento están diseñados para pocas pulgadas de agua de presión de vacío, relativamente sufren grandes pérdidas por venteo.

Los tanques a presión los cuales operan a 2 ½ psia o más altas; las pérdidas por evaporación son pequeñas o no existen. Los tanques con techo flotante casi eliminan el espacio-vapor por lo que estas pérdidas son muy pequeñas o no existen, esto solo sucede en el último sello del techo.

### **2.2.2 Pérdidas por Almacenamiento Estático**

Los vapores de tanques, los cuales no resultan del venteo o de cambios en el nivel del líquido, son definidos como pérdidas por almacenamiento estático. Dichas pérdidas son básicamente las generadas por los cambios de temperatura entre el día y la noche, derivadas del aumento de presión en zona vapor durante el día (salida de vapores por la válvula de presión-vacío) y disminución de dicha presión por condensación durante la noche (entrada de aire por las válvulas de presión-vacío).

En tanques con techo flotante, la gran fuente potencial de estas pérdidas se debe a un incorrecto ajuste en el sello y la cubierta de la coraza, debido a esto se expone alguna superficie del líquido a la atmósfera; y los efectos del viento son otra fuente de pérdidas. También una pequeña cantidad de vapor puede penetrar completamente la membrana flexible que sella el espacio entre la cubierta y el techo. Otras causas de pérdidas por almacenamiento estático son el escape de vapor al abrir compuertas, válvulas o accesorios.

### **2.2.3 Pérdidas por Llenado de Tanque**

Los vapores expulsados de un tanque como resultado de llenado, independientemente del mecanismo exacto por el cual los vapores son producidos, es definido como pérdidas por llenado de tanque.

Estas pérdidas ocurren durante el aumento en el nivel de líquido en el tanque, cuando la mezcla aire-vapor en el espacio-vapor del tanque es comprimida dentro de la presión de alcance de los venteos de la presión de vacío. A estas condiciones los venteos de la presión de vacío son abiertos y la mezcla aire-vapor es expulsada del espacio-vapor del tanque para mantener la presión dentro de los límites de la presión de relevo. Por lo que el volumen de líquido que entra a el tanque, desplaza un volumen igual de la mezcla aire-vapor del tanque.

Durante el procedimiento de llenado del tanque, el grado de saturación en el vapor venteado se aproxima a las condiciones de saturación. El grado de saturación en el vapor venteado depende del intervalo de tiempo entre el proceso de llenado y el anterior proceso de vaciado. La presión del tanque también ayuda a la condensación de vapores de hidrocarburos durante el llenado.

#### **2.2.4 Pérdidas por Vaciado de Tanques**

Los vapores expulsados de un tanque después de que el líquido es retirado, es definido como pérdidas por vaciado. El aire suficiente entra durante el vaciado del tanque para mantener la presión interna igual a la presión atmosférica. Durante el vaciado del tanque, el nivel del líquido decrece, por lo que la presión en la mezcla aire-vapor del espacio-vapor en el tanque también decrece. Cuando la presión alcanza la presión de vacío, el aire entra al espacio-vapor del tanque a través de los venteos de la presión de vacío. Durante un proceso de vaciado rápido, el volumen almacenado removido del tanque es aproximadamente igual al volumen de aire que entra al espacio-vapor del tanque. El volumen tiende a establecer condiciones de equilibrio con la entrada de aire por evaporación de la superficie del líquido. El volumen evaporado de la superficie del líquido tiene movimiento ascendente por convección y difusión y se mezcla con el aire el cual entra al espacio-vapor del tanque.

Después de que el proceso de vaciado es detenido y el venteo de la presión de vacío es cerrado, la superficie del líquido tratará de establecer un equilibrio con el espacio-vapor del tanque. Como los vapores continúan evaporándose en la superficie del líquido en el proceso de establecer un equilibrio, la presión en el tanque tiende a aumentar. Cuando la presión alcanza la presión de vacío, la mezcla aire-vapor sería venteada del espacio-vapor del tanque, resultando en pérdidas por vaciado.

Las pérdidas por vaciado son comunes en todos los tanques excepto en los tanques con techo flotante y sistemas cerrados de almacenamiento a presión. Los tanques con techo fijo son los más vulnerables a estas pérdidas.

### **2.2.5 Pérdidas por Evaporación**

Los vapores expulsados de un tanque son el resultado de la evaporación del líquido, esto es definido como pérdidas por evaporación, estas pérdidas ocurren en cualquier tipo de tanque. El tanque con techo fijo es el que está más sujeto a este tipo de pérdidas que los tanques a presión. El techo flotante tipo pan, es especialmente vulnerable a estas pérdidas, debido a que el calor es fácilmente conducido a través del techo directamente hacia el líquido.

### **2.2.6 Pérdidas por Adherencia**

La vaporización del líquido desde una pared mojada del tanque, expuesta cuando un techo flotante baja durante el vaciado del tanque, es definido como pérdidas por adherencia. Esta fuente de pérdidas por evaporación es muy pequeña.

## **2.3 FACTORES QUE AFECTAN LAS PERDIDAS POR EVAPORACION EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO**

La cantidad total de pérdidas por evaporación depende de la razón de pérdidas y el período de tiempo involucrado. Los factores primarios que afectan la velocidad de pérdidas son: la presión de vapor verdadera del líquido y en el tanque: los cambios de temperatura, la interrupción de servicios, el diámetro, el programa de llenado y vaciado, las condiciones y el tipo. Los efectos de saturación y difusión son únicamente parte del mecanismo de las pérdidas y son clasificadas como dependientes o variables secundarias.

### **2.3.1 Presión de Vapor Verdadera de un Líquido**

La presión de vapor verdadera (PVV) afecta la velocidad de pérdidas debido a que es la fuerza causante de la vaporización; y esta varía con la composición del líquido y la temperatura. Para mezclas de hidrocarburos está presión disminuye con la evaporación debido al cambio de la composición del líquido. La presión de vapor verdadera usualmente es determinada por correlaciones relacionadas con la presión de vapor Reid.

El efecto de esta presión en la velocidad de pérdidas por venteo de tanques con techo fijo involucra como mínimo dos consideraciones internas - la concentración de saturación y el factor de difusión y convección. La concentración máxima de hidrocarburos la cual puede estar presente en los vapores expulsados, conocida como la concentración de saturación, incrementa en proporción directa a la presión de vapor verdadera. Esto seguido de que si los vapores venteados están completamente saturados, las pérdidas por evaporación se incrementarían rápidamente por la aproximación de la PVV a la presión de alivio del tanque. Sin embargo otro mecanismo - la difusión y convección de vapores de hidrocarburos de la superficie del líquido a través del espacio-vapor es también lenta a saturarse completamente.

Las pérdidas por llenado y vaciado de tanques con techo fijo son directamente proporcional al incremento en la presión de vapor verdadera debido a la relación entre dicha presión y la concentración de saturación. En términos de pérdidas totales a través de un período de tiempo, el efecto de la PVV depende de la composición existente.

### **2.3.2 Cambios de Temperatura en el Tanque**

Los cambios de temperatura interna, causados por calor solar, tienden a causar el espacio-vapor a ventear en el tanque. Durante el día, la temperatura fluye por todo el techo y las paredes superiores, elevando la temperatura del vapor y expandiendo el volumen. El efecto térmico puro, es aumentado por la vaporización de hidrocarburos desde el contenido del tanque durante un mismo periodo. La adición de calor también puede incrementar la temperatura de la superficie del líquido y acelerar la vaporización. En la noche, el proceso es reversible, el vapor se contrae y causa la entrada de aire.

La temperatura atmosférica y solar también causan convección forzada en el espacio-vapor el cual fomenta la evaporación desde la superficie del líquido y ayudando en la dispersión del vapor del hidrocarburo.

El promedio diario de cambio en la temperatura atmosférica, es todavía el único camino aceptado para caracterizar los efectos de la atmósfera y el calor solar.

Las consideraciones teóricas no permiten una buena estimación de la cantidad de pérdidas que aumentan con el incremento en el cambio de temperatura; no obstante, esto probablemente sería menor que si fuera directamente proporcional al incremento en el cambio de la temperatura.

### **2.3.3 Interrupción de los Servicios del Tanque**

Para un tanque con techo fijo, la interrupción de servicios tiene grandes pérdidas debido a el gran volumen del tanque que se puede ventear. Sin embargo cuando se interrumpen los servicios es incrementado el calor y este no incrementa en forma directa. En el espacio-vapor entra calor por toda la pared del tanque, esta área incrementa en proporción directa, por todo el techo del tanque, esta área se queda sin cambios.

Además con el aumento del espacio-vapor, hay resistencia a la transferencia de vapores de hidrocarburos de la superficie del líquido a el incremento de venteos. Por lo tanto, el promedio de concentración de hidrocarburos en el venteo de vapores debe haber bajado.

### **2.3.4 Diámetro del Tanque**

El diámetro del tanque influye en el volumen del espacio-vapor y las condiciones de la superficie del líquido. Los venteos son menores que directamente proporcional al incremento en el volumen del vapor, debido a que el incremento es menos proporcional en el área de transferencia de calor dentro del espacio-vapor. Además incrementando el diámetro debería de reducir el aumento de temperatura de la superficie del líquido debido al calor ascendente almacenado, en contacto con la pared del tanque. Asumiendo la altura constante del tanque, las pérdidas totales por venteo, incrementan a una razón menor que directamente proporcional a el volumen del tanque.

### **2.3.5 Programa de Llenado y Vaciado del Tanque**

Sobre un periodo de tiempo, la frecuencia de errores en el almacenamiento y el promedio de interrupción de servicios afectan las pérdidas totales. El programa de llenado y vaciado compensa los cambios diarios de temperatura para poder reducir las pérdidas por venteo. El intervalo de tiempo entre el llenado y vaciado puede tener un efecto significativo en las pérdidas. Para un sistema de tanques conectados, simultáneamente llenando un tanque y vaciando el otro, la capacidad de vapor almacenado se mantiene relativamente constante y las pérdidas por llenado se reducen.

### **2.3.6 Condiciones del Tanque**

Las condiciones del tanque son otro factor que afectan el tipo de pérdidas; sin embargo, los efectos cuantitativos no pueden ser predecidos. Los venteos abiertos resultan de grandes pérdidas cuando los vientos turbulentos causan cambios rápidos de presión en los tanques, en los cuales los líquidos volátiles están almacenados. Cualquier agujero en el techo del tanque, diafragma, sello o accesorio son el resultado del mismo tipo de pérdidas.

Un tanque que se ha pintado recientemente reflejará con más eficiencia el calor solar que otro que tiene sucia y desgastada la pintura, reduciendo así las fluctuaciones en la temperatura diaria, lo cual reducirá las pérdidas por venteo. La pintura blanca es más efectiva todavía que la pintura de aluminio.



### **2.3.7 Tipo de Tanque**

El tipo de tanque o sistemas de almacenamiento son afectados por las pérdidas por evaporación. La cantidad de pérdidas depende del volumen del espacio-vapor disponible y las limitaciones de presión del equipo.

Si los tanques tienen espacios de vapor interconectados, el volumen del espacio-vapor puede ser controlado a un área limitada por programación de llenado y vaciado de tanques, donde sea factible.

Si el espacio-vapor es asignado al cambio de volumen a presión constante, las pérdidas por venteo pueden prácticamente ser eliminadas y las pérdidas por llenado pueden ser reducidas.

### **2.3.8 Dimensiones del Tanque**

Estas son muy importantes ya que el calentamiento o enfriamiento del líquido almacenado y del espacio-vapor, ocurre a través del cuerpo y del techo. La superficie más pequeña para un volumen dado del líquido almacenado, será la que dé menores pérdidas por venteo. Un tanque grande tendrá por esta razón, ventaja sobre varios tanques pequeños que en conjunto tengan un volumen igual al primero.

### **2.3.9 Nivel del Líquido en el Tanque**

La cantidad de vapor que se ventea de un tanque con techo cónico fijo a un determinado cambio de temperatura es proporcional al volumen del espacio-vapor. De acuerdo con esto, el volumen del espacio-vapor es importante en el estudio de las pérdidas por evaporación. El tamaño del espacio-vapor se indica generalmente en términos del nivel del líquido, tomando este como la distancia entre la superficie del líquido y la parte superior del cuerpo del tanque. Un espacio-vapor pequeño responde con mayor intensidad a los cambios de temperatura que un espacio-vapor grande, ya que en este se requiere un tiempo mayor para que se sature de vapor la capa superior de aire, por lo que la mezcla vapor-aire que sale tiene una concentración baja de hidrocarburos.

## CAPITULO III

### DESCRIPCION DE TANQUES

Dentro de este capítulo solo hablaremos de tres tipos de tanques de almacenamiento del petróleo y sus productos, dependiendo de la naturaleza del líquido a almacenar:

- Tanques con techo fijo
- Tanques con techo flotante externo
- Tanques con techo flotante interno

#### TIPOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

En general se tienen los siguientes tipos de tanques para almacenamiento:

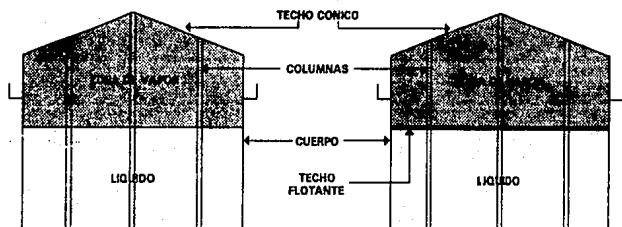
- De techo fijo
  - a. Cónico
  - b. Domo
- De techo flotante interno
  - a. Bajo techo cónico
  - b. Bajo domo
- De techo flotante externo

El casco o cuerpo del tanque así como el fondo pueden ser idénticos y lo que cambia es el tipo de techo (figura 1).

Los tanques de techo fijo se utilizan para almacenar líquidos con baja presión de vapor y pueden ser con el techo soportado por columnas o con el techo autosoportado. Este último generalmente es un domo.

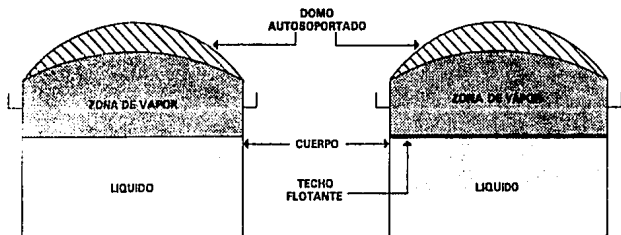
Los tanques con techo flotante se utilizan para almacenar fluidos con gran cantidad de volátiles como por ejemplo gasolinas.

# TIPO DE TANQUES



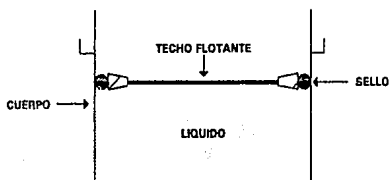
**TECHO CONICO FIJO SOPORTADO**

**TECHO CONICO FIJO CON  
TECHO FLOTANTE INTERNO**



**TECHO FIJO  
AUTOSOPORTADO**

**TECHO FIJO AUTOSOPORTADO  
CON TECHO FLOTANTE INTERNO**



**TECHO FLOTANTE EXTERNO**

**FIGURA 1**

## CAPACIDADES Y PRINCIPALES DIMENSIONES DE TANQUES

Con el fin de proporcionar información que sirva para saber las capacidades y productos que se manejan en PEMEX, a continuación se presentan los principales productos petrolíferos y las principales características de los tanques:

GRUPO	PRODUCTO
Gasolinas	Gasolina Incolora
	Gasolina Nova
	Gasolina Magna Sin
	Gas Nafta
	Gasavión
Kerosinas	Diáfano
	Turbosina
	Tractogas
Combustóleos	Combustóleo
Gasóleos	Diesel

TANQUES VERTICALES		
CAPACIDAD (bbl)	DIAMETRO (ft)	ALTURA (ft)
500000	280	48
200000	180	48
150000	150	48
100000	134	40
80000	117	40
55000	100	40
30000	73	40
20000	60	40
15000	50	40
10000	42.5	40

## **3.1 TANQUES CON TECHO FLOTANTE EXTERNO**

### **3.1.1 GENERAL**

Los tanques con techo flotante externo son un dispositivo efectivo de conservación para el almacenamiento de las gasolinas volátiles. El diseño básico virtualmente elimina el espacio-vapor, en los cuales las pérdidas son bajas tanto en el llenado del tanque como en los venteos. Las pérdidas excepcionalmente bajas en el llenado de tanque trajo a este tanque un uso muy extenso. Otras ventajas de este tanque son su excelente protección contra el fuego y su resistencia a la corrosión. La ignición puede ocurrir únicamente en el área de sellado, en esta área el fuego es normalmente fácil de extinguir.

Los tanques con techo flotante externo son recipientes cilíndricos que tienen un techo que flota en la superficie del líquido. En complemento a una coraza cilíndrica, los componentes básicos son:

- Un techo flotante
- Un sello unido al perímetro del techo flotante
- Accesorios del techo flotante

Los tipos generales de estos componentes, los cuales están disponibles en un rango de diseño comercial, están descritos en esta sección. Incluye una descripción sobre pérdidas por evaporación, así como algún diseño y características operacionales. Otros factores como el mantenimiento y la seguridad de los tanques son importantes en la selección y diseño del equipo del tanque, pero esto está fuera del alcance de este trabajo.

### **3.1.2 TECHOS FLOTANTES**

Los techos flotantes son usados para el control de pérdidas por evaporación. El concepto de diseño básico es para reducir al mínimo la superficie del líquido expuesta a evaporación colocando un techo flotante en contacto directo con la superficie del líquido.

Los techos flotantes son usados para dar servicio a líquidos volátiles y a líquidos con una presión de vapor verdadera a condiciones de almacenamiento abajo de la presión atmosférica. Estos tanques están disponibles en tamaños comerciales, desde 20 a 280 pies de longitud.

Estos tipos de techos son por lo general contruidos de placas de acero soldadas y son de tres tipos :

- Tipo "Pan"
- Tipo Pontón
- Tipo Doble Cubierta

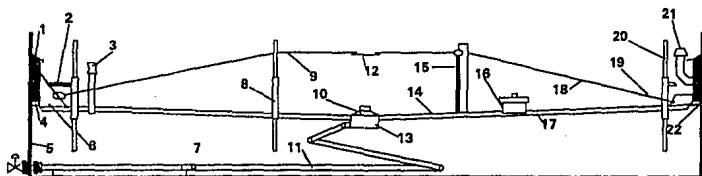
### 3.1.2.1 Techo Flotante de Cubierta Sencilla (tipo "Pan")

El primer tanque con techo flotante que tiene éxito, es el tipo "Pan", que fue construido en Cushing, Oklahoma, en 1922. Este tipo de techo flotante tiene una cubierta sencilla que cubre la superficie del líquido y un sello es colocado en el borde de esta cubierta. La cubierta tiene una pendiente hacia el centro para el drenaje (figura 2).

Este techo flotante tiene desventajas, las cuales cuentan para su uso limitado. La cubierta sencilla esta expuesta al sol durante la mitad del día, y ya que esta en contacto directo con el líquido, el calor es transferido directamente en la superficie del líquido, aumentando apreciablemente la temperatura. El techo tipo "Pan" también puede hundirse bajo cargas pesadas de agua o nieve, o por fugas que se pueden desarrollar en la cubierta. Este tipo es el mas antiguo de los techos flotantes. Esta formado por una placa sencilla de 3/16" con un desnivel hacia el centro y sostenida en la posición adecuada mediante una serie de tensores.

Este techo simple se encuentra en contacto directo con el producto almacenado. Empleando este techo es posible minimizar las pérdidas de producto por llenado y vaciado del tanque, reducir las pérdidas por venteo y el riesgo de incendio del tanque. Se usa mucho para reducir la corrosión en los tanques que manejan crudos sulfurados u otros productos corrosivos. Es el recomendable para crudos o productos del petróleo con presiones de Vapor Reid hasta de 5 lb/pulg<sup>2</sup>, o para productos con temperatura de ebullición superiores a la temperatura atmosférica.

**VISTA GENERAL**  
**TECHO FLOTANTE TIPO " PAN "**



- |                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| 1- PELICULA CONTINUA | 12- ANILLO CENTRAL          |
| 2- BRAZO SOPORTE     | 13- DRENE                   |
| 3- ESCOTILLA         | 14- CUBIERTA                |
| 4- SELLO             | 15- POSTE                   |
| 5- PARED             | 16- REGISTRO                |
| 6- PLACA DE REFUERZO | 17- MIEMBROS DE LA ARMADURA |
| 7- LIQUIDO           | 18- TIRANTE                 |
| 8- SOPORTE           | 19- TENSOR                  |
| 9- TIRANTE           | 20- SOPORTE DEL TECHO       |
| 10- MALLA            | 21- VENTEO                  |
| 11- TUBO DE DRENAJE  | 22- NIVEL DEL LIQUIDO       |

**FIGURA 2**

Para llevar el agua del techo al exterior del tanque, se dispone de un sistema de drenaje cerrado que va por el interior del tanque (figura 2).

### 3.1.2.2 Tanque con Techo Flotante Tipo Pontón.

El techo tipo Pontón fue desarrollado en 1928 por adición de pontones al techo tipo "Pan", para tener una gran estabilidad y flotabilidad. Los pontones son arreglados para proveer estabilidad flotante bajo cargas pesadas de agua o nieve. Normalmente hay bastante flotabilidad, siempre y cuando el techo no se hunda por fugas en la cubierta o fallas en el drenaje. Correctamente compartidos, los pontones pueden ser parcialmente inundados sin poner en peligro la estructura del techo.

Este tipo de tanque apareció en 1928 y mejoró la estabilidad y demás características del tipo de cubierta sencilla (tipo "Pan").

Este techo está constituido por un pontón anular a lo largo del borde exterior del techo y una cubierta sencilla en el centro. La superficie de arriba del pontón, tiene un declive hacia el centro del techo, y la cubierta tiene una pendiente también dirigida al techo.

La relación del área del pontón al área total, depende del tamaño del tanque y los requerimientos de flotación. Por otra parte, el espacio de aire interior del pontón, proporciona un aislante para el calor del sol, inhibiendo así la ebullición del producto almacenado en el área anular.

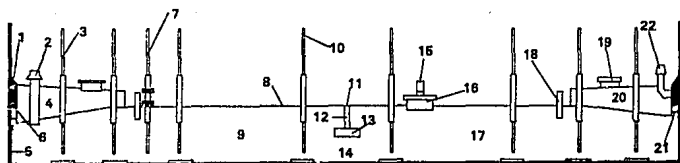
La placa sencilla central, puede dilatarse con el calor, y guardar de esa manera el vapor formado, hasta que la temperatura baje y se condense de nuevo. Las características dadas anteriormente, permiten que líquidos muy volátiles puedan almacenarse en este tipo de tanques. Así, en algunos lugares se han almacenado durante el verano hidrocarburos con presiones de Vapor Reid superiores a 12 lb/pulg<sup>2</sup>, y durante el invierno, líquidos con presiones de Vapor aún mayores.

El pontón anular está formado por una serie de pontones pequeños, independientes, unidos para dar la apariencia de ser uno solo. Con ello se consigue que el techo permanezca a flote aún cuando la placa central y dos compartimentos del pontón integral están picados.



## VISTA GENERAL

### TECHO FLOTANTE TIPO PONTON



1- PELICULA CONTINUA

2- ESCOTILLA

3- SOPORTE

4- PONTON

5- PARED

6- SELLO

7- VENTEO AUTOMATICO

8- CUBIERTA

9- LIQUIDO

10- SOPORTE DEL TECHO

11- SIFON DEL DRENAJE

12- TUBO

13- CHAROLA

14- TECHO

15- VENTEO

16- REGISTRO

17- LIQUIDO

18- DRENAJE DE EMERGENCIA

19- REGISTRO

20- PONTON

21- NIVEL DEL LIQUIDO

22- VENTEO

**FIGURA 3**

Este tipo de techo proporciona una protección al fuego y resistencia a la corrosión, reduce las pérdidas por ventilación, llenado y vaciado del tanque (Figura 3).

