

## Guía ambiental para el quemado de gas en instalaciones de exploración y producción petrolera

Esta guía es una de la serie de documentos publicados por el Ministerio de Energía y Minas del Perú. Los Títulos en esta serie son:

- Guía para Elaborar Estudios de Impacto Ambiental (EIA).
- Guía para Elaborar Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA).
- Guía para la Protección Ambiental de Estaciones de Servicio y Plantas de Venta.
- Guía Ambiental para la Disposición y Tratamiento del Agua Producida.
- Guía Ambiental para el Manejo de Desechos de las Refinerías de Petróleo.
- Guía Ambiental para el Manejo de Emisiones Gaseosas de Refinerías de Petróleo.
- Guía Ambiental para Proyectos de Exploración y Producción
- Guía Ambiental para la Disposición de los Desechos de Perforación en la Actividad Petrolera.
- Guía Ambiental para el Quemado de Gas en Instalaciones de Exploración y Producción Petrolera.
- Guía Ambiental para el Manejo de Oleoductos.
- Guía para Auditorías Ambientales de Operaciones Petroleras en Tierra.
- Guía Ambiental para el Manejo de Tanques de Almacenamiento Enterrados.
- Guía Ambiental para la Restauración de Suelos en las Instalaciones de Refinación y Producción Petrolera.

Además de estas guías, el Ministerio también ha publicado Protocolos de Monitoreo de Calidad de Aire, Emisiones y de Agua. Algunos de estos documentos fueron preparados específicamente para el Perú, pero la mayoría de ellos fueron adaptados para el país a partir de guías publicadas por la Organización de Asistencia Recíproca Petrolera Estatal Latinoamericana (ARPEL). Se agradece el permiso otorgado por ARPEL para el uso de sus guías en esta forma.

En noviembre de 1993, el Gobierno del Perú promulgó el nuevo "Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos", Decreto Supremo N° 046-93-EM. Esta norma fue la primera que delineó específicamente los requerimientos ambientales de los proyectos petroleros. Otras leyes y normas, por ejemplo, la "Ley General de Aguas", también tienen aplicación en dichos proyectos, pero de una forma indirecta.

Esta guía y las demás de la serie no son leyes o reglamentos. Se realizaron con la finalidad de ayudar a personas de la industria y del gobierno, así como al público en general a desarrollar planes ambientales que se adecuen con los requerimientos de las leyes. Los lineamientos son generales; reflejan prácticas industriales petroleras que se han encontrado en muchos países. Sin embargo, no todos los diseños y procedimientos delineados serán apropiados para todos los proyectos o en todas las circunstancias.

Este y los otros documentos describen varias alternativas, incluso aquéllas que pueden no ser implementadas en el Perú por algunos años. Estas alternativas fueron incluidas para asegurar que los documentos no queden desactualizados rápidamente, sino que sean de utilidad en años futuros, a medida que la capacidad tecnológica peruana en protección ambiental avance.

Se recomienda al lector consultar con la Dirección General de Hidrocarburos (DGH) y con la Dirección General de Asuntos Ambientales (DGAA) en el Ministerio de Energía y Minas, acerca de la aplicación de regulaciones ambientales a proyectos nuevos y existentes. Estas guías pueden ser utilizadas como fuente de información para facilitar estas consultas. Por último, es responsabilidad del proponente/dueño asegurar que su proyecto se adecue a las normas vigentes.

#### Próposito

En las instalaciones de producción, continuamente se manipulan y procesan hidrocarburos, los cuales normalmente se separan en líquidos y vapores. Los procesos involucrados someten las mezclas a niveles variables de calor y presión para obtener grados variables de separación y para recolectar los líquidos para su venta -por lo común después de almacenarlos en tanques- y los gases en un conducto para la venta, o bien hacia la antorcha. A través de todo el sistema es común que se produzcan emisiones de gas, a pesar de los esfuerzos por prevenirlas.

El presente documento trata sobre las emisiones en las instalaciones de producción desde dos perspectivas: minimización de emisiones de hidrocarburos gaseosos a partir del equipo de procesamiento y la recolección de dichas emisiones mediante tecnología de recuperación de vapores; y la destrucción de dichas emisiones en una antorcha tanto en forma continua como en forma intermitente.

#### PRINCIPIOS GUIAS

a presente guía se deberá considerar dentro del contexto de la industria de producción de petróleo y gas, donde el gas es, por lo general, considerado como un subproducto o producto de desecho. Los problemas de las emisiones de hidrocarburos y su respectiva destrucción en antorchas han sido históricamente relegados como temas de baja prioridad, lo que en la actualidad está cambiando debido a:

- q La legislación del Gobierno Peruano;
- q las presiones del público; y
- q las mejores prácticas operativas.

El control de las emisiones a la atmósfera es una parte importante de todo programa de protección ambiental. Para tener aire puro se requerirá de la acción concertada de la industria, el público y los diferentes niveles del gobierno.

Muchos gobiernos ya han instituido o están en proceso de instituir normas sobre emisiones gaseosas más rigurosas. Mientras que los detalles y la duración varían, es razonable asumir que el siguiente escenario influirá en las operaciones petroleras en un futuro cercano:

v Aplicación/imposición de reglamentos sobre emisiones cada vez más estrictos, en los que se incluye la divulgación de las cantidades y tipos de los compuestos emitidos.

- v Aumento de esfuerzos por lograr la conservación de la energía.

v Reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno provenientes de calentadores y calderas.

v Establecimiento de programas de detección y reparación de fugas para reducir emisiones fugitivas de hidrocarburos.

v Reducción de emisiones durante las operaciones de carga y descarga de los camiones tanques, vagones de ferrocarril y naves, usando líneas de retorno de vapor, así como instalaciones de recuperación e incineración de vapores.

v Desarrollo de mercados o uso de la cogeneración en las áreas de campo para minimizar el quemado de gases.

v Incremento de la extracción de particulados de gas de combustión y de gas de la antorcha.

En líneas generales, el público está demandando acciones para contrarrestar las emisiones al aire. Esta preocupación ha ocasionado que se adopte una legislación, que exige que todos los operadores remitan información sobre la cantidad y los tipos de compuestos emitidos a la atmósfera.

El impacto combinado de la legislación, la presión pública y una carga financiera cada vez mayor han llevado a la industria petrolera a ser más productiva. Por ejemplo, ya no es más aceptable quemar gases en cabezas de pozo individuales, por lo cual se deberán diseñar nuevas líneas de flujo para su empleo con flujos de fases múltiples.

La economía desempeña un papel decreciente en la conservación del gas; se deberán encontrar mercados para el gas, dándose consideración a su desarrollo, son ejemplos la cogeneración de electricidad para uso local o la manufactura de fertilizantes. Además, deberán optimizarse los procesos existentes para eliminar emisiones o, por lo menos, su cantidad.

En los casos en que no se pueda evitar la emisión de contaminantes, se deberán realizar estudios con el propósito de reducir el impacto ambiental por medio de la reducción de la cantidad de contaminantes, reciclaje de la corriente de gas efluente o re-uso en otros servicios.

De manera similar, se deberá intentar reducir la cantidad de material de desecho generado durante el tratamiento de emisiones de aire, mediante el uso del proceso conocido como las Cuatro Rs: reducir, reusar, reciclar, recuperar.

Todas las instalaciones deben diseñar medidas de control para satisfacer o superar los objetivos de reducción de los niveles reglamentarios existentes. Estas instalaciones deberán ser diseñadas para requerimientos futuros esperados.

#### Información a la Comunidad

El público tiene serias inquietudes respecto a las emisiones a la atmósfera. Existe un sentimiento muy vívido de que la protección ambiental sólo puede lograrse a través de un esfuerzo permanente. Además, existen sospechas muy fuertes de que los gobiernos y la industria no resolverán adecuadamente este problema.

Se recomienda que los programas de control de las emisiones con la atmósfera den prioridad a la información pública. Al no hacerlo, se podría generar un nivel de presión tal que obligue a la instalación productiva a modificar significativamente sus operaciones.

## NIVELES DE CALIDAD DEL AIRE

Existen algunas dificultades para definir los niveles de calidad del aire en el área que rodea a una instalación de producción.

Asimismo, con la tecnología de muestreo existente no se pueden efectuar mediciones prácticas de campo sobre las emisiones liberadas por las antorchas. Sin embargo, los estudios han concluido que las antorchas presentan eficiencia de destrucción Química Orgánica Volátil por lo menos igual -o mayor- a las de cualquier otra tecnología disponible.

Los niveles de calidad del aire definen los niveles de emisión de diversos productos de combustión, los cuales se resumen en el cuadro 1 del Apéndice C. Se recomienda aplicar estos límites de emisiones a toda la instalación, en vez de a una unidad individual.

Los valores en el cuadro 1 se reproducen del cuadro 2 de "Concentraciones Máximas Aceptables de Contaminantes de Aire" que se encuentra en el "Reglamento para la Protección Ambiental en la Actividades de Hidrocarburos" y del documento de discusión Reglamento 308 de Ontario que se adjunta al presente como Apéndice B y proporciona los niveles de emisión sugeridos para la mayoría de contaminantes. Se deberá usar como guía en caso de ocurrir descargas.

Existen dos métodos de lograr este estándar: minimizando los volúmenes que requieren de disposición y aumentando la eficiencia de destrucción o quemado.

El capítulo 6 trata la Prevención de Químicos Orgánicos Fugitivos, recuperación de vapores y prevención de pérdidas de vapor. Donde existan mercados, se deberá conservar y vender la mayor cantidad de gas que se pueda. En donde no existan mercados, se deberá tener en cuenta la utilización del gas en las instalaciones de cogeneración con el objeto de generar electricidad, que sea más fácilmente transportada y con más capacidad de ser vendida. Si hay disponibilidad de grandes volúmenes, se deberán tener en cuenta los usos manufactureros: el metanol y el fertilizante úrea, los dos más comúnmente usados.

El capítulo 7 trata del quemado de gases y discute el diseño y la eficiencia de los sistemas de antorcha. Si se siguen estas guías, se obtendrá un buen sistema de antorcha con emisiones y efectos ambientales mínimos.

## REDUCCION DE VOLUMENES DE VAPOR (PERDIDOS)

El gas que se quema en la punta de la antorcha es gas desperdiciado y en verdad perdido. La conservación del vapor es esencialmente un ejercicio de prevención de pérdidas. Una verdadera pérdida de vapor ocurre cuando el gas se quema, se expulsa a la atmósfera o fuga.

En el Perú, todos los proyectos de hidrocarburos requieren la aprobación de un Estudio de Impacto Ambiental que debe incluir estudios de base. Se dará preferencia a los proyectos que utilicen el mayor recurso de hidrocarburos que sea posible (es

decir, que conserve y venda gas) y que minimicen el impacto ambiental.

El mejor método para conservar vapor es retener la mayor cantidad posible del hidrocarburo en solución, durante las etapas de procesamiento y almacenamiento. Por supuesto, esto deberá confrontarse y sopesarse contra las restricciones de venta de la presión de vapor del petróleo crudo.

Las opciones abiertas son:

1. Eliminar las fugas.
2. Utilizar los vapores localmente como combustibles, colchón de gas, etc.
3. Colectar y suministrar a los gaseoductos y plantas.

Las instalaciones de producción cuentan con equipos tales como separadores, separadores de agua libre, calentadores, tratadores y tanques que están sujetos a cierta pérdida de vapor. Todos estos ofrecen la posibilidad de conservar vapor.

Otras situaciones en las cuales la utilización del gas podría ser apropiada son:

1. Control de la presión de la tubería de revestimiento de pozo, es decir, reducción de la presión de la tubería de revestimiento de los pozos con bombeo para aumentar la producción de petróleo y de gas.

2. Instalación de un sistema colector para la venta o procesamiento adicional.

3. Recomprimir el gas del separador en una línea para ventas, con el fin de minimizar la presión operativa.

4. Recolección del gas como combustible en aplicaciones residenciales para la generación (y venta) de electricidad o para la manufactura de fertilizantes.

Las preguntas fundamentales que se deben plantear son:

1. ¿Cuánto gas se está expulsando o quemando?
2. ¿Existe un mercado o uso para este gas?
3. ¿Cuál es el valor del gas y de los líquidos?
4. ¿Cuál será el costo de la recolección y entrega?

La prevención de pérdidas reduce la cantidad de hidrocarburos fugitivos liberados a la atmósfera y deberá preceder a la recuperación. A continuación, se presentan algunas técnicas que se deberán considerar.

#### 6.2.1 Optimización del Proceso

Ajustar el proceso de manera que se retenga más vapor en el petróleo e incrementar el líquido de venta sin aumentar la producción.

Cada vez que se produce petróleo, existe una considerable disminución en la presión. Esta reducción de presión es muy importante ya que se libera vapor. A menudo es necesario calentar el petróleo durante el procesamiento. Esto incrementa adicionalmente la cantidad de vapor liberado.

Todas las reducciones de presión y procesos de calentamiento deberán optimizarse para cumplir con los requerimientos del proceso, al mismo tiempo que se minimizan las pérdidas de vapor.

Los equipos instalados en el proceso deben ser del diseño apropiado para el trabajo y deben ser eficientes.

A despecho del tipo de proceso empleado, deberá realizarse el examen regular y periódico de todos los ítems del equipo con el objeto de evaluar permanentemente su eficiencia.

La fuente más grande de liberaciones incontroladas de vapores de hidrocarburos a la atmósfera son los tanques de almacenamiento de la locación. Todas las conexiones y acoplamientos de los tanques deberán estar herméticamente selladas para evitar fugas tanto de líquidos como de vapor.

Las fugas en los acoplamientos se considerarán tan objetables como las que ocurran en el tanque mismo. Cuando los acoplamientos presentan fugas o cuando las escotillas permanecen abiertas, pueden ocurrir fugas, que constituirán una pérdida adicional a aquella normal por respiración.

Las pérdidas de tanques de almacenamiento convencionales de techo fijo, en algunos casos, se han reducido en un 50 por ciento haciéndolos herméticos a las fugas de gas. Se recomienda esta práctica para todos los tanques de almacenamiento de techo fijo que hay en el Perú.

El uso de válvulas P-V en los respiraderos de los tanques de almacenamiento reducirán las pérdidas por evaporación al almacenar el producto bajo una ligera presión y al minimizar la tendencia a "respirar" del tanque. La característica de alivio del vacío es un dispositivo de seguridad para prevenir daños en el tanque, si se intenta drenarlo sin compensar el espacio de vapor o si ocurre condensación en dicho espacio.

Una suposición de base es que el tanque y sus accesorios están herméticamente sellados para prevenir fugas de vapor. (Ver 6.2.3).

La pintura es importante para reducir las emisiones atmosféricas. La pintura blanca es un medio simple y efectivo para reducir las emisiones de tanques de techo fijo.

Una pintura blanca altamente reflectora reduce las pérdidas por respiración mediante:

- a. La reducción de la transferencia de calor hacia y desde el tanque.
- b. La reducción del aumento total de calor en el tanque, generado por la radiación solar, bajando la temperatura del volumen líquido y de la presión del vapor.

La publicación API 2518 incluye datos excelentes sobre pintura, pruebas y evaluación de la misma, en la medida en que ésta afecta las pérdidas.

#### 6.2.6 Cubiertas Flotantes Internas

Se pueden usar cubiertas flotantes dentro de los tanques de techo fijo con el objeto de minimizar pérdidas. Los diámetros disponibles fluctúan entre 300 y 8 pies.

Los flotadores internos se construyen usando paneles de aluminio o paneles con láminas tipo sandwich de fibra de vidrio-poliéster. No se recomiendan los "microbalones" o los métodos de cobertores plásticos flotantes debido a que se

hunden.

Los flotadores internos adecuadamente contruidos son tal vez más prometedores que cualquier otra técnica de prevención de pérdidas de vapor. Su uso se ve restringido por los oleoductos que no tienen capacidad para manejar crudos con una presión de vapor Reid de 12 psi o más, principalmente, a causa del almacenamiento en tanques de techo fijo a lo largo de los sistemas de oleoductos.

#### 6.2.7 Tanques de Techo Flotante Externo

Este tipo de tanque consiste en una armazón cilíndrica de acero equipado con un techo que flota en la superficie del líquido almacenado, subiendo y bajando con el nivel del líquido. La superficie del líquido está cubierta completamente por el techo flotante, excepto en el pequeño espacio anular entre el techo y la pared del tanque. Un sello (o sistema de sellado) anexo al techo contacta la pared del tanque y cubre el espacio anular. El sello se desliza contra la pared del tanque a medida que el techo baja o sube. El propósito del techo flotante y del sello es reducir la pérdida del líquido almacenado por evaporación.