### **3.1.2.3 Tanque con Techo Flotante Tipo Doble Cubierta .**

A mitad de los años de 1940's , el techo tipo Doble Cubierta fue presentado, todo el techo tiene una serie de pontones. Los tabiques radiales y circulares dividen el espacio entre las dos cubiertas dentro de los compartimentos; este techo da buena estabilidad y flotabilidad y provee un aislante formado entre el espacio de aire que hay en las dos cubiertas.

Este tipo de techo consta de dos cubiertas completas sobre la superficie del líquido. En un principio se usó solamente para tanques de diámetro pequeño, y no fue hasta 1940 cuando se usaron en tanques con diámetros grandes.

El techo flotante tipo Doble Cubierta es el tipo más eficiente de techo flotante, ya que el aire que se encuentra en el espacio comprendido entre las dos cubiertas sirve como aislante de toda la superficie del líquido. Es esta característica la que lleva a usar este tipo de techo para el almacenamiento de las gasolinas más volátiles.

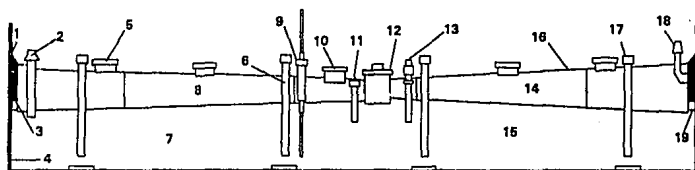
Este tipo de techo tiene dos tipos de drenaje, regulares y de emergencia, debido a esta disposición puede manejar hasta 254 mm. de agua de lluvia en un período de 24 horas.

El techo flotante de Doble Cubierta se construye por compartimentos, de tal manera que el techo puede permanecer a flote, aún cuando dos pontones o compartimentos estén picados (Figura 4).

Aunque numerosos techos flotantes tipo " Pan " están por lo general en uso, el presente trabajo está dirigido hacia techos flotantes tipo Pontón y Doble Cubierta.

## VISTA GENERAL

### TECHO FLOTANTE TIPO DOBLE CUBIERTA



- |                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| 1- PELICULA CONTINUA | 11- DRENAJE ABIERTO       |
| 2- ESCOTILLA         | 12- REGISTRO              |
| 3- SELLO             | 13- DRENAJE DE EMERGENCIA |
| 4- PARED             | 14- TECHO                 |
| 5- REGISTRO          | 15- LIQUIDO               |
| 6- SOPORTE           | 16- CUBIERTA              |
| 7- LIQUIDO           | 17- SOPORTE TECHO         |
| 8-TECHO              | 18- VENTEO                |
| 9- VENTEO AUTOMATICO | 19- NIVEL DEL LIQUIDO     |
| 10- REGISTRO         |                           |

FIGURA 4

### **3.1.3 SELLOS PERIMETRALES**

Todos los tipos de techos flotantes tienen un espacio anular entre la coraza del tanque y el techo flotante, para controlar las pérdidas por evaporación del espacio perimetral. Un sistema efectivo de sellado cierra el espacio perimetral, las irregularidades se acomodan entre el techo flotante y la coraza del tanque, y ayudan al centro del techo, sin embargo permite movimiento normal al techo.

Un sistema de sellado perimetral puede consistir de uno o dos sellos:

- Un sello primario
- Un sello secundario, el cual se encuentra montado arriba del sello primario

Tres tipos básicos de sellos primarios son por lo general usados:

- Zapata Mecánica
- Llenado-Elástico
- Wiper-Flexible

Dos configuraciones de tipo de sellado secundario están disponibles:

- Zapata-Montada
- Borde-Montado

En adición a algunos sistemas de sellados perimetrales estos incluyen una pantalla protectora. Otros tipos de sellos primarios y secundarios han sido o serán desarrollados, pero un número de tipos específicos de sellos y los cuales representan los sistemas de sellado generalmente en uso, están descritos a continuación.

Los factores usados para determinar las pérdidas por evaporación han sido desarrolladas únicamente para sistemas de sellado con zapata mecánica y sellos primarios de llenado-elástico.

### 3.1.3.1 Zapata Mecánica como Sello Primario

La zapata mecánica (o metálica) como sello primario tiene un amplio uso por varios años (figura 5). Identificando las características de estos sellos que usan un ligero-medidor con banda metálica por el deslizamiento en contacto con la coraza del tanque.

La banda metálica esta soportada junto a la coraza del tanque por un dispositivo mecánico. La banda esta formada de hojas (zapatas) y puede variar en tamaño con diferentes fabricantes. Las zapatas están unidas para formar un anillo. La expansión y contracción del anillo es para que el anillo pase sin problemas las irregularidades de los remaches de la coraza.

Esto es realizado por la unión de piezas angostas de tela dentro del anillo o por impedimento de las zapatas a intervalos. El fondo de las zapatas se extiende debajo de la superficie del líquido a confinar el espacio-vapor entre la zapata y el techo flotante.

El borde del espacio-vapor, el cual esta delimitado por la zapata, el borde del techo flotante, y la superficie del líquido son selladas a la atmósfera por remachado o por atornillado, y revestido por una tela llamada sello primario, esto se extiende desde la zapata hasta el borde. El tipo específico de fabrica usado varía con el fabricante de tanques y el tipo de servicio.

Dos métodos son usados para unir el sello primario fabricado. Con el método usado más comúnmente, la tela es unida a la parte superior de la zapata y el borde del techo flotante. Con el método de reducción del borde del espacio-vapor la tela es unida a la zapata y al borde del techo flotante cercano a la superficie del líquido almacenado. Estas dos posiciones del sello primario son mostradas en la figura 5.

Los sellos de zapatas mecánicas son usualmentè diseñados para acomodar una variación local de 5 y un normal de 8 pulgadas de ancho del espacio. Los detalles para diferentes diseños están disponibles para tanques con diámetros grandes o con bordes de espacios tan grandes como de 8 pulgadas. El sellado del anillo de la zapata y el mecanismo ordinariamente, provee suficiente flexibilidad para acomodar las irregularidades en la coraza del tanque. Los sellos de tipo zapata mecánica pueden fácilmente ser llenados de placas usadas para servicios largos en tanques remachados.

El uso normal (esto es cuando el techo flotante se mantiene continuamente flotando) de la zapata mecánica tiene un buen servicio. En general la tela como sello primario empieza a mostrar signos de envejecimiento mostrado en las partes mecánicas deterioradas. Cuando el sello (zapata mecánica) es usado con un producto corrosivo, tal como cuando la superficie del fondo del techo flotante es expuesta al aire, la corrosión puede ser severa.

### **3.1.3.2 Sello Primario de Llenado-Elástico**

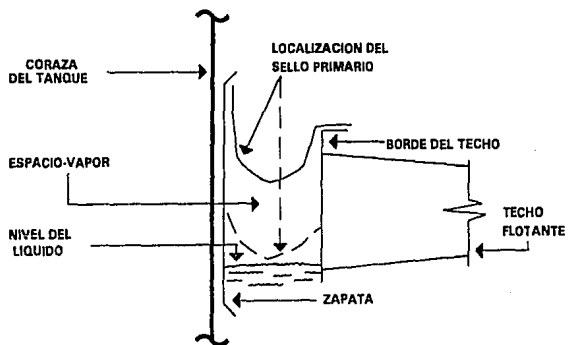
La identificación característica de este tipo de sello es el uso de un elastómero cubierto con una tela que esta en contacto con la coraza del tanque, como se muestra en la figura 6. La envoltura se expande por llenado con líquido, espuma resilente o gas, esto con tal de que este en contacto con la coraza del tanque.

El sello esta unido al borde del techo flotante para que toque la superficie del líquido (líquido-montado) o permitir un espacio-vapor entre el líquido y el sello (vapor-montado). Los tanques con sello tipo llenado-elástico están a menudo equipados con un sello secundario.

La ventaja de un sello tipo llenado-elástico es que tiene mucha flexibilidad. La tela usada para envolver es mucho mas flexible que un sello de tipo zapata mecánica, y tiene mayor conformidad la coraza del tanque. El mejor sello de llenado-elástico esta diseñado para acomodarse a variaciones normales de 4 pulgadas.

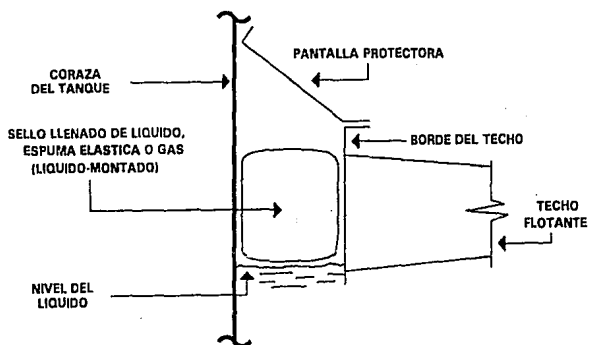
Estos sellos son menos abrasivos que el sello tipo zapata mecánica, el sello de llenado-elástico es típicamente usado siempre en una cubierta interior del tanque. También estos sellos tiene un área vertical relativamente corta en contacto con la coraza del tanque.

Los sellos de vapor-montado están asociados con el espacio-vapor, el cual tiende a contribuir a las pérdidas por evaporación. También estos sellos tienen un área vertical relativamente corta en contacto con la coraza del tanque (comparada con el sello tipo zapata mecánica), el vacío entre el sello y la coraza del tanque que se comunica con el espacio-vapor, permite las pérdidas por evaporación adicionales. Los sellos de vapor-montado no están sujetos a deteriorarse al no estar en contacto con la superficie del líquido.



**SELLO PRIMARIO TIPO ZAPATA MECANICA**

**FIGURA 5**



**SELLO PRIMARIO TIPO LLENADO-ELASTICO**

**FIGURA 6**

Los sellos tipo líquido-montado los cuales tocan la superficie del líquido, reducen significativamente las pérdidas por evaporación. Sin embargo las telas revestidas en contacto con productos de hidrocarburos, especialmente los de alto contenido aromático, tienden a reducir en algunos casos la vida útil, o requieren de un incremento en su mantenimiento. Recientes avances en la composición sintética tienen resultados en telas con un incremento en la compatibilidad con hidrocarburos.

Aunque el sello de llenado-elástico no tiene un servicio tan largo como el sello tipo zapata mecánica, estos también son conocidos por dar un buen servicio.

A diferencia del sello tipo zapata mecánica, el sello tipo llenado-elástico tiene menos partes metálicas por lo que esta menos sujeto a corrosión.

### **3.1.3.3 Sello Primario Tipo Wiper-Flexible**

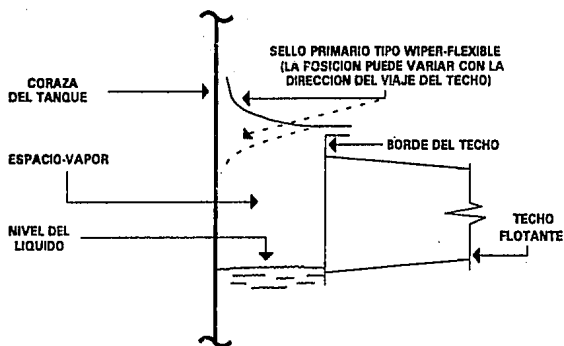
El sello primario tipo wiper-flexible ha sido desarrollado en años recientes. La característica que identifica a este tipo de sello es el uso de una hoja elastomérica la cual se desliza al contacto con la coraza del tanque (fig. 7).

Una ventaja de este tipo de sello es que tiene mucha flexibilidad. El wiper-flexible es usualmente más flexible que el tipo zapata mecánica, también estos pueden ser mejor conformados a la coraza del tanque. Este tipo de sello esta diseñado para un acomodo a una variación local de cerca de  $\pm 4$  en un espacio normal de 8 pulgadas. Algunos sellos tipo wiper-flexible están diseñados para invertirse, cuando el techo flotante cambia de dirección debido al llenado y vaciado del tanque, como se muestra en la figura 7.

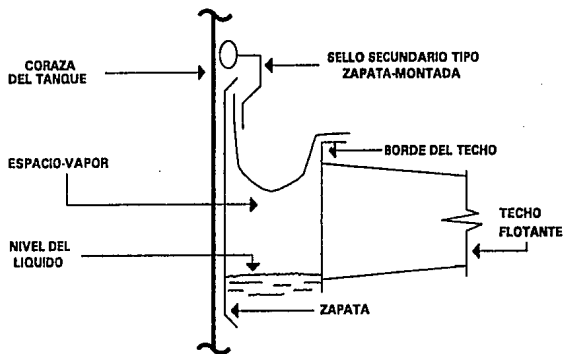
El sello tipo wiper-flexible tiene una asociación de espacio-vapor, la cual tiende a contribuir en las pérdidas por evaporación. Dependiendo de la longitud del área en contacto vertical entre el sello wiper-flexible y la coraza del tanque, el vacío entre el sello y la coraza del tanque permiten las pérdidas por evaporación.

Debido a que los sellos tipo wiper-flexible tienen que ser usados por un tiempo relativamente corto, la vida útil del sello no esta definida. Como es el caso para sellos de llenado-elástico, las partes metálicas de los sellos wiper-flexible no están sujetas a corrosión.





**SELLO PRIMARIO TIPO WIPER-FLEXIBLE**  
**FIGURA 7**



**SELLO PRIMARIO TIPO ZAPATA MECANICA CON**  
**SELLO SECUNDARIO TIPO ZAPATA-MONTADA**  
**FIGURA 8**

### **3.1.3.4 Sellos Secundarios**

Los sellos secundarios pueden ser divididos dentro de dos categorías:

- Zapata-Montada
- Borde-Montado

El sello secundario tipo Borde-Montado (Figura 9) es más efectivo en reducción de pérdidas debido a que cubre más completamente el espacio-vapor.

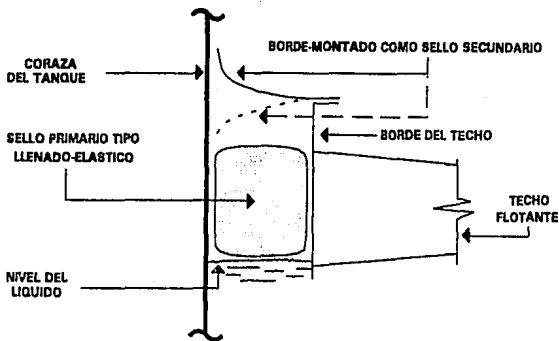
El sello secundario como Zapata-Montada (Figura 8), el cual es usado con zapata mecánica como sello primario, es efectivo en reducción de pérdidas del vacío que hay entre la zapata y la coraza del tanque, pero no reduce las pérdidas causadas por defectos en la tela del sello primario.

Los sellos secundarios son usualmente hechos de tela o materiales elastoméricos, algunas reforzados o guiados por uniones externas. Algunos sellos secundarios están diseñados para invertirse cuando el techo cambia de dirección, como lo muestra la figura 9. Para que los sellos sean efectivos, estos tienen que mantenerse en contacto con la coraza del tanque; de esta manera el uso de un sello secundario puede reducir la capacidad efectiva del tanque.

### **3.1.3.5 Pantallas Protectoras**

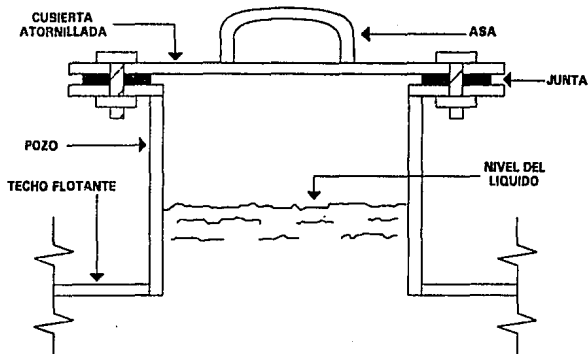
Cuando los techos flotantes tienen como sello primario un llenado-elástico y que no están equipados con un sello secundario, mas esta proporcionado con una pantalla protectora, como lo muestra la figura 6. Las pantallas son usualmente de una construcción tipo-hoja y tiene numerosas juntas radiales para permitir movimiento al techo flotante.

La pantalla protectora puede ser metálica o elastomérica. Están normalmente unidas al techo flotante, por una conexión mecánica o una bisagra plegable. Esta pantalla generalmente provee una larga vida al sello por la protección de la tela del sello primario de la deterioración a la que esta expuesta al mal tiempo.



**SELLO PRIMARIO TIPO LLENADO-ELASTICO CON SELLO SECUNDARIO TIPO BORDE-MONTADO**

**FIGURA 9**



**COMPUERTA DE ACCESO**

**FIGURA 10**

### **3.1.4 ACCESORIOS DEL TECHO**

Numerosos accesorios son los que pasan por todo o están unidos al techo flotante para asignar funciones operacionales. Los accesorios del techo pueden ser una fuente de pérdidas por evaporación, sobre todo cuando requieren aberturas en el techo flotante. Los accesorios más comunes que requieren aberturas en el techo y por lo tanto causan pérdidas están descritos a continuación.

#### **3.1.4.1 Compuerta de Acceso**

La figura 10 muestra una compuerta de acceso típica, la cual consiste de una abertura en el techo con un pozo vertical unido al techo y una cubierta removible que descansa en el pozo.

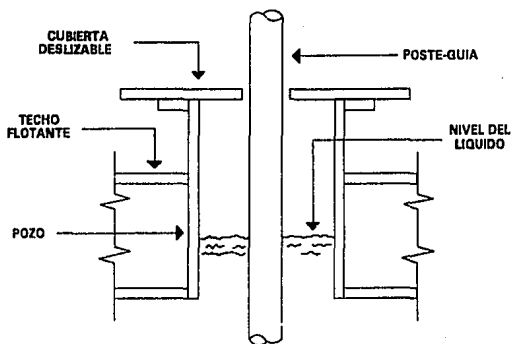
Una compuerta de acceso tiene dimensiones tales que provee el acceso de trabajadores y materiales a través del techo para construcción y mantenimiento. Se coloca una junta entre la cubierta y el pozo para reducir las pérdidas por evaporación.

#### **3.1.4.2 Pozo con Poste Guía**

En la figura 11 se muestra un pozo con poste guía. Los dispositivos antirotación son usados para prevenir a los techos flotantes de rotación y daños en la escalera flotante, en los sistemas de drenaje del techo y en el sellado. Un dispositivo antirotación comúnmente usado es un poste con guía que esta fijo a la parte superior y el fondo del tanque. El poste con guía pasa a través del pozo del techo flotante.

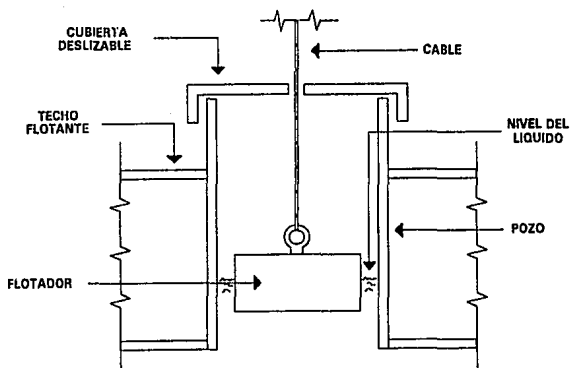
Las ruedas unidas a la parte superior del pozo montadas en la superficie exterior del poste con guía, son para prevenir la rotación del techo flotante.

El pozo con poste guía tiene una cubierta móvil para acomodar el límite del movimiento radial del techo. La cubierta móvil puede estar equipada con una junta entre el poste con guía y la cubierta para evitar las pérdidas por evaporación.



**POZO CON POSTE-GUIA**

**FIGURA 11**



**INDICADOR POR FLOTACION**

**FIGURA 12**

### **3.1.4.3 Indicador por Flotación**

El indicador por flotación es usado para indicar el nivel del líquido dentro del tanque. Estos usualmente consisten de un flotador contenido dentro del pozo que pasa por toda la cubierta. El flotador esta conectado a un indicador en el exterior del tanque pasando por un sistema guiado en el techo fijo. El pozo se encuentra cerrado por una tapa, y se pueden reducir las pérdidas por eyaporación colocando una junta entre la tapa y el pozo. Un indicador por flotación es mostrado en la figura 12.

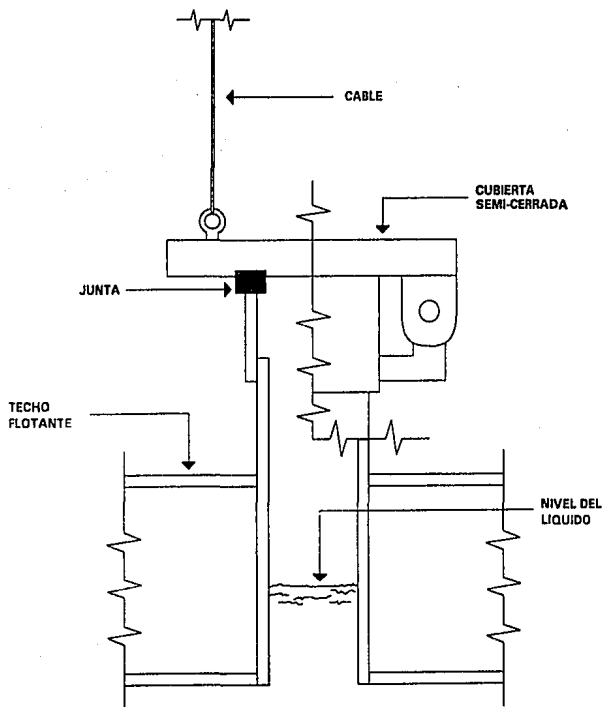
### **3.1.4.4 Compuertas de Medición**

La compuerta de medición provee acceso al tanque para mediciones manuales del nivel del líquido y para tomar muestras del contenido del tanque. Una compuerta de medición consiste de un tubo que pasa a través del techo flotante. Esta compuerta esta usualmente localizada dentro de la plataforma de medición, la cual esta montada en la parte superior de la coraza del tanque. La cubierta puede tener una cuerda unida para que esta pueda abrir desde la plataforma de medición. La figura 13 muestra una compuerta de medición.

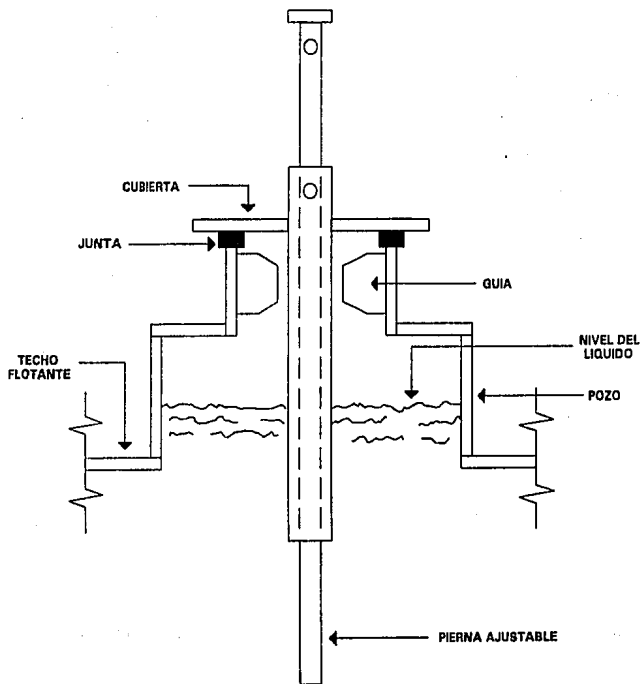
### **3.1.4.5 Rompedores de Vacío**

La figura 14 muestra un rompedor de vacío común. El rompedor de vacío es usado para igualar la presión en el espacio-vapor debajo del techo flotante, cuando el techo flota sin apoyarse en las piernas. Esto es realizado por las aberturas de los accesorios en el tanque, usualmente un pozo está formado de tubo el cual descansa en la cubierta. Una pierna-guía esta unida a la superficie inferior de la cubierta y esta en contacto con el fondo del tanque justo en el punto en el cual el techo flota libremente en el líquido. Cuando la pierna esta en contacto con el fondo del tanque, el rompedor de vacío abre mecánicamente para levantar la cubierta del pozo.

Algunos rompedores de vacío tienen piernas ajustables para permitir cambiar el nivel del tanque en el cual la pierna esta en contacto con el fondo. El propósito de un rompedor de vacío es dar un intercambio libre de aire.