Las instalaciones de producción poseen diversos equipos que están sometidos a cierta pérdida de vapor; cada uno de los ítems se revisa a continuación.

#### 6.3.1 Separadores Gas-Petróleo

Usualmente, el petróleo crudo fluye del pozo hacia un separador y luego a un tanque de la locación.

En el separador, el flujo se divide en gas y líquido a la temperatura y presión existentes. El comportamiento de la fase de la mezcla gas-líquido gobierna la distribución de los componentes intermedios, de modo que cualquier componente dado, como por ejemplo el butano, se distribuye como parte del gas y del petróleo.

Cuando el petróleo rico en gas deja el separador, puede pasar a través de una o más separaciones adicionales, en la medida en que la presión y temperatura varíen mientras se las reduce a las condiciones del tanque de la locación. Cuando el líquido ingresa en dicho tanque, se produce una nueva separación gas-petróleo, a presión y temperatura atmosféricas. Nuevamente, los hidrocarburos se distribuyen entre la fase gaseosa y la líquida. En todas las separaciones, algo del "petróleo crudo" permanece con el gas y algo del gas permanece en solución con el petróleo crudo.

El gas que ha permanecido en el petróleo crudo puede perderse del tanque convencional de techo fijo. Además de la pérdida de gas, hay una pérdida del volumen de crudo y disminuye la gravedad API.

Las separaciones gas-petróleo son operaciones importantes desde el punto de vista de las posibles pérdidas de hidrocarburos y especialmente respecto de posibles pérdidas posteriores en el volumen de petróleo, después que éste haya dejado los tanques de la locación.

La cantidad de vapores licuefactibles en el gas puede controlarse de dos maneras:

1. Controlando la presión y, donde sea posible, la temperatura de separación. Esto hará que la máxima cantidad de los componentes pase al tanque de la locación.
2. Instalando un sistema de recuperación de vapor para procesar los gases liberados.

Con el objeto de minimizar las pérdidas, un sistema de recuperación de vapor puede usarse de dos maneras:

1. Procesando vapores del separador, donde las condiciones están controladas, para distribuir un petróleo crudo estable hacia los tanques de la locación.

2. Procesando los vapores de los tanques de la locación.

Unas condiciones óptimas de proceso para la separación por etapas y unos separadores de alta eficiencia pueden maximizar la recuperación sea de petróleo o de gas.

El uso de gas de venteo para los combustibles de la locación también puede bajar los costos operativos.

### 6.3.2 Tratamiento de Emulsiones

El petróleo crudo que contiene agua en emulsión debe ser tratado antes de colocarse en los tanques de la locación. Para romper las emulsiones pueden emplearse sustancias químicas y calor.

El calor incrementará la pérdida de vapor de dos fuentes:

1. De la unidad de tratamiento, elevando la temperatura del petróleo.

2. De los tanques de la locación. Cuando el petróleo caliente tratado se coloca en estos tanques, aumenta la velocidad de evaporación.

En cierta medida, la pérdida de vapor generada por el calentamiento puede ser controlada. Se añade calor para elevar la temperatura del líquido al nivel deseado para romper la emulsión. El calor en el crudo tratado puede reducirse enfriándolo en intercambiadores de calor con la corriente ingresante. Sin embargo, la parafina y otros tipos de ensuciamiento de las superficies de intercambio de calor pueden constituir un problema.

La presión de la unidad de tratamiento puede controlarse, dentro de ciertos límites, para reducir las pérdidas. Existe una presión óptima de operación para cada petróleo crudo, que da por resultado la liberación de cantidades mínimas de constituyentes volátiles.

Las unidades de tratamiento deberán contar con una sección de separación gas-petróleo donde se pueda separar el vapor entrampado de la emulsión antes del tratamiento. Este vapor frío se mezcla con los vapores calientes de la sección de calentamiento y decantación para condensar las fracciones más pesadas y recuperarlas en el crudo tratado.

Los calentadores/tratadores deberán examinarse regularmente para asegurar que la temperatura de tratamiento no esté demasiado alta, o que el uso de la sustancia química adicional, así como de una diferente pueda permitir una temperatura de tratamiento más baja.

A medida que un reservorio se hace viejo, con frecuencia, se produce más agua con el crudo y las unidades de tratamiento se sobrecargan. El agua se calienta innecesariamente. Cuando se presenta esta condición, se recomienda la adición de un separador de agua libre.

La instalación de baterías centralizadas de tanques da por resultado diversas oportunidades del sistema de tratamiento. Las presiones de tratamiento en la batería son bajas, de manera que las estaciones satélites puedan fluir. Cada vez que la presión en



la línea para la venta de gas fluctúa y se eleva, el vapor del sistema de tratamiento será expulsado en forma intermitente; la frecuencia de esta expulsión puede justificar la instalación de una unidad compresora de recuperación o de refuerzo.

En los casos en que el volumen de vapor varía dentro de un amplio espectro, se pueden emplear compresores duales o se pueden instalar unidades accionadas por correas para lograr la flexibilidad requerida.

### 6.3.3 Estabilizadores

La estabilización puede proporcionar al operador el control de la presión y composición del producto. Algunas aplicaciones han indicado un incremento de 4-6% en producto recuperado en comparación con el que se obtiene con la separación por etapas.

Los estabilizadores pueden diseñarse para combinar diversas funciones, tales como:

1. Tratar (deshidratar) el petróleo
2. Estabilizar el petróleo y eliminar la necesidad de recuperar el vapor en los tanques de la locación.
3. Incrementar el API y obtener un premio sobre el precio del crudo.

Los estabilizadores se usan frecuentemente en un esquema de separación de múltiples etapas para un crudo con una presión de vapor de 12 psia (83 Kpa) que no producirá vapores en los tanques de la locación. Los estabilizadores pueden extraer selectivamente los hidrocarburos más livianos del crudo (es decir, el etano, propano y butano), permitiendo así la recuperación de una cantidad máxima del líquido en el tanque de almacenamiento. La presión de operación, por lo general, está por debajo de 50 psi (345 Kpa). Se recuperan los hidrocarburos más livianos venteados.

Dado que los estabilizadores son esencialmente torres de fraccionamiento, son necesarios trabajos de ingeniería considerables, requiriéndose de datos completos sobre las propiedades del crudo y otros datos sobre procesamiento para obtener el diseño apropiado.

### 6.3.4 Control de la Presión de la Tubería de Revestimiento del Pozo

La consolidación de locaciones que contienen pozos de bombeo ha generado pérdidas de producción. La alta presión de la tubería de revestimiento se puede deber a largas líneas de flujo y, en ciertos pozos, un incremento de la presión de revestimiento de 10-20 psi (70-140 Kpa) reducirá la producción.

Se debería conectar un compresor de recuperación de vapor a la tubería de revestimiento, minimizando los niveles de presión sin pérdidas de vapor.

### 6.3.5 Tanques de Almacenamiento de la Locación

El tanque de techo fijo es el estándar mínimo aceptado para el almacenamiento de petróleo crudo. Los tanques modernos se sueldan y se diseñan para no permitir fugas de líquido ni gas. Los tanques más antiguos, especialmente aquéllos de tipo ribeteados o con pernos, son de cuestionable hermeticidad.

La pérdida por evaporación en los tanques de almacenamiento de la locación puede ser alta, si el crudo se encuentra a una temperatura cercana al punto de burbuja y se manipula (se vacía/llena) con frecuencia el tanque. Además, durante el

almacenamiento, el crudo pasa por un ciclo diario de calentamiento y enfriamiento debido a la radiación solar. Esto produce lo que normalmente se conoce como "pérdida por respiración". Durante la parte caliente del día y primeras horas de la noche, la temperatura del tanque de almacenamiento aumenta y los vapores escapan. En la noche, el crudo se enfría y la presión del espacio del vapor disminuye debido a la condensación.

En tanques que operan a una presión de 2 1/2 psig (117 Kpa) o más alta, hay muy poca o ninguna pérdida por respiración.

El tanque también sufre una "pérdida por trabajo". Esta pérdida se asocia con un cambio del nivel de líquido en el tanque, que puede incluir el desplazamiento de vapor por el nivel de líquido en aumento y la vaporización brusca debido a un rápido vaciado del tanque. La vaporización se hace más lenta después de la expansión del espacio de vapor durante el vaciado, cayendo la presión parcial. El aire ingresa para mantener la presión atmosférica. Cuando la vaporización en el aire recién ingresado alcanza el equilibrio, el volumen de vapor excede la capacidad del espacio de vapor y ocasiona la emisión. Otras pérdidas pueden ocurrir por las aberturas. Un respiradero abierto da por resultado una pérdida alta, cuando los vientos causan cambios de presión en los tanques. Cualquier agujero en el techo, diafragma, sello o accesorio de un tanque también puede generar pérdidas.

Cierta cantidad de pérdida es inherente a los métodos de medición y muestreo manuales que requieren abrir un tanque a la atmósfera. Esta pérdida puede minimizarse a través del uso de un equipo de medición automático, puntos de medición de doble cierre y un sistema de termómetros y válvulas de muestreo en el armazón del tanque. No es una buena práctica abrir una escotilla de medición por más de unos minutos para medir o muestrear.

Entre los accesorios que ayudan a reducir la evaporación de los tanques de la locación se encuentran:

1. Un tipo de línea de llenado descendiente con ranuras diagonales, para minimizar la caída libre y las salpicaduras. La velocidad máxima del fluido en las líneas descendientes deberá ser de 0,25 pies/seg (0,075 m/seg).

2. Una válvula de cierre automático en cualquier línea de igualación que se cierre cuando se abre la escotilla de medición.

3. Una escotilla tipo ladrón de presión-vacío y una válvula del mismo tipo para la línea de venteo.

Se recomiendan todos estos accesorios.

#### 6.4.1 Válvulas de Presión-Vacío (P-V) para Tanques

La válvula de ventilación P-V es un dispositivo que inhibe la pérdida por evaporación al tiempo que protege el tanque de posibles efectos perjudiciales de la presión o el vacío excesivos. Cuando la presión dentro de un tanque excede el valor prefijado, el respiradero P-V se abre para liberar vapores hasta que se reduzca la presión debajo de dicho valor prefijado. Cuando se forma un vacío que excede el valor prefijado de vacío, la válvula P-V se abre para admitir aire hasta que el vacío se reduzca debajo del valor prefijado de P-V.

El uso de las válvulas P-V en tanques de almacenamiento reduce las pérdidas por evaporación. Se asume que el tanque y sus accesorios se encuentran en una condición de completa hermeticidad frente a los vapores.

La API (STD12) sugiere valores preestablecidos de P-V para diversos tipos de construcción de tanques, los cuales se adjuntan

como extractos en el Apéndice A.

#### 6.4.2 Cubiertas Flotantes Internas para Tanques de Techo Fijo

La instalación rápida es la característica de las cubiertas flotantes internas. No se requiere de soldadura ni se tiene que cortar el tanque para tener puertas que faciliten la instalación. Los tanques deben sacarse de servicio y purgarse el gas que puedan contener. Las cubiertas flotantes internas son muy livianas, necesitándose únicamente cables antirotación para preservar el alineamiento.

Es esencial una amplia ventilación del espacio de vapor. Areas de ventilación equivalentes a 0,20 pie cuadrado por pie (0,02 metros cuadrados por metro) de diámetro del tanque es, por lo común, suficiente para todas las velocidades de bombeo normales. Para obtener eficiencia aerodinámica, por lo general, se proporcionan cuatro respiraderos. Se considera deseable un espaciamiento máximo de no más de 32 pies (10 m) entre los respiraderos alrededor de la circunferencia. Además se deberá proporcionar un respiradero de punto alto, por lo menos con 50 pulgadas cuadradas (325 centímetros cuadrados) de área abierta. Los daños al techo ocasionados por el llenado excesivo pueden evitarse equipando el tanque con un rebose.

La instalación de una cubierta flotante interna es el método más barato de convertir un tanque de techo fijo existente en un tanque de conservación de vapor. El tiempo de instalación se puede estimar en un día por cada 10 pies (3 m) de diámetro de tanque.

Se recomiendan los techos flotantes internos para todos los tanques de almacenamiento de petróleo crudo. Si se está diseñando una nueva área de tanques, se deberían considerar evaluar los tanques de techo flotante externo junto con las alternativas de tanques de techo fijo más las cubiertas flotantes internas.

#### 6.4.3 Empaquetaduras y Prevención de Fugas

El tanque de techo fijo tiene diversas aberturas en el techo para permitir ventilación, medición y muestreo. Para mantener un techo hermético a la fuga de gases, los accesorios también deberán mantenerse en dicha condición.

Se deberán inspeccionar y reponer periódicamente las paletas de válvulas P-V. Las paletas de las válvulas de respiración metal-a-metal que se hayan torcido en servicio deberán fresarse para restaurar la condición de hermético a fugas de gas. Deberán reponerse los diafragmas defectuosos de las válvulas.

Las válvulas de respiración de sello líquido pueden resultar afectadas por la dilución o pérdida de líquidos, por lo que deben inspeccionarse, limpiarse y recibir mantenimiento en intervalos frecuentes.

Se recomienda que todas las empaquetaduras de los tanques sean confeccionadas con VITON o un producto similar.

El volumen de gas (y contenido líquido) que puede recuperarse o venderse, deberá determinarse con la mayor precisión posible antes de cualquier evaluación o diseño de la instalación.

La cantidad de recuperación de líquido a partir del gas dependerá principalmente de sus propiedades físicas y de la temperatura ambiental. Los cambios estacionales de la temperatura del ambiente tienen un gran efecto sobre el volumen de pérdida de vapor. Se debe recalcar que es esencial conservar todos los sistemas herméticos a las fugas de gas para poder

medir apropiadamente los vapores.

El aspecto más crítico (y a menudo el más descuidado) en la factibilidad de un sistema de recolección de gas de cabeza de revestimiento es la determinación del volumen de gas presente. Es fundamental conducir mediciones por pozo bajo las mismas condiciones en las que operará el sistema.

Se puede lograr la medición de las emisiones de tres formas básicas que se expondrán a continuación.

#### 6.5.1 Disminución del Producto Almacenado

Esto requiere la medición del contenido de un depósito antes y después de haberse producido la pérdida. Este método es aceptable para el almacenamiento estático cuando se permite el tiempo adecuado. La medición de pequeños cambios en grandes volúmenes almacenados podría requerir de varios meses para obtener resultados significativos.

Otra forma de medir las pérdidas por cambio en el volumen utiliza medidores de líquidos y el método de medición manual. Este método es adaptable sólo para tanques de trabajo. La diferencia entre el volumen que se mide al entrar y el volumen que se mide al salir, corregido por inventario, es la pérdida combinada de respiración y de trabajo.

#### 6.5.2 Cambios en las Propiedades del Producto Almacenado

Los cambios en la presión y la densidad del vapor durante el almacenamiento proporcionan la base para este método de medición de la pérdida por evaporación. Este método requiere de equipo especial de laboratorio, personal capacitado y muestras realmente representativas del líquido del tanque.

#### 6.5.3 Medición de Vapores Expulsados al Aire

El método directo es el más simple, más preciso y, por tanto, el preferido para medir vapores de cualquier fuente.

Una de las formas más comunes de medición directa es usar un medidor portátil de orificio para pozos, con fuelles de agua de 0-5 pulgadas o 0-10 pulgadas, más un registrador de presión. Este medidor puede usarse para medir vapor del tanque de almacenamiento o puede conectarse directamente a la cabeza de revestimiento para medir volúmenes de cantidades tan pequeñas como 500 pies cúbicos por día. El manómetro de registro deberá ser de rango estrecho, debido a la leve diferencial por medirse.

La presión en el tanque puede controlarse por el tamaño del plato instalado en el medidor de orificio para pozos. Con el objeto de obtener una prueba representativa, la presión deberá ser más o menos la misma que habría en el sistema de recuperación de vapores.

Otro dispositivo, y tal vez de mayor preferencia, es usar un medidor de Desplazamiento Positivo como el tipo de medidor de recuperación de vapor.

Las mediciones directas continuas deberán tomarse por varios días para obtener datos apropiados. Durante este tiempo, la gravedad y la cantidad de líquidos deberá determinarse, midiéndose la gravedad específica de los vapores con la mayor frecuencia posible a lo largo de la prueba.