COMPUERTA DE MEDICION  
FIGURA 13



**ROMPEDOR DE VACIO**

**FIGURA 14**



### **3.1.4.6 Drenajes del Techo**

Los drenajes de los techos permiten remover el agua de lluvia en la superficie de los techos flotantes. Dos tipos de sistemas de drenaje, para este tipo de techos flotantes son usados: uno cerrado y uno abierto. Los sistemas de drenaje cerrado llevan agua de lluvia desde la superficie del techo al exterior del tanque a través de un sistema de tubería flexible, o a través de un sistema de calzas flexibles localizadas abajo del techo flotante en el espacio del producto.

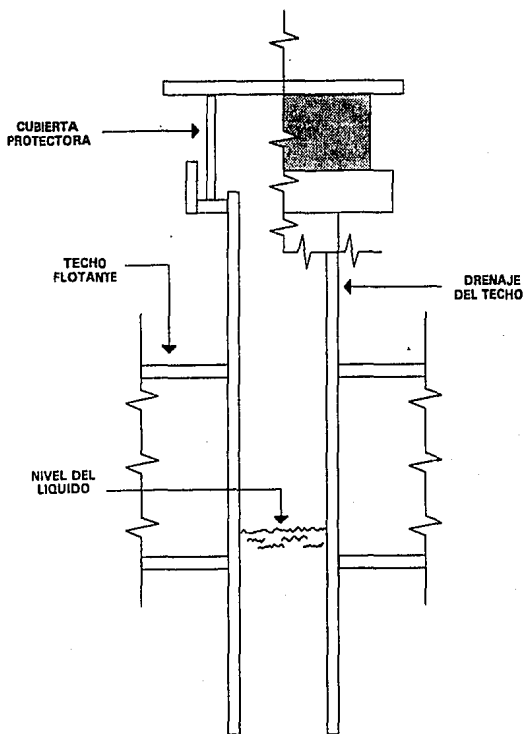
Los sistemas de drenaje abiertos permiten drenar el agua de lluvia de la superficie del techo flotante dentro del producto. Los drenajes del techo en este sistema consisten de un tubo abierto que se extiende a corta distancia abajo del fondo del techo flotante. Estos tubos de drenaje están llenos con producto al nivel del líquido del tanque, ocurren pérdidas por evaporación desde la parte superior de los tubos del drenaje. Los sistemas de drenaje abiertos pueden usarse únicamente con techos flotantes de Doble-Cubierta.

Dentro de los sistemas de drenaje abiertos se encuentran dos tipos de sistemas usados:

- Drenaje de flujo repentino
- Drenaje por inundación

El drenaje de flujo repentino tiene un drenaje abierto que esta al ras de la parte superior de la superficie de la doble-cubierta. Esta permite que el agua sea a drenada dentro del producto. El drenaje por inundación consiste de un dren abierto que esta elevado arriba de la parte superior en la superficie del techo flotante.

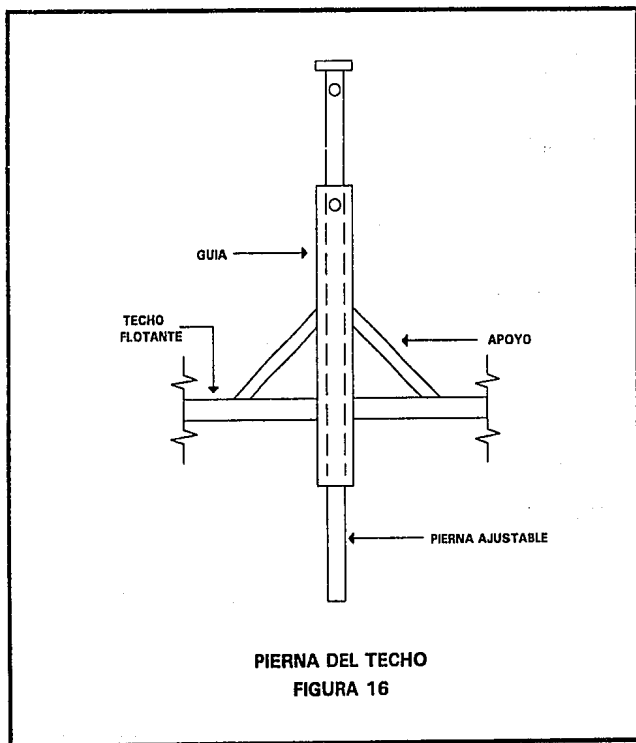
Este drenaje limita la cantidad máxima de agua de lluvia que puede acumularse en el techo flotante y de esta manera se usa para proveer un drenaje de emergencia. El drenaje por inundación es usado normalmente en conjunto con un sistema de drenaje cerrado para llevar agua de lluvia al exterior del tanque. La figura 15 muestra un drenaje por inundación.



**DRENAJE DEL TECHO**  
**FIGURA 15**

### 3.1.4.7 Piernas del Techo

La figura 16 muestra una pierna del techo. Sirven para prevenir daños a los accesorios localizados debajo del techo flotante y para dar limpieza o reparación al tanque, los piernas del techo están para soportar el techo flotante a una distancia predeterminada abajo del fondo del tanque, cuando este vacío. Un diámetro grande de un tanque requiere un gran número de piernas. Estos piernas generalmente consisten de un tubo-pierna que pasa a través de un tubo vertical de diámetro grande, con una manga. La manga es soldada al techo flotante extendiéndose por abajo y arriba.



## **3.2 TANQUES CON TECHO FLOTANTE INTERNO**

### **3.2.1 GENERAL**

Los tanques con techo flotante interno son recipientes cilíndricos que tienen un techo fijo en la parte superior del tanque y una cubierta flotante que descansa en la superficie del líquido almacenado. Existen dos tipos básicos de tanques con techo flotante interno:

- Tanques en los cuales el techo fijo es soportado por columnas verticales dentro del tanque; esto sería un tanque con techo fijo ajustado con una cubierta flotante.
- Tanques en los cuales el techo fijo es autosoportado, sin soporte de columnas internas; el cual sería un techo flotante externo con un techo fijo.

Además de una coraza cilíndrica y un techo fijo, los componentes básicos de un techo flotante interno son:

- Una cubierta flotante
- Un sello en el borde unido al perímetro de la cubierta flotante
- Los accesorios de la cubierta flotante que proveen el soporte para el techo fijo o servicio de funciones operacionales

Estos componentes, los cuales están disponibles en rango de diseño comercial, están descritos en este trabajo, incluyendo una descripción y comentarios sobre pérdidas por evaporación.

El uso de una cubierta flotante interna reduciría la concentración del vapor de hidrocarburos en el espacio entre la cubierta y el techo fijo, la cual ocurre en tanques con techo fijo.

Para minimizar el caso de inflamabilidad de la mezcla aire-vapor, los venteos están instalados en la parte superior de la coraza o en el techo fijo para abastecer circulación de aire a través del espacio entre el techo fijo y la cubierta flotante.

El API STD 650, Apéndice H, especifica el uso de tales venteos y el esquema de los detalles de diseño para el almacenamiento de los productos del petróleo. Tales tanques están referidos a tanques con techo flotante interno de libre venteo y el procedimiento de estimación de pérdidas esta descrito en el capítulo 4.

Los tanques cerrados con techo flotante interno referidos a venteo únicamente a través de un relevo de venteo de la presión de vacío. Estos tanques están diseñados típicamente con accesorios auxiliares de seguridad, así como especificaciones dadas por el usuario. El procedimiento de estimación de pérdidas propuesto en el siguiente capítulo no es aplicable a tanques cerrados con techo flotante interno.

### 3.2.2 CUBIERTAS FLOTANTES

Las cubiertas flotantes son usadas típicamente para controlar las pérdidas por evaporación. El concepto básico de diseño es para reducir la superficie del líquido expuesta a evaporación colocando una cubierta flotante en contacto con la superficie del líquido o por confinamiento de una capa de vapor saturado debajo de la cubierta flotante y por encima del líquido. Las pérdidas por evaporación ocurren durante el almacenamiento estático por todo el espacio del borde anular, los accesorios de la cubierta y, en algunos casos, por las costuras de las cubiertas.

Las cubiertas flotantes son usadas en productos volátiles y en productos con un presión de vapor verdadera a condiciones de almacenamiento, abajo de la presión atmosférica. Estos tanques están disponibles en todos los tamaños comerciales, con un rango en el diámetro de 20 a 280 pies.

Las cubiertas flotantes son por lo general de dos tipos:

- Cubiertas de construcción soldada.
- Cubiertas construidas por atornillado de hojas.

Las cubiertas con costuras atornilladas, son hechas típicamente de materiales super ligeros, mientras que las cubiertas soldadas están hechas de placas de acero. Ambos tipos de cubiertas están diseñados de acuerdo al estandar API 650, Apéndice H.

Las cubiertas flotantes pueden ser caracterizadas por la localización de la cubierta relativa a la superficie del líquido almacenado. Una cubierta que es soportada arriba de la superficie del líquido almacenado por estructuras flotantes es referida a cubiertas de tipo no contacto.

Una cubierta que flota directamente en la superficie del líquido almacenado esta referida como una cubierta de contacto. Las cubiertas de acero son diseño de contacto directo, mientras que los materiales no ferrosos son usados tanto en cubiertas de contacto directo como en las de no contacto.

Estos tipos generales y diseños de cubiertas flotantes están por lo general disponibles en diferentes materiales y con varias características de diseño. Los tipos básicos de estas cubiertas usadas en tanques con techo flotante interno son las siguientes:

- Techo Flotante tipo " Pan "
- Techo Flotante tipo Pontón
- Techo Flotante tipo Doble Cubierta
- Techos Metálicos Flotantes
- Techos Metálicos con panel tipo Sandwich
- Techos de Plástico con panel tipo Sandwich

Los cuales están descritas a continuación de acuerdo a su clasificación, en cubiertas de tipo No-Contacto y en Contacto Directo con el Líquido

### **3.2.2.1 Cubiertas de No-Contacto con Costuras Atornilladas**

Este tipo de cubierta está por lo general disponible en dos tipos de diseño básico. El diseño más común consiste de una hoja de aluminio atornillada a una estructura de rejilla de aluminio para formar una barrera substancialmente hermética, en la cual el vapor del producto almacenado esta contenido en el espacio creado por la cubierta flotante. La flotación es debida al sellado tubular de pontones de aluminio, los cuales están aproximadamente sumergidos a la mitad en el líquido almacenado (fig. 17A).

La rejilla y los pontones están interconectados con una estructura y a un sistema de soportes; los cuales soportan la cubierta flotante interna cuando el tanque esta casi vacío.

Un segundo diseño consiste de paneles de aluminio en una estructura de rejilla de aluminio soportada en una estructura arriba de la superficie del líquido por flotadores de aluminio llenados con espuma de poliuretano. Mientras que los detalles varían un poco del diseño anterior, el concepto es similar en que la flotación es para mantener la cubierta arriba de la superficie del líquido con un espacio-vapor abajo de la cubierta.

### **3.2.2.2 Cubiertas en Contacto-Directo con Costuras Atornilladas**

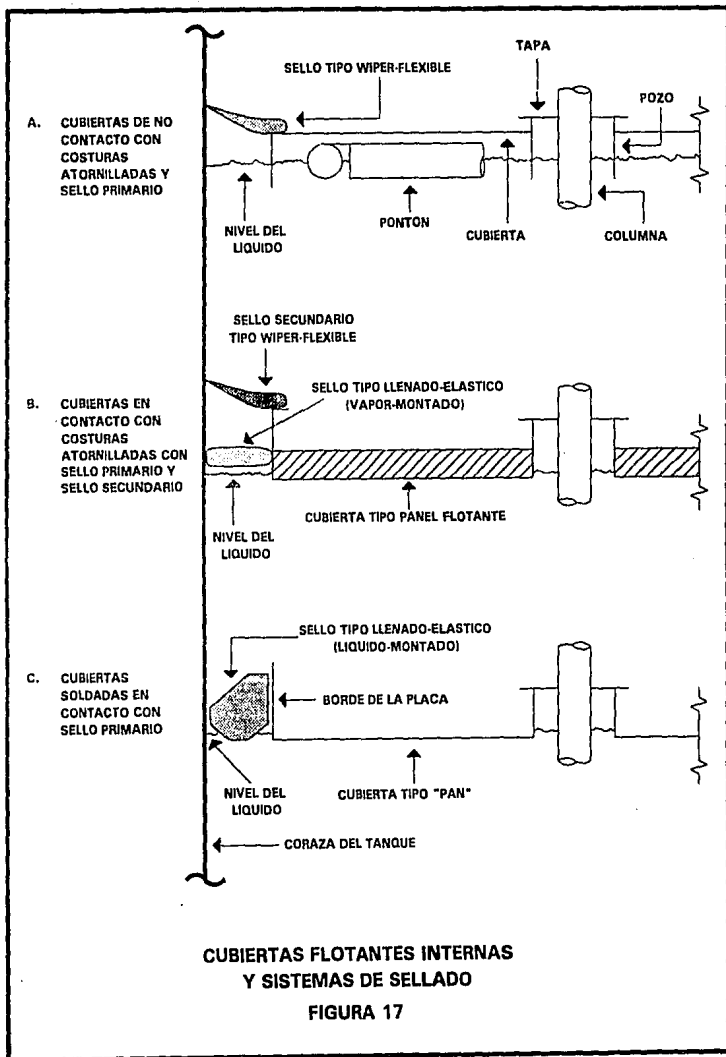
Este tipo de cubierta esta también por lo general disponible en dos diseños básicos (figura 17B). El diseño más común consiste de paneles de aluminio tipo sandwich , con un núcleo en el panel, el cual flota directamente en la superficie del líquido. Este panel con núcleo de aluminio es casi 1 ½ pulg. de grueso y esta adicionado a los paneles de aluminio en la parte superior y la superficie del fondo. Esta construcción tipo sandwich es una cubierta medio-flotante. Un número de paneles están atornillados en los bordes para formar la cubierta. Puesto que no existe espacio-vapor dentro de la cubierta, los bordes verticales no son usados para los accesorios de la cubierta o el perímetro de la cubierta.

Un segundo diseño consiste de paneles hechos arriba de una espuma rígida, encerrada en una fibra de vidrio reforzada con poliéster. Los paneles pueden ser atornillados para formar la cubierta, los cuales flotan directamente en la superficie del líquido. El concepto es similar al descrito anteriormente excepto en los diferentes materiales usados.

### **3.2.2.3 Cubiertas Soldadas en Contacto-Directo**

Este tipo de cubiertas consiste de placas de acero que están soldadas a todo lo largo de los bordes para formar una cubierta continua. Una placa vertical provee alrededor del borde de la cubierta flotación y un soporte del sello.

En una cubierta soldada tipo "Pan", la flotación ocurre únicamente como un resultado del desplazamiento de la cubierta dentro del líquido almacenado (figura 17C).





La flotación es realizada por el uso de flotadores en la parte superior de la superficie de la cubierta los cuales toman la forma de un círculo ( como en un techo flotante externo tipo Pontón ); la distribución de volúmenes a través o por completo en la superficie de la cubierta ( como un techo flotante externo tipo Doble Cubierta ).

### 3.2.3 SELLOS PERIMETRALES

Todo tipo de cubiertas flotantes tienen un espacio anular entre el perímetro o el borde de la cubierta y la coraza del tanque para permitir movimiento a la cubierta dentro del tanque. Un sello es usado en todos los tipos de cubiertas flotantes para controlar las pérdidas por evaporación del área del borde anular. Un sello efectivo cierra este espacio y se acomoda irregularmente entre la cubierta y la coraza del tanque. Normalmente un sello primario es suficiente, aunque un sello secundario puede ser instalado arriba del sello primario para controlar las pérdidas totales por evaporación.

Los sellos para tanques con techo flotante interno son normalmente no-metálicos, excepto cuando el tanque fue diseñado como un tanque con techo flotante externo, en los cuales, ambos sellos tanto el metálico como el no-metálico son usados. El uso de materiales no-metálicos es el resultado de un sello ligero, el cual es construido con una pequeña dimensión vertical. Un sello ligero es de interés particular con una cubierta no-ferrosa para limitar la posibilidad de inmersión del borde de la cubierta. Una posible causa del mal funcionamiento de las cubiertas flotantes internas es el sobrellenado del tanque y la consecuencia es la interferencia del techo fijo con la cubierta.

Dos tipos básicos de sellos no-metálicos son por lo general de uso extenso; el sello tipo wiper-flexible y el sello de llenado-elástico. Estos dos tipos de sellos pueden ser caracterizados por la localización de un sello relativo a la superficie del líquido almacenado. El sello montado en la cubierta flotante; tal que exista un espacio-vapor entre el líquido almacenado y el fondo del sello, son llamados como sellos de vapor-montado. Si el fondo del sello toca el líquido, esto es llamado un sello de líquido-montado.

Estos tipos de sellos primarios, así como los sellos secundarios se describen a continuación. Los sellos metálicos están descritos en la sección de techos flotantes externos.

### **3.2.3.1 Sello Tipo Wiper-Flexible (Vapor-Montado)**

El sello tipo wiper-flexible consiste de una hoja continua de material flexible fijado a una montura en el perímetro de la cubierta, extendiéndose sobre el espacio del borde anular, y estando en contacto con la coraza del tanque. Un espacio-vapor existe entre el líquido almacenado y el fondo del sello.

Para el control de pérdidas por evaporación, esto es importante que el montaje y el sello radial asociados serían esencialmente herméticos al vapor, el sello continúa alrededor de la circunferencia, la hoja generalmente esta en contacto con la coraza del tanque; y la parte superior del sello no se extiende dentro del líquido durante el recorrido hacia arriba de la cubierta. Este tipo de sello se muestra en la figura 17A.

El segundo tipo de construcción de sello wiper usado es una celda con núcleo de espuma encerrada con un revestimiento de tela. El poliuretano revestido de tela nylon y espuma de poliuretano es un material común. El núcleo provee la flexibilidad y soporte, mientras que la tela provee la barrera de vapor.

### **3.2.3.2 Sello de Llenado-Elástico ( Vapor o Líquido-Montado )**

El sello de llenado-elástico trabaja en un principio por expansión y compresión del material elástico para mantenerse en contacto con la coraza del tanque. Este sello consiste de un núcleo de espuma encerrado por un revestimiento de tela. La elasticidad del núcleo de la espuma empuja la tela que esta en contacto con la coraza del tanque.

Los sellos están unidos y montados en el perímetro de la cubierta y esta continuamente alrededor de la circunferencia . El poliuretano revestido de nylon y espuma de poliuretano son materiales comúnmente usados.

Los sellos de llenado-elástico pueden ser de vapor-montado (figura 17B) o líquido-montado (figura 17C). La selección de la posición de montado es influenciado por varios diseños y factores de operación.

### **3.2.3.3 Sellos Secundarios**

Los sellos secundarios pueden ser usados para proveer un control adicional a las pérdidas por evaporación. Este sello puede ser montado como se muestra en la fig. 17B. Estos sellos secundarios son de tipo wiper-flexible o de llenado-elástico. El uso de un sello secundario limita la capacidad de operación de un tanque, cuando el tanque esta llenándose. Por lo general, los sellos secundarios no son usados en tanques con techo flotante interno.

### **3.2.4 ACCESORIOS DE LA CUBIERTA**

Los accesorios de la cubierta son una fuente de pérdidas por evaporación debido a que ellos requieren aberturas en la cubierta. Los accesorios más comunes que requieren aberturas en la cubierta son descritos a continuación.

#### **3.2.4.1 Compuertas de Acceso**

Una compuerta de acceso consiste de una abertura en la cubierta con un pozo vertical unido a la cubierta y una cubierta removible para abrir y cerrar. La compuerta de acceso tiene un tamaño razonable para poder pasar material y tener acceso el personal a través de la cubierta para construcción y servicio. La cubierta puede descansar directamente en el pozo, una junta puede ser usada entre la tapa y el pozo para reducir las pérdidas por evaporación.

#### **3.2.4.2 Columnas**

El techo fijo más común diseñado esta soportado adentro del tanque por varias columnas verticales, las cuales necesariamente penetran la cubierta flotante. Algunos techos fijos están autosoportados, y por lo tanto, no tienen columnas. Las columnas están hechas de tubo, con una sección circular cruzada, o están construidas arriba de una forma estructural con secciones irregulares cruzadas. El número de columnas varía con el diámetro del tanque, desde un mínimo de 0 hasta 80 para tanques grandes.

El paso de columnas a través de las aberturas de la cubierta es mediante pozos periféricos verticales. Una tapa existe entre la parte superior del pozo y la columna. Varios diseños patentados existen para esta tapa, incluyendo tapas deslizables, la cual acomoda los movimientos de la cubierta relativo a la columna como el cambio en el nivel del líquido. Una junta entre la tapa y el pozo reduce las pérdidas por evaporación.

#### **3.2.4.3 Pierna de la Cubierta**

Para prevenir daños a los accesorios que se encuentran debajo de la cubierta y para dar limpieza o reparación al tanque, los soportes están provistos para soportar la cubierta a una distancia predeterminada desde el fondo del tanque. Estos soportes consisten de: (1) una pierna fija ajustable unida a la cubierta flotante y (2) soportes colgantes que suspenden la cubierta desde el techo fijo. Para piernas ajustables o soportes colgantes, el elemento para llevar carga pasa a través del pozo en la cubierta.

#### **3.2.4.4 Medidores por Flotación**

Los medidores por flotación son usados para indicar el nivel del líquido dentro del tanque. Estos usualmente consisten de un flotador contenido dentro de un pozo que pasa por toda la cubierta. El flotador esta conectado a un indicador en el exterior del tanque pasando por un sistema guiado en el techo fijo. El pozo se encuentra cerrado por una tapa, y se pueden reducir las pérdidas por evaporación colocando una junta entre la tapa y el pozo.

#### **3.2.4.5 Escalera de la Cubierta**

Algunos tanques están equipados con escaleras internas, que van desde la entrada de hombre en el techo fijo a el fondo del tanque. La abertura de la cubierta pasa a través de la escalera, y esta es construida con detalles de diseño y consideraciones similares a las discutidas para las columnas.

### **3.2.4.6 Drenajes**

Estas penetraciones pequeñas pueden ser espaciadas a través de la cubierta en cubiertas remachadas para dar algún producto que puede ser en la superficie de la cubierta para el dren posterior a la superficie inferior de la cubierta. Típicamente, el drenaje esta 1 pulgada en diámetro y es un flujo con y unido a la superficie de arriba de la cubierta. El dren se extiende dentro del líquido almacenado en cubiertas de no-contacto.

### **3.2.4.7 Rompedores de Vacío**

Un rompedor de vacío es usado para igualar la presión en el espacio-vapor a través de la cubierta, cuando la cubierta flota libre de sus piernas. Esto es realizado por las aberturas de los accesorios de la cubierta, las cuales usualmente consisten de un pozo formado de tubo en la cual descansa una tapa.

La superficie inferior de una tapa esta unida a una pierna-guía de tal longitud que esta en contacto con el fondo del tanque cuando la cubierta esta justo flotando libremente en el producto. Cuando esta en contacto con el fondo del tanque, la pierna- guía mecánica abre el rompedor de vacío. Cuando la pierna no esta en contacto con el fondo, la abertura esta cerrada por una tapa descansando en el pozo.

El cierre puede ser con o sin una junta entre la tapa y el pozo. El propósito de un rompedor de vacío es para permitir el intercambio libre de aire y/o vapor.

## **3.3 TANQUES CON TECHO FIJO**

### **3.3.1 GENERAL**

El tanque con techo fijo es el tipo de tanque mínimo aceptado para el almacenamiento de líquidos volátiles. Los tanques grandes y modernos con este tipo de techo son de construcción soldada. Algunos tanques viejos con techo fijo pueden ser de construcción remachada. Por el momento, susceptible a cuantiosas pérdidas por venteo y llenado, este tipo de tanque es usado más frecuentemente para servicios en los cuales no se puede justificar económicamente la conservación del tanque.

El tanque con techo fijo es el predecesor de los tanques de conservación, vino a existir durante los primeros días de la industria del petróleo. Los barriles de madera fueron los primeros que se usaron, pero no pudieron cumplir con la inundación creciente del petróleo. Con el incremento de la producción se fueron abriendo pozos y diques, pero estos eran muy peligrosos.