La gravedad API puede variar considerablemente con la temperatura del líquido, de manera que se deben realizar mediciones de la misma tanto durante el día como de noche para llegar a un buen promedio. Se deberá registrar continuamente la temperatura del gas que fluye.

Otra técnica que generalmente se usa es la instalación de un compresor de alquiler para la recuperación de vapores. Aquí, el gas puede ser comprimido hasta aproximadamente 25 psig para su medición. Así se mejora la precisión de la medición y se pueden observar las condiciones operativas reales.

Para las evaluaciones y cálculos iniciales, el Boletín API 2522 describe métodos de pruebas relativamente simples que pueden usarse en el campo, cuando se busca cierta evidencia positiva que justifique los gastos por reducción de la pérdida de vapor.

La siguiente ecuación puede usarse para un estimado muy general de los vapores del tanque de almacenamiento:

$$Q = C \times P_s$$

donde: Q = cantidad de vapor del tanque de almacenamiento, pie cúbico estándar/barril de producto del tanque de almacenamiento

$P_s$  = presión de la última etapa de separación, psig

C equivale a los siguientes valores:

Gravedad o API del petróleo "C"

35 1,0

40 2,0

45 3,0

50 4,0

Por ejemplo: ¿cuál será la cantidad de vapores del tanque de almacenamiento disponibles de un separador que produce petróleo de 40o API? La presión de tratamiento es de 30 psig.

Q = vapor del tanque de almacenamiento (pies cúbicos/barril)

$$Q = 2,0 \times 30$$

Q = 60 pies cúbicos/barril de producto del tanque de almacenamiento

Los ingresos económicos directos de un sistema de recuperación de vapores resulta de las ventas del gas y líquidos recuperados. Otros factores que contribuyen podrían ser:

1. La seguridad de la locación mejorada a través de la disminución de riesgos de incendio y explosión. Además, se elimina la inhalación de vapores del tanque.
2. La reducción de la corrosión del tanque, ya que se evita que ingrese el aire.
3. La estabilización de la gravedad API del petróleo crudo.
4. El incremento en la producción a través del control de la presión en la tubería de revestimiento del pozo.
5. La reducción de la contaminación ambiental.

Los sistemas de recuperación de vapores típicos incorporarán uno o más de los siguientes sistemas:

1. Recolección de vapores
2. Separador de succión
3. Compresión
4. Motor de compresor
5. Controles
6. Equipo auxiliar

#### 6.7.1 Sistemas de Recolección de Vapores

Todo sistema de recolección de vapores, deberá mantenerse lo más corto posible. La caída total de presión en la línea de succión que va hacia un compresor no deberá exceder 0,25 pulgada de agua en las instalaciones de recuperación de vapores de tanques de almacenamiento.

Para las instalaciones que operan a niveles de presión más elevados (sobre 15 psig), la caída de presión no deberá exceder 1/10 de la presión operativa.

Las filtraciones permiten que el aire se mezcle con los vapores de hidrocarburos y creen una mezcla inflamable que puede ser encendida por el calor de la compresión. Se puede generar corrosión, ineficiencia de la operación o problemas de ventas. Las líneas de recolección del sistema de vacío deberán probarse con un mínimo de 100 psig.

Los líquidos se acumulan en las líneas recolectoras y generan caídas de presión innecesarias. Esta situación puede resolverse con la instalación de goteras o drenes de punto bajo. Además, se deberán instalar filtros inmediatamente al frente del compresor.

Otras características a tener en cuenta cuando se diseñan los sistemas de recolección son:

1. Instalación de válvulas de bloqueo para permitir el aislamiento de secciones para su reparación.
2. Localización de controles y dispositivos de cierre de emergencia de modo que se pueda cerrar la unidad desde una ubicación remota.
3. Localización de antorchas y equipo de medición.
4. Instalación de válvulas de contrapresión y de seguridad.

#### 6.7.2 Separadores de Succión

Los separadores de succión evitan que los líquidos ingresen en el compresor. Normalmente son depósitos verticales, diseñados para manejar corriente con proporciones altas de gas a líquido. Este tipo de depósitos es típico de las instalaciones para recuperación de vapores de los tanques de almacenamiento.

Los separadores deben equiparse con un conmutador de nivel de líquido para parar el compresor antes de que los líquidos puedan ser arrastrados.

### 6.7.3 Compresores

El compresor es muy importante y su funcionamiento puede determinar el éxito o el fracaso de la instalación. Tanto los compresores reciprocantes como los rotatorios se utilizan para el servicio de recuperación de vapores.

Los compresores reciprocantes son máquinas en las cuales el elemento compresor es un pistón en un cilindro. Tiene válvulas accionadas por resortes que se abren sólo cuando existe la presión diferencial apropiada. Esta característica da a la unidad reciprocante una gran flexibilidad para acomodar variaciones en las presiones de succión y de descarga. Las unidades reciprocantes son las más extensamente usadas de todos los equipos de compresión y se presentan en una amplia gama de tamaños y tipos. Por lo general, son las máquinas más eficientes para la mayoría de aplicaciones.

El compresor de aletas tiene una estrecha gama de capacidad y presión comparada con los diseños reciprocantes, debido a sus límites inherentes impuestos por las longitudes de las aletas y las fuerzas de flexión que actúan sobre la aleta cuando se encuentra en posición extendida.

El compresor de aletas no tiene válvulas. Los tiempos en el ciclo, cuando la admisión y descarga están abiertas, son determinados por la localización de las aberturas por las cuales pasan las aletas.

Para relaciones de compresión mayores se pueden emplear etapas múltiples. La segunda etapa es otro compresor diseñado para operar en serie con el de la primera etapa. Por lo general se requiere de enfriamiento y separación de líquidos entre etapas.

La lubricación apropiada es esencial para la buena operación del compresor. El aceite va tanto hacia los cojinetes como a diversos puntos en el cilindro. Se recomienda diez veces más aceite para lubricar una unidad de aletas que el usado para lubricar la respectiva unidad reciprocante.

La suciedad, óxido, escamas, etc. pueden pasar a través del compresor y, dado que las aletas normalmente están hechas de asbesto con láminas de material fenólico, es muy fácil que ocurran daños. Los filtros de arranque y las instalaciones de filtros permanentes deberán tenerse en cuenta para excluir los sólidos.

El compresor de tornillo helicoidal es bastante similar al tipo rotatorio de aletas en sus características generales, dado que también tiene una relación de compresión fija "incorporada". La relación de diseño incorporada o de diseño se determina por la localización de los bordes de abertura de la ranura de descarga y el ángulo de vuelta de los lóbulos.

Los diseños varían en el ángulo de la hélice y en el contorno de los lóbulos. Los lóbulos en los dos rotores no son idénticos en la mayoría de los casos. El rotor accionado por el motor (macho) tiene una forma que se adapta a la cavidad del rotor hembra.

Este tipo de compresor manejará un arrastre razonable de líquidos.

Es posible trabajar en dos etapas si se disponen las máquinas en serie. Por lo general, se requiere de enfriamiento y separación de líquidos entre etapas.

El compresor de tornillo helicoidal tiene características de funcionamiento que se acercan al tipo reciprocante. Puede operar a velocidades moderadas consistentes con los motores eléctricos.

Las desventajas son las siguientes:

1. Ruidosos
2. Presentan fugas internas (deslizamiento)
3. Más caras

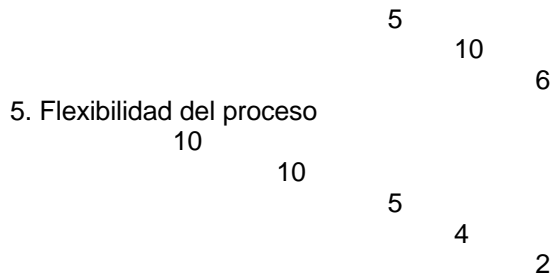
Los compresores de pistón líquido y de lóbulos son unidades de baja eficiencia, no recomendadas para el servicio de recuperación de líquidos.

Esencialmente, la selección del tipo apropiado del compresor se determina por comparación de los requerimientos de presión máxima de la aplicación con los máximas capacidades de presión de los tipos disponibles. La medición de la presión de la línea de ventas es muy importante debido a que las presiones intermitentes más elevadas, pueden ocasionar serios problemas en las unidades de aletas, helicoidales y de pistón líquido, en particular. El cuadro A resume los factores relevantes.

Otros factores muy generales se pueden clasificar en una escala de uno a diez, con diez como la mejor puntuación, en la forma siguiente:

	Reciproc. Horiz.	Reciproc. Vertical	Tipo helic.	Tipo Aletas	Tipo lóbulos
1. Expectativa de vida	8	10	4	4	
2. Costo de capital	6	6	7	10	9
3. Costo de cimentación	1	2	10	10	10
4. Problemas de ruidos	9	9			





El requerimiento de potencia también es una base principal para la selección y el diseño del compresor, motor y componentes.

El requerimiento real de potencia es relacionado con un ciclo teórico a través de la eficiencia de compresión. Esta es la relación de la potencia teórica a la potencia real del gas, sin incluir pérdidas por fricción mecánica.

Debido a posibles variaciones en la cantidad de flujo, deberá considerarse la selección del control de capacidad del compresor. La salida de los compresores deberá regularse para igualar el suministro del sistema.

Los métodos de control de la salida de las unidades reciprocantes pueden resumirse, para unidades de velocidad constante, en la forma siguiente:

Tipo de control	Rango de control	observaciones
Control por derivaciones (by pass)	0-100%	Requiere válvula de control tuberías y, a veces, un enfriador. Proporciona el mejor control
Obturación de succión	25 - 100%	No tan caro como la derivación, pero proporciona control menos eficiente.
Elevadores de válvula de succión	0-50-100%	No tan caro. Buenos para ajuste manual. Pueden ser automáticos
Bolsillos de tolerancia	0-100%	En promedio, caros. Proporciona control razonable.

Para unidades de velocidad variable, como los motores de gas, se puede diseñar cierta variación en la velocidad.

La mayoría de los compresores reciprocantes no deben tener carga antes de su arranque. El mejor método para no tener carga es una derivación hacia la succión (by pass). Los compresores reciprocantes pueden usar un control automático de arranque y parada, siempre que se proporcionen sistemas automáticos para quitarle carga para el arranque.

Los métodos de control de "velocidad constante" incluyen:

- a. Bloqueo de la succión
- b. Obturación de la succión
- c. Derivación externa (by pass)

El bloqueo de la succión, combinado con una válvula de alivio para reducir la presión dentro del compresor mientras que está sin carga, es una de las técnicas. Una válvula de retención de descarga (válvula check) es necesaria para prevenir el flujo de retorno de la línea.

Algunas unidades de aletas pueden arrancarse sin el uso de un dispositivo especial para quitar la carga, dado que la velocidad debe alcanzar entre 40 y 50% de la velocidad total antes de que las aletas estén totalmente extendidas y se inicie la compresión. Se deberá consultar con el fabricante.

La unidad de aletas de impulsión directa deberá operar satisfactoriamente hasta con un 40 por ciento de fluctuación en el volumen. La unidad impulsada por correas proporcionará más flexibilidad. En algunos casos, se puede requerir de un cambio de roldanas en invierno y otro en verano. Se pueden aplicar los sistemas automáticos de encendido y apagado. Consultar con el fabricante.

El compresor de tornillo helicoidal puede usar el control automático de arranque y parada, siempre que esté provista de sistemas adecuados para quitarle la carga al compresor.

Se puede usar, como en el caso de las unidades reciprocantes, el control de velocidad variable.

La obturación de la succión no debe usarse hasta el punto en que la temperatura de descarga se vuelva excesiva. Además, esta máquina nunca debe operarse con la admisión cerrada.

Para arrancarse, los compresores de tornillo helicoidal deben estar sin carga, lo que puede lograrse mediante derivación de la descarga a la succión (by pass) o por venteo de la descarga a la atmósfera.

Las unidades de recuperación de vapores de los tanques de almacenamiento, por lo general, están diseñadas para operar intermitentemente.

Los requerimientos de potencia y las características operativas de la mayor parte de unidades de recuperación de vapores tienen al motor eléctrico como el dispositivo de accionamiento preferido. En el cuadro B del apéndice C, se muestra un panorama de los dispositivos de accionamiento usados para este servicio.

El motor de inducción de jaula de ardilla es el dispositivo de accionamiento de compresores más ampliamente usado, particularmente hasta 200 HP. Estos motores son sólidos y confiables. Pueden ser de correas, engranajes, directamente acoplados o acoplados con bridas.

En la selección del motor debe considerarse la altitud, dado que mientras más baja sea la densidad del aire, menor es el enfriamiento. Los motores estándar reciben su velocidad plena a una altitud de 3 300 pies. A mayores alturas, el aumento permisible de temperatura; debe reducirse en 1 por ciento por cada 330 pies por encima de los 3 300, o 3 por ciento/1 000 pies. Para compensar, el factor de servicio deberá reducirse, o bien se usará una clase superior de aislamiento.

En las instalaciones de recuperación de vapores en tanques de almacenamiento, el compresor arranca cuando la presión del tanque alcanza un nivel predeterminado y sigue funcionando hasta que dicha presión caiga a un nivel mínimo.

La presión del tanque de almacenamiento se controla mejor por una válvula de diafragma. Mientras mayor sea el volumen de operación en el área de medición, mejor operará este control. El rango aproximado para operar esta válvula es el siguiente:

- a. Operar en el rango de 1,0 a 1,5 pulgadas de agua.
- b. Desviar la descarga del compresor al separador de succión a 0,75-1,0 pulgada de agua.
- c. Parar el compresor por encima de 0,5 pulgada de agua de presión de succión.
- d. Arrancar el compresor a 1,5-1,75 pulgadas de agua de presión de succión.

La mayoría de tanques de almacenamiento se diseñan para una presión operativa de alrededor de 2 oz por pulgada cuadrada; por lo tanto, es necesario que las válvulas de seguridad que se van a instalar puedan ventilar adecuadamente sin ocasionar daños al tanque.

Los ítems típicos que debe contener el panel de control son los siguientes:

- a. Botón de arranque/parada para motores eléctricos
- b. Botón de restablecimiento de poder
- c. Paradas por:
  1. Baja presión de succión
  2. Alta presión de descarga
  3. Alta temperatura de descarga
  4. Alto nivel de líquido del separador de succión
  5. Bajo nivel de aceite en el lubricador
  6. Alta temperatura de cojinetes

Los sistemas de antorcha tienen una amplia aplicación en la industria del petróleo: desde la perforación y la producción pasando por diversos tipos de procesamiento hasta la comercialización. Cada sistema de antorcha presenta consideraciones especiales de aplicación. Gran parte de la investigación realizada sobre las antorchas ha sido efectuada sobre refinerías, en esta guía se han adaptado dichos resultados a los emplazamientos de exploración y producción.

El diseño de los sistemas de antorchas es un tema complejo. Sobre la base de los requerimientos de aplicación, el diseñador del sistema de antorcha debe considerar los siguientes puntos fundamentales de diseño:

- q Encendido
- q Prevención de infiltraciones de aire
- q Remoción de líquidos
- q Localización
- q Supresión de humos
- q Ruido
- q Otros niveles de emisión

Además, el diseñador debe tomar en cuenta el ambiente de la antorcha, los mecanismos de falla de la antorcha y las técnicas de diseño que puedan mejorar la vida de la antorcha. Deberá existir una conciencia permanente de que el diseño y la operación nunca deben comprometer el objetivo primordial del sistema de antorcha: la disposición segura y efectiva de gases.

Los gases y líquidos indeseados o liberados pueden provenir de una amplia variedad de fuentes, tales como:

- v Emergencias en la planta
- v Venteos de emergencia
- v Gases de la cabeza de revestimiento
- v Gases del manipuleo de productos
- v Gases y líquidos de procesamiento
- v Pruebas de la producción de pozo petrolero
- v Derrames de petróleo
- v Subproductos de la producción de petróleo

Sin tener en cuenta la fuente o la situación, el objetivo primordial del sistema de antorcha debe ser la disposición segura y efectiva de gases. Todos los aspectos del sistema deben apuntar a cumplir este objetivo. No se puede permitir que consideraciones secundarias, como el deseo de incrementar la vida del quemador de antorcha, comprometan la seguridad.