El primer tanque de hierro con madera y techo cubierto de grava apareció en 1864. Después en 1915 las capacidades de los tanques se incrementaron y en 1919 fue construido el primer tanque de 80,000 bbl. La introducción de la soldadura eléctrica en 1923 hizo posible la fabricación de techos y fondos soldados. El tanque soldado fue introducido en 1927.

Los tanques con techo fijo son usados en México para almacenar líquidos volátiles con una Presión de Vapor Verdadera menor de 1.5 lb/pulg<sup>2</sup> absolutas. Estos tanques están disponibles en rangos de tamaño de 20 a 280 pies de diámetro y arriba de 40 pies de altura de la coraza. Un tanque con techo fijo puede ser soportado por una o varias columnas o autosoportado, y puede ser de tipo cónico o tipo domo. Algunos tanques con techo fijo incorporan un techo flotante interno de los cuales hablamos en la sección anterior.

Estos tanques pueden adaptarse a muy bajas presiones internas o de vacío. Para tanques construidos de acuerdo con el API STD. 650\* la máxima presión segura o de vacío para tanques grandes es de 1.5 pulgadas de columna de agua.

Los tanques con techo fijo son recipientes que tienen un cuerpo vertical cilíndrico y un techo fijo. Los componentes básicos y las características de construcción del tanque incluyen:

- Accesorios del techo
- Aislamiento en el cuerpo del tanque y techo
- Pintura del tanque

Estos componentes, los cuales están disponibles en rango de diseño comercial, están descritos en este trabajo, incluyendo una descripción y comentarios sobre pérdidas por evaporación.

### **3.3.2 ACCESORIOS DEL TANQUE**

Varios accesorios están montados en el techo del tanque para asignar funciones operacionales y estos son fuentes de pérdidas por evaporación. Los accesorios de los techos pueden ser una fuente de pérdidas por evaporación cuando no están bien sellados. Los accesorios más comunes de tanques son descritos a continuación.

La contribución de pérdidas por evaporación propiamente del sellado de los accesorios del techo son despreciables en comparación a las pérdidas por almacenamiento estático y las pérdidas por llenado y vaciado de tanques.

#### **3.3.2.1 Venteos de la Presión de Vacío**

Los venteos de la presión de vacío están montados en el techo de los tanques para abastecer suficiente capacidad de venteos protegiendo al tanque de daños por sobrepresión.

Cuando la presión es formada dentro del espacio-vapor del tanque y esta excede el valor deseado de presión, los venteos de la presión de vacío abren para permitir a los vapores del tanque salir hasta que la presión es reducida abajo del valor deseado. Cuando el vacío es formado dentro del espacio-vapor del tanque y este excede el valor deseado de vacío, los venteos de la presión de vacío abren para dejar entrar aire al tanque hasta que el valor es reducido abajo del deseado.

Los venteos de la presión de vacío en tanques con techo fijo a presión atmosférica son usualmente usados y colocados a 0.75 pulgadas de columna de agua. Los venteos de la presión de vacío deberían recibir inspección regular y mantenimiento, dependiendo de las condiciones locales. Los venteos están a veces equipados con arrestadores de flama.

### **3.3.2.2 Compuerta de Acceso**

La compuerta de acceso provee al tanque de una entrada para la medición manual del nivel del producto en el tanque y para tomar muestras de lo que contiene el tanque.

La compuerta de acceso consiste de un tubo que penetra en el techo del tanque que esta equipado con una cubierta que se cierra automáticamente. Un empaque cubierto puede ser usado para favorecer la reducción de pérdidas por evaporación. La compuerta de acceso esta localizada usualmente por la plataforma de aforo, la cual esta montada en la parte superior del tanque.

Algunas pérdidas de vapor pueden ocurrir durante una medición manual y operaciones de muestreo del producto, en ese instante la cubierta de la compuerta esta abierta; estas pérdidas pueden ser minimizadas por la reducción de tiempo en que este abierta la cubierta.

### **3.3.2.3 Medidores por Flotación**

Los medidores por flotación son usados para indicar el nivel del líquido dentro del tanque. Los medidores flotantes consisten de un flotador que descansa en la superficie del líquido y esta conectado a un indicador de nivel del líquido, montado en el exterior del tanque por un cable que pasa a través de un sistema de guías. El cable pasa a través de techo del tanque y normalmente contiene un sello tipo conduit para eliminar las pérdidas por evaporación.



### **3.3.2.4 Entradas de Hombre al Techo**

Las entradas de hombre son usadas para tener acceso a el Interior del tanque para el propósito de construcción y mantenimiento.

Las entradas de hombre normalmente consisten de una abertura circular en el techo del tanque, con un cuello vertical periférico pegado al techo y una cubierta removible. La abertura esta medida para proveer el paso del personal y materiales a través del techo. La cubierta puede descansar directamente en el cuello, una junta puede ser usada entre la cubierta y el cuello para reducir las pérdidas por evaporación.

### **3.3.3 AISLAMIENTO**

El aislamiento puede ser usado en el cuerpo del tanque y el techo para así reducir el calor que entra o las pérdidas por calor. Algunos líquidos necesitan ser almacenados a condiciones de temperatura altas para permitir su manejo. Los tanques para servicios con altas temperaturas requieren aislamiento en el cuerpo y el techo del tanque, dependiendo de las condiciones climáticas, propiedades del líquido, y la temperatura de almacenamiento requerida. Varios tipos de sistemas de aislamiento son usados como:

- Aislamiento prefabricado de panel rígido
- Aislamiento prefabricado con una capa de fibra
- Aislamiento de spray en espuma de poliuretano

Los sistemas de aislamiento deberán ser equipados con una adecuada barrera de vapor exterior para reducir el ingreso de humedad, la cual puede resultar en pérdidas por el efecto del aislamiento, así como corrosión en la coraza del tanque.

El aislamiento en el cuerpo del tanque o el techo pueden reducir las pérdidas por almacenamiento estático por la disminución de la entrada de calor o pérdidas en el espacio-vapor del tanque. El procedimiento para estimación de pérdidas totales por evaporación descrito en el capítulo 4, no incluye el factor para el uso de aislamiento.

### **3.3.4 SELECCION DE PINTURA**

La pintura del cuerpo y el techo del tanque es muy importante para reducir las pérdidas por evaporación y preservar el tanque en buenas condiciones. El uso de una pintura reflejante, como lo es pintura blanca, permitirá entradas de calor muy bajas en el espacio-vapor y la temperatura será baja, debido a esto se reducirán las pérdidas por venteo. Un programa de mantenimiento e inspección del tanque puede preservar la pintura en buen estado y eliminar la corrosión del tanque y del techo.

## CAPITULO IV

### PROCEDIMIENTOS PARA EL CALCULO DE PERDIDAS POR EVAPORACION

#### 4.1 GENERAL

Este trabajo contiene métodos para la estimación de pérdidas totales por evaporación o el equivalente a emisiones de hidrocarburos a la atmósfera de los diferentes tipos de techos utilizados en tanques de almacenamiento, que contienen mezclas de hidrocarburos multicomponentes (tales como petróleo crudo y gasolinas) o líquidos de componentes sencillos (tales como los petroquímicos).

Los tipos de techos colocados en los tanques, los sistemas de sellado y los accesorios de los techos están descritos solamente como información. Este trabajo no intenta ser usado como una guía para diseño de equipo, selección u operación.

El equipo del tanque no debe ser seleccionado basado solamente en consideraciones de pérdidas por evaporación. Algunos otros factores no contemplados en este trabajo, tales como, la operación, el mantenimiento y la seguridad del tanque son importantes en el diseño y la selección del equipo del tanque.

Una guía completa para la estimación de pérdidas por evaporación del producto o el equivalente a las emisiones totales a la atmósfera de productos volátiles almacenados en los diferentes tipos de tanques, esta mostrada en este capítulo.

Las tablas mostradas al final del capítulo contienen un resumen de las ecuaciones y la información necesaria para estimar las pérdidas por evaporación totales. La información de estas tablas es la misma que se describen en este capítulo, pero sin toda la descripción importante presentada en el mismo. Para información mas detallada acerca de las tablas referirse a la sección correspondiente.

## **4.2 PARAMETROS COMUNES**

Dado que este trabajo es para comparar diferentes condiciones de almacenamiento de un mismo producto en un mismo lugar (mismas condiciones locales) y para una misma capacidad (mismo diámetro y altura), existen varios parámetros que serán comunes en los diferentes tipos de análisis a desarrollar, como son:

### **4.2.1 Datos de las Condiciones Locales:**

- Nombre del Lugar
- Presión Barométrica del lugar
- Temperaturas máxima y mínima promedio anual del lugar
- Velocidad del Viento Promedio anual del lugar

### **4.2.2 Datos del Tanque:**

- Capacidad
- Diámetro
- Altura Total
- Cantidad neta anual
- Tipo de Techo
- Color de Pintura

### **4.2.3 Datos del Producto:**

- Nombre del Producto
- Presión de Vapor Reid
- Peso Molecular
- Densidad del Líquido Almacenado a 60 °F
- Pendiente de la Curva de Destilación ASTM al 10% de Evaporación

### 4.3 TANQUES CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

Las ecuaciones presentadas a continuación están pensadas para ser usadas en la estimación de pérdidas anuales en tanques con techo flotante externo para varios tipos de construcción de tanques, techos flotantes, sistemas de sellado y accesorios del techo, así como para varios líquidos almacenados, presiones de vapor, tamaños de tanques y velocidades del viento.

Las ecuaciones son aplicables propiamente para el mantenimiento del equipo dentro de condiciones normales de trabajo. Las ecuaciones fueron desarrolladas para líquidos que no estén en ebullición, líquidos con una Presión de Vapor Verdadera en un rango aproximado de 1.5 a 14.7 lb/pulg<sup>2</sup>, con una velocidad del viento promedio entre 2 y 15 millas/hora y un diámetro del tanque mayor a 20 pies.

Las ecuaciones no pueden ser usadas en las siguientes aplicaciones:

- La estimación de pérdidas de líquidos inestables o de mezclas de hidrocarburos o petroquímicos para los cuales la presión de vapor no es conocida o no puede ser estimada.
- Estimación de pérdidas de tanques en los cuales los materiales usados en el sellado, accesorios del techo o ambos tienen partes deterioradas.

#### 4.3.1 ECUACIONES DE PERDIDAS

En esta sección se habla de los procedimientos para la estimación de pérdidas totales anuales por evaporación de líquidos volátiles almacenados en tanques con techo flotante externo. Un resumen de este procedimiento se encuentra en la parte final de este capítulo en forma tabulada. Las pérdidas totales  $L_t$ , son la suma de las pérdidas por almacenamiento estático,  $L_s$ , y las pérdidas por adherencia,  $L_w$ . En algunos casos, las pérdidas por adherencia pueden ser despreciables.

#### 4.3.1.1 Pérdidas por Almacenamiento Estático

Además de los parámetros comunes es necesario para el cálculo de estas pérdidas la siguiente información:

- Tipo de construcción del tanque (soldado o remachado)
- Sistema de tipo de sellado
- Tipo de construcción del techo flotante (Pontón o Doble Cubierta)

Las pérdidas por almacenamiento estático, incluyen pérdidas del sellado y las pérdidas de los accesorios del techo y pueden ser estimadas con la ecuación 1.

$$L_s = (F_r \cdot D + F_f) \cdot P_f \cdot M_v \cdot K_c \quad (1)$$

Donde:

$L_s$ = Pérdidas por almacenamiento estático	(lb/año)
$F_r$ = Factor de pérdidas por sellado	(lb-mol/ft año)
$D$ = Diámetro del Tanque	(ft)
$F_f$ = Factor de pérdidas totales de accesorios del techo	(lb-mol/año)
$P_f$ = Función de la presión de vapor	(dimensional)
$M_v$ = Peso molecular	(lb/lb-mol)
$K_c$ = Factor por el tipo de producto	(dimensional)

Estas pérdidas pueden ser convertidas de lb/año a bbl/año de la siguiente manera:

$$L_s(\text{bbl / año}) = \frac{L_s(\text{lb / año})}{42 \cdot W_v} \quad (2)$$

Donde:

$W_v$  = Densidad del vapor condensado

La constante 42 de las ecuaciones 2 y 4 tiene unidades de (gal/bbl).

### 4.3.1.2 Pérdidas por Adherencia

Las pérdidas por adherencia  $L_w$ , pueden ser estimadas con la información de los parámetros comunes y las condiciones de la coraza del tanque. Las pérdidas por adherencia pertenecen a la evaporación del líquido almacenado que se adhiere a la coraza del tanque mientras que el líquido es retirado. Las pérdidas por adherencia pueden ser estimadas con la siguiente ecuación:

$$L_w = \frac{0.943 \cdot Q \cdot C \cdot Wl}{D} \quad (3)$$

Donde:

$L_w$ = Pérdidas por adherencia	(lb/año)
$Q$ = Cantidad neta anual	(bbl/año)
$C$ = Factor por adherencia	(bbl/1000 ft <sup>2</sup> )
$Wl$ = Densidad del líquido almacenado	(lb/gal)
$D$ = Diámetro del tanque	(ft)

La constante 0.943 tiene dimensiones de (1000 ft<sup>3</sup>gal/bbl<sup>2</sup>). También estas pérdidas pueden ser convertidas de lb/año a bbl/año:

$$L_w(\text{bbl/año}) = \frac{L_w(\text{lb/año})}{42 \cdot Wl} \quad (4)$$

Donde:

$Wl$  = Densidad promedio del líquido almacenado a 60 °F (lb/gal).

### 4.3.1.3 Pérdidas Totales

Las pérdidas totales se calculan de la siguiente manera:

$$L_t (\text{lb/año}) = L_s (\text{lb/año}) + L_w (\text{lb/año}) \quad (5)$$

$$L_t (\text{bbl/año}) = L_s (\text{bbl/año}) + L_w (\text{bbl/año}) \quad (6)$$

### 4.3.2 DISCUSION DE VARIABLES

La información resumida a continuación sirve para saber como determinar los valores específicos de las variables involucradas en las ecuaciones para determinar pérdidas por evaporación y los rangos de valores de las variables para las cuales las ecuaciones son aplicables.

#### 4.3.2.1 Factores de las Pérdidas por Almacenamiento Estático

##### 4.3.2.1.1 Factor de pérdidas por sellado perimetral

Este factor  $Fr$ , es estimado con la ecuación (7):

$$Fr = Kr * V^n \quad (7)$$

Donde:

$Kr$  = Factor de pérdidas por sellado (lb-mol/ft año)(millas/hora)<sup>n</sup>

$V$  = Velocidad del viento (millas/hora)

$n$  = Exponente de la velocidad del viento en relación al tipo de sellado

El factor de pérdidas por sellado,  $Kr$  y  $n$  están mostrados en la Tabla 4.1 como función de la construcción del tanque y el sistema de sellado. Existen tres tipos básicos de sellado: zapata mecánica, llenado-elástico y wiper-flexible.

Este factor únicamente puede ser aplicable para velocidades del viento comprendidas entre un rango que va de 2 a 15 millas/hora y para tanques soldados.

Si no hay información disponible de un tipo en específico de construcción del tanque y sistema de sellado, un tanque soldado con zapata mecánica como sello primario puede ser asumido para representar el tipo más común de uso general.



<b>Tabla 4.1 Factores por sellado perimetral</b>		
<b>Construcción del tanque y sistema de sellado</b>	<b>Kr</b>	<b>n</b>
<b>Zapata Mecánica</b>		
Sello primario únicamente	1.2	1.5
Sello secundario Zapata-Montada	0.8	1.2
Sello secundario Borde-Montado	0.2	1.0
<b>Llenado-Elástico (Líquido-Montado)</b>		
Sello primario únicamente	1.1	1.0
Pantalla Protectora	0.8	0.9
Sello secundario Borde-Montado	0.7	0.4
<b>Llenado-Elástico (Vapor-Montado)</b>		
Sello primario únicamente	1.2	2.3
Pantalla Protectora	0.9	2.2
Sello secundario Borde-Montado	0.2	2.6

#### 4.3.2.1.2 Factor de pérdidas totales por accesorios del techo

El factor de pérdidas totales por accesorios,  $F_f$ , puede ser usado únicamente para velocidades del viento entre 2 y 15 millas/hr.

El número de cada tipo de accesorio del techo puede variar significativamente de tanque en tanque. Los valores de cada tipo de accesorio del techo deberían de ser determinados para el tanque en consideración.

El factor típico de pérdidas totales por accesorios del techo,  $F_f$ , puede ser estimado con las siguientes ecuaciones, tanto para techo flotante externo, tipo Pontón como para un tipo Doble Cubierta.

<b>Techo Flotante Tipo Pontón</b>	
<b>Vel. del Viento(millas/hora)</b>	<b>Ecuación</b>
5	$Ff = 340 + 0.71 \cdot D(8)$
10	$Ff = 680 + 1.05 \cdot D(9)$
15	$Ff = 1000 + 1.40 \cdot D(10)$

<b>Techo Flotante Tipo Doble Cubierta</b>	
<b>Vel. del Viento(millas/hora)</b>	<b>Ecuación</b>
5	$Ff = 260 + 2.10 \cdot D(11)$
10	$Ff = 480 + 5.05 \cdot D(12)$
15	$Ff = 640 + 8.60 \cdot D(13)$

#### 4.3.2.1.3 Función de la Presión de Vapor

La función de la Presión de Vapor, Pf, puede calcularse mediante la ec. (14):

$$Pf = \frac{\left(\frac{P}{Pa}\right)}{\left(1 + \left(1 - \left(\frac{P}{Pa}\right)^{0.5}\right)\right)^2} \quad (14)$$

Donde:

P = Presión de Vapor Verdadera a la temperatura promedio del líquido almacenado (lb/pulg<sup>2</sup> abs.)

Pa = Presión atmosférica en la localización del tanque (lb/pulg<sup>2</sup> abs.)

La Presión de Vapor Verdadera puede ser estimada por las siguientes ecuaciones 15 ó 16, conociendo la Presión de Vapor Reid (PVR), la pendiente de la curva de Destilación ASTM al 10% de Evaporación (S) y la temperatura promedio de almacenamiento (Ts en °F).

$$P = \text{EXP} \left\{ \left[ 0.7553 - \left( \frac{413}{T_s + 459.6} \right) \right] S^{0.5} \text{Log}_{10}(\text{RVP}) - \left[ 1.854 - \left( \frac{1042}{T_s + 459.6} \right) \right] S^{0.5} \right. \\ \left. + \left[ \left( \frac{2416}{T_s + 459.6} \right) - 2.013 \right] \text{Log}_{10}(\text{RVP}) - \left( \frac{8742}{T_s + 459.6} \right) + 15.64 \right\} \quad (15)$$

$$P = \text{EXP} \left\{ \left[ \left( \frac{2799}{T_s + 459.6} \right) - 2.227 \right] \text{Log}_{10}(\text{RVP}) - \left( \frac{7261}{T_s + 459.6} \right) + 12.82 \right\} \quad (16)$$

La ecuación 15 sirve para calcular la Presión de Vapor Verdadera para productos refinados del petróleo con una Presión de Vapor Reid de 1 - 20 lb/pulg<sup>2</sup>. Mientras que la ecuación 16 es para petróleo crudo con una Presión de Vapor Reid de 2 - 15 lb/pulg<sup>2</sup>.

Si la temperatura promedio de almacenamiento,  $T_s$ , no es conocida, esta puede ser estimada de la temperatura promedio anual del líquido,  $T_a$ , y el color de la pintura utilizando los datos de la Tabla 4.2. La temperatura promedio anual se calcula con las temperaturas promedio máxima y mínima,  $T_{ax}$  y  $T_{an}$ , respectivamente; de la siguiente manera:

$$T_a = \frac{(T_{ax} + T_{an})}{2} \quad (17)$$

Tabla 4.2 Temperatura Promedio Anual	
Color del Tanque	$T_s$ (°F)
Blanco	$T_a + 0.0$
Aluminio	$T_a + 2.5$
Negro	$T_a + 5.0$

En ausencia de la pendiente de la curva de Destilación ASTM al 10% de Evaporación (S) en productos refinados del petróleo, los valores aproximados de la pendiente, S, se muestran en la Tabla 4.3.

<b>Tabla 4.3 Pendiente de destilación ASTM (S) para Productos Refinados del Petróleo</b>	
<b>Productos Refinados del Petróleo</b>	<b>Pendiente de la curva de destilación al 10% de Evaporación</b>
Gas- Avión	2.0
Nafta	2.5
Gasolinas	3.0
Nafta ligera	3.5

#### 4.3.2.1.4 Peso Molecular del Vapor

El peso molecular del vapor,  $M_v$ , puede ser estimado por un análisis de vapores simples o por cálculos de la composición del líquido. En ausencia de esta información un valor de 64 lb/lb-mol puede ser asumido para las gasolinas y un valor de 50 lb/lb-mol para el petróleo crudo.

#### 4.3.2.1.5 Factor por el Tipo de Producto

El factor por el tipo de producto,  $K_c$ , es importante para el efecto de diferentes tipos de líquidos almacenados en pérdidas por evaporación. Este factor debería de ser desarrollado para mezclas de hidrocarburos multicomponentes, incluyendo productos refinados y petróleo crudo, así como productos de componentes sencillos, los valores para este factor se encuentran en la Tabla 4.4.

<b>Tabla 4.4 Factor por el Tipo de Producto</b>	
<b>Tipo de Producto</b>	<b><math>K_c</math></b>
Productos Refinados	1.0
Petróleo Crudo	0.4
Prod. Comp. sencillos	1.0

#### **4.3.2.1.6 Densidad del Vapor Condensado**

Para el petróleo crudo y refinado, la densidad del vapor condensado,  $W_v$ , es menor que la densidad del líquido almacenado. Si la información no es conocida, la ecuación 18 sirve para calcular la densidad para gasolinas:

$$W_v = 0.08 \cdot M_v \quad (18)$$

Para productos de componentes sencillos (como los petroquímicos), la densidad del vapor condensado es igual a la densidad del líquido almacenado.

#### **4.3.2.2 Factores de Pérdidas por Adherencia**

El significado de las pérdidas por adherencia varían con las prácticas operacionales del tanque. En las industrias estas pérdidas son despreciables frente a las pérdidas por almacenamiento estático. Sin embargo, en los casos de cantidad extremadamente alta, los resultados por errores de manejo en los tanques son más frecuentes, por lo que las pérdidas por adherencia son significativas.

##### **4.3.2.2.1 Cantidad Neta Anual**

La cantidad neta anual,  $Q$ , es usada en este trabajo, como el volumen total del producto que se está retirando del tanque en un año, el cual resulta de una disminución en el nivel del líquido en el tanque. Si el llenado y vaciado del tanque ocurren igual y simultáneamente, donde el nivel del líquido no sufriría cambios, la cantidad neta anual sería cero.

##### **4.3.2.2.2 Factor por adherencia**

Los factores por adherencia,  $C$ , están mostrados en la tabla 4.5 para tanques de acero, en función del producto almacenado y del estado de corrosión del interior de la envolvente y columnas.

<b>Tabla 4.5 Factor por Adherencia</b>		
<b>Producto Almacenado</b>	<b>Condición de la Coraza</b>	
	<b>Buen estado</b>	<b>Mal estado</b>
<b>Gasolinas</b>	<b>0.0015</b>	<b>0.0075</b>
<b>Petróleo Crudo</b>	<b>0.0060</b>	<b>0.0300</b>

#### **4.3.2.2.3 Densidad Promedio del Líquido Almacenado**

La densidad del líquido almacenado, WI, puede variar significativamente, y particularmente en petróleo crudo y productos de componentes sencillos. Para gasolinas, la densidad es generalmente de 6.1 lb/gal.

## 4.4 TANQUES CON TECHO FLOTANTE INTERNO

Aquí se presenta un método perfeccionado para la estimación de pérdidas totales, para tanques con techo flotante interno, con libre venteo.

Los tanques con techo flotante interno descritos a continuación son:

- Tanques con techo fijo soportado por columnas dentro del tanque, los cuales son tanques con techo fijo con una cubierta interna.
- Tanques con techos fijos que no requieren columnas de soporte (autosoportados), los cuales son tanques con techo flotante externo cubiertos con un techo fijo.

Las cubiertas flotantes disponibles, los detalles de los accesorios de la cubierta y los sistemas de sellado, están descritos únicamente como información.

Las ecuaciones están pensadas a ser usadas para estimar pérdidas anuales de tanques con techo flotante interno, para varios tipos generales de tanques, cubiertas flotantes y sistemas de sellado, así como para varios líquidos almacenados, presiones de vapor de productos y tamaños de tanques. Las ecuaciones han sido desarrolladas para líquidos que no estén en ebullición, con una presión de vapor de 0.1 a 14.7 lb/pulg<sup>2</sup> abs.

Las ecuaciones no pueden ser utilizadas en las siguientes aplicaciones:

- Para estimar pérdidas de tanques cerrados con techo flotante interno (esto es, tanques venteados únicamente a través del venteo de la presión de vacío).
- Para estimar pérdidas de líquidos inestables o de mezclas de hidrocarburos o petroquímicos para los cuales la presión de vapor no es conocida o no puede ser estimada.
- Para estimar pérdidas de tanques en los cuales el material usado en el sistema de sellado y/o construcción de la cubierta estén deteriorados.

Una guía completa para estimar pérdidas por evaporación de líquidos volátiles almacenados en tanques con techo flotante interno; esta incluida en esta sección. Este procedimiento de estimación de pérdidas es aplicable únicamente para tanques con techo flotante interno con diseño de libre venteo, como se describe en el API STD 650\*\*, Apéndice H. Las ecuaciones se detallan a continuación y describen como determinar los valores específicos de las variables involucradas en las ecuaciones. Un resumen del procedimiento de cálculo de pérdidas esta incluido al final de este capítulo.

#### 4.4.1 ECUACIONES DE PERDIDAS

Las pérdidas totales  $L_t$ , son la suma de las pérdidas por almacenamiento estático,  $L_s$ , y las pérdidas por adherencia,  $L_w$ . En algunos casos, las pérdidas por adherencia pueden ser despreciables; en este caso las pérdidas totales son casi iguales a las pérdidas por almacenamiento estático.

##### 4.4.1.1 Pérdidas por Almacenamiento Estático

Además de los parámetros comunes es necesario para el cálculo de estas pérdidas la siguiente información:

- Tipo de construcción del tanque (soportado por columnas o autosoportado)
- Sistema de tipo de sellado

Las pérdidas por almacenamiento estático, incluyen pérdidas por sellado, por los accesorios de la cubierta y por las costuras de las mismas. Estas pérdidas pueden ser estimadas con la ecuación 19.

$$L_s = (K_r \cdot D + F_f + F_d) \cdot P_f \cdot M_v \cdot K_c \quad (19)$$



Donde:

Ls = Pérdidas por almacenamiento estático	(lb/año)
Kr = Factor de pérdidas por sellado	(lb-mol/ft año)
D = Diámetro del Tanque	(ft)
Ff = Factor de pérdidas totales de accesorios del techo	(lb-mol/año)
Fd = Factor de pérdidas por las costuras de la cubierta	(lb-mol/año)
Pf = Función de la presión de vapor	(dimensional)
Mv = Peso molecular	(lb/lb-mol)
Kc = Factor por el tipo de producto	(dimensional)

Para convertir estas pérdidas de lb/año a bbl/año se utiliza la siguiente ecuación:

$$Ls(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Ls(\text{lb} / \text{año})}{42 * Wv} \quad (20)$$

Donde:

Wv = Densidad del vapor condensado (lb/gal)

La constante 42 de las ecuaciones 20 y 22 tiene unidades de (gal/bbl).

#### 4.4.1.2 Pérdidas por Adherencia

Las pérdidas por adherencia, Lw, pueden ser estimadas con la siguiente información adicional a los parámetros comunes:

- Condiciones de la coraza del tanque.

Las pérdidas por adherencia incluyen la evaporación del líquido almacenado que se adhiere a la coraza del tanque mientras que el líquido es retirado. Las pérdidas por adherencia pueden ser estimadas con la siguiente ecuación:

$$L_w = \frac{0.943 \cdot Q \cdot C \cdot Wl}{D} \left( 1 + \left( \frac{N_c \cdot F_c}{D} \right) \right) \quad (21)$$

Donde:

L <sub>w</sub> = Pérdidas por adherencia	(lb/año)
Q = Cantidad neta anual	(bbl/año)
C = Factor por adherencia	(bbl/1000 ft <sup>2</sup> )
Wl = Densidad del líquido almacenado	(lb/gal)
D = Diámetro del tanque	(ft)
N <sub>c</sub> = Número de columnas	(dimensional)
F <sub>c</sub> = Diámetro de columna efectiva	(ft)

La constante 0.943 tiene dimensiones de (1000 ft<sup>3</sup>gal/bbl<sup>2</sup>). Para convertir las pérdidas a unidades de bbl/año se utiliza la siguiente ecuación:

$$L_w(\text{bbl/año}) = \frac{L_w(\text{lb/año})}{42 \cdot Wl} \quad (22)$$

Donde:

Wl = Densidad promedio del líquido almacenado a 60 °F (lb/gal).

#### 4.4.1.3 Pérdidas Totales

Las pérdidas totales pueden ser estimadas de la siguiente manera:

$$L_t (\text{lb/año}) = L_s (\text{lb/año}) + L_w (\text{lb/año}) \quad (23)$$

$$L_t (\text{bbl/año}) = L_s (\text{bbl/año}) + L_w (\text{bbl/año}) \quad (24)$$

## 4.4.2 DISCUSION DE VARIABLES

La información resumida abajo sirve para determinar los valores específicos de las variables involucradas en las ecuaciones de pérdidas.

La información detallada acerca de la especificación del tanque(s) dentro de consideración debería ser usada para obtener una estimación de pérdidas por evaporación más precisa.

### 4.4.2.1 Factores de las Pérdidas por Almacenamiento Estático

#### 4.4.2.1.1 Factor de pérdidas por sellado perimetral

Los factores de pérdidas por sellado,  $K_r$ , están mostrados en la tabla 4.6 para cuatro tipos generales de sistemas de sellados.

Los sellos tipo Wiper-Flexible son de Vapor-Montado. Los sellos elásticos pueden ser de Vapor-Montado o Líquido-Montado, mientras que las Zapatas Mecánicas son instaladas típicamente en techos flotantes externos.

Descripción del tipo de sello	$K_r$ (lb-mol/ft-año)
Sello primario (Vapor-Montado)	6.7*
Sello primario (Líquido-Montado)	3.0
Sello primario (Vapor-Montado) más un sello secundario	2.5
Sello primario (Liq.-Montado) más un sello secundario	1.6

\* Si no hay información, este valor puede ser tomado para representar el sistema de sellado más común.

#### 4.4.2.1.2 Factor de pérdidas totales por accesorios de la cubierta

El factor típico de pérdidas totales de los accesorios de la cubierta, pueden ser estimados mediante las siguientes ecuaciones:

- Cubiertas atornilladas con techo fijo soportado por columnas

$$F_f = 0.0481 \cdot D^2 + 1.392 \cdot D + 134.2 \quad (25)$$

- Cubiertas soldadas con techo fijo soportado por columnas

$$F_f = 0.0385 \cdot D^2 + 1.392 \cdot D + 134.2 \quad (26)$$

- Cubiertas atornilladas con techo fijo autosoportado

$$F_f = 0.0228 \cdot D^2 + 0.79 \cdot D + 105.2 \quad (27)$$

- Cubiertas soldadas con techo fijo autosoportado

$$F_f = 0.0132 \cdot D^2 + 0.79 \cdot D + 105.2 \quad (28)$$

#### 4.4.2.1.3 Factor de pérdidas por costuras en la cubierta

El factor de pérdidas por costuras en la cubierta,  $F_d$ , puede ser estimado por la ecuación 29.

$$F_d = K_d \cdot S_d \cdot D^2 \quad (29)$$

Donde:

$K_d$  = Pérdidas por costuras en la cubierta por unidad de longitud de costura de la cubierta (lb-mol/ft-año)

$S_d$  = Factor de longitud de la costura (ft/ft<sup>2</sup>)

$D$  = Diámetro del tanque (ft)

La ecuación 29 esta basada en que las pérdidas de las costuras de la cubierta ocurren continuamente en los puntos localizados que están distribuidos a lo largo de toda la costura.

Las pérdidas por costura de la cubierta por unidad de longitud,  $K_d$ , se encuentran en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Factor de pérdidas por costura de la cubierta	
Tipo de cubierta	$K_d$
Soldada	0.00
Atomillada	0.34
Otro tipo	no hay información

El factor de longitud de la costura de la cubierta,  $S_d$ , puede variar significativamente para diferentes diseños de cubiertas, este factor puede ser estimado de la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Factor de longitud de la costura	
Construcción de la cubierta	$S_d(\text{ft}/\text{ft}^2)$
De hoja continua	
5 ft ancho de la hoja	0.20*
6 ft ancho de la hoja	0.17
7 ft ancho de la hoja	0.14
De tipo panel	
5 x 7.5 ft paneles rectangulares	0.33
5 x 12 ft paneles rectangulares	0.28
* Si no hay información disponible, este valor es el típico a usar.	

#### 4.4.2.1.4 Función de la Presión de Vapor

La función de la Presión de Vapor,  $P_f$ , puede calcularse mediante la ecuación (14), así como la Presión de Vapor Verdadera de las ecuaciones 15 ó 16.

#### **4.4.2.1.5 Peso Molecular del Vapor**

El peso molecular del vapor,  $M_v$ , puede ser estimado por un análisis de vapores simples o por cálculos de la composición del líquido. En ausencia de esta información un valor de 64 lb/lb-mol puede ser asumido para las gasolinas y un valor de 50 lb/lb-mol para el petróleo crudo.

#### **4.4.2.1.6 Factor por el Tipo de Producto**

El factor por el tipo de producto,  $K_c$ , cuenta para el efecto de diferentes tipos de líquidos almacenados en pérdidas por evaporación. Los factores por tipo de producto son desarrollados por mezclas multicomponentes de hidrocarburos, incluyendo líquidos refinados (como las gasolinas y naftas) y petróleo crudo. Estos factores se encuentran en la Tabla 4.4.

#### **4.4.2.1.7 Densidad del Vapor Condensado**

Para petróleo crudo y refinado, la densidad del vapor condensado,  $W_v$ , es menor que la densidad del líquido almacenado. Si la información no es conocida, la ecuación 18 sirve para calcular la densidad de las gasolinas.

Para productos de componentes sencillos (como los petroquímicos), la densidad del vapor condensado es igual a la densidad del líquido almacenado.

#### **4.4.2.2 Factores de Pérdidas por Adherencia**

El significado de las pérdidas por adherencia varían con las prácticas operacionales del tanque. En las industrias estas pérdidas son despreciables frente a las pérdidas por almacenamiento estático. Sin embargo, en los casos de cantidad extremadamente alta, los resultados por errores de manejo en los tanques son más frecuentes, por lo que las pérdidas por adherencia son significativas.

#### 4.4.2.2.1 Cantidad Neta Anual

La cantidad neta anual,  $Q$ , es usada en este trabajo, como el volumen total del producto que se esta retirando del tanque en un año, el cual resulta en una disminución en el nivel del líquido en el tanque. Si el llenado y vaciado del tanque ocurre igual y simultáneamente, donde el nivel del líquido no sufriría cambios, la cantidad neta anual sería cero.

#### 4.4.2.2.2 Factor por adherencia

Los factores por adherencia,  $C$ , están mostrados en la Tabla 4.5 para tanques de acero, en función del producto almacenado y del estado de corrosión del interior de la envolvente y las columnas.

#### 4.4.2.2.3 Densidad Promedio del Líquido Almacenado

La densidad del líquido almacenado,  $W_l$ , puede variar significativamente, y particularmente en el petróleo crudo y productos de componentes sencillos. Para gasolinas, la densidad es generalmente de 6.1 lb/gal, que es un valor típico.

#### 4.4.2.2.4 Diámetro efectivo de columna

El diámetro efectivo de columna,  $F_c$ , puede ser tomado de la tabla 4.9.

<b>Tabla 4.9 Diámetro efectivo de columna</b>	
<b>Tipo de construcción de la columna</b>	<b><math>F_c</math>(ft)</b>
9 pulg. x 7 pulg. de construcción de la columna	1.1
8 pulg. del diámetro del tubo de la columna	0.7
Valor aproximado para uso cuando no se conoce a detalle la construcción de la columna	1.0

4.4.2.2.5 Número de columnas

El número de columnas,  $N_c$ , puede ser determinado por un tanque en específico, o tomado de la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Número típico de columnas para tanques con techo fijo soportado por columnas	
Rango del diámetro del tanque D (ft)	Num. típico de columnas ( $N_c$ )
$0 < D \leq 85$	1
$85 < D \leq 100$	6
$100 < D \leq 120$	7
$120 < D \leq 135$	8
$135 < D \leq 150$	9
$150 < D \leq 170$	16
$170 < D \leq 190$	19
$190 < D \leq 220$	22
$220 < D \leq 235$	31
$235 < D \leq 270$	37
$270 < D \leq 275$	43
$275 < D \leq 290$	49
$290 < D \leq 330$	61
$330 < D \leq 360$	71
$360 < D \leq 400$	81



## 4.5 TANQUES CON TECHO FIJO

Las ecuaciones presentadas en este capítulo están pensadas a ser usadas para estimar pérdidas anuales de tanques con techo fijo sin aislamiento para varios líquidos almacenados, presiones de vapor de producto, tamaños de tanques, condiciones meteorológicas y condiciones de operación.

Las ecuaciones están aplicadas para mantener propiamente el equipo dentro de condiciones de trabajo normales. Las ecuaciones fueron desarrolladas para almacenamiento sin ebullición.

Las ecuaciones no pueden ser usadas en las siguientes aplicaciones:

- Para estimar pérdidas de productos inestables o de mezclas de hidrocarburos o petroquímicos para los cuales la presión de vapor no es conocida.
- Para estimar pérdidas de tanques con techo fijo en los cuales el techo y la coraza estén aislados.
- Para estimar pérdidas de tanques con techo fijo los cuales tengan un techo flotante interno.
- Para estimar pérdidas de tanques cilíndricos horizontales.

### 4.5.1 ECUACIONES DE PERDIDAS

Los procedimientos para estimación de pérdidas por evaporación o el equivalente a las emisiones de vapor de hidrocarburos a la atmósfera de líquidos volátiles almacenados en tanques con techo fijo están mostradas a continuación. Un resumen de este procedimiento se encuentra en la parte final de este capítulo en forma tabulada. Las pérdidas totales,  $L_t$ , son la suma de las pérdidas por almacenamiento,  $L_s$ , y las pérdidas por operación,  $L_w$ , las cuales incluyen las pérdidas por llenado y vaciado de tanques.

#### 4.5.1.1 Pérdidas por Almacenamiento Estático

Los datos necesarios para calcular estas pérdidas fueron descritos con anterioridad (parámetros comunes), solo hace falta el dato sobre el color de la pintura del tanque.

Las pérdidas por almacenamiento estático, pertenecen a la evaporación del líquido almacenado la cual ocurre como resultado del venteo del espacio-vapor del tanque. Estas pérdidas pueden ser estimadas mediante la siguiente ecuación:

$$L_s = 365 \cdot V_v \cdot W_v \cdot K_e \cdot K_s \quad (30)$$

Donde las variables involucradas en la ecuación 30, son calculadas de la siguiente manera:

$$V_v = \text{Volumen del espacio-vapor del tanque} \quad (\text{ft}^3)$$

$$V_v = \left( \frac{P_l}{4} \right) \cdot D^2 \cdot H_{vo} \quad (31)$$

$$W_v = \text{Densidad del vapor almacenado} \quad (\text{lb}/\text{ft}^3)$$

$$W_v = \frac{M_v \cdot P_{va}}{R \cdot T_{la}} \quad (32)$$

$$K_e = \text{Factor de Expansión del espacio-vapor} \quad (\text{dimensional})$$

$$K_e = \frac{DT_v}{T_{la}} + \frac{DP_v}{(P_a - P_{va})} \quad (33)$$

$$K_s = \text{Factor de Saturación del vapor venteado} \quad (\text{dimensional})$$

$$K_s = \frac{1}{1 + 0.053 \cdot P_{va} \cdot H_{vo}} \quad (34)$$

Donde:

D = Diámetro del Tanque	(ft)
Hvo = Espacio-Vapor	(ft)
Mv = Peso Molecular del producto	(lb/lb-mol)
Pva = Presión de Vapor Verdadera del producto	(lb/pulg <sup>2</sup> )
R = Constante del gas ideal	(10.371)
Tla = Temperatura Prom. de la superficie del liq.	(°R)
DTv = Rango de temperatura del vapor almacenado	(°R)
DPv = Rango de la presión de vapor	(lb/pulg <sup>2</sup> )
Pa = Presión atmosférica	(lb/pulg <sup>2</sup> )

La constante 365 de la ecuación 30 tiene unidades de año<sup>-1</sup>, y la constante de la ecuación 34 tiene unidades de ((lb/pulg<sup>2</sup> absolutas)ft)<sup>-1</sup>.

Las pérdidas por almacenamiento estático son convertidas de lb/año a bbl/año con la siguiente relación:

$$Ls(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Ls(\text{lb} / \text{año})}{42 * Wvc} \quad (35)$$

Donde:

Wvc = densidad del vapor condensado almacenado a 60 °F (lb/gal.)

La constante 42 de las ecuaciones 35 y 37 tiene unidades de (gal/bbl).

#### 4.5.1.2 Pérdidas por Operación

Las pérdidas por operación, Lw, pueden ser calculadas mediante la siguiente ecuación:

$$Lw = 0.0010 * Mv * Pva * Q * Kp \quad (36)$$

Donde:

Lw = Pérdidas por operación	(lb/año)
Q = Cantidad neta anual del producto almacenado	(bbl/año)
Kp = Factor por el tipo de producto	(dimensional)

La constante 0.0010 de la ecuación 36 tiene unidades de (lb-mol/bbl\*(psia)).

Las pérdidas por operación son convertidas de lb/año a bbl/año mediante la ecuación 37:

$$Lw(\text{bbl / año}) = \frac{Lw(\text{lb / año})}{42 * Wvc} \quad (37)$$

#### 4.5.1.3 Pérdidas Totales

Las pérdidas totales son estimadas por la ecuación 38 y 39:

$$Lt(\text{lb/año}) = Ls(\text{lb/año}) + Lw(\text{lb/año}) \quad (38)$$

$$Lt(\text{bbl/año}) = Ls(\text{bbl/año}) + Lw(\text{bbl/año}) \quad (39)$$

### 4.5.2 DISCUSION DE VARIABLES

#### 4.5.2.1 Factores de las Pérdidas por Almacenamiento Estático

Estas pérdidas, Ls, se calculan mediante la ecuación 30 y las variables involucradas en esta ecuación son las siguientes:

- Volumen del espacio-vapor del tanque, Vv.
- Densidad del vapor almacenado, Wv.
- Factor de Expansión del espacio-vapor, Ke.
- Factor de Saturación del vapor venteado, Ks.

Estas variables pueden ser calculadas utilizando las ecuaciones 31 a 34, a continuación se describen cada una de las variables:

#### 4.5.2.1.1 Espacio-Vapor vacío.

El espacio-vapor vacío, Hvo, es la altura de un cilindro del diámetro del tanque, de cuyo volumen es equivalente a el volumen del espacio-vapor de un tanque con techo fijo, incluyendo el volumen dentro del techo cónico o domo. El espacio-vapor vacío puede ser determinado por la siguiente ecuación:

$$Hvo = Hs - Hl + Hro \quad (40)$$

Donde:

Hs = Altura de la coraza del tanque (ft)

Hl = Altura del líquido almacenado (ft)

Hro = Volumen del techo vacío (o altura de la coraza equivalente a el volumen contenido dentro del techo, ft)

#### Techo Cónico

Para un tanque con techo cónico la variable Hro se calcula de la siguiente manera:

$$Hro = \frac{1}{3} Hr \quad (41)$$

$$Hr = Sr \cdot Rs \quad (42)$$

Donde:

Hr = Altura del techo del tanque (ft)

Sr = Pendiente del techo cónico

Rs = Radio del tanque (ft)

Si la pendiente del techo cónico, Sr, no se conoce un valor típico para ser usado es de 0.0625.

### Techo tipo domo

Para este tipo de techo la Hro se calcula con la ecuación 43:

$$Hro = Hr \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \left( \frac{Hr}{Rs} \right)^2 \right) \quad (43)$$

$$Hr = Rr - (Rr^2 - Rs^2)^2 \quad (44)$$

Donde:

Rr = Radio del domo del tanque (ft)

En la sección 3.10.6 del API STD 650, se indica que el radio del domo del tanque, Rr, varía entre un mínimo de  $0.8 \cdot D$  y un máximo de  $1.2 \cdot D$ . Si no se conoce el radio del domo del techo, un valor típico de  $1.0 \cdot D$  puede ser utilizado. En este caso, las ecuaciones anteriores se simplifican quedando de la siguiente manera:

$$Hro = 0.137 \cdot Rs \quad (45)$$

$$Hr = 0.268 \cdot Rs \quad (46)$$

#### 4.5.2.1.2 Datos Meteorológicos

Los datos meteorológicos necesarios para estimar las pérdidas por almacenamiento estático, Ls, son:

- Temperatura ambiente máxima, Tax
- Temperatura ambiente mínima, Tan
- Insolación solar en la superficie horizontal, I

El término insolación solar se refiere a la radiación incidente del sol. La temperatura ambiente promedio, Taa, y el rango de temperatura ambiente, DTa (en °R), son calculados por las ecuaciones siguientes:

$$T_{aa} = \frac{(\text{Tax} + \text{Tan})}{2} \quad (47)$$

$$DTa = \text{Tax} - \text{Tan} \quad (48)$$

#### 4.5.2.1.3 Absorbancia solar de la pintura del tanque

La absorbancia solar de la pintura del tanque,  $\alpha$ , es una función del color de la pintura del tanque, dependiendo del tipo, color y condición del tanque. La Tabla 4.11 muestra una lista de la absorbancia solar para seleccionar la pintura del tanque.

Tabla 4.11 Absorbancia Solar de la Pintura			
		Absorbancia Solar	
		Condición de la Pintura	
Color de Pintura	Tipo de Pintura	Buena	Malá
Aluminio	Especular	0.39	0.49
Aluminio	Difuso	0.60	0.68
Gris	Alto	0.54	0.63
Gris	Medio	0.68	0.74
Blanco	----	0.17	0.34

Si el techo y la coraza del tanque son pintados de diferente color, la absorbancia solar se calcula así:

$$\alpha = \frac{\alpha_r + \alpha_s}{2} \quad (49)$$

Donde:

$\alpha_r$  = Absorbancia solar del techo del tanque

$\alpha_s$  = Absorbancia solar de la coraza del tanque

#### 4.5.2.1.4 Temperatura del volumen del líquido

La temperatura del volumen del líquido,  $T_b$ , es la temperatura promedio del líquido en el tanque de almacenamiento. Si la temperatura del volumen del líquido no es conocida, se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$T_b = T_{aa} + 6 \cdot \alpha - 1 \quad (50)$$

#### 4.5.2.1.5 Temperatura promedio en la superficie del líquido

La temperatura promedio en la superficie del líquido,  $T_{la}$ , es usada para calcular la presión de vapor verdadera del líquido,  $P_{va}$ .

$$T_{la} = 0.44 \cdot T_{aa} + 0.56 \cdot T_b + 0.0079 \cdot \alpha \cdot l \quad (51)$$

#### 4.5.2.1.6 Rango de temperatura del vapor

El rango de temperatura del vapor  $DT_v$ , puede ser estimado con la ec. 52:

$$DT_v = 0.72 \cdot DT_a + 0.028 \cdot \alpha \cdot l \quad (52)$$

#### 4.5.2.1.7 Temperatura máxima y mínima en la superficie del líquido

La temperatura máxima y mínima del líquido,  $T_{lx}$  y  $T_{ln}$ , respectivamente; son usadas para calcular las presiones de vapor de almacenamiento  $P_{vx}$  y  $P_{vn}$ . Estas temperaturas pueden ser estimadas con las siguientes ecuaciones:

$$T_{lx} = T_{la} + 0.25 \cdot DT_v \quad (53)$$

$$T_{ln} = T_{la} - 0.25 \cdot DT_v \quad (54)$$



#### 4.5.2.1.8 Peso Molecular del Vapor

El peso molecular del vapor,  $M_v$ , puede ser estimado por un análisis de vapores o por cálculos en la composición del líquido. Para almacenamiento de productos refinados del petróleo (gasolina), el valor típico es de 64 lb/lb-mol, mientras que para almacenamiento de petróleo crudo el valor típico es de 50 lb/lb-mol.