Tan pronto como el diseñador de la instalación empiece a trabajar en el sistema de la antorcha, debe tomar conciencia de ciertos factores que pueden influir en el diseño del equipo de quemado de gases. Los principales de estos factores son los siguientes:

- q Velocidad del flujo
- q Composición de los gases
- q Presión disponible del gas
- q Temperatura del gas
- q Costos y disponibilidad de energía
- q Requerimientos ambientales
- q Requerimientos de seguridad
- q Requerimientos sociales

Un diseñador debe conocer todas estas variables antes de empezar la especificación del equipo. A continuación se comenta brevemente sobre algunos de estos factores.

La velocidad del flujo afecta obviamente el tamaño de la línea, así como de la radiación y puede tener otras influencias. Por ejemplo, el quemado sin generación de humo de pequeñas cantidades de un gas puede ser simple cuando se compara con el quemado de mayores cantidades del mismo gas.

La composición del gas puede influir sobre el diseño de la antorcha en una serie de formas. La relación en peso del hidrógeno al carbono (H/C) puede afectar considerablemente el quemado sin producción de humo. El sulfuro de hidrógeno o grandes cantidades de materias inertes requieren de consideraciones especiales de diseño. La experiencia demuestra que el uso apropiado de la energía potencial (presión) de una corriente de gas puede mejorar significativamente el proceso de combustión.

Nunca se debe comprometer la seguridad en el diseño de grandes sistemas. Los detalles sobre el uso que se pretende, especificaciones de la aplicación, etc., deben discutirse abiertamente.

Luego de haberse informado sobre los aspectos esenciales de estos factores, el diseñador deberá dirigir su atención hacia ciertas consideraciones de diseño. Algunos de los puntos por considerar son los siguientes:

- w Encendido
- w Prevención de infiltraciones de aire
- w Remoción de líquidos
- w Supresión de humos

w Ruido

w Localización

w Llamas visibles

w Recuperación de recursos

Un proyecto dado debe considerar todos estos puntos.

La remoción de líquidos es una consideración importante. En el Perú, todo el quemado de líquidos debe hacerse sin emisiones importantes de humo y sin exceder las concentraciones permisibles de contaminantes. (Artículo 43, Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos).

En todo sistema de antorcha, existe el potencial de arrastre de líquidos. El simple hecho de prolongar la línea no asegura la remoción adecuada de los líquidos; velocidades de flujo tan bajas como de un metro por segundo pueden mantener partículas de gran tamaño en suspensión.

La separación completa de gas-líquido puede hacerse a través de una trampa de neblina apropiadamente diseñada. El desentrapado debe complementarse por medio del espacio adecuado para retención de líquidos, así como con medios de remoción.

Los sistemas comerciales de antorcha son de dos tipos básicos: antorchas elevadas y antorchas de tierra. Las elevadas se usan para la disposición de desechos gaseosos generados durante emergencias en la planta (fallas de energía, incendios, falla de componentes) y, en consecuencia, se usan en conjunción con sistemas de descarga de vapores en la manufactura de sustancias químicas de gran escala, en las operaciones de refinación de petróleo y en la instalación de producción de campos petrolíferos. Otras aplicaciones limitadas incluyen la ventilación de tanques de almacenamiento y plataformas de carga.

A pesar de que, con frecuencia, se inyecta vapor, agua y aire en el quemador de la antorcha elevada para reducir el humo y la luminosidad, el énfasis del diseño se ha puesto más bien en la disposición rápida y segura de los vapores antes que en el control de la polución. Los sistemas de antorcha de tierra recientemente desarrollados representan un alejamiento del diseño convencional. Con el nuevo énfasis en la reducción de ruidos, emisiones químicas, calor y luminosidad, estas antorchas se van haciendo cada vez más populares para la disposición de las

descargas de rutina. Incluyen la disposición de los gases inflamables que fugan del proceso y de las válvulas de seguridad, de las corrientes residuales del proceso y el exceso de producto o productos que no cumple con las especificaciones.

### 7.3.1 Antorchas Elevadas

Los sistemas de antorcha elevada proporcionan un medio para la disposición de corrientes residuales gaseosas con un rango casi ilimitado de flujos y caídas de presión de 0 a 60 pulgadas de H<sub>2</sub>O.

Los criterios de diseño de los sistemas de antorcha elevada se orientan exclusivamente hacia la combustión segura antes que eficiente de los desechos gaseosos. De conformidad con ello, los cálculos de las dimensiones se basan en la caída permisible de la presión y en la dispersión de la radiación térmica o la dispersión de gases tóxicos cuando ocurre la extinción de la antorcha. La descarga de líquidos en el sistema de antorcha puede causar problemas; para la remoción de líquidos se requiere de cilindros "separadores" o de desentrampado de líquidos.

### 7.3.2 Antorchas Protegidas a Nivel del Suelo

Las antorchas a nivel del suelo con combustión protegida se están empleando en conjunción con la antorcha elevada, como respuesta al reciente énfasis que se pone en el problema de la contaminación. Las antorchas de bajo nivel, a pesar de ser relativamente costosas en cuanto a construcción y mantenimiento, son efectivas ya que reducen el ruido y las emisiones térmicas.

Existe relativamente poca información respecto de sus dimensiones. El diseño de antorchas de bajo nivel comprende una estructura externa de acero, revestida con material refractario. La estructura externa sirve para atenuar las llamas y para prevenir la radiación térmica y luminosa. El material refractario protege la estructura de acero de la exposición directa a los efectos de las altas temperaturas y materiales corrosivos, además, mejora la eficiencia de combustión al minimizar las pérdidas de calor. Los espesores refractarios varían de 4 a 8 pulgadas. El material refractario usado proporciona una respuesta más lenta ante cambios abruptos en el flujo de gas, contribuyendo significativamente en los costos de construcción y mantenimiento de una antorcha de bajo nivel. Debido al calentamiento lento, asociado con la construcción refractaria, la antorcha de bajo nivel generalmente se usa solo para velocidades de flujo bajas o continuas, mientras que la antorcha elevada, de diseño convencional, se usa para acomodar alteraciones repentinas.

### 7.3.3 Equipos Auxiliares

Los equipos auxiliares para el sistema de la antorcha incluyen encendedores, pilotos y equipo de seguridad. Normalmente se proporcionan cilindros separadores para la remoción de líquidos del gas. Se usan sellos de agua, parallas y sellos moleculares para aislar la torre de la antorcha del sistema de recolección de venteos. Los generadores de gas de purga y las trampas de neblina sirven para evitar la formación de mezclas explosivas dentro de la torre de la antorcha. El

mantenimiento del nivel de líquido en los sellos de agua y cilindro de desentrampado es un punto fundamental; existen disposiciones de sistemas de control del nivel de líquido y de alarma para estos sistemas. Los quemadores pilotos, con frecuencia, vienen equipados con sistemas de detección de llamas y de alarma.

### 7.3.4 Costos

Los elevados costos de la antorcha varían considerablemente debido a los costos desproporcionados de los equipos auxiliares

y de control, así como por el costo relativamente bajo de la torre y quemador de la antorcha. Como resultado de ello, los costos de los equipos rara vez dependen del diámetro. Los costos típicos fluctúan entre \$50 000 y \$500 000. Las antorchas de bajo nivel son aproximadamente diez veces más costosas para capacidades similares.

Los costos operativos se determinan principalmente por los costos de combustible para el gas de purga y quemadores piloto; por el costo del vapor que se requiere para quemar gases sin producir humo y por los costos de energía y mantenimiento en los sistemas asistidos por aire. Sobre una base de 30 centavos por millón de BTUs de requerimiento de combustible, los elevados costos operativos típicos para la torre de la antorcha (dos pies de diámetro de torre) son de alrededor de \$1500 al año.

### 7.3.5 Rendimiento y Emisiones de la Antorcha

Dado que el quemado de gases tradicionalmente se ha usado para la disposición segura de gases descargados durante condiciones de emergencia, los patrones de rendimiento que se refieren a la eficiencia de combustión y emisiones gaseosas son limitados. Los contaminantes del aire provenientes de antorchas elevadas incluyen CO, hidrocarburos no quemados y particulados. Se deberán esperar estos contaminantes de cualquier proceso de combustión que comprenda grandes llamas de difusión turbulenta y que son el resultado del enfriamiento de dichas llamas. Temperaturas de llama relativamente bajas se observan de manera típica tanto en las antorchas elevadas como en las de bajo nivel. Esto da por resultado factores bajos de emisión de NO<sub>x</sub>, comparados con otros tipos de equipos de combustión industrial. En el Perú, se exige la medición e información de todos estos contaminantes. Ver capítulos 5 y 8 de esta guía.

En muchas instalaciones de exploración y producción, se producen grandes volúmenes de gas. Estos gases son desechos, subproductos o el resultado de fugas en el equipo operativo que provienen de condiciones de emergencia en la operación normal de una planta en donde los gases deben expulsarse para evitar presiones peligrosamente altas en él; provienen también de los arranques de planta y de las paradas de emergencia. Grandes cantidades de gases pueden resultar de los productos que no pueden ser vendidos. Los flujos son típicamente intermitentes con velocidades de flujo, durante emergencias más graves, de varios millones de pies cúbicos por hora.

El método de control preferido para el exceso de gases y vapores es recuperarlos en un sistema de recuperación de vapor. Sin embargo, grandes fluctuaciones en la cantidad de gas, especialmente durante condiciones de emergencia, son difíciles de contener y procesar. En el pasado, todos los gases residuales se expulsaban directamente a la atmósfera; pero la expulsión generalizada ocasionaba problemas de seguridad y ambientales. Por lo tanto, actualmente, en la práctica se acostumbra recolectar dichos gases en un sistema cerrado de antorcha y quemarlos a medida que se descargan de una torre de antorcha elevada. Alternativamente, los gases pueden descargarse y quemarse a nivel del suelo con protección contra llamas.

El sistema de antorcha se usa principalmente como un método seguro para la disposición de los gases residuales excesivos. Sin



embargo, el sistema de la antorcha en sí puede presentar problemas adicionales de seguridad. Estos incluyen el potencial de explosión de la antorcha, peligros de radiación térmica de la llama y el problema de asfixia tóxica durante el apagado de la antorcha. Aparte de la seguridad, existen otros varios problemas asociados con el quemado de gases, los cuales deben tratarse durante el diseño y la operación de un sistema de antorcha. Estos problemas caen dentro del área general de las emisiones de las antorchas e incluyen la formación de humo, la luminosidad de la llama, ruido durante el quemado y la posible emisión de contaminantes del aire durante las operaciones de quemado de gases.

#### 7.4.1 Aplicaciones del Quemado para la Disposición de Gases Residuales

Existen tres aspectos fundamentales que se toman en cuenta al decidir la manera como quemar un gas residual. Estas son: (1) la variabilidad del flujo, (2) el volumen máximo esperado y (3) el contenido de calor.

Una alta variabilidad del flujo es el factor más importante. Una antorcha se diseña para operar prácticamente una gama infinita de flujos que van de más a menos. Los sistemas alternativos de disposición de gases residuales, como los incineradores o los dispositivos de combustión posterior, necesitan un control adecuado del flujo y pueden usarse únicamente en flujos de gas razonablemente continuos.

El volumen también es un factor importante. Con volúmenes muy grandes, la combustión directa de llamas por incineración o un dispositivo de combustión posterior de llamas se hacen imprácticas debido al tamaño del equipo que se requiere. La capacidad de una antorcha elevada puede incrementarse fácilmente aumentando el diámetro de la torre. Una antorcha pequeña típica, con una torre de cuatro pulgadas de diámetro, tiene una capacidad de 30 000 scfh. Una antorcha con una capacidad de 5 000 000 scfh requeriría de una torre de antorcha con un diámetro de sólo 36 pulgadas.

El contenido de calor de un gas determina dos clases. Los gases bien pueden mantener su propia combustión o bien pueden no hacerlo. En general, un gas residual con un valor de combustión mayor que 200 Btu/pie<sup>3</sup> puede quemarse exitosamente. Por debajo de 200 Btu/pie<sup>3</sup>, podría ser

necesario enriquecer el gas residual mediante la inyección de un gas con valor de combustión alto. La adición de dicho gas se denomina quemado endotérmico. No es factible quemar un gas con un valor de combustión menor a 100Btu/pie<sup>3</sup>. Si el flujo del gas con bajo BTU es continuo, se puede emplear la incineración para su disposición. Para flujos intermitentes de este tipo de gas, el quemado endotérmico es la única posibilidad.

Las antorchas son adecuadas para disponer de flujos intermitentes de grandes y pequeños volúmenes de gases que tienen un valor de combustión apropiado para mantener la combustión. Para flujos intermitentes de gases residuales con bajo valor de combustión, deberá añadirse más combustible a la corriente de gas residual. Dado que el valor del combustible adicional puede ser considerable y se pierde completamente durante el quemado, el proceso de quemado endotérmico puede resultar costoso. Sin embargo, si los flujos intermitentes de gases residuales con bajo calor son grandes, la única alternativa práctica es expulsar

los gases directamente a la atmósfera. Esto es inaceptable por razones ambientales.

La mayoría de antorchas se usan para disponer de los flujos intermitentes. Existen algunas antorchas continuas, pero éstas deberán usarse para pequeños volúmenes de gases: 500 cfm (15 m<sup>3</sup>/min) o menos. El valor de grandes flujos continuos de un alto valor de combustión es demasiado elevado. Es preferible la recuperación de vapores o el uso del vapor como combustible para el calentador del proceso al quemado de gases. Para grandes flujos continuos de gas con valor de combustión bajo, se debería añadir combustible complementario al gas en un incinerador protegido, en vez de hacerlo en la llama de una antorcha. Para flujos continuos pequeños de gases, algunas veces se emplean las antorchas aún cuando el combustible o el calor se pierda o desperdicie. En estos casos, los costos por equipo son a veces más importantes que los ahorros en combustible, por lo cual el uso de una antorcha resulta más económico.

Las antorchas se usan, en su mayoría, para la disposición de hidrocarburos. Los gases residuales compuestos de gas natural, propano, etileno, butadieno y butano, probablemente constituyan más del 95% del material quemado. Las antorchas se han usado para controlar exitosamente los gases malolientes como los mercaptanos y las aminas. Sin embargo, se debe tener cuidado al quemar estos gases. A menos que la antorcha sea muy eficiente y tenga buena combustión, humos nocivos pueden escapar sin quemarse y ocasionar problemas.

Se deberá evitar el quemado de sulfuro de hidrógeno debido a su toxicidad y bajo umbral de olor. Inclusive el quemado de pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno puede crear suficiente dióxido de azufre para ocasionar daños a los cultivos o disturbios locales. No se recomienda la disposición por quemado de gases cuyos productos de combustión ocasionen problemas, como aquéllos que contienen sulfuro de hidrógeno o hidrocarburos clorinados.

#### 7.4.2 Métodos de Quemado de Gases

La antorcha elevada es el sistema que más comúnmente se usa en la actualidad. En esta antorcha, se descarga el gas sin una mezcla previa sustancial, se enciende y se quema en el punto de

descarga. La combustión de los gases descargados tiene lugar en el aire atmosférico del ambiente por difusión. Este tipo de combustión por lo común genera un suministro insuficiente de aire y, por tanto, una llama humeante. La legislación peruana exige una llama sin humo, la cual puede obtenerse con una cantidad adecuada de aire de combustión, mezclado con el gas para que pueda quemarse completamente. El quemado sin humo se cumple mediante el uso de un mezclado especial de aire y coronas de inducción de la antorcha o mediante la inyección de vapor en la llama.

La antorcha elevada moderna permite que se quemen con seguridad y economía grandes volúmenes de gases residuales. Sin embargo, la antorcha elevada también puede presentar otros problemas, incluyendo la emisión a la atmósfera de ruido, luz y contaminantes químicos del aire. La legislación exige la minimización de las emisiones de ruido y luz, especificando los niveles máximos de los demás contaminantes. Ver capítulo 5, cuadro 1.

Un segundo tipo de antorcha es la de tierra. Una antorcha de tierra consiste en un quemador y sus accesorios localizados al nivel del suelo o cerca de éste. El quemador puede o no tener protección, pero debe permitir el libre escape de la llama y de los productos de combustión. Las antorchas de tierra presentan la ventaja de ser capaces de tener protegida la llama. En comparación con las antorchas elevadas, requieren de más terreno, si no están protegidas, o bien los quemadores, controles y protección pueden resultar más costosos que una torre. Además, si el sistema de encendido o piloto falla, la antorcha de tierra no puede dispersar los gases tan bien como una antorcha elevada.