#### 4.5.2.1.9 Presiones de vapor máxima, mínima y promedio.

La presión de vapor de almacenamiento puede ser determinada a tres temperaturas diferentes:

- Temperatura máxima en la superficie del líquido  $T_{ix}$ ;  $P_{vx}$
- Temperatura mínima en la superficie del líquido  $T_{in}$ ;  $P_{vn}$
- Temperatura promedio en la superficie del líquido  $T_{ia}$ ;  $P_{va}$

Las tres presiones de vapor pueden ser calculadas mediante la siguiente ecuación utilizando su temperatura correspondiente:

$$P = \text{EXP} \left( A - \frac{B}{T} \right) \quad (55)$$

Donde:

A = Constante

B = Constante en  $^{\circ}\text{R}$

T = Temperatura en  $^{\circ}\text{R}$

#### Almacenamiento del petróleo refinado

Para el almacenamiento de petróleo refinado, las constantes A y B están en función de la presión de vapor Reid (PVR), y la pendiente de la curva de Destilación ASTM al 10% de Evaporación (S), y pueden ser estimadas de la siguiente manera:

$$A = 15.64 - 1.854 \cdot S^{0.5} - (0.8742 - 0.328 \cdot S^{0.5}) \cdot \ln(\text{RVP}) \quad (56)$$

$$B = 8742 + 1042 \cdot S^{0.5} - (1049 - 179.4 \cdot S^{0.5}) \cdot \ln(\text{RVP}) \quad (57)$$

#### Almacenamiento del petróleo crudo

Para el almacenamiento de petróleo crudo las constantes A y B son función únicamente de la presión de vapor Reid (PVR) y se calculan con las ecuaciones 58 y 59.

$$A = 12.82 - 0.9672 \cdot \ln(\text{RVP}) \quad (58)$$

$$B = 7261 - 1216 \cdot \ln(\text{RVP}) \quad (59)$$

#### 4.5.2.1.10 Rango de presión de vapor

El rango de presión de vapor, DPv, puede ser calculado por la ecuación siguiente:

$$\text{DPv} = \text{Pvx} - \text{Pvn} \quad (60)$$

#### 4.5.2.1.11 Factor de saturación del vapor venteado

El factor de saturación del vapor venteado, Ks, cuenta para el grado de vapor saturado en el vapor venteado. Se calcula con la ecuación 34.

#### 4.5.2.1.12 Densidad del Vapor Condensado

Para almacenamiento de petróleo refinado y del petróleo crudo, la densidad del vapor condensado, Wvc, es menor que la densidad del líquido, Wl. Si esta información no es conocida, puede ser estimada por la ecuación 61, la cual fue desarrollada para almacenamiento de gasolinas:

$$\text{Wvc} = 0.08 \cdot \text{Mv} \quad (61)$$

#### 4.5.2.2 Factores de pérdidas por Operación

Las variables de Pérdidas por Operación, como son, el Peso Molecular,  $M_v$ , la Presión de Vapor a la temperatura promedio,  $P_{va}$ , y la Densidad del Vapor Condensado,  $W_{vc}$ , fueron discutidas con anterioridad; las variables faltantes se discuten a continuación.

En casos de baja cantidad neta anual de almacenamiento, las pérdidas por operación, pueden ser pequeñas en relación a las pérdidas por almacenamiento estático. Sin embargo en casos en que la cantidad neta anual de almacenamiento es grande; resultan con frecuencia errores en el manejo de los tanques, y las pérdidas pueden ser significativamente altas.

##### 4.5.2.2.1 Cantidad neta anual

La cantidad neta anual,  $Q$ , es el volumen total de almacenamiento que es bombeado dentro del tanque en un año, que resulta en un incremento en el nivel del líquido almacenado en el tanque.

##### 4.5.2.2.2 Factor por el tipo de producto

Las pérdidas por el factor del tipo de producto,  $K_p$ , se asume para el efecto de diferentes tipos de líquidos almacenados, en pérdidas por evaporación durante la operación del tanque. El uso de este factor aplica solamente para pérdidas por operación. Los valores de este factor se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Factor por el Tipo de Producto	
Tipo de Producto	$K_p$
Petróleo Refinado	1.00
Petróleo Crudo	0.75
Comp. Petroquímicos	1.00

## RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

TABLA 4.13

### ECUACIONES DE PERDIDAS POR ALMACENAMIENTO ESTATICO (Ls)

$$Ls(\text{lb/año}) = [(Fr \cdot D) + Ff] \cdot Pf \cdot Mv \cdot Kc$$

$$Ls(\text{bbl/año}) = \frac{Ls(\text{lb/año})}{42 \cdot Wv}$$

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
Fr	Factor de pérdidas sellado perimetral $Fr = Kr \cdot V^n$	lb-mol/ft año	Calculado de la ecuación 7
Kr	Factor de pérdidas por sellado	lb-mol/ft año (millas/hora) <sup>n</sup>	De la tabla 4.1
V	Velocidad del viento	millas/hora	Dato
n	Exponente de la vel. del viento con relación al tipo de sellado	dimensional	De la tabla 4.1
D	Diámetro del tanque	ft	Dato
Ff	Factor de pérdidas totales en los accesorios de la cubierta  Techo tipo Pontón Para diferentes velocidades del viento en función del diámetro del tanque  Techo tipo Doble Cubierta Para diferentes velocidades del viento en función del diámetro del tanque	lb-mol/año	.  Calculado de las ecuaciones 8, 9 ó 10  Calculado de las ecuaciones 11, 12 ó 13

**RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS  
POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FLOTANTE EXTERNO**

**CONTINUA TABLA 4.13**

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
Pf	Función de la presión de vapor  $Pf = \left[ \frac{\left( \frac{P}{Pa} \right)}{1 + \left( 1 - \frac{P}{Pa} \right)^{0.5}} \right]^2$	dimensional	Calculado de la ecuación 14
Pa	Presión atmosférica	psia	Dato
P	Presión de vapor verdadera - Productos refinados del petróleo - Petróleo Crudo	psia	Calculado de las ecuaciones 15 ó 16
Mv	Peso molecular del vapor almacenado	lb/lb-mol	Dato
Kc	Factor por el tipo de producto	dimensional	De la tabla 4.4
Wv	Densidad vapor condensado a 60 °F	lb/gal	Calculado de la ecuación 18

## RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

TABLA 4.14

### ECUACIONES DE PERDIDAS POR ADHERENCIA (Lw)

$$Lw(\text{lb} / \text{año}) = \frac{0.943 \cdot Q \cdot C \cdot Wl}{D}$$

$$Lw(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Lw(\text{lb} / \text{año})}{42 \cdot Wl}$$

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
Q	Cant. neta anual de almacenamiento	bbl/año	Dato
C	Factor por adherencia	bbl/1000 ft <sup>2</sup>	De la tabla 4.5
Wl	Densidad liquido a la temperatura de almacenamiento	lb/gal	Dato
D	Diámetro del tanque	ft	Dato

## RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FLOTANTE INTERNO

**TABLA 4.15**

### ECUACIONES DE PERDIDAS POR ALMACENAMIENTO ESTATICO (Ls)

$$Ls(\text{lb / año}) = [(Kr \cdot D) + Ff + Fd] \cdot Pf \cdot Mv \cdot Kc$$

$$Ls(\text{bbl / año}) = \frac{Ls(\text{lb / año})}{42 \cdot Wv}$$

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
Kr	Factor de pérdidas sellado perimetral	lb-mol/ft año	De la tabla 4.6
D	Diámetro del tanque	ft	Dato
Ff	Factor de pérdidas totales en los accesorios de la cubierta Para cubiertas soldadas o atornilladas, con techo soportado por columnas o autoportado	lb-mol/año	Calculado de las ecuaciones 25, 26, 27 ó 28.
Fd	Factor de pérdidas por costuras de la cubierta $Fd = Kd \cdot Sd \cdot D^2$	lb-mol/año	Calculado de la ecuación 29
Kd	Pérdidas por costura en la cubierta por unidad de longitud	lb-mol/ft año	De la tabla 4.7
Sd	Factor de longitud de la costura de la cubierta	ft/ft <sup>2</sup>	De la tabla 4.8
Pf	Función de la presión de vapor $Pf = \left[ \frac{\left( \frac{P}{Pa} \right)}{\left[ 1 + \left( 1 - \frac{P}{Pa} \right)^{0.5} \right]^2} \right]$	dimensional	Calculado de la ecuación 14

**RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS  
POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FLOTANTE INTERNO**

**CONTINUA TABLA 4.15**

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
Pa	Presión atmosférica	psia	Dato
P	Presión de vapor verdadera - Productos refinados del petróleo - Petróleo Crudo	psia	Calculado de las ecuaciones 15 ó 16
Mv	Peso molecular del vapor almacenado	lb/lb-mol	Dato
Kc	Factor por el tipo de producto	dimensional	De la tabla 4.4
Wv	Densidad vapor condensado a 60 °F	lb/gal	Calculado de la ecuación 18



**RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS  
POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FLOTANTE INTERNO**

**TABLA 4.16**

<b>ECUACIONES DE PERDIDAS POR ADHERENCIA (Lw)</b>	
$Lw(\text{lb} / \text{año}) = \left[ \frac{0.943 \cdot Q \cdot C \cdot Wl}{D} \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Nc \cdot Fc}{D} \right) \right]$	
$Lw(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Lw(\text{lb} / \text{año})}{42 \cdot Wl}$	

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
Q	Cant. neta anual de almacenamiento	bbl/año	Dato
C	Factor por adherencia	bbl/1000 ft <sup>2</sup>	De la tabla 4.5
Wl	Densidad del líquido a la temperatura de almacenamiento	lb/gal	Dato
D	Diámetro del tanque	ft	Dato
Nc	Número de columnas	dimensional	Nc=0, techo autosoportado. Para techo soportado ver tabla 4.10
Fc	Diámetro efectivo de columna	ft	De la tabla 4.9

## RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FIJO

TABLA 4.17

### ECUACIONES DE PERDIDAS POR ALMACENAMIENTO ESTATICO (Ls)

$$Ls(\text{lb} / \text{año}) = 365 \cdot Vv \cdot Wv + Ke \cdot Ks$$

$$Ls(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Ls(\text{lb} / \text{año})}{42 \cdot Wvc}$$

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
Vv	Vol. del espacio-vapor en el tanque $Vv = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D^2 \cdot Hvo$	ft <sup>3</sup>	Calculado de la ecuación 31
D	Diámetro del tanque	ft	Dato
Hvo	Espacio-vapor vacío $Hvo = Hs - HI + Hro$	ft	Calculado de la ecuación 40
Hs	Altura de la coraza del tanque	ft	Dato
HI	Altura del líquido almacenado	ft	Dato
Hro	Volumen del Techo vacío	ft	Calculado de la Ec. 41 para techo cónico. Ec. 43 para domos
Wv	Densidad del vapor almacenado $Wv = \frac{Mv \cdot Pva}{R \cdot Tia}$	lb/ft <sup>3</sup>	Calculado de la ecuación 32
R	Cte. de los gases ideales (10.731)	psia ft <sup>3</sup> /lb-mol <sup>o</sup> R	Dato
Mv	Peso molecular del vapor	lb/lb-mol	Dato
Pva	Presión de vapor del producto a la temp. prom. en la superficie del liq. $Pva = \text{EXP} \left[ A - \left( \frac{B}{Tia} \right) \right]$	psia	Calculado de la ecuación 55

## RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FIJO

CONTINUA TABLA 4.17

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
A	Cte. de la ec. de la Presión de vapor	dimensional	Calculado de la ec. 58 y 56 para petróleo crudo y ref., respect.
B	Cte. de la ec. de la Presión de vapor	°R	Calculado de la ec. 59 y 57 para petróleo crudo y ref., respect.
T <sub>la</sub>	Tem. prom. en la superficie del liq. $T_{la} = 0.44 \cdot T_{aa} + 0.56 \cdot T_b + 0.0079 \cdot \alpha \cdot I$	°R	Calculado de la ecuación 51
T <sub>aa</sub>	Temperatura promedio ambiente	°R	Dato
T <sub>b</sub>	Temperatura del volumen del líquido $T_b = T_{aa} + 6 \cdot \alpha - 1$	°R	Calculado de la ecuación 50
$\alpha$	Absorbancia solar en el tanque	dimensional	De tabla 4.11
I	Insolación solar total diaria	BTU/ft <sup>2</sup> día	Dato
K <sub>e</sub>	Factor de expansión del espacio-vapor $K_e = \frac{DT_v}{T_{la}} + \frac{DP_v}{(P_a - P_{va})}$	dimensional	Calculado de la ecuación 33
DT <sub>v</sub>	Rango de temperatura del vapor $DT_v = 0.72 \cdot DT_a + 0.028 \cdot \alpha \cdot I$	°R	Calculado de la ecuación 52
DT <sub>a</sub>	Rango de temperatura ambiente	°R	Dato
DP <sub>v</sub>	Rango de la presión de vapor $DP_v = P_{vx} - P_{vn}$	psia	Calculado de la ecuación 60
P <sub>vx</sub>	Presión de vapor de almnto. a la temp. de la superficie del liq. máxima (T <sub>lx</sub> )	psia	Calculado de la ecuación 55
P <sub>vn</sub>	Presión de vapor de almnto. a la temp. de la superficie del líquido mínima (T <sub>ln</sub> )	psia	Calculado de la ecuación 55
P <sub>a</sub>	Presión atmosférica	psia	Dato
K <sub>s</sub>	Factor de saturación vapor venteado $K_s = \frac{1}{(1 + 0.053 \cdot P_{va} + H_{vo})}$	dimensional	Calculado de la ecuación 34
W <sub>vc</sub>	Densidad vapor condensado a 60 °F	lb/gal	Ecuación 61

## RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE PERDIDAS POR EVAPORACION EN TANQUES CON TECHO FIJO

**TABLA 4.18**

### ECUACIONES DE PERDIDAS POR OPERACION (Lw)

$$Lw(\text{lb/año}) = 0.0010 \cdot Mv + Pva + Q + Kp$$

$$Lw(\text{bbl/año}) = \frac{Lw(\text{lb/año})}{42 \cdot Wvc}$$

VARIABLE	DESCRIPCION	UNIDADES	FUENTE
Mv	Peso molecular del vapor	lb/lb-mol	Dato
Pva	Presión de vapor del producto a la temp. prom. en la superficie del liq.  $Pva = \text{EXP} \left[ A - \left( \frac{B}{Tla} \right) \right]$	psia	Calculado de la ecuación 55
A	Cte. de la ec. de la Presión de vapor	dimensional	Calculado de la ec. 58 y 56 para petróleo crudo y ref., respect.
B	Cte. de la ec. de la Presión de vapor	°R	Calculado de la ec. 59 y 57 para petróleo crudo y ref., respect.
Tla	Tem. prom. en la superficie del liq. $Tla = 0.44 \cdot Taa + 0.56 \cdot Tb + 0.079 \cdot \alpha \cdot t$	°R	Calculado de la ecuación 51
Q	Cant. neta anual de almacenamiento	bbl/año	Dato
Kp	Factor por el tipo de producto	dimensional	De tabla 4.12
Wvc	Densidad vapor condensado a 60 °F	lb/gal	Calculado de la ecuación 61

## CAPITULO V

### EVALUACION DE PERDIDAS POR EVAPORACION

En este capítulo se realizará una evaluación de pérdidas por evaporación anuales de diferentes productos del petróleo almacenados en los diferentes tipos de tanques de almacenamiento.

Como se ha visto en los capítulos anteriores las pérdidas por evaporación dependen del tipo de tanque, del producto almacenado y del lugar donde esta localizado. Los tanques escogidos para evaluar las pérdidas por evaporación, son los empleados para almacenar las gasolinas comerciales. Todos los tanques utilizados para la evaluación de pérdidas son verticales.

Para dar valor a las pérdidas por evaporación se utilizaron los procedimientos descritos en el capítulo IV, los cuales fueron desarrollados por el Comité del API (American Petroleum Institute) en Mediciones de Pérdidas por Evaporación. Las ecuaciones presentadas están basadas en experiencias de campo y laboratorio que ha realizado este Instituto.

En las siguientes ciudades se evaluarán las pérdidas por evaporación anuales en tanques de almacenamiento

- Azcapotzalco, D.F.
- Tula, Hidalgo.
- Salamanca, Guanajuato.
- Salina Cruz, Oaxaca.

Para evaluar las pérdidas por evaporación anuales de los productos del petróleo en los tanques de almacenamiento es necesario conocer una serie de datos como son:

- Las condiciones locales
- Los datos del tanque
- Los datos de los productos

## 5.1 PROBLEMAS RESUELTOS PARA LA EVALUACION DE PERDIDAS POR EVAPORACION

### 5.1.1 TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

Estimar las pérdidas por evaporación anuales totales , en lb/año y bbl/año, tomando en cuenta la siguiente información:

A. Tanque soldado, en buenas condiciones con las siguientes características:

1. Diámetro = 134 ft
2. Altura = 40 ft
3. Techo tipo: Pontón
4. Color de pintura del tanque: Blanca
5. Sello tipo Llenado-Elastico (Sello Primario)

B. Producto almacenado, con las siguientes características:

1. Nombre: Gasolina Nova
2. Presión de Vapor Reid = 8.5 psia
3. Densidad del líquido almacenado = 6.1 lb/gal
4. Curva de destilación ASTM al 10% de Evaporación = 3
5. Cantidad neta anual = 1 500 000 bbl/año
6. Peso Molecular = 64 lb/lb-mol

C. Condiciones ambientales

1. Lugar: Azcapotzalco, D.F.
2. Temperatura máxima promedio anual = 76.5 °F (536.1 °R)
3. Temperatura mínima promedio anual = 50.0 °F (509.6 °R)
4. Presión Atmosférica = 11.25 psia
5. Velocidad del Viento promedio anual = 5.2 millas/hora

# PROCEDIMIENTO

## Pérdidas por Almacenamiento Estático

$$Ls(\text{lb/año}) = (Fr \cdot D + Ff) \cdot Pf \cdot Mv \cdot Kc \quad \text{Ecuación 1}$$

1.  $Fr = Kr \cdot V^n$

$$\begin{array}{ll} Kr & 1.1 \\ n & 1.0 \end{array}$$

De la Tabla 4.1  
De la Tabla 4.1

$$Fr = 5.72 \text{ lb-mol/ft año}$$

2.  $D = 134 \text{ ft}$

Dato

3.  $Ff = 340 + 0.71 \cdot D$

Ecuación 8

$$Ff = 435.14 \text{ lb-mol/año}$$

$$4. Pf = \frac{\left(\frac{P}{Pa}\right)}{\left(1 + \left(1 - \left(\frac{P}{Pa}\right)^{0.5}\right)\right)^2}$$

Ecuación 14

$$\begin{array}{l} Ta = 522.85 \text{ }^\circ\text{R} \\ Ts = 522.85 \text{ }^\circ\text{R} \\ PVR = 8.5 \\ P = 4.61 \text{ psia} \\ Pa = 11.25 \text{ psia} \\ Pf = 0.1311 \end{array}$$

Ecuación 17  
De la Tabla 4.2  
Dato  
Ecuación 15  
Dato

5.  $Mv = 64 \text{ lb/lb-mol}$

Dato

6.  $Kc = 1.0$

De la Tabla 4.4

7.  $Ls = 10\,085.99 \text{ lb/año}$

8.  $Ls(\text{bbbl/año}) = \frac{Ls(\text{lb/año})}{42 * Wv}$

Ecuación 2

9.  $Wv = 0.08 * Mv$

Ecuación 18

$Wv = 5.12 \text{ lb/gal}$

10.  $Ls = 46.90 \text{ bbl/año}$

### Pérdidas por Adherencia

$Lw(\text{lb/año}) = \frac{0.943 * Q * C * WI}{D}$

Ecuación 3

1.  $Q = 1\,500\,000 \text{ bbl/año}$

Dato

2.  $C = 0.0015 \text{ bbl/1000 ft}^2$

De la Tabla 4.5



3.  $Wl = 6.1 \text{ lb/gal}$

Dato

4.  $D = 134 \text{ ft}$

Dato

5.  $Lw = 96.58 \text{ lb/año}$

6.  $Lw(\text{bbl/año}) = \frac{Lw(\text{lb/año})}{42 \cdot Wl}$

Ecuación 4

7.  $Lw = 0.37 \text{ bbl/año}$

### Pérdidas Totales

1.  $Lt = Ls(\text{lb/año}) + Lw(\text{lb/año})$

$Lt = 10\,182.58 \text{ lb/año}$

2.  $Lt = Ls(\text{bbl/año}) + Lw(\text{bbl/año})$

$Lt = 47.27 \text{ bbl/año}$

## RESUMEN

### TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO TIPO PONTON

**SELLO PRIMARIO:** Llenado-Elastico (Liquido-Montado)

**SELLO SECUNDARIO:** Ninguno

Pérdidas por almacenamiento estático	Pérdidas por adherencia
$Ls(\text{lb} / \text{año}) = [(Fr \cdot D) + Ff] \cdot Pf \cdot Mv \cdot Kc$	$Lw(\text{lb} / \text{año}) = \frac{0.943 \cdot Q \cdot C \cdot Wl}{D}$
$Ls(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Ls(\text{lb} / \text{año})}{42 \cdot Wv}$	$Lw(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Lw(\text{lb} / \text{año})}{42 \cdot Wl}$

Fr (lb-mol/ft año)	5.72	Q (bbl/año)	1 500 000
D (ft)	134	C (bbl/1000 ft <sup>2</sup> )	0.0015
Ff (lb-mol/año)	435.14	Wl (lb/gal)	6.1
Pf (dimensional)	0.1311	D (ft)	134
Mv(lb/lb-mol)	64	Lw (lb/año)	96.58
Kc (dimensional)	1.0	Lw (bbl/año)	0.37
Wv (lb/gal)	5.12		
Ls (lb/año)	10 085.99		
Ls (bbl/año)	46.90		

Lt (lb/año)	10 182.58
Lt (bbl/año)	47.27

### 5.1.2 TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

Estimar las pérdidas por evaporación anuales totales , en lb/año y bbl/año, tomando en cuenta la siguiente información:

A. Tanque con techo flotante interno, con techo fijo soportado por columnas, con costuras atornilladas y libre venteo; en buenas condiciones:

1. Diámetro = 134 ft
2. Altura = 40 ft
3. Tipo de Cubierta: Atomillada
4. Color de pintura del tanque: Blanca
5. Sello tipo Llenado-Elastico (Sello Primario)

B. Producto almacenado, con las siguientes características:

1. Nombre: Gasolina Nova
2. Presión de Vapor Reid = 8.5 psia
3. Densidad del líquido almacenado = 6.1 lb/gal
4. Curva de destilación ASTM al 10% de Evaporación = 3
5. Cantidad neta anual = 1 500 000 bbl/año
6. Peso Molecular = 64 lb/lb-mol

C. Condiciones ambientales

1. Lugar: Azcapotzalco, D.F.
2. Temperatura máxima promedio anual = 76.5 °F (536.1 °R)
3. Temperatura mínima promedio anual = 50.0 °F (509.6 °R)
4. Presión Atmosférica = 11.25 psia

## PROCEDIMIENTO

### Pérdidas por Almacenamiento Estático

$$L_s(\text{lb / año}) = (K_r \cdot D + F_f + F_d) \cdot P_f \cdot M_v \cdot K_c \quad \text{Ecuación 19}$$

1.  $K_r = 6.7 \text{ lb-mol/ft año}$  De la Tabla 4.6

2.  $D = 134 \text{ ft}$  Dato

3.  $F_f = 0.0481 \cdot D^2 + 1.392 \cdot D + 134.2$  Ecuación 25  
 $F_f = 1184.41 \text{ lb-mol/año}$