Un tercer sistema que puede emplearse donde el ruido, la luminosidad y la formación de humo son criticados por los residentes locales, es una antorcha de tierra de "bajo nivel" protegida, usada en conjunción con una antorcha elevada. Más del 95% del tiempo, la carga que va a la antorcha es menor que el 10% de la capacidad de diseño. La antorcha de tierra de "bajo nivel" está diseñada para manejar este volumen, mientras que los grandes volúmenes restantes por liberar usan ambos sistemas. Este sistema, llamado antorcha integrada, puede reducir considerablemente las emisiones de humo, ruido y luz que ocasionan las quejas.

El quemado de tiro forzado, en donde el aire de combustión es mecánicamente soplado para premezclarlo con el gas antes del encendido, es ideal en cuanto se refiere a la combustión. Este tipo de antorcha consigue el quemado sin humo, sin necesidad de usar la inyección de vapor. Sin embargo, este método tiene una proporción limitada de rechazo y requiere de una torre mucho más grande para el aire de combustión que se añade. Este enfoque se ha utilizado para algunas aplicaciones especiales, por lo general, no es un procedimiento económico.

Si hay un flujo continuo de gas, se deberá considerar un sistema de recuperación de vapores. Mientras que la recolección, almacenamiento y retorno del gas es costoso, el desecho continuo de gas puede serlo aún más. Los gastos de capital para comprimir inmensos volúmenes, liberados

en forma intermitente e irregular, exceden los gastos de la operación de quemar el gas. Muchas instalaciones tienen un sistema de tres componentes para los gases residuales, el cual consiste en un sistema de recuperación de vapores, una antorcha de bajo nivel para la mayoría de ocurrencias de antorcha, que sobrecargan el sistema de recuperación de vapor, y una antorcha elevada para grandes liberaciones de emergencia que sobrecargan la antorcha de bajo nivel.

Un sistema de protección de alta integridad nunca puede eliminar totalmente las válvulas de descarga de seguridad en una planta y, en consecuencia, la necesidad de una antorcha. Sin embargo, la carga a la antorcha se reduciría considerablemente y se usará dicha antorcha sólo en situaciones de emergencia mayores.

Este capítulo describirá el equipo disponible para el quemado de gases residuales y presentará los datos sobre costos relativos a los diferentes sistemas.

### 7.5.1 Antorchas Elevadas

El sistema de antorcha elevada se compone de la corona de la antorcha, algún tipo de trampa de gases directamente debajo de la corona, un sistema de piloto y encendido en la parte superior de la corona de la antorcha y, finalmente, la torre y su soporte. Cuando se requiere quemado sin humo, también se debe proveer un sistema de inyección de vapor en la parte superior de la antorcha. Los sellos de agua y cilindros separadores también son necesarios generalmente por razones de seguridad.

Una corona de antorcha debe ser capaz de operar sobre un amplio rango de proporciones de rechazo. Para lograrlo, la antorcha debe tener una excelente llama que mantenga las características de capacidad y mezcla. El mantenimiento de la llama se asegura proporcionando pilotos múltiples continuos alrededor de la corona de combustión. La corona de la antorcha por lo general está hecha de acero inoxidable o de alguna otra aleación resistente a altas temperaturas y a la corrosión.

El quemado sin humo se puede lograr con coronas de antorcha especiales que inyecten agua, gas natural o vapor en la llama, aumentando la mezcla aire-gas para asegurar la combustión completa. La inyección de agua presenta muchas desventajas, incluyendo la formación de hielo en el invierno, neblinas durante el verano, así como la alta cabeza de presión que se requiere para una antorcha elevada y una proporción de rechazo mucho menor que el vapor, haciendo que el control sea muy difícil con la posibilidad de apagar la llama.

El vapor es el elemento más frecuentemente usado para el quemado sin humo. Hay dos técnicas básicas de inyección de vapor que se usan en las antorchas elevadas. En un método, el vapor se inyecta directamente de las boquillas en un anillo externo que se encuentra alrededor de la parte superior de la corona. En el segundo método, el vapor se inyecta por una boquilla única ubicada concéntricamente en la corona del quemador. Los proveedores utilizan diversos tipos de boquillas para crear un efecto circular, helicoidal, de abanico, de chorro o Coanda.

Los reglamentos ambientales exigen que las antorchas no emitan humo para las grandes relaciones de rechazo. Para asegurar la operación satisfactoria, se han combinado los dos tipos de inyección de vapor en una misma corona. La boquilla interna proporciona vapor a velocidades bajas de flujo, mientras que los chorros externos se encuentran disponibles para grandes velocidades de flujo.

Mientras que estos son los tipos más comunes de coronas, existen varios otros tipos disponibles para propósitos especiales. En una modificación de corona de inyección de vapor, se usa una boquilla interna para inyectar tanto vapor como aire en la corona. Se requiere de una corona más grande debido al incremento en la caída de la presión y porque los gases pueden quemarse en el interior de la corona. El quemado en el interior de la corona puede acortar drásticamente la vida de la misma. Se puede usar una punta con mezclador de vórtice a chorro con gases de relativamente alta presión, que requieren de muy poco o nada de vapor para las operaciones sin humo. Otras coronas para propósitos especiales se encuentran a disposición, incluyendo las coronas endotérmicas que inyectan gas para elevar el valor de combustión de la corriente y coronas con adición

de mufles para un quemado más silencioso.

La inyección de vapor a la corona de la antorcha se puede controlar manual o automáticamente. Se recomienda el control automático porque reduce el uso de vapor, reduce considerablemente la cantidad de humo y minimiza el ruido. Los sistemas automáticos utilizan dispositivos de medición de flujos con control de proporción sobre el vapor. Dado que la medición de la velocidad de flujo no puede incluir las variables del grado de saturación y peso molecular, el control de proporción por lo general se fija para cierta composición de hidrocarburos promedio. Por lo general, es necesario tener una cantidad fija de vapor que fluye en todo momento para enfriar las boquillas de distribución en la corona.

Para prevenir la migración de aire en la torre de la antorcha como resultado de los efectos de viento o la diferencia de densidad entre el aire y el gas de la antorcha, se mantiene un flujo de gas de purga continuo a través del sistema de la antorcha. El sistema se puede purgar con gas natural, gas procesado, gas inerte o nitrógeno. Para reducir la cantidad de gas de purga requerido y mantener el aire fuera del sistema de antorcha, por lo general se colocan dispositivos para atrapar gas en la torre, directamente debajo de la corona de la antorcha.

Un tipo de trampa de gas que se encuentra disponible en el mercado es el sello molecular. Este tipo de trampa puede no evitar que el aire penetre en la torre como resultado del enfriamiento de gas en los colectores de la antorcha. Se encuentran disponibles sistemas de instrumentación para aumentar automáticamente la velocidad de purga y evitar así que el aire ingrese en la torre durante el rápido enfriamiento del gas. Otro desarrollo en las trampas de gas es el Sello Fluido. Este sello pesa mucho menos que el molecular y puede colocarse mucho más cerca de la corona de la antorcha.

El mecanismo de encendido de una antorcha consiste en los quemadores pilotos y los encendedores del quemador piloto. Los quemadores pilotos sirven para encender los gases que fluyen hacia afuera y para mantener el encendido del gas. Estos pilotos deben proporcionar una llama estable para encender los gases de la antorcha y, en muchos casos, para mantenerlos encendidos. Para lograrlo, se usan dos o más -por lo general, tres o cuatro- quemadores pilotos. Además, algunas veces, los quemadores pilotos se proporcionan con protectores de viento separados.

Se debe suministrar un sistema separado para el encendido del quemador piloto, para efectos de protección contra fallas de la antorcha. El método usual es encender una mezcla de gas- aire en una cámara de encendido por medio de una chispa. El frente de llamas viaja a través de un tubo encendedor hacia el quemador piloto en la parte superior de la antorcha. Este sistema permite que el encendedor se coloque a una distancia segura de la antorcha, hasta de 100 pies, y aún así encienda satisfactoriamente los pilotos. El dispositivo completo está montado en un panel de encendido e instalado en un lugar accesible en el suelo. El panel de encendido debe ser a prueba de explosiones, tener una vida ilimitada y no ser sensible a todas las condiciones climáticas. En las antorchas elevadas, la llama del piloto usualmente no es visible, por lo que es deseable un

sistema de alarma para indicar una falla en la misma. Por lo general, esto se hace a través de una termocupla en la llama del quemador piloto. En caso de una falla de la llama, la temperatura cae y suena una alarma.

Se usan diferentes métodos para soportar la torre de la antorcha completa. Estas torres deben proporcionarse con una escalera que posea una jaula y una plataforma en el extremo superior para propósitos de reparación y mantenimiento. Las torres pueden fluctuar entre 150 y 400 pies de longitud. Las torres de antorcha con una relación de longitud a diámetro no menor de 30, generalmente se construyen como torres auto soportantes; las torres con una relación de  $L/D < 100$ , tienen un soporte conformado por un único conjunto de vientos o tirantes; cuando la proporción es de  $L/D > 100$ , las torres son confeccionadas con dos o más conjuntos de vientos. Las torres autosoportantes en la mayoría de las veces no se construyen con más de 50 pies de longitud debido a los grandes y costosos cimientos que requieren.

Los vientos necesitan una gran área para torres altas. A menudo, es preferible construir soportes de acero a los cuales se fija la torre. Por lo común, se trata de un armazón de acero con una sección transversal cuadrada, ensanchada en la base. Una sección transversal triangular es más económica y se ha usado en varios casos. La torre de la antorcha se expandirá debido al flujo de gas caliente, por lo cual la estructura de soporte debe tener la capacidad de acomodar esta expansión.

Los sellos de agua y los parallamas se usan para evitar que un frente de llamas ingrese en el sistema de la antorcha. Los parallamas presentan la tendencia a taponar y obstruir el flujo y no son capaces de detener un frente de llamas en una mezcla de aire con hidrógeno, acetileno, óxido de etileno y disulfuro de carbono, de modo que son de poco valor.

Los sellos de agua se usan para evitar que un frente de llamas y aire ingrese en el sistema de recolección de gases de la antorcha. El peso del sello de agua hace que éste se localice a nivel o casi a nivel del suelo y por lo tanto no puede usarse para evitar que el aire ingrese en la torre.

Los cilindros separadores se ubican en o cerca a la base de las antorchas elevadas para separar los líquidos de los gases que se están quemando. Si no se eliminan las grandes gotas líquidas, podrían quemarse mientras caen al suelo. Diseñadas para transportar gases, las líneas de antorcha pueden contener líquidos de las descargas de expansión de líquidos, el líquido arrastrado de las descargas de gas y vapores condensados. El cilindro separador se usa para eliminar estos líquidos antes de que se quemen los gases. Los sellos de agua y los cilindros separadores se encuentran en la mayoría de sistemas de antorcha por razones de seguridad.

#### 7.5.2 Antorchas de Tierra

Una antorcha de tierra consiste en un quemador y sus accesorios, como un sello, quemador y encendedor piloto. Uno de los tipos consiste en los quemadores convencionales que descargan horizontalmente sin protecciones. Esta antorcha debe

instalarse en una gran área abierta para su operación segura y por protección contra incendios. Si el sistema de encendido no funciona, no es capaz de dispersar los gases como lo haría una antorcha elevada. Este tipo de antorcha de tierra sólo tiene aplicaciones limitadas.

Las antorchas de tierra también pueden consistir en múltiples quemadores protegidos dentro de un casco refractario. El propósito esencial de una antorcha de bajo nivel es la atenuación total de las llamas de la antorcha, así como el quemado sin humo a un nivel bajo de ruido. Los gases quemados se conectan por un colector múltiple a una serie de cabezas de quemador que descargan el gas en la protección refractaria. Se obtiene la mezcla del gas y el aire por una serie de boquillas múltiples a chorro. El aire para la combustión es proporcionado por el tiro natural dentro del casco protector. Se logra el quemado sin humo con poco vapor, o en ausencia de éste, debido a la turbulencia y temperatura del quemado. El tamaño de la protección depende de la

capacidad de la antorcha, pero puede ser bastante grande. Una antorcha de tierra protegida, con una capacidad de 25 000 lb/hr tiene un casco de 100 pies de alto y 20 de diámetro. Esta misma capacidad podría manejarse con una antorcha elevada de 8 pulgadas de diámetro.

El costo inicial de una antorcha, protegida de tierra generalmente limita su capacidad a solo una porción de las tasas de descarga de emergencia de una planta. Sin embargo, la antorcha de tierra puede diseñarse para manejar la mayor parte de operaciones de antorcha, mientras que las grandes liberaciones restantes pueden desviarse hacia una antorcha elevada. Este tipo de sistema de antorcha integrado actualmente se está haciendo común, especialmente en áreas pobladas.

### 7.5.3 Antorchas de Tiro Forzado

La antorcha de tiro forzado utiliza el aire proporcionado por un soplador para proporcionar aire y turbulencia primarios, necesarios para el quemado sin humo de los gases de descarga, sin el uso de vapor. Este tipo de antorcha combina el quemado sin humo con costos operativos bajos y buena confiabilidad debido a que el tiro forzado es menos afectado por el viento.

Sin embargo, esta antorcha también tiene un costo inicial alto. El costo puede ser de dos a tres veces el costo de una antorcha convencional, principalmente porque son necesarias dos torres para mantener separados el gas y el aire hasta que se mezclen y enciendan en la corona. Una antorcha de soplador deberá tener un dispositivo automático de rechazo del aire para evitar que un exceso de aire apague las llamas y cree humo, si se reduce la velocidad del gas. Sopladores o compuertas de velocidad variable, conectados a dispositivos de detección de flujo, se han usado en estas antorchas para extender su proporción de rechazo. Debido a las limitaciones de costos y de proporción de rechazo, esta antorcha se ha usado mayormente en aplicaciones especiales para proporcionar quemado sin humos cuando no hay disponibilidad de vapor. También se ha utilizado

en transferencia y ventilación de tanques y en conjunción con una antorcha elevada sin control, con el objeto de brindar quemado sin humo durante el quemado de gases cotidianos.

#### 7.5.4 Comparación de Costos de los Sistemas de Antorcha

Los costos de capital y operación para un sistema de antorcha dado dependen de la disponibilidad de vapor, del tamaño de la antorcha, de la composición del gas residual y de la frecuencia del quemado de gases. Cada instalación es un problema especial, cuya economía debe resolverse conforme al caso específico.

Vanderlinde estimó el costo relativo del equipo usado en los sistemas de antorcha sin generación de humo. Los costos de equipo incluyen una torre con vientos, tubería de encendido, tubería de pilotos, anillo quemador y accesorios. Como se muestra en el cuadro a continuación, Vanderlinde descubrió que el costo relativo de los sistemas de antorcha sin humo no dependían del diámetro de la torre. Por otro lado, el costo relativo del equipo para un sistema de aire forzado sí depende del diámetro, dado que se adquiere una torre dentro de otra.

#### COSTOS RELATIVOS DE LOS SISTEMAS DE ANTORCHAS

Tipo de Antorcha	
	12" día
	24" día
Corona estándar con humo	1,00
	1,00
Corona de vapor sin humo	1,25
	1,25
Corona de gas	1,30
	1,30
Corona de agua	1,20
	1,20
Tiro forzado	2,80
	3,38

Las antorchas protegidas de bajo nivel, con la capacidad equivalente de una antorcha elevada, pueden resultar hasta 10 veces más costosas. Por esta razón, la antorcha protegida sólo se diseña para manejar operaciones de antorcha de poco volumen y cotidianas.

Esta discusión cubre factores de importancia en la locación de la antorcha, el equipo involucrado y el diseño.

#### 7.6.1 Sistema de Antorcha



Un sistema de quemado de gases consiste en instalaciones para poner en combustión -con seguridad- hidrocarburos que se expulsan a una caída de presión que no compromete los sistemas de seguridad de la planta. La condición operativa ideal sería eliminar la necesidad de antorchas, según se discutió en el capítulo 6. Sin embargo, las instalaciones para recuperar grandes cantidades de hidrocarburos liberados bajo condiciones de emergencia no son económicamente justificables.

Un sistema de quemado típico consiste en una serie de tuberías dentro de una unidad (incluyendo una mezcla de válvulas y respiraderos para regular la presión), una línea hacia la locación de la antorcha, un cilindro separador para eliminar hidrocarburos líquidos de la corriente de gas, un sello líquido opcional para proporcionar presión de colector positiva, sin tener que compensar y proteger contra el retorno de llama, una torre de antorcha con corona de antorcha, un sistema opcional de asistencia para mantener un encendido sin humo, un sistema de gas combustible para las luces pilotos junto con encendedores e instrumentación. El sistema típico de quemado de gases maneja la descarga de todo lo que expele una unidad dada o varias unidades dentro de una planta.

El diseño de un sistema de antorcha es una tarea compleja. Como con cualquier unidad de proceso, el diseñador debe estar familiarizado con todos los factores que influyen en el producto deseado. El propósito del presente punto es revisar estos factores y ofrecer soluciones específicas que satisfagan los criterios anteriormente señalados.

#### 7.6.2 Múltiple de Colección

El sistema de antorcha puede definirse de manera que incluya todo el equipo: desde la boquilla de descarga de alivio de un depósito hasta el proceso de combustión de la antorcha. La primera pieza del equipo que realmente ve o inicia una descarga es la válvula de alivio del depósito. En condiciones operativas anormales o de emergencia, este dispositivo permite que los flujos de gas/líquido escapen del depósito hacia el colector.

Los criterios de diseño para las válvulas de alivio están bien documentados en las publicaciones API RP-520 y RP-521. Estos documentos proporcionan guías específicas para determinar la presión de descarga y el flujo de descarga requerido para cualquier depósito dado. La mayoría de sistemas de antorcha consiste en múltiples válvulas de alivio que descargan en uno múltiple de colección común o sistema colector. En muchos sistemas, se utilizan colectores de descarga de baja presión y de alta presión separados. Esto permite la segregación de las válvulas de alivio desde las fuentes de alta presión, como los depósitos, torres, etc., y de fuentes de baja presión como tanques de almacenamiento y limpieza de coches tanques. Los gases de cada múltiple de colección son quemados a través de una sola antorcha. Un aspecto clave que influye en el diseño del sistema de antorcha es la contrapresión permisible para la válvula de alivio. La caída permisible de la presión del sistema desde la descarga de la válvula que pasa a través de la corona de la antorcha es igual a la contrapresión permisible de la válvula de alivio. En un sistema de válvulas de descarga múltiple, este valor es igual a la más baja de las válvulas del colector. Este

valor se ha mantenido limitado a un máximo del 10 por ciento de la presión mínima establecida para la válvula de alivio.

Utilizando válvulas de descarga operadas por asiento balanceado o por piloto, esta contrapresión permisible puede aumentarse hasta en un 50 por ciento de la presión establecida, pero esto no es recomendable.

El aumento de la contrapresión permisible de la válvula de alivio puede tener varios efectos sobre los componentes del sistema de antorcha, por ejemplo:

- a) Colectores y tuberías más pequeños.
- b) Cilindros separadores y de sello líquido más pequeños.
- c) Mayores tamaños de las válvulas de alivio.
- d) Antorchas más pequeñas con velocidades más bajas de purga y vida operativa mejorada.
- e) Reducción significativa o eliminación de servicios (aire, vapor, etc.) requeridos para el quemado sin humo, a través de la utilización de la energía cinética incrementada en la corona de la antorcha.

Los ahorros en costos de capital del equipo, como resultado del incremento en la caída de presión, son atractivos, pero no constituyen el factor principal por considerar. Los ahorros por reducción en los costos operativos continuos pueden ser muy significativos durante la vida de un sistema de antorcha promedio. El ahorro sólo en la reducción de purga puede ser de hasta el 99%.

### 7.6.3 Cilindros

Un sistema de antorcha adecuadamente diseñado incluye por lo menos dos depósitos para propósitos especiales: un cilindro de sello líquido y un cilindro separador. Estos depósitos sirven, cada uno, para una función especial tendiente a aumentar la seguridad del sistema total.

El potencial de introducción de líquido, o de formación de condensados (vapor de hidrocarburos o de agua) en el colector de la antorcha es inherente a todo sistema de antorcha. Si se permite que esta fase líquida llegue a la zona de combustión, se producirán por lo menos dos serios problemas. Si hay grandes gotas presentes, existe el potencial de que se produzca una lluvia de fuego de hidrocarburos desde la llama. Esto puede dar por resultado gotas flameantes que cubran el área o líquido flameante que se derrame de la corona de la antorcha, generando un serio peligro para la instalación y el personal. La incorporación en el sistema de un cilindro separador adecuadamente diseñado puede resolver este problema. El segundo inconveniente es la presencia de gotas parejas muy pequeñas, que pueden reducir dramáticamente la capacidad de la antorcha de funcionar sin humo. Las gotas muy pequeñas, que pasan a través del cilindro separador, con frecuencia se condensan para formar gotículas mayores en la corriente del sistema que sale del cilindro separador. Este problema puede eliminarse

localizando el cilindro separador muy cerca o en la base de la torre de la antorcha. La remoción de gotas líquidas muy pequeñas no se puede lograr a través de una simple reducción en la velocidad de la corriente de gas. Para eliminar efectivamente las gotas líquidas muy pequeñas, deberá emplearse un ciclón centrífugo modificado para superficies húmedas u otro dispositivo similar.

El diseñador deberá garantizar que la capacidad de retención del cilindro sea suficiente para cualquier taco previsto de flujo líquido. Además, la capacidad de bombeo debe ser adecuada para evacuar el cilindro. Se deberá disponer o almacenar todo condensado removido por el cilindro separador.

El sello líquido se instala en un sistema de antorcha para proteger el colector de antorcha de la infiltración de aire y el potencial retorno de llama asociado. Una antorcha elevada, llena de gas más liviano que el aire, debido al peso molecular o a la temperatura, tendrá una presión manométrica negativa en la base, como resultado de esta flotación de gas. Si existe presión negativa en la base

de la torre, el sistema colector completo de la antorcha estará bajo presión negativa. La operación del sistema de la antorcha bajo presión negativa aumenta considerablemente el potencial de infiltración de aire en el sistema colector a través de filtraciones o válvulas abiertas. La instalación de un sello líquido en el sistema asegura que la presión positiva en el colector de la antorcha reduzca significativamente el potencial de infiltración de aire.

Un sello líquido apropiadamente diseñado puede funcionar como parallamas positivo. Las pruebas indican que el sello líquido puede diseñarse para detener efectivamente la propagación de las llamas que resultarían inafectadas por los parallamas convencionales de tipo laberinto. La localización del sello líquido en la base de la torre ofrece la máxima protección del sistema, aislando completamente la fuente de encendido de la antorcha de las unidades del proceso y del colector múltiple de la antorcha.

Un sello líquido con componentes internos impropios puede operar con un efecto acoplado entre el líquido sellante y el flujo de gas para producir un sistema no amortiguado. El resultado es una presión sinusoidal versus tiempo de respuesta. Esta variación da por resultado una llama tipo bocanadas que hace imposible que se realice un quemado de gases eficiente, sin humo. La solución es añadir amortiguación a través de los componentes internos adecuadamente diseñados.

El sello líquido y el cilindro separador pueden combinarse en un solo depósito de dos componentes. Una combinación de sello líquido y cilindro separador localizada en la base de la torre de la antorcha proporciona varios beneficios:

- q Los dos cilindros se encuentran en una locación de procesamiento óptima.

- q El depósito puede actuar como parte de una estructura de soporte integrada.

Se acumulan ahorros significativos de costos en las siguientes áreas:

- v Se pueden ahorrar dos cimientos
- v Se pueden eliminar las tuberías entre los depósitos
- v El acero del cilindro puede usarse como parte de la torre de la antorcha

#### 7.6.4 Ubicación de la Antorcha

La economía y la seguridad dictan por lo general la cantidad y la ubicación del espacio de tierra asignado a la antorcha. Los reglamentos de seguros a menudo dictan la proximidad permisible de la antorcha a otros equipos e instalaciones del proceso.

En un área fijada, se pueden utilizar diferentes tipos y configuraciones de antorchas. Existen tres tipos básicos de sistemas a disposición:

La ubicación también tomará en consideración las demás estructuras erigidas en el área. Otra complicación con frecuencia pasada por alto es la localización de los alambres de los vientos y su posible interferencia.

La dirección y velocidad del viento afectan la radiación del calor, influyendo en la longitud y ángulo de la llama. El diseño normal emplea la velocidad promedio del viento y toma en cuenta toda posible dirección del mismo.

Las inversiones de temperatura y otras condiciones meteorológicas afectan la estabilidad atmosférica y reducen la dispersión de olores, concentraciones tóxicas y humo. Estas condiciones se deben considerar en base a la frecuencia de las ocurrencias de inversión de la temperatura y el efecto esperado en la población del área. Donde ocurren inversiones de temperatura, es posible que los máximos niveles permisibles de emisión (capítulo 5, cuadro 1) se excedan en el punto de medición especificado (ver capítulo 8) .

El tipo de gas por quemar afecta el diseño y el tamaño de la corona de la antorcha. No es aceptable diseñar sólo en base al peso molecular. Algunos gases se queman sin gases de apoyo, mientras otros, tales como los gases con bajo contenido de BTU, deben ser suplementados. Algunos gases requieren de asistencia para poder quemarse sin emitir humo. La selección del método de asistencia es importante en la seguridad de la antorcha. ¿Cuál es el grado de confiabilidad del medio de asistencia? ¿Estará éste disponible en las cantidades necesarias durante una emergencia? ¿Cuál método de asistencia es el más económico?

Al revisar la composición del gas, la primera preocupación es garantizar la eficiencia de destrucción. Una buena eficiencia de destrucción se asegura si se puede establecer una llama estable. El logro de esto supone diferentes técnicas para diversas propiedades del gas.

Una de las reales preocupaciones en cuanto a seguridad es que se transporten materiales inapropiados hacia el sistema de la antorcha. El gas acuoso descargado a 500oF en 1000 pies de colector de descarga frío, podría ser un sólido al otro extremo

de la línea. La línea de vapor conectada a la línea de descarga podría generar un bloque de hielo en clima de invierno. Estos factores deben considerarse en un diseño seguro.

Otro aspecto es dónde ocurre la descarga de alivio. El bloqueo del colector de la antorcha significa la pérdida de la protección de la válvula de alivio. Esto puede ocurrir por gas húmedo o por un sistema deficientemente dimensionado que coloca contrapresión excesiva en la válvula de alivio. La disposición y la selección de la válvula de alivio -más las instrucciones de operación del sistema de alivio- necesitan considerar este problema.

A medida que los gases residuales entran en combustión, cierta cantidad del calor producido se transfiere en la forma de radiación térmica. El nivel de radiación producido a grandes velocidades de flujo de gas puede poner en peligro al personal tanto en estructuras a nivel del suelo como en aquéllas elevadas que se encuentren cerca de la antorcha. Además, las estructuras de madera, como las torres de enfriamiento, también pueden ponerse en peligro. Esta radiación normalmente controla la altura de la torre de la antorcha. Durante las operaciones normales, su intención es limitar la intensidad del calor al nivel del suelo hasta niveles que sean lo suficientemente bajos para que los puedan soportar los humanos, así como para proteger los equipos de daños por calor. La intensidad de calor se mide en términos de BTU/hr/pie cuadrado. El nivel de diseño recomendado para áreas de planta es de 1500 Btu/hr/pie cuadrado. Este nivel de intensidad permitirá que una persona adecuadamente vestida realice funciones normales en el área. Los equipos pueden soportar hasta 3000 Btu/hr/pie cuadrado. Cuando se efectúa trabajo de mantenimiento por encima del nivel del suelo mientras la antorcha está en operación, los trabajadores de mantenimiento, si no toman precauciones especiales, pueden recibir más calor del recomendado.

Por lo general, la mayor liberación de gas (y de calor) ocurre cuando se presenta una dificultad importante; por ejemplo, pérdida de energía eléctrica, pérdida de agua de enfriamiento o incendio. Una descarga de gas de este tipo es una verdadera situación de emergencia. La adición de las capacidades de la válvula de alivio de aquellas válvulas comprendidas en el peor caso de emergencia dictarán la velocidad de diseño que debe manejar la antorcha. El tamaño del volumen del sistema usualmente amortiguará los picos temporales. (Deberá notarse que las válvulas de alivio en los depósitos pueden no abrirse todas o permanecer abiertas simultáneamente).

El uso por varias unidades de una misma antorcha complica el dimensionamiento debido a la probabilidad de que varias unidades descarguen a la antorcha al mismo tiempo. Las dimensiones de la antorcha deberían tomar en cuenta la posibilidad de que ocurra una falla común que pueda ocasionar que se descargue hacia la misma antorcha al mismo tiempo.

Otro caso por considerar es la radiación de más de una antorcha en una sola área. En este caso, no sólo se deberá considerar la radiación combinada, sino que también se deberá considerar, al establecer la distancia entre las antorchas, el trabajo de mantenimiento por encima del nivel del suelo en una antorcha, mientras la otra esté en operación.

Las expansiones de unidades normalmente aumentan la posible liberación de calor desde una antorcha. Cualquier adición considerable deberá automáticamente generar la revisión de la liberación de calor y efecto de la radiación. Por seguridad, podrá requerirse una corona de antorcha nueva y, tal vez, una torre más alta. La caída de la presión del colector es una función especialmente crítica en este escenario.

Otro método que se puede utilizar para reducir la radiación es el concepto de antorcha de puntos múltiples. Utilizando un número de coronas de antorcha pequeñas, pero de alta eficiencia, en lugar de una sola corona grande se puede reducir considerablemente la longitud total de la llama y su capacidad de emisión. Como resultado, se obtiene una altura menor de la torre y una llama más limpia.

Este tema ha sido previamente discutido, en el capítulo sobre los cilindros separadores. Si el sistema de antorcha que se está diseñando presenta potencial de emisiones de líquido, se debe asumir que eventualmente ocurrirá cierto arrastre. Tanto la dirección prevaleciente del viento como el equipo que funciona en condiciones donde no lo hay deberán tenerse en cuenta al momento de seleccionar la ubicación de la antorcha, así como si se va a utilizar una antorcha de tierra o elevada.

Las antorchas adecuadamente diseñadas y operadas son muy efectivas para convertir los hidrocarburos potencialmente tóxicos y explosivos en productos de combustión seguros, ambientalmente más aceptables. Pueden lograrse eficiencias de destrucción de más del 99,9 por ciento. Algunos gases típicos de las antorchas de plantas de procesamiento (aquellos que contienen azufre, cloro, etc.) son tóxicos tanto cuando están en su forma en combustión como cuando no lo están. Para el quemado de gases que contienen tales compuestos tóxicos, se debe dar el tamaño apropiado a la antorcha y se debe asegurar el encendido a través del uso de pilotos constantemente encendidos. Los compuestos tóxicos en su forma después de combustión y combinados con los otros productos de combustión deben dispersarse de manera adecuada en la atmósfera para proporcionar concentraciones seguras a nivel del suelo (CNS).

Las concentraciones a nivel del suelo son una función de la velocidad del flujo contaminante, velocidad del viento, condiciones atmosféricas, velocidad de descarga y altura efectiva de la torre. Están a disposición algunos métodos aceptados por la industria que calculan la CNS de contaminantes. Todos dan resultados similares dependiendo del terreno y de los límites del modelo. Los niveles más bajos de CNS, en la dirección del viento, comúnmente se obtienen de antorchas de tierra protegidas. Esto es debido a que la altura efectiva de la torre es mayor que en las unidades elevadas. La combustión protegida en una antorcha de tierra crea temperaturas mayores con el resultante incremento en la elevación térmica.

Una concentración objetivo de diseño al nivel del suelo, en la dirección del viento, es de 0,10 ppm o menos. Para la mayoría de sustancias tóxicas o nocivas esta concentración es satisfactoria: sin embargo, hay algunas cuantas sustancias para las cuales,

incluso esta pequeña concentración, es demasiado alta y se generan severas molestias de olor o deterioro de suelos.

En el capítulo 5, cuadro 1, se dan los límites para los compuestos tóxicos más comunes en campos petroleros (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO), los mismos que son considerados en la legislación peruana en vigencia. El volumen 2 del manual "Disposal of Refinery Wastes, Waste Gases and particulate Matter", publicado por el Instituto Estadounidense del Petróleo, recomienda los límites que se indican para las siguientes sustancias:

Compuesto ppm

alcohol isobutílico 0,003

alcohol isoamílico 0,0026

mercaptano de metilo 0,041

mercaptano de etilo 0,0028

mercaptano de n-propilo 0,0016

mercaptano de n-butilo 0,001

mercaptano de isoamilo 0,00043

p-tiocresol 0,0027

sulfuro de metilo 0,0037

sulfuro de etilo 0,000056

sulfuro de propilo 0,011

sulfuro de n-butilo 0,015

Las preguntas sobre el mantenimiento pueden cambiar el diseño del sistema: ¿Se puede retirar de servicio al sistema cuando la unidad está parada? ¿Cuántos días podrá estar fuera del servicio el sistema por reparaciones? El vaporizado y la purga de una unidad reducen el tiempo disponible para trabajar en la antorcha.

¿Hay otras torres que estén descargando en el área que harían peligroso trabajar en altura debido a la concentración de contaminantes o a la radiación de calor? Con frecuencia, las estructuras elevadas se pasan por alto en las evaluaciones de diseño.

#### 7.6.5 Purgado

Las antorchas pueden plantear uno de los más serios peligros de seguridad para la instalación, si se operan inadecuadamente. Existe el potencial de que se produzca una explosión o detonación seria en cualquier sistema de antorcha.

Dos de los tres elementos requeridos para una explosión están siempre presentes en un sistema de este tipo. El combustible está disponible en la forma de descarga y fuga de gases en el sistema. Los pilotos proporcionan una fuente constante de encendido. La seguridad del sistema de antorcha depende, pues, totalmente de evitar que el oxígeno (aire) se infiltre en la antorcha. El sello líquido del que ya se ha discutido puede mantener una presión positiva del gas en el colector de la antorcha y evitar el ingreso de una fuente de aire. La torre de la antorcha por encima del sello líquido y los sistemas de antorcha que no contienen sellos líquidos, generalmente son protegidos por la introducción de un gas de purga.

Dado que los costos de energía se han incrementado, se ha venido dando mayor atención al costo de estos gases de purga. Al mismo tiempo, se han incrementado los esfuerzos por reducir o eliminar las fugas de las válvulas de alivio. El resultado neto es la reducción de dichas fugas, así como los esfuerzos simultáneos por reducir los requerimientos de gas de purga, los cuales han producido una reducción importante en el flujo normal hacia la antorcha. Hay disponibles diversos tipos de dispositivos de sellado para reducir el gas de purga que se requiere para proteger el sistema de la antorcha.

Se ha probado que los sellos de densidad de gas son dispositivos confiables, de conservación efectiva de la purga, a través de años de operación en el campo. Este tipo de sellos ofrece las velocidades de purga más bajas posibles, la máxima seguridad y un reembolso extremadamente rápido en ahorros de purga.

Los sellos de densidad de gas operan mediante el establecimiento de bolsones segregados de gases de diferente composición y densidad. El ingreso de aire se restringe a la velocidad de difusión en la que el oxígeno puede penetrar estos bolsones de densidad de gas, tal ingreso es bloqueado completamente mediante el mantenimiento de una purga mínima que fluye continuamente a través de la zona del bolsón de densidad afectado por la difusión de gas hacia fuera de la antorcha. El proceso de difusión, además, es un fenómeno que depende del tiempo. Aún cuando se interrumpa el flujo de gas de purga, la infiltración de aire en el sistema de la antorcha se bloqueará por el periodo que le tome al oxígeno difundirse a través del bolsillo de densidad de gas. Con un sello molecular, se puede restringir la infiltración de aire durante las interrupciones por purga que excedan las dos horas.

Las velocidades de purga son aproximadamente 1/50 de las velocidades requeridas en una torre de antorcha que no posee ningún dispositivo de sellado.

El sello molecular ofrece las siguientes ventajas:

- q La velocidad de purga y costos operativos más bajos posibles.
- q Cero por ciento de oxígeno debajo del sello.
- q Protección extendida en caso de pérdida de purga.
- q Rápido reembolso



q No hay piezas que se muevan.

q Mantenimiento mínimo.

Cuando el costo inicial de inversión es más importante que los costos operativos, o en los casos en que haya disponibilidad de gas de purga barato, un tipo de sello de velocidad de gas es una elección excelente. Las pruebas indican que la infiltración de aire en la antorcha ocurre a través de la adhesión de flujo a la pared de la antorcha. El tipo de sello de velocidad de gas elimina esta adhesión de flujo y devuelve el aire ingresante al centro de la antorcha, donde la velocidad del gas de purga lo barre fuera del sistema. Este tipo de dispositivo de sellado funcionará en tanto se mantenga la velocidad de gas de purga.

Este tipo de sello de velocidad de gas ofrece varias ventajas:

v Operación e instalación baratas

v No se añade carga estructural de viento

v No requiere mantenimiento

La reducción de purga que se ofrece con los dispositivos anteriormente señalados requiere que el diseñador del sistema trate de cerca el problema de encogimiento o condensación de los gases de descarga en la cabeza de la antorcha luego de una descarga caliente. La reducción en volumen, después de una descarga así, requiere la introducción de volúmenes muy grandes de purgado durante el periodo de enfriamiento. Comúnmente, este volumen de gas de purga se introduce de modo continuo.

Un sistema de purga para compensar la temperatura mide el estado termodinámico del desecho de descarga e inyecta gas de purga sólo en la medida que se requiera durante el enfriamiento. El sistema consiste en sensores y controles de estado termodinámico que accionan una válvula de inyección auxiliar de gas de purga. Las velocidades suplementarias de purga se determinan conforme al pronóstico de la peor condición de descarga.

#### 7.6.6 Resumen

Las cinco causas más frecuentes de accidentes en las antorchas son:

q Explosión interna

q Arrastre de líquidos

q Obstrucciones del sistema

q Procedimientos de mantenimiento defectuosos

q Pérdida de encendido

Un sistema de antorcha funcional y seguro toma en cuenta todos los factores de diseño. Recordar siempre que de los tres elementos de un desastre, dos están siempre presentes en un sistema de antorcha: el combustible y el fuego. Si mantenemos el control adecuado, el oxígeno no se presentará.

El logro del objetivo primordial de un sistema de antorcha expone a ésta a un ambiente hostil. Los factores que influyen en el ambiente de la antorcha son:

- q El viento
- q La velocidad de flujo
- q La composición del gas
- q Los líquidos
- q Los contaminantes transportados en el aire

Toda antorcha está expuesta al viento y debe diseñarse para poder soportarlo. Limitar las consideraciones de diseño a la respuesta estructural ante las cargas de viento puede ser desastroso para la vida de la antorcha. Las velocidades máximas del viento son importantes para la consideración de la estructura y para ciertas consideraciones de combustión, como el encendido. Sin embargo, un viento modesto puede producir fuerzas inducidas que empujen y jalen la llama y que sean un contribuyente importante a la falla de la antorcha. Los vientos en los emplazamientos mar afuera y en algunos situados en la costa o en el desierto presentan un reto especial debido a su alta velocidad promedio y, en algunos casos, dirección casi constante.

Algunos diseñadores de sistemas de antorcha consideran su tarea completa cuando han previsto una disposición segura y efectiva a una velocidad máxima de flujo. En verdad, esta es una consideración de principal importancia. Sin embargo, la mayor parte de daños a la antorcha ocurre a velocidades de flujo bajas a intermedias.

Las instalaciones de antorchas mar afuera y en la costa deben reconocer que los contaminantes transportados por el aire, tales como la sal o incluso el agua salada, estarán presentes. Sin embargo, dicha presencia debe ponerse en su real perspectiva con relación a otros factores.

Ignorar o no dar la debida importancia al ambiente de la antorcha puede conducir a fallas prematuras de la misma. El impacto financiero de una falla de antorcha es serio, puesto que se deben considerar los costos de parada de la instalación, de trabajo y equipos de repuesto, así como de la antorcha misma.

Al considerar la falla de la antorcha, se debe hacer la siguiente pregunta: "¿Cuándo es inaceptable la condición de la antorcha?". Existen tres modos principales de falla de la antorcha que deben considerarse:

- q Restricción de flujo
- q Falla de quemado
- q Falla mecánica

El funcionamiento seguro del sistema de antorcha requiere que el sistema sea capaz de disponer de la velocidad máxima de flujo sin exceder la contrapresión permisible en los dispositivos de alivio. El calor puede hacer que el quemador de la antorcha -o ciertos dispositivos de regulación de flujo en el quemador mismo- se deformen, generando una restricción del flujo y un aumento de la caída de presión. Cuánta deformación es aceptable, ya es materia de criterio, el cual debe basarse en la cantidad de restricción, no en la apariencia. Por ejemplo, una antorcha puede experimentar un óvalo considerable antes de que el flujo se restrinja seriamente.

La falla de quemado puede ser ocasionada por la pérdida de funcionamiento del piloto o daño a los estabilizadores de llama.

La falla del piloto generalmente se puede rastrear en una falla del sistema de suministro de gas al piloto, antes que en el piloto mismo. La falla del estabilizador de llamas es más serio en condiciones de flujo elevado.

El combado severo, rajaduras o partes que caen del quemador de la antorcha son obviamente inaceptables.

#### 7.9.1 Quemado Interno

Uno de los mecanismos más insidiosos de falla de la antorcha es el quemado interno. Este es casi imposible de observar durante el día. En la oscuridad, el quemado interno severo puede calentar las superficies metálicas hasta la incandescencia.

El viento que sopla perpendicularmente al eje de un quemador de antorcha ocasiona el desarrollo de una zona interna de baja presión. A velocidades de flujo muy bajas, las fuerzas creadas por la zona interna de baja presión no son satisfechas sólo por el gas, por lo que se jala aire hacia el quemador de la antorcha. Cuando el aire y el gas se mezclan se produce el quemado interno.

Las antorchas horizontales o las colocadas a cierto ángulo entre vertical y horizontal son particularmente susceptibles al quemado interno. Toda dirección de viento que haga entrar algún componente del viento en la boca de la antorcha intensificará el quemado interno y aumentará el rango de flujo sobre el cual puede ocurrir dicho quemado interno. Para la mayoría de aplicaciones, la mejor posición de la antorcha es vertical o lo más vertical que sea posible.

Si no se ha considerado adecuadamente en el diseño de la antorcha, el quemado interno puede ocasionar fallas mecánicas o de materiales.

#### 7.9.2 Quemado Externo

Las velocidades de flujo incrementadas superan la zona interna de baja presión y el quemado se produce en el exterior del quemador de la antorcha. El quemado externo es influido por la fuerza

misma del viento, así como por zonas de presión creadas por él. Cuando el viento golpea la antorcha, se desarrolla una zona de alta presión en el lado del viento y una zona de baja presión a sotavento.

Las velocidades altas de flujo superan la fuerza de la zona de baja presión, desarrollándose una llama que se proyecta hacia arriba. Sin embargo, a una velocidad de flujo un poco más baja, la fuerza de la zona de baja presión más la fuerza del viento hacen que la llama se mueva hacia la zona de baja presión a sotavento de la antorcha. Luego, una parte de la antorcha es expuesta a intenso calor y, en algunos casos, a una atmósfera reductora, ocasionando fallas mecánicas o de materiales.

### 7.9.3 Ataque Químico

Además de la exposición a altas temperaturas y condiciones reductoras, la antorcha también está sujeta al ataque químico. Los componentes del gas de descarga, los productos de combustión y contaminantes transportados en el aire pueden estar presentes en la atmósfera que circunda al quemador de la antorcha.

El sulfuro de hidrógeno, SO<sub>x</sub>, cloro, NO<sub>x</sub> y agua están entre los contribuyentes más comunes del ataque químico. La selección de material para la antorcha debe reconocer su presencia.

### 7.9.4 Fuegos Secundarios

Muchas antorchas se destruyen a causa de los sistemas de remoción de líquidos inapropiadamente diseñados u operados. En el peor de los casos, la porción líquida se hace tan grande que el líquido empieza a correr por el lado del quemador de la antorcha hacia la estructura de soporte. La llama resultante y la condición reductora engloban la antorcha y sus accesorios conduciendo rápidamente a daños serios.

Un fuego secundario menos obvio pero igualmente destructivo puede ser ocasionado por pilotos impropriamente diseñados u operados. La alta confiabilidad del piloto a un consumo bajo de gas para pilotos demanda el uso de un diseño de piloto del tipo con mezcla previa que incluye un inspirador de aire. Este debe localizarse en un punto algo lejano de la corona del piloto.

El gas del piloto inspira aire y la mezcla de aire-gas se quema en la corona del piloto. El diseño o la operación impropia puede ocasionar que el gas se queme en el inspirador de aire, no así en la corona. La llama que se produce puede destruir el piloto y dañar severamente o destruir el quemador de la antorcha.

### 7.10.1 Dimensiones de la Antorcha

Normalmente se diseñan las dimensiones de los quemadores de antorcha de acuerdo con dos criterios: caída de presión o máxima velocidad de salida permisible para un quemado estable. La caída de presión y la velocidad de salida están relacionadas. La caída de presión permisible se fija por el diseño total del sistema de antorcha y por los requerimientos de contrapresión máxima para los dispositivos de alivio. En algunos casos, los límites de caída de presión mantienen la velocidad de salida, bastante por debajo de la máxima permisible. En otros, hay disponibilidad de una considerable presión y la velocidad de salida es la que limita el tamaño del quemador de la antorcha.

La norma API RP 521 sugiere limitar la velocidad de salida máxima de las antorchas a un número Mach de 0,5 para asegurar el quemado estable. La experiencia demuestra que la velocidad de salida máxima permisible depende de la composición del gas de descarga; sin embargo se recomienda la consulta de API RP 521 para los sistemas de antorcha en las instalaciones de producción y exploración de petróleo, así como de gas que se encuentran en el Perú.

El uso prudente de la caída de presión de la que se dispone puede permitir que se mantenga el tamaño del quemador de antorcha al mínimo. Esto incrementa la velocidad de salida para una velocidad de flujo dada, reduciendo de este modo el choque de llamas y mejorando la vida de la antorcha. Un beneficio adicional de los tamaños más pequeños de antorchas es una reducción en el tamaño de las problemáticas zonas de baja presión.

#### 7.10.2 Separación de la Carga

La separación de la carga, por lo general, requiere el uso de dos o más antorchas, como se discutió en el capítulo 7.4.2 "Métodos de Quemado".

Un sello líquido desvía pequeños flujos a la antorcha de primera etapa, mientras que -al mismo tiempo- proporciona un medio para descargar con seguridad altas velocidades hacia la antorcha para emergencias. Un sistema semejante minimiza el quemado interno y externo, y mejora significativamente la vida de la antorcha.

Otros sistemas de antorcha tienen dos niveles distintos de alivio de presión. En estas situaciones, habrá tanto un colector de baja presión como uno de alta o bien un colector de alta presión más uno de presión media. La caída de presión permisible en el colector de baja presión podría ser tan baja como unas cuantas pulgadas de columna de agua, mientras que la permisibilidad en el colector de alta presión podrá ser de hasta varias libras por pulgada cuadrada. Los objetivos de quemado de gases de un sistema semejante pueden requerir el uso de un sistema de antorcha dual. La situación es usualmente que uno o ambos sistemas pueden aliviar al mismo tiempo.

Sin embargo, el quemado sin generación de humo de los gases de baja presión presenta un problema de diseño interesante. Dado que la corriente está a baja presión, contribuye muy poco al nivel de energía cinética de la zona de combustión. Para tener éxito en el quemado sin humo se requerirá el uso de una segunda fuente para añadir energía cinética.

En una aplicación semejante, los gases de alivio de alta presión podrían usarse como fuente secundaria. Sin embargo, el empleo de los gases de alta presión depende del sistema de alivio de alta presión. Se podría extraer gas de alta presión del sistema de separación, pero esto representa un desperdicio innecesario de recursos.

#### 7.10.3 Sistemas de Purga Apropriados

Muchos operadores usaron una velocidad de purga en el sistema de antorcha lo suficientemente alta para producir una llama fácilmente visible durante el día. Los altos costos de energía han producido un deseo por conservar el gas de purga. No existen

dudas que un dispositivo de conservación de la purga, como un sello molecular o dispositivo para evitar el ingreso de aire, reducirán considerablemente los costos de purga. Muchos pasan por alto el hecho de que la reducción en la purga aumentará la vida de la antorcha. Cuando se reduce la cantidad de purga, también se reduce la cantidad de calor liberado. Una liberación menor de calor significa menores daños a la antorcha inducidos por el calor.

#### 7.10.4 Protección contra Choque de Llamas

El choque de llamas por quemado interno o externo puede ser una causa importante de falla de la antorcha. La atención cuidadosa al diseño y la aplicación de la antorcha puede minimizar o prevenir el choque de llamas.

El daño a la antorcha debido al quemado interno puede retardarse por el uso apropiado de un revestimiento refractario interno. Incluso un revestimiento refractario delgado puede reducir significativamente la temperatura del metal y evitar la atmósfera reductora ocasionada por el choque de llamas en el metal.

La vida del quemador de antorcha puede mejorarse minimizando el choque externo de llamas. La protección contra este tipo de choque de llamas puede lograrse por medios activos o pasivos.

Los escudos o deflectores de viento patentados y comercialmente disponibles pueden contribuir a reducir el efecto de la zona de baja presión a sotavento. Además de interrumpir la zona de baja presión, el escudo evita que las llamas entren en contacto con el quemador de la antorcha. Tal protección pasiva es adecuada para muchas aplicaciones.

Las condiciones severas pueden requerir el uso de energía suplementaria para evitar el choque externo de llamas. Los quemadores usan una fuente de energía suplementaria, como aire de baja presión, para superar el efecto de la zona de baja presión e imprimir una dirección hacia arriba de la llama. El ahorro que se obtiene por el incremento en la vida de la antorcha es mucho mayor que el costo nominal de operación.

#### 7.10.5 Antorchas de Puntos Múltiples

Ya se ha visto que la separación de la carga de la antorcha en dos puntos de quemado puede mejorar considerablemente la vida de la antorcha. Una ventaja incluso mayor puede lograrse usando varios puntos de quemado individuales en un sistema por etapas o no. Las ventajas son:

- q Vida prolongada
- q Bajo mantenimiento
- q Bajo consumo de energía
- q Llamas cortas
- q Radiación reducida
- q Los líquidos arrastrados se queman

q Capacidades muy superiores de no generar humo

#### 7.10.6 Metalurgia

Puede haber muchas causas de fallas en la antorcha. La selección apropiada de material puede mejorar la vida de la antorcha pero no puede, sola, superar todos los problemas que ya se han discutido. Un diseño de quemador de antorcha que exponga el metal a un choque frecuente de llamas está destinado a fallar a pesar de la metalurgia. Ningún metal puede soportar un choque repetido de llamas.

Es importante comprender que los fabricantes de antorchas no hacen las planchas de material que frecuentemente se usan en la construcción de antorchas. Los proveedores de materiales tienen un interés válido en promover una aleación particular. El interés del operador deberá ser el de mejorar la vida de la antorcha.

La experiencia es un factor muy importante en la selección del material para la antorcha. Se requiere de tiempo considerable para acumular una amplia base de datos sobre el rendimiento real de los metales en condiciones de quemado de gases. Se ha descubierto que la mayoría de aplicaciones no se beneficia del uso de aleaciones especiales y frecuentemente costosas. Para comprender la selección de materiales, se debe entender cómo ocurren las fallas en los metales.

La degradación térmica es una falla de un metal debido a ciclos térmicos repetidos. El choque de llamas inducido por el viento es generalmente cíclico en su naturaleza, como los vendavales, y los cambios en la velocidad de flujo ocasionan el movimiento del punto de choque. Esto genera ciclos

repetidos de alta temperatura, seguidos por enfriamiento. La exposición a altas temperaturas ocasiona que se forme un óxido o costra en las superficies metálicas. La formación de costras en sí misma no es necesariamente nociva para el metal. Sin embargo, las costras tienen un coeficiente de expansión algo diferente, lo que da por resultado la separación de las costras del metal de base. Por lo tanto, cada ciclo ocasiona pérdida de peso.

Cuando se selecciona un material, es necesario estudiar con cuidado las características del ciclo térmico y la aplicación exacta. Por ejemplo, si su aplicación no los expone a altas temperaturas, los materiales como el S.S. 302, 316, 321 e incluso el acero de carbono, pueden usarse efectivamente para ciertas piezas de la antorcha.

La presencia de azufre en el gas residual ha llevado a los proveedores de materiales a recomendar el uso de la aleación 800 para las antorchas. La experiencia de campo real demuestra que esta aleación no es la mejor elección para tales aplicaciones. La combinación de alta temperatura, atmósfera reducida y azufre, puede dar por resultado una rápida falla de la aleación 800. La aleación 310 S.S. es una mejor opción.

El cloruro en la atmósfera alrededor de la antorcha puede sugerir el uso de materiales, tales como el Hasteloy. Sin embargo, la experiencia con antorchas expuestas a una atmósfera de agua salada indican que no se requiere el uso de dicho material.

El diseño mecánico inapropiado puede llevar a falla del metal, aún cuando la selección del material haya sido básicamente correcta. El no tomar debidamente en cuenta las fuerzas que se desarrollan durante la fabricación o la expansión térmicas han condenado a muchas antorchas antes incluso de que fueran puestas en uso.

La eficiencia de combustión del quemado de gases es una medida de la destrucción de hidrocarburos. Bajo condiciones estables, la mayoría de sistemas logrará un 98% o más. Ver cuadro 2. Las condiciones inestables de llamas darán por resultado eficiencias considerablemente más pobres y emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y particulados. Se debe observar que una antorcha humeante puede aún lograr una buena destrucción de hidrocarburos.

Se deberán mantener las siguientes condiciones para asegurar un patrón de llamas estable:

- v Las emisiones visibles no deben exceder 5 minutos en un periodo de 2 horas.
- v En todo momento debe estar presente una llama.
- v Se debe monitorear la presencia de una llama piloto para detectar una llama.
- v El valor de combustión neto del gas deberá ser por lo menos de 11,2 MJ/Nm<sup>3</sup> para las antorchas asistidas por vapor o aire y de por lo menos 7,45 MJ/Nm<sup>3</sup> para las antorchas no asistidas.

## SISTEMAS DE ANTORCHA

Los sistemas de antorcha tienen una amplia aplicación en la industria del petróleo: desde la perforación y la producción pasando por diversos tipos de procesamiento hasta la comercialización. Cada sistema de antorcha presenta consideraciones especiales de aplicación. Gran parte de la investigación realizada sobre las antorchas ha sido efectuada sobre refinerías, en esta guía se han adaptado dichos resultados a los emplazamientos de exploración y producción.

El diseño de los sistemas de antorchas es un tema complejo. Sobre la base de los requerimientos de aplicación, el diseñador del sistema de antorcha debe considerar los siguientes puntos fundamentales de diseño:

- q Encendido
- q Prevención de infiltraciones de aire
- q Remoción de líquidos
- q Localización
- q Supresión de humos



q Ruido

q Otros niveles de emisión

Además, el diseñador debe tomar en cuenta el ambiente de la antorcha, los mecanismos de falla de la antorcha y las técnicas de diseño que puedan mejorar la vida de la antorcha. Deberá existir una conciencia permanente de que el diseño y la operación nunca deben comprometer el objetivo primordial del sistema de antorcha: la disposición segura y efectiva de gases.

Los gases y líquidos indeseados o liberados pueden provenir de una amplia variedad de fuentes, tales como:

- v Emergencias en la planta
- v Venteos de emergencia
- v Gases de la cabeza de revestimiento
- v Gases del manipuleo de productos
- v Gases y líquidos de procesamiento
- v Pruebas de la producción de pozo petrolero
- v Derrames de petróleo
- v Subproductos de la producción de petróleo

Sin tener en cuenta la fuente o la situación, el objetivo primordial del sistema de antorcha debe ser la disposición segura y efectiva de gases. Todos los aspectos del sistema deben apuntar a cumplir este objetivo. No se puede permitir que consideraciones secundarias, como el deseo de incrementar la vida del quemador de antorcha, comprometan la seguridad.

Tan pronto como el diseñador de la instalación empiece a trabajar en el sistema de la antorcha, debe tomar conciencia de ciertos factores que pueden influir en el diseño del equipo de quemado de gases. Los principales de estos factores son los siguientes:

- q Velocidad del flujo
- q Composición de los gases
- q Presión disponible del gas
- q Temperatura del gas
- q Costos y disponibilidad de energía
- q Requerimientos ambientales
- q Requerimientos de seguridad
- q Requerimientos sociales

Un diseñador debe conocer todas estas variables antes de empezar la especificación del equipo. A continuación se comenta

brevemente sobre algunos de estos factores.

La velocidad del flujo afecta obviamente el tamaño de la línea, así como de la radiación y puede tener otras influencias. Por ejemplo, el quemado sin generación de humo de pequeñas cantidades de un gas puede ser simple cuando se compara con el quemado de mayores cantidades del mismo gas.

La composición del gas puede influir sobre el diseño de la antorcha en una serie de formas. La relación en peso del hidrógeno al carbono (H/C) puede afectar considerablemente el quemado sin producción de humo. El sulfuro de hidrógeno o grandes cantidades de materias inertes requieren de consideraciones especiales de diseño. La experiencia demuestra que el uso apropiado de la energía potencial (presión) de una corriente de gas puede mejorar significativamente el proceso de combustión.

Nunca se debe comprometer la seguridad en el diseño de grandes sistemas. Los detalles sobre el uso que se pretende, especificaciones de la aplicación, etc., deben discutirse abiertamente.

Luego de haberse informado sobre los aspectos esenciales de estos factores, el diseñador deberá dirigir su atención hacia ciertas consideraciones de diseño. Algunos de los puntos por considerar son los siguientes:

- w Encendido
- w Prevención de infiltraciones de aire
- w Remoción de líquidos
- w Supresión de humos
- w Ruido
- w Localización
- w Llamas visibles
- w Recuperación de recursos

Un proyecto dado debe considerar todos estos puntos.

La remoción de líquidos es una consideración importante. En el Perú, todo el quemado de líquidos debe hacerse sin emisiones importantes de humo y sin exceder las concentraciones permisibles de contaminantes. (Artículo 43, Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos).

En todo sistema de antorcha, existe el potencial de arrastre de líquidos. El simple hecho de prolongar la línea no asegura la remoción adecuada de los líquidos; velocidades de flujo tan bajas como de un metro por segundo pueden mantener partículas de gran tamaño en suspensión.

La separación completa de gas-líquido puede hacerse a través de una trampa de neblina apropiadamente diseñada. El

desentrampado debe complementarse por medio del espacio adecuado para retención de líquidos, así como con medios de remoción.

Los sistemas comerciales de antorcha son de dos tipos básicos: antorchas elevadas y antorchas de tierra. Las elevadas se usan para la disposición de desechos gaseosos generados durante emergencias en la planta (fallas de energía, incendios, falla de componentes) y, en consecuencia, se usan en conjunción con sistemas de descarga de vapores en la manufactura de sustancias químicas de gran escala, en las operaciones de refinación de petróleo y en la instalación de producción de campos petrolíferos. Otras aplicaciones limitadas incluyen la ventilación de tanques de almacenamiento y plataformas de carga.

A pesar de que, con frecuencia, se inyecta vapor, agua y aire en el quemador de la antorcha elevada para reducir el humo y la luminosidad, el énfasis del diseño se ha puesto más bien en la disposición rápida y segura de los vapores antes que en el control de la polución. Los sistemas de antorcha de tierra recientemente desarrollados representan un alejamiento del diseño convencional. Con el nuevo énfasis en la reducción de ruidos, emisiones químicas, calor y luminosidad, estas antorchas se van haciendo cada vez más populares para la disposición de las

descargas de rutina. Incluyen la disposición de los gases inflamables que fugan del proceso y de las válvulas de seguridad, de las corrientes residuales del proceso y el exceso de producto o productos que no cumple con las especificaciones.

#### 7.3.1 Antorchas Elevadas

Los sistemas de antorcha elevada proporcionan un medio para la disposición de corrientes residuales gaseosas con un rango casi ilimitado de flujos y caídas de presión de 0 a 60 pulgadas de H<sub>2</sub>O.

Los criterios de diseño de los sistemas de antorcha elevada se orientan exclusivamente hacia la combustión segura antes que eficiente de los desechos gaseosos. De conformidad con ello, los cálculos de las dimensiones se basan en la caída permisible de la presión y en la dispersión de la radiación térmica o la dispersión de gases tóxicos cuando ocurre la extinción de la antorcha. La descarga de líquidos en el sistema de antorcha puede causar problemas; para la remoción de líquidos se requiere de cilindros "separadores" o de desentrampado de líquidos.

#### 7.3.2 Antorchas Protegidas a Nivel del Suelo

Las antorchas a nivel del suelo con combustión protegida se están empleado en conjunción con la antorcha elevada, como respuesta al reciente énfasis que se pone en el problema de la polución. Las antorchas de bajo nivel, a pesar de ser relativamente costosas en cuanto a construcción y mantenimiento, son efectivas ya que reducen el ruido y las emisiones térmicas.

Existe relativamente poca información respecto de sus dimensiones. El diseño de antorchas de bajo nivel comprende una estructura externa de acero, revestida con material refractario. La estructura externa sirve para atenuar las llamas y para

prevenir la radiación térmica y luminosa. El material refractario protege la estructura de acero de la exposición directa a los efectos de las altas temperaturas y materiales corrosivos, además, mejora la eficiencia de combustión al minimizar las pérdidas de calor. Los espesores refractarios varían de 4 a 8 pulgadas. El material refractario usado proporciona una respuesta más lenta ante cambios abruptos en el flujo de gas, contribuyendo significativamente en los costos de construcción y mantenimiento de una antorcha de bajo nivel. Debido al calentamiento lento, asociado con la construcción refractaria, la antorcha de bajo nivel generalmente se usa solo para velocidades de flujo bajas o continuas, mientras que la antorcha elevada, de diseño convencional, se usa para acomodar alteraciones repentinas.

### 7.3.3 Equipos Auxiliares

Los equipos auxiliares para el sistema de la antorcha incluyen encendedores, pilotos y equipo de seguridad. Normalmente se proporcionan cilindros separadores para la remoción de líquidos del gas. Se usan sellos de agua, parallas y sellos moleculares para aislar la torre de la antorcha del sistema de recolección de venteos. Los generadores de gas de purga y las trampas de neblina sirven para evitar la formación de mezclas explosivas dentro de la torre de la antorcha. El

mantenimiento del nivel de líquido en los sellos de agua y cilindro de desentrapado es un punto fundamental; existen a disposición sistemas de control del nivel de líquido y de alarma para estos sistemas. Los quemadores pilotos, con frecuencia, vienen equipados con sistemas de detección de llamas y de alarma.

### 7.3.4 Costos

Los elevados costos de la antorcha varían considerablemente debido a los costos desproporcionados de los equipos auxiliares y de control, así como por el costo relativamente bajo de la torre y quemador de la antorcha. Como resultado de ello, los costos de los equipos rara vez dependen del diámetro. Los costos típicos fluctúan entre \$50 000 y \$500 000. Las antorchas de bajo nivel son aproximadamente diez veces más costosas para capacidades similares.

Los costos operativos se determinan principalmente por los costos de combustible para el gas de purga y quemadores piloto; por el costo del vapor que se requiere para quemar gases sin producir humo y por los costos de energía y mantenimiento en los sistemas asistidos por aire. Sobre una base de 30 centavos por millón de BTUs de requerimiento de combustible, los elevados costos operativos típicos para la torre de la antorcha (dos pies de diámetro de torre) son de alrededor de \$1500 al año.

### 7.3.5 Rendimiento y Emisiones de la Antorcha

Dado que el quemado de gases tradicionalmente se ha usado para la disposición segura de gases descargados durante condiciones de emergencia, los patrones de rendimiento que se refieren a la eficiencia de combustión y emisiones gaseosas son limitados. Los contaminantes del aire provenientes de antorchas elevadas incluyen CO, hidrocarburos no quemados y particulados. Se deberán esperar estos contaminantes de cualquier proceso de combustión que comprenda grandes llamas de

difusión turbulenta y que son el resultado del enfriamiento de dichas llamas. Temperaturas de llama relativamente bajas se observan de manera típica tanto en las antorchas elevadas como en las de bajo nivel. Esto da por resultado factores bajos de emisión de NO<sub>x</sub>, comparados con otros tipos de equipos de combustión industrial. En el Perú, se exige la medición e información de todos estos contaminantes. Ver capítulos 5 y 8 de esta guía.

En muchas instalaciones de exploración y producción, se producen grandes volúmenes de gas. Estos gases son desechos, subproductos o el resultado de fugas en el equipo operativo que provienen de condiciones de emergencia en la operación normal de una planta en donde los gases deben expulsarse para evitar presiones peligrosamente altas en él; provienen también de los arranques de planta y de las paradas de emergencia. Grandes cantidades de gases pueden resultar de los productos que no pueden ser vendidos. Los flujos son típicamente intermitentes con velocidades de flujo, durante emergencias más graves, de varios millones de pies cúbicos por hora.

El método de control preferido para el exceso de gases y vapores es recuperarlos en un sistema de recuperación de vapor. Sin embargo, grandes fluctuaciones en la cantidad de gas, especialmente durante condiciones de emergencia, son difíciles de contener