4.  $F_d = K_d \cdot S_d \cdot D^2$  Ecuación 29

$K_d = 0.34 \text{ lb-mol/ft año}$  De la Tabla 4.7

$S_d = 0.20 \text{ ft/ft}^2$  De la Tabla 4.8

$F_d = 1221.0 \text{ lb-mol/año}$

5. 
$$P_f = \frac{\left(\frac{P}{P_a}\right)}{\left(1 + \left(1 - \left(\frac{P}{P_a}\right)^{0.5}\right)\right)^2}$$
 Ecuación 14

$T_a = 522.85 \text{ }^\circ\text{R}$  Ecuación 17

$T_s = 522.85 \text{ }^\circ\text{R}$  De la Tabla 4.2

$PVR = 8.5$  Dato

$P = 4.61 \text{ psia}$  Ecuación 15

$P_a = 11.25 \text{ psia}$  Dato

$P_f = 0.1311$

6.  $Mv = 64 \text{ lb/lb-mol}$

Dato

7.  $Kc = 1.0$

De la Tabla 4.4

8.  $Ls = 27726.11 \text{ lb/año}$

9.  $Ls(\text{bbl / año}) = \frac{Ls(\text{lb / año})}{42 * Wv}$

Ecuación 20

10.  $Wv = 0.08 * Mv$

Ecuación 18

$Wv = 5.12 \text{ lb/gal}$

11.  $Ls = 128.93 \text{ bbl/año}$

### Pérdidas por Adherencia

$Lw(\text{lb / año}) = \frac{0.943 * Q * C * Wl}{D} \left( 1 + \left( \frac{Nc * Fc}{D} \right) \right)$  Ecuación 21

1.  $Q = 1\,500\,000 \text{ bbl/año}$

Dato

2.  $C = 0.0015 \text{ bbl/1000 ft}^2$

De la Tabla 4.5

3.  $Wl = 6.1 \text{ lb/gal}$

Dato

4.  $D = 134 \text{ ft}$

Dato

5.  $N_c = 8$  con  $D = 134$  ft

De la Tabla 4.10

6.  $F_c = 1.0$

De la Tabla 4.9

7.  $L_w = 102.35$  lb/año

8.  $L_w(\text{bbl/año}) = \frac{L_w(\text{lb/año})}{42 \cdot Wl}$

Ecuación 22

9.  $L_w = 0.39$  bbl/año

### Pérdidas Totales

1.  $L_t = L_s(\text{lb/año}) + L_w(\text{lb/año})$

$L_t = 27\ 828.46$  lb/año

2.  $L_t = L_s(\text{bbl/año}) + L_w(\text{bbl/año})$

$L_t = 129.33$  bbl/año

## RESUMEN

### TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO TIPO CUBIERTA ATORNILLADA CON TECHO FIJO SOPORTADO POR COLUMNAS

**SELLO PRIMARIO:** Tipo Vapor-Montado

**SELLO SECUNDARIO:** Ninguno

Pérdidas almacenamiento estático	Pérdidas por adherencia
$Ls(\text{lb} / \text{año}) = [(Kr \cdot D) + Ff + Fd] \cdot Pf \cdot Mv \cdot Kc$	$Lw(\text{lb} / \text{año}) = \left[ \frac{0.843 \cdot Q \cdot C \cdot Wl}{D} \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Nc \cdot Fc}{D} \right) \right]$
$Ls(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Ls(\text{lb} / \text{año})}{42 \cdot Wv}$	$Lw(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{Lw(\text{lb} / \text{año})}{42 \cdot Wl}$

Kr (lb-mol/ft año)	6.7	Q (bbl/año)	1 500 000
D (ft)	134	C (bbl/1000 ft <sup>2</sup> )	0.0015
Ff (lb-mol/año)	1184.41	Wl (lb/gal)	6.1
Fd (lb-mol/año)	1221.0	D (ft)	134
Pf (dimensional)	0.1311	Nc (dimensional)	19
Mv (lb/lb-mol)	64	Fc (ft)	1.0
Kc (dimensional)	1.0	Lw (lb/año)	102.35
Wv (lb/gal)	5.12	Lw (bbl/año)	0.39
Ls (lb/año)	27 726.11		
Ls (bbl/año)	128.93		

Lt (lb/año)	27 828.46
Lt (bbl/año)	129.33

### 5.1.3 TANQUE CON TECHO FIJO

Estimar las pérdidas por evaporación anuales totales , en lb/año y bbl/año, tomando en cuenta la siguiente información:

A. Tanque con techo fijo tipo cónico; en buenas condiciones:

1. Diámetro = 134 ft
2. Altura = 40 ft
3. Nivel del Líquido en el Tanque: Lleno
4. Color de pintura del tanque: Blanca

B. Producto almacenado, con las siguientes características:

1. Nombre: Gasolina Nova
2. Presión de Vapor Reid = 8.5 psia
3. Densidad del líquido almacenado = 6.1 lb/gal
4. Curva de destilación ASTM al 10% de Evaporación = 3
5. Cantidad neta anual = 1 500 000 bbl/año
6. Peso Molecular = 64 lb/lb-mol

C. Condiciones ambientales

1. Lugar: Azcapotzalco, D.F.
2. Temperatura máxima promedio anual = 76.5 °F (536.1 °R)
3. Temperatura mínima promedio anual = 50.0 °F (509.6 °R)
4. Presión Atmosférica = 11.25 psia
5. Insolación Solar en la Superficie Horizontal = 1449 BTU/ft día



## PROCEDIMIENTO

### Pérdidas por Almacenamiento Estático

$$Ls(\text{lb / año}) = 365 * Vv * Wv * Ke * Ks \quad \text{Ecuación 30}$$

$$1. Vv = \left( \frac{\pi I}{4} \right) * D^2 * Hvo \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\pi = 3.1416 \quad \text{Dato}$$

$$D = 134 \text{ ft} \quad \text{Dato}$$

$$Rs = 67 \text{ ft} \quad \text{Dato}$$

$$Sr = 0.0625 \quad \text{Dato}$$

$$Hvo = Hs - HI + Hro \quad \text{Ecuación 40}$$

$$Hs = 40 \text{ ft} \quad \text{Dato}$$

$$HI = 40 \text{ ft} \quad \text{Dato}$$

$$Hr = Sr * Rs \quad \text{Ecuación 42}$$

$$Hr = 4.187 \text{ ft}$$

$$Hro = \frac{1}{3} Hr \quad \text{Ecuación 41}$$

$$Hro = 1.395 \text{ ft}$$

$$Hvo = 1.395 \text{ ft}$$

$$Vv = 19684.93 \text{ ft}^3$$

### 2. Calcular Taa y DTa

$$Tax = 76.5 \text{ } ^\circ\text{F} (536.1 \text{ } ^\circ\text{R})$$

$$Tan = 50.0 \text{ } ^\circ\text{F} (509.6 \text{ } ^\circ\text{R})$$

$$Taa = 63.25 \text{ } ^\circ\text{F} (522.85 \text{ } ^\circ\text{R})$$

$$DTa = 26.5 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\alpha = 0.17$$

$$\text{Ecuación 47}$$

$$\text{Ecuación 40}$$

$$\text{De la Tabla 4.11}$$

3. Calcular  $T_b$ ,  $T_{ia}$ ,  $DT_v$ ,  $T_{ix}$  y  $T_{in}$ .

$$T_{aa} = 63.25 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (522.85 } ^\circ\text{R)}$$

$$\alpha = 0.17$$

$$T_b = 63.27 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (522.87 } ^\circ\text{R)}$$

$$I = 1449 \text{ BTU/ft d}{\text{a}}$$

$$T_{ia} = 65.2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (524.8 } ^\circ\text{R)}$$

$$DT_a = 26.5 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$DT_v = 25.97 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$T_{ix} = 71.7 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (531.3 } ^\circ\text{R)}$$

$$T_{in} = 58.7 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (518.3 } ^\circ\text{R)}$$

Calculado en el punto 2

Del punto 2

De la ecuaci3n 50

Dato

Ecuaci3n 51

Calculado en el punto 2

Ecuaci3n 52

Ecuaci3n 53

Ecuaci3n 54

4. Calcular  $P_{va}$ ,  $P_{vx}$ ,  $P_{vn}$  y  $DP_v$ .

$$T_{ix} = 71.7 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (531.3 } ^\circ\text{R)}$$

$$P_{vx} = 5.421 \text{ psia}$$

$$T_{in} = 58.7 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (518.3 } ^\circ\text{R)}$$

$$P_{vn} = 4.211 \text{ psia}$$

$$T_{ia} = 65.2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (524.8 } ^\circ\text{R)}$$

$$P_{va} = 4.77 \text{ psia}$$

$$DP_v = 1.21$$

Calculado en el punto 3

Ecuaci3n 55

Calculado en el punto 3

Ecuaci3n 55

Calculado en el punto 3

Ecuaci3n 55

Ecuaci3n 60

$$5. \quad W_v = \frac{M_v \cdot P_{va}}{R \cdot T_{ia}}$$

Ecuaci3n 32

$$M_v = 64 \text{ lb/lb-mol}$$

$$R = 10.731 \text{ psia ft}^3\text{/lb-mol } ^\circ\text{R}$$

$$T_{ia} = 65.2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ (524.8 } ^\circ\text{R)}$$

$$P_{va} = 4.78 \text{ psia}$$

$$W_v = 0.0543 \text{ lb/ft}^3$$

Dato

Dato

Calculado en el punto 3

Calculado en el punto 4

$$6. K_e = \frac{DTv}{T_{1a}} + \frac{DPv}{(P_a - P_{va})}$$

$DTv = 25.97 \text{ }^\circ\text{R}$   
 $T_{1a} = 65.2 \text{ }^\circ\text{F} (524.8 \text{ }^\circ\text{R})$   
 $DPv = 1.193 \text{ psia}$   
 $P_a = 11.25$   
 $P_{va} = 4.78 \text{ psia}$   
 $K_e = 0.236$

Ecuación 33

Ecuación 52  
Calculado en el punto 3  
Calculado en el punto 4  
Dato  
Calculado en el punto 4

$$7. K_s = \frac{1}{1 + 0.053 \cdot P_{va} \cdot H_{vo}}$$

$P_{va} = 4.78 \text{ psia}$   
 $H_{vo} = 1.395 \text{ ft}$   
 $K_s = 0.738$

Ecuación 34

Calculado en el punto 4  
Calculado en el punto 1

$$8. L_s = 68336.9 \text{ lb/año}$$

$$9. L_s(\text{bbl / año}) = \frac{L_s(\text{lb / año})}{42 \cdot W_{vc}}$$

Ecuación 35

$$10. W_{vc} = 0.08 \cdot M_v$$

$$W_{vc} = 5.12 \text{ lb/gal}$$

Ecuación 61

$$11. L_s = 317.78 \text{ bbl/año}$$

## Pérdidas por Operación

$$L_w = 0.0010 \cdot M_v \cdot P_{va} \cdot Q \cdot K_p$$

Ecuación 36

1.  $M_v = 64 \text{ lb/lb-mol}$

Dato

2.  $P_{va} = 4.78 \text{ psia}$

Calculado en el punto 4

3.  $Q = 1\,500\,000 \text{ bbl/año}$

Dato

4.  $K_p = 1.0$

De la Tabla 4.12

5.  $L_w = 459\,451.6 \text{ lb/año}$

6.  $L_w(\text{bbl} / \text{año}) = \frac{L_w(\text{lb} / \text{año})}{42 \cdot W_{vc}}$

Ecuación 37

7.  $W_{vc} = 0.08 \cdot M_v$

Ecuación 61

$$W_{vc} = 5.12 \text{ lb/gal}$$

8.  $L_w = 2136.58 \text{ bbl/año}$

## Pérdidas Totales

$$1. L_t = L_s(\text{lb/año}) + L_w(\text{lb/año})$$

$$L_t = 527\,788.05 \text{ lb/año}$$

$$2. L_t = L_s(\text{bbl/año}) + L_w(\text{bbl/año})$$

$$L_t = 2454.37 \text{ bbl/año}$$

## RESUMEN

### TANQUE CON TECHO FIJO TIPO CONICO

Pérdidas por almacenamiento estático	Pérdidas por operación
$L_s(\text{lb / año}) = 365 \cdot V_v \cdot W_v \cdot K_e \cdot K_s$	$L_w(\text{lb / año}) = 0.0010 \cdot M_v \cdot P_{va} \cdot Q \cdot K_p$
$L_s(\text{bbl / año}) = \frac{L_s(\text{lb / año})}{42 \cdot W_{vc}}$	$L_w(\text{bbl / año}) = \frac{L_w(\text{lb / año})}{42 \cdot W_{vc}}$

Vv (ft <sup>3</sup> )	19 684.93	Mv (lb/lb-mol)	64
Wv (lb/ft <sup>3</sup> )	0.0543	Pva (psia)	4.78
Ke (dimensional)	0.236	Q (bbl/año)	1 500 000
Ks (dimensional)	0.738	Kp (dimensional)	1.0
Wvc (lb/gal)	5.12	Wvc (lb/gal)	5.12
Ls (lb/año)	68336.9	Lw (lb/año)	459 451.14
Ls (bbl/año)	317.78	Lw (bbl/año)	2136.58

Lt (lb/año)	527 788.05
Lt (bbl/año)	2454.37

## 5.2 EVALUACION DE PERDIDAS POR EVAPORACION

A continuación se presentan todos los resultados obtenidos al evaluar las pérdidas por evaporación en todos los tipos de techos y tipos de sellado descritos en el capítulo IV. Estos cálculos se realizan para poder seleccionar los sistemas en los que se obtengan menores pérdidas por evaporación anuales y por consecuencia menor contaminación ambiental.

Para poder evaluar las pérdidas por evaporación se necesita conocer los siguientes datos:

CONDICIONES LOCALES DE LAS CIUDADES				
CIUDAD	Temp. Máx. Prom. Anual	Temp. Mín. Prom. Anual	Presión Atmosférica	Vel. Viento Prom. Anual
	°R	°R	psia	millas/hr
Azcapotzalco	536.1	509.6	11.25	5.2
Salamanca	538.0	512.6	12.2	5.5
Tula	528.9	508.3	11.31	9.5
Salina Cruz	554.4	532.6	14.7	10.3

DATOS DEL TANQUE	
Capacidad (bbl)	100 000
Diámetro (ft)	134
Altura (ft)	40
Cantidad neta anual (bbl/año)	1 500 000
Color de la pintura	Blanca

DATOS DE LOS PRODUCTOS			
Nombre	G. Nova	G. Magna Sin	Turbosina
Presión de Vapor Reid (lb/pulg <sup>2</sup> )	8.5	9.5	8.0
Peso Molecular (lb/lb-mol)	64	64	64
Densidad del líquido almacenado a 60 °F (lb/gal)	6.1	6.1	6.1
Pendiente de la curva de destilación ASTM al 10%	3	3	3

## 5.2.1 TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

<b>TIPO DE TECHO</b>	Pontón
<b>CIUDAD</b>	Azcapotzalco, D.F.

Tipo(s) de Sello(s) colocados en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Ninguno	84.22	91.78	108.07
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Zapata-Montada	43.71	47.61	56.03
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Borde-Montado	20.94	22.80	26.79
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Ninguno	43.39	47.27	55.63
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	32.88	35.81	42.12
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Borde-Montado	22.45	24.44	28.72
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Ninguno	271.23	295.67	348.28
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	178.31	194.36	228.93
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Borde-Montado	85.72	93.42	110.00

S.P. Sello Primario

S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

<b>TIPO DE TECHO</b>	Doble Cubierta
<b>CIUDAD</b>	Azcapotzalco, D.F.

Tipo(s) de Sello(s) colocados en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Ninguno	88.02	95.93	112.96
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Zapata-Montada	47.51	51.76	60.92
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Borde-Montado	24.75	26.94	31.68
S.P. Llenado-Elastico (Líquido-Montado) S.S. Ninguno	47.20	51.42	60.52
S.P. Llenado-Elastico (Líquido-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	36.68	39.96	47.01
S.P. Llenado-Elastico (Líquido-Montado) S.S. Borde-Montado	26.25	28.58	33.61
S.P. Llenado-Elastico (Vapor-Montado) S.S. Ninguno	275.04	299.81	353.17
S.P. Llenado-Elastico (Vapor-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	182.12	198.51	233.81
S.P. Llenado-Elastico (Vapor-Montado) S.S. Borde-Montado	89.53	97.57	114.89

**S.P. Sello Primario**

**S.S. Sello Secundario**



## TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

<b>TIPO DE TECHO</b>	Pontón
<b>CIUDAD</b>	Salamanca, Guanajuato

Tipo(s) de Sello(s) colocados en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Ninguno	86.54	94.18	110.57
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Zapata-Montada	43.79	47.64	55.89
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Borde-Montado	20.38	22.15	25.95
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Ninguno	43.16	46.95	55.08
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	32.39	35.23	41.32
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Borde-Montado	21.69	23.58	27.63
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Ninguno	293.89	319.92	375.72
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	191.50	208.45	244.78
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Borde-Montado	97.75	100.93	118.49

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

<b>TIPO DE TECHO</b>	Doble Cubierta
<b>CIUDAD</b>	Salamanca, Guanajuato

Tipo(s) de Sello(s) colocados en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Ninguno	90.19	98.16	115.23
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Zapata-Montada	47.44	51.61	60.56
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Borde-Montado	24.03	26.12	30.62
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Ninguno	46.81	50.92	59.75
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	36.04	39.20	45.98
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Borde-Montado	25.34	27.55	32.29
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Ninguno	297.54	323.89	380.39
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	195.15	212.41	249.45
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Borde-Montado	96.39	104.91	123.16

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

<b>TIPO DE TECHO</b>	Pontón
<b>CIUDAD</b>	Tula, Hidalgo

Tipo(s) de Sello(s) colocados en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Ninguno	177.17	192.83	226.34
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Zapata-Montada	77.70	84.55	99.20
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Borde-Montado	34.76	37.80	44.32
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Ninguno	71.39	77.68	91.14
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	52.61	57.24	67.74
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Borde-Montado	34.00	36.97	43.35
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Ninguno	938.35	1021.47	1199.23
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	572.57	623.28	731.72
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Borde-Montado	325.18	353.96	415.51

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

<b>TIPO DE TECHO</b>	Doble Cubierta
<b>CIUDAD</b>	Tula, Hidalgo

Tipo(s) de Sello(s) colocados en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Ninguno	187.91	204.53	240.07
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Zapata-Montada	88.44	96.25	112.94
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Borde-Montado	45.50	49.50	58.05
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Ninguno	82.13	89.38	104.87
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	63.36	68.94	80.88
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Borde-Montado	44.74	48.67	57.08
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Ninguno	949.09	1033.16	1212.96
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	583.31	634.97	745.45
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Borde-Montado	335.92	35.92	429.25

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

<b>TIPO DE TECHO</b>	Pontón
<b>CIUDAD</b>	Salina Cruz, Oaxaca

Tipo(s) de Sello(s) colocados en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Ninguno	258.86	286.06	332.35
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Zapata-Montada	109.10	118.86	140.01
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Borde-Montado	46.57	50.72	59.71
S.P. Llenado-Elastico (Líquido-Montado) S.S. Ninguno	98.90	107.74	126.91
S.P. Llenado-Elastico (Líquido-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	71.78	78.19	92.08
S.P. Llenado-Elastico (Líquido-Montado) S.S. Borde-Montado	44.99	48.99	57.67
S.P. Llenado-Elastico (Vapor-Montado) S.S. Ninguno	1481.54	1614.51	1902.66
S.P. Llenado-Elastico (Vapor-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	898.21	974.45	1148.34
S.P. Llenado-Elastico (Vapor-Montado) S.S. Borde-Montado	520.29	566.96	668.11

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE EXTERNO

<b>TIPO DE TECHO</b>	Doble Cubierta
<b>CIUDAD</b>	Salina Cruz, Oaxaca

Tipo(s) de Sello(s) colocados en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Ninguno	273.56	297.49	350.53
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Zapata-Montada	123.25	134.28	158.19
S.P. Zapata-Mecánica S.S. Borde-Montado	60.73	66.14	77.89
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Ninguno	114.29	123.17	145.09
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	86.58	93.62	110.26
S.P. Llenado-Elástico (Líquido-Montado) S.S. Borde-Montado	59.22	64.42	75.85
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Ninguno	1561.12	1629.94	1920.84
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Pantalla-Protectora	945.50	989.87	1166.52
S.P. Llenado-Elástico (Vapor-Montado) S.S. Borde-Montado	559.33	582.38	686.28

**S.P. Sello Primario**

**S.S. Sello Secundario**

## 5.2.2 TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

<b>TIPO DE TECHO FIJO</b>	Soportado por Columnas (Cónico)
<b>CIUDAD</b>	Azcapotzalco, D.F.

### Cubierta Atornillada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	118.66	129.33	152.30
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	98.51	107.36	126.42
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	100.91	109.98	129.50
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	94.19	102.65	120.87

### Cubierta Soldada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	57.79	62.96	74.11
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	40.87	44.53	52.39
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	42.89	46.72	54.98
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	37.25	40.58	47.73

S.P. Sello Primario

S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

<b>TIPO DE TECHO FIJO</b>	Autoportado (Domo)
<b>CIUDAD</b>	Azcapotzalco, D.F.

### Cubierta Atornillada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turboquina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	98.45	107.29	126.35
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	78.30	85.35	100.46
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	80.70	87.94	103.54
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	73.98	80.62	94.92

### Cubierta Soldada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turboquina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	48.56	52.91	62.27
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	28.41	30.94	36.38
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	30.81	33.55	39.47
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	24.09	26.23	30.84

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario



## TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

<b>TIPO DE TECHO FIJO</b>	Soportado por Columnas (Cónico)
CIUDAD	Salamanca, Guanajuato

### Cubierta Atornillada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	113.83	123.89	145.46
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	94.51	102.85	120.74
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	96.81	105.36	123.68
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	90.36	98.34	115.44

### Cubierta Soldada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	55.45	60.33	70.79
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	39.22	42.67	50.05
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	41.15	44.77	52.52
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	35.75	38.88	45.60

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

<b>TIPO DE TECHO FIJO</b>	Autosoportado (Domo)
<b>CIUDAD</b>	Salamanca, Guanajuato

### Cubierta Atornillada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	94.44	102.78	120.67
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	75.12	81.74	95.95
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	77.42	84.25	98.89
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	70.97	77.23	90.66

### Cubierta Soldada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	46.59	50.69	59.48
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	27.26	29.65	34.76
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	29.57	32.15	37.70
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	23.12	25.14	29.46

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

<b>TIPO DE TECHO FIJO</b>	Soportado por Columnas (Cónico)
<b>CIUDAD</b>	Tula, Hidalgo

### Cubierta Atornillada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	106.02	115.38	135.39
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	88.02	95.79	112.39
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	90.16	98.12	115.13
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	84.16	91.59	107.46

### Cubierta Soldada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	51.65	56.19	65.91
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	36.55	39.75	46.60
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	38.35	41.71	48.90
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	33.31	36.23	42.47

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

<b>TIPO DE TECHO FIJO</b>	Autosoportado (Domo)
<b>CIUDAD</b>	Tula, Hidalgo

### Cubierta Atornillada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	87.96	95.72	112.32
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	69.97	76.13	89.32
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	72.11	78.46	92.06
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	66.11	71.93	84.39

### Cubierta Soldada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	43.41	47.22	55.38
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	25.41	27.63	32.38
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	27.55	29.96	35.11
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	21.56	23.43	27.45

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

<b>TIPO DE TECHO FIJO</b>	Soportado por Columnas (Cónico)
<b>CIUDAD</b>	Salina Cruz, Oaxaca

### Cubierta Atornillada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	139.54	152.03	179.10
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	115.83	126.20	148.65
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	118.66	129.27	152.28
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	110.75	120.66	142.13

### Cubierta Soldada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	67.92	73.98	87.12
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	48.02	52.30	61.56
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	50.39	54.88	64.61
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	43.76	47.65	56.09

S.P. Sello Primario

S.S. Sello Secundario

## TANQUE CON TECHO FLOTANTE INTERNO

<b>TIPO DE TECHO FIJO</b>	Autosoportado (Domo)
<b>CIUDAD</b>	Salina Cruz, Oaxaca

### Cubierta Atornillada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	115.76	126.12	148.57
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	92.05	100.29	118.12
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	94.88	103.36	121.75
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	86.97	94.76	111.60

### Cubierta Soldada

Tipo(s) de Sello(s) colocado en el techo	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbl/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
S.P. Vapor-Montado S.S. Ninguno	57.07	62.16	73.19
S.P. Vapor-Montado S.S. Existente	33.36	36.32	42.74
S.P. Líquido-Montado S.S. Ninguno	36.18	39.40	46.36
S.P. Líquido-Montado S.S. Existente	28.28	30.78	36.21

S.P. Sello Primario  
S.S. Sello Secundario

## 2.3 TANQUE CON TECHO FIJO

Tipo de Techo en el Tanque	Pérdidas por evaporación totales anuales (bbi/año)		
	Turbosina PVR = 8.0	Gasolina Nova PVR = 8.5	G. Magna Sin PVR = 9.5
<b>Azcapotzalco, D.F.</b>			
Techo Tipo Cónico	2268.92	2454.37	2814.54
Techo Tipo Domo	2750.26	2986.76	3435.87
<b>Salamanca, Guanajuato</b>			
Techo Tipo Cónico	2361.48	2541.26	2915.65
Techo Tipo Domo	2811.17	3028.78	3487.53
<b>Tula, Hidalgo</b>			
Techo Tipo Cónico	2017.40	2170.57	2487.91
Techo Tipo Domo	2370.96	2554.04	2937.40
<b>Salina Cruz, Oaxaca</b>			
Techo Tipo Cónico	3332.03	3579.81	4091.74
Techo Tipo Domo	3808.68	4095.70	4705.71

## CAPITULO VI

### COMPARACION ECONOMICA

En este capítulo se elaborara una comparación económica entre los costos de las pérdidas por evaporación anuales, en función de la vida útil del tanque y el tipo de techo utilizado en los tanques de almacenamiento; lo cual nos dará un parámetro para poder seleccionar el tipo de tanque más adecuado para ser utilizado en las Terminales de Almacenamiento de Productos Destilados.

Con esto se pretende demostrar que los tanques con techo flotante son más económicos que los tanques con techo fijo, así como también que emiten menores vapores a la atmósfera, lo cual contribuye a mejorar el medio ambiente.

La comparación que se va a realizar en este trabajo no es totalmente confiable, ya que este trabajo se basa solo en consideraciones de pérdidas por evaporación. Algunos factores no fueron contemplados en este trabajo, tales como son la operación, el mantenimiento y la seguridad del tanque, y por lo tanto no fueron incluidos en el costo total del tanque.

#### 6.1 COSTOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

En esta sección se presentan los costos de los diferentes tanques de almacenamiento, con diferentes tipos de techos, el costo esta considerado para una capacidad del tanque de 100,000 barriles, ya que con esta capacidad se realizó la evaluación de pérdidas por evaporación mostradas en el capítulo V. Estos costos se tomaron solo para poder reforzar el trabajo de tesis presentado y poder hacer un análisis económico del costo total de los tanques. El equipo del tanque no debe de ser seleccionado basado solamente en consideraciones de pérdidas por evaporación. Otros factores no contemplados en este trabajo, son importantes en el diseño y la selección del equipo para el tanque.



**TABLA 6.1**

<b>TIPO DE TANQUES</b>	<b>COSTO EN DOLARES</b>
Techo Cónico Fijo soportado por columnas	626 700
Techo Fijo Autosoportado (Domo)	866 704
Techo Flotante Externo	795 000
Techo Flotante Interno con Techo Cónico Fijo soportado por columnas	814 700
Techo Flotante Interno con Techo Fijo Autosoportado (Domo)	976 421

Estos costos fueron proporcionados por varios proveedores para fines de estudio, por lo que no deben de tomarse en cuenta como datos de cotización, ya que se realizaron sin tomar en cuenta el lugar de la obra y la variación en el espesor de los materiales usados, lo cual influye también en el costo del tanque. Los costos de los tanques mostrados en la tabla 6.1 solo incluyen la fabricación del tanque.

Con el costo de los tanques se puede realizar una comparación con las cantidades de pérdidas por evaporación, y así poder seleccionar el tanque que tenga menores pérdidas y un mejor costo.

La inversión inicial necesaria para instalar un tanque consta de los siguientes puntos:

- Limpieza y acondicionamiento del terreno
- Excavación
- Cimentación
- Costo del tanque
- Limpieza y pintura del tanque
- Limpieza posterior del terreno
- Dique de protección

Tanto en los tanques con techo fijo como en los tanques con techo flotante, tenemos los mismos renglones para la instalación del tanque y de hecho los costos son semejantes, excepto en el costo del tanque, que varía dependiendo del tipo de techo.

## 6.2 COMPARACION ECONOMICA

A continuación se presenta una comparación económica, entre el costo total del tanque (costo del tanque más el costo de las pérdidas por evaporación); en función de la vida útil del tanque, y el tipo de tanque, lo cual nos proporcionará una idea del tipo de techo a utilizar en los tanques de almacenamiento.

La vida útil que se le dará a cada uno de los tanques es aproximadamente de 10 años cuando son fabricados de acero, más de 10 años para los domos de aluminio, y 10 años para los techos flotantes internos fabricados de aluminio, por encontrarse en contacto directo con el líquido.

Para encontrar el costo de pérdidas por evaporación se necesitan dos datos, la vida útil del tanque y el costo de los productos del petróleo, los cuales se muestran en la tabla 6.2.

**TABLA 6.2**

<b>PRODUCTO</b>	<b>COSTO EN DOLARES/BARRIL</b>
Gasolina Nova	60.7
Gasolina Magna Sin	63.6
Turbosina	43.8

Teniendo los datos anteriores el costo total de las pérdidas por evaporación, se calcula de la siguiente manera:

- Evaluar las pérdidas por evaporación anuales en bbl/año.
- Calcular el costo de las pérdidas por evaporación anuales, con el costo del producto.
- El costo total de las pérdidas por evaporación se obtiene, multiplicando el costo de las pérdidas por evaporación anuales por los años de vida útil del tanque.

El costo total del tanque es la suma del costo del tanque mas el costo total de las pérdidas por evaporación en función de la vida útil del tanque.

Cabe mencionar que para tener una mejor selección del tanque más económico se tendrían que incluir los costos de almacenamiento. Para obtener estos costos es necesario evaluar la inversión inicial requerida para la instalación de almacenamiento y la vida útil de la misma, es decir, el tiempo utilizado para depreciar esta instalación. Con esto es posible encontrar un costo anual de depreciación, que sumado a los costos anuales de operación, mantenimiento, reparación, pérdidas por evaporación y manejo del producto, se forma el costo anual de almacenamiento.

Después se debe realizar un estudio del retorno sobre la inversión. El cual consiste en comprobar la utilidad de los tanques mediante el tiempo de recuperación de la inversión. El tiempo de recuperación de la inversión o retorno sobre la inversión, es el lapso en el cual se iguala la diferencia que existe entre la inversión inicial de los tanques comprados y el ahorro logrado en el costo de almacenamiento.

En las tablas siguientes se muestran las pérdidas por evaporación anuales, las cuales fueron tomadas del capítulo anterior. El sistema de sellado que se utilizó en los techos flotantes, para poder calcular el costo total de las pérdidas por evaporación, fue un sello primario tipo líquido-montado, ya que es un sello que se utiliza en los dos tipos de techos flotantes. Existe otro sistema de sellado en los techos flotantes externos (zapata-mecánica) en donde las pérdidas por evaporación son menores, solo que este tipo de sello no se utiliza en techos flotantes internos.

Las razones por las cuales se selecciono este sistema de sellado fueron las siguientes:

1. Por su baja emisión de contaminantes a la atmósfera.
2. Por que los proveedores que cotizan tanques de almacenamiento no nos proporcionan precios sobre los diferentes tipos de sello.
3. Para poder comparar con el mismo sistema de sellado, ya que existen otros sistemas de sellado, en donde se obtienen menores pérdidas.

TABLA 6.3

LUGAR :	AZCAPOTZALCO, D.F.
PRODUCTO ALMACENADO :	TURBOSINA

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	2268.92	43.8	99378.6	993786	1620486
Techo fijo tipo domo	866704	2750.26	43.8	120461.3	1204613	2071317
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	43.39	43.8	1900.4	19004	814004
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	42.89	43.8	1878.5	18785	833485
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	30.81	43.8	1349.4	13494	989915

NOTAS:

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

TABLA 6.4

LUGAR :	AZCAPOTZALCO, D.F.
PRODUCTO ALMACENADO :	GASOLINA NOVA

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	2454.37	60.7	148980.2	148980.2	211650.2
Techo fijo tipo domo	866704	2986.76	60.7	181296.3	181296.3	267966.7
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	47.27	60.7	2869.2	2869.2	823692
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	46.72	60.7	2835.9	2835.9	843059
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	33.55	60.7	2036.4	2036.4	996785

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

**TABLA 6.5**

<b>LUGAR :</b>	AZCAPOTZALCO, D.F.
<b>PRODUCTO ALMACENADO :</b>	GASOLINA MAGNA SIN

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	2814.54	63.6	179286.1	1792861	2419561
Techo fijo tipo domo	866704	3435.87	63.6	218521.3	2185213	3051917
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	55.65	63.6	3539.3	35393	830393
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	54.98	63.6	3496.7	34967	849667
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	39.47	63.6	2510.2	25102	1001523

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

TABLA 6.6

LUGAR :	SALAMANCA, GUANAJUATO
PRODUCTO ALMACENADO :	TURBOSINA

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	2361.48	43.8	103432.8	1034328	1661028
Techo fijo tipo domo	866704	2811.17	43.8	123129.2	1231292	2097996
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	43.16	43.8	1890.4	18094	813904
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	41.15	43.8	1802.3	18023	832723
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	29.57	43.8	1295.1	12951	989372

NOTAS:

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares



**TABLA 6.7**

<b>LUGAR :</b>	<b>SALAMANCA, GUANAJUATO</b>
<b>PRODUCTO ALMACENADO :</b>	<b>GASOLINA NOVA</b>

<b>TIPO DE TECHO</b>	<b>COSTO TANQUE</b>	<b>PPE ANUALES BBL/AÑO</b>	<b>COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL</b>	<b>COSTO DE LAS PPE ANUALES</b>	<b>COSTO TOTAL DE LAS PPE</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
Techo cónico fijo	626700	2541.26	60.7	154254.4	1542544	2169244
Techo fijo tipo domo	866704	3028.78	60.7	183846.9	1838469	2705173
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	46.95	60.7	2849.9	28499	823499
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	44.77	60.7	2714.5	27145	841845
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	33.15	60.7	1525.9	15259	991680

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

TABLA 6.8

LUGAR :	SALAMANCA, GUANAJUATO
PRODUCTO ALMACENADO :	GASOLINA MAGNA SIN

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	2915.65	63.6	185435.3	1854353	2481053
Techo fijo tipo domo	866704	3487.53	63.6	221806.9	2218069	3084773
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	55.08	63.6	3503.0	35030	830030
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	52.52	63.6	3340.2	33402	848102
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	37.70	63.6	2397.7	23977	1000398

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

TABLA 6.9

LUGAR :	TULA, HIDALGO
PRODUCTO ALMACENADO :	TURBOSINA

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	2017.40	43.8	88362.1	883621	1510321
Techo fijo tipo domo	866704	2370.96	43.8	103848.0	1038480	1905184
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	71.39	43.8	3126.8	31268	826268
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	38.35	43.8	1679.7	16797	831497
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	27.55	43.8	1206.6	12066	988487

NOTAS:

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

**TABLA 6.10**

<b>LUGAR :</b>	TULA, HIDALGO
<b>PRODUCTO ALMACENADO :</b>	GASOLINA NOVA

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	2170.57	60.7	131753.5	1317535	1944235
Techo fijo tipo domo	866704	2554.04	60.7	155030.2	1550302	2417006
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	77.68	60.7	4715.1	47151	842151
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	41.71	60.7	2531.7	25317	840017
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	29.96	60.7	1818.5	18185	994606

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

**TABLA 6.11**

<b>LUGAR :</b>	TULA, HIDALGO
<b>PRODUCTO ALMACENADO :</b>	GASOLINA MAGNA SIN

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	2487.91	63.6	158231.0	1582310	2209010
Techo fijo tipo domo	866704	2937.40	63.6	186818.6	1868186	2734890
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	91.14	63.6	5796.5	57965	852965
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	48.90	63.6	3110.0	31100	845800
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	35.11	63.6	2232.9	22329	998750

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

TABLA 6.12

LUGAR :	SALINA CRUZ, OAXACA
PRODUCTO ALMACENADO :	TURBOSINA

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	3332.03	43.8	145942.9	1459429	2086129
Techo fijo tipo domo	866704	3808.68	43.8	166820.1	1668201	2534905
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	98.90	43.8	4331.8	43318	838318
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	50.39	43.8	2207.0	22070	836770
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	36.18	43.8	1584.6	15846	992267

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

**TABLA 6.13**

<b>LUGAR :</b>	<b>SALINA CRUZ, OAXACA</b>
<b>PRODUCTO ALMACENADO :</b>	<b>GASOLINA NOVA</b>

<b>TIPO DE TECHO</b>	<b>COSTO TANQUE</b>	<b>PPE ANUALES BBL/AÑO</b>	<b>COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL</b>	<b>COSTO DE LAS PPE ANUALES</b>	<b>COSTO TOTAL DE LAS PPE</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
Techo cónico fijo	626700	3579.81	60.7	217294.4	2172944	2799644
Techo fijo tipo domo	866704	4095.70	60.7	248608.9	2486089	3352793
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	107.14	60.7	6539.8	65398	860398
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	54.88	60.7	3331.2	33312	848012
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	39.40	60.7	2391.5	23915	1000336

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares

TABLA 6.14

LUGAR :	SALINA CRUZ, OAXACA
PRODUCTO ALMACENADO :	GASOLINA MAGNA SIN

TIPO DE TECHO	COSTO TANQUE	PPE ANUALES BBL/AÑO	COSTO PRODUCTO DOLAR/BBL	COSTO DE LAS PPE ANUALES	COSTO TOTAL DE LAS PPE	COSTO TOTAL
Techo cónico fijo	626700	4091.74	63.6	260234.6	2602346	3229046
Techo fijo tipo domo	866704	4705.71	63.6	299283.1	2992831	3859535
Techo flotante externo (Tipo Pontón)	795000	126.91	63.6	8071.4	80714	875714
Techo flotante interno con techo fijo tipo cónico	814700	64.61	63.6	4109.1	41091	855791
Techo flotante interno con techo fijo tipo domo	976421	46.36	63.6	2948.4	29484	1005905

**NOTAS:**

1. PPE - Pérdidas por Evaporación
2. Todos los costos estan en dólares



## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se presento una evaluación de pérdidas por evaporación anuales en tanques de almacenamiento con diferentes tipos de techos y sistemas de sellado, utilizados para el almacenamiento de productos derivados del petróleo (gasolinas), con esto se pretende demostrar la necesidad de hacer una selección del sistema de almacenamiento más adecuado, para que se pueda instalar en las Terminales de Almacenamiento y Distribución de Productos Destilados, evitando así las emisiones de gases a la atmósfera, y por consiguiente la contaminación del medio ambiente.

Suponiendo las mismas condiciones, localización y producto almacenado en diferentes tipos de tanques, se puede observar que los tanques con techo flotante, ya sea flotante externo o flotante interno; son los que emiten menores pérdidas por evaporación totales anuales, con respecto al tanque con techo fijo. Comparando las pérdidas por evaporación de tanques con techo fijo, con un tanque con techo flotante se puede observar la gran diferencia de pérdidas por evaporación que existe entre un tanque y otro, esto es debido a que la superficie del líquido expuesta a evaporación se reduce al mínimo, gracias a que el techo flotante esta en contacto directo con la superficie del líquido.

De los tanques de almacenamiento para gasolinas sujetos a este trabajo, podemos decir que los tanques en donde se tienen las menores pérdidas por evaporación son los siguientes:

- Tanques con techo flotante externo tipo Pontón
- Tanques con techo flotante externo tipo Doble Cubierta
- Tanques con techo flotante interno, con un techo fijo tipo Domo

Estos tipos de techos flotantes utilizan en el borde del techo simplemente un sello primario tipo líquido-montado o un sello primario tipo líquido-montado mas un sello secundario. El uso de un sello secundario nos proporciona menores pérdidas por evaporación.

De acuerdo a la comparación económica realizada, se puede observar en las tablas del capítulo VI que el costo total en los tanques con techo fijo es aproximadamente más del 40% que los tanques con techo flotante, suponiendo una vida útil de los tanque de 10 años. Esto es una buena razón económica para utilizar tanques con techos flotantes, además de que las pérdidas por evaporación son mucho menores en este tipo de tanques, con respecto a los tanques con techos fijos, ayudando así a preservar el medio ambiente.

De los techos flotantes, tanto externos como internos, contemplados en este trabajo, podemos decir que el costo total entre cada tanque varía entre un 15% y 20%; y las pérdidas por evaporación anuales en este tipo de techos son muy pequeñas.

El uso de cualquiera de los dos tipos de techos flotantes dependería de factores como la operación, el mantenimiento y la seguridad, tanto del tanque como del techo. Por lo que no se puede recomendar cual tipo de techo es el mejor, ya que eso dependería de los factores mencionados. Algunas ventajas de los techos flotantes internos sobre los techos flotantes externos son:

#### Emisión de vapores

La emisión de vapores de un techo flotante externo es mas grande que la de un techo flotante interno debido a:

- Se crea un vacío por la velocidad del viento en la parte superior del techo flotante externo.
- Las pérdidas por evaporación que se generan en la pared mojada del tanque, (cuando se esta vaciando) están expuestas a la atmósfera.
- En caso de que un sello este dañado, el techo flotante externo no esta protegido con una segunda línea de defensa (contenedor secundario), como lo es el caso de un tanque con techo flotante interno.
- La transferencia de calor por radiación solar es directa en el techo flotante externo, lo cual provoca un aumento en la presión de vapor de los productos almacenados.

## Contaminación del Producto/Agua

Los techos flotantes externos están sujetos a la acumulación de lluvia en la parte superior del techo. El agua drenada del techo es considerada como agua contaminada debido a las fugas del producto en los sellos y la pared mojada del tanque. Esta agua puede pasar a través del sello y contaminar al producto, y esto requerirá de un tratamiento para separarlos.

## Seguridad

En el aspecto de la seguridad esta incrementa en el caso de techos flotantes internos debido a la deficiencia de oxígeno debajo del techo flotante y la deficiencia de hidrocarburos arriba del techo.

Con esto no se pretende decir que los techos flotantes internos son mejores que los flotantes externos; solo son una recomendación, que en un momento dado puede servirnos para poder decidir por el uso de uno u otro tipo de techo flotante.

Analizando los resultados obtenidos de pérdidas por evaporación anuales en los diferentes estados de la República Mexicana utilizando techos flotantes, podemos recomendar lo siguiente:

- En las ciudades donde la velocidad del viento sea menor a 6 millas/hora, un tanque con techo flotante externo es el sistema de almacenamiento que tiene menores pérdidas por evaporación.
- En donde la velocidad del viento sea mayor a 9 millas/hora, un tanque con techo flotante interno con techo fijo autosoportado (Domo) es el mejor sistema de almacenamiento.

Esto sucede siempre y cuando los techos flotantes usen tanto un sello primario tipo líquido-montado mas un sello secundario.

El tipo de cubierta flotante que se recomienda utilizar en los tanques de almacenamiento con techo flotante interno, es una cubierta de tipo soldada ya que la de tipo atornillada emite mayor número de pérdidas por evaporación a la atmósfera, debido a que las partes atornilladas presentan mucho mayor puntos de fuga.

Con lo que respecta a que la Presión de Vapor Reid (PVR) se puede observar que esta variable es directamente proporcional a las pérdidas por evaporación anuales, ya que al aumentar esta variable, las pérdidas por evaporación aumentan. Esto se debe a que la Presión de Vapor Verdadera (PVV) depende directamente de la Presión de Vapor Reid, y la PVV afecta la razón de pérdidas por evaporación debido a que es la fuerza causante de la vaporización.

La velocidad del viento es un variable que solo se aplica en tanques con techo flotante externo; esta variable también es directamente proporcional a las pérdidas por evaporación. Esto es debido a que la velocidad del viento al aumentar arrastra mayor cantidad de vapores en la parte superior del techo flotante que se escapan por el sello o los accesorios, esto no ocurre en los techos flotantes internos.

Los dos tipos de sellos utilizados en tanques con techo flotante; son de tipo líquido-montado y vapor-montado, el primero es un sello que disminuye de mejor manera las pérdidas por evaporación, debido a que no forma espacio-vapor entre el nivel del líquido y el fondo del sello, ya que se encuentra tocando la superficie del líquido; esto no ocurre en los sellos de tipo vapor-montado, lo cual contribuye a aumentar las pérdidas por evaporación, esto se puede observar en las tablas del capítulo V. Si se utiliza un sello secundario las pérdidas por evaporación disminuyen; para que estos sellos sean efectivos, estos tienen que mantenerse en contacto con la coraza del tanque.

Considero que este trabajo representa una valiosa herramienta para la optimización de los recursos empleados para el almacenamiento de productos derivados del petróleo.

## CAPITULO VIII

### BIBLIOGRAFIA

- 1) American Petroleum Institute.  
Publication 2517.  
Evaporative Loss From External Floating-Roof Tanks.  
Third Edition, February 1989.
  
- 2) Manual of Petroleum Measurement Standards.  
Chapter 19 - Evaporative Loss Measurement.  
Section 1 - Evaporative Loss From Fixed-Roof Tanks.  
American Petroleum Institute.  
Publication 2518.  
Second Edition, October 1991.
  
- 3) American Petroleum Institute.  
Publication 2519.  
Evaporation Loss From Internal-Roof Tanks.  
Third Edition, June 1983.
  
- 4) American Petroleum Institute.  
Publication 2513.  
Evaporation Loss in the Petroleum Industry - Causes and Control.  
First Edition, February 1962.
  
- 5) Tesis " Estudio Técnico-Económico del uso de Tanques de Almacenamiento de Techo Flotante en Gasolineras Comerciales ".  
Arsenio Javier Blanco Olivares.  
México 1969. Facultad de Química, UNAM.

- 6) Estudio sobre Pérdidas por Evaporación en el Almacenamiento de Hidrocarburos en Tanques Atmosféricos API con diferentes tipos de Techos.  
Ing. Ernesto Jaritz Olivares. Ing. J. Edgar Peña Guevara.  
México, 1992. PEMEX.
  
- 7) CONCAWE. Report No. 85/84.  
Hydrocarbon Emissions from Gasoline Storage and Distribution Systems.  
D. Beardshall. P.G. Edgington.  
September 1986.
  
- 8) American Petroleum Institute.  
Standard 650.  
Welded Steel Tanks For Oil Storage.  
Eighth Edition, November 1988.
  
- 9) American Petroleum Institute.  
Publication 2523.  
Petrochemical Evaporation Loss From Storage Tanks.  
First Edition, November 1969.
  
- 10) American Society of Mechanical Engineers  
ASME Publication  
Floating Roofs - Their Design and Application  
W.B. Young  
July 2, 1973.
  
- 11) Chemical Engineering / Desbook Issue.  
Liquid Storage in the CPI.  
April 3, 1978.  
Pág. 9 a 15.

- 12) **The Oil and Gas Journal.**  
**Design and Selection of Storage Tank.**  
**November 14, 1955.**  
**Pág. 170 a 179.**
  
- 13) **Boletines del Servicio Metereológico Nacional, Tacubaya, D.F.**  
**Formas T-9. (1980 - 1990)**
  
- 14) **Petroleum Refining. Technology and Economics.**  
**Refino del Petróleo. Tecnología y Economía.**  
**James H. Gary. Glenn E. Handwerk.**  
**Editorial Reverté, S.A.**  
**España, 1980.**
  
- 15) **American Society Testing and Materials**  
**Annual Book of ASTM Standards 1993**  
**Volumen 5.01**  
**ASTM D-323-90**  
**Pag. 129 - 135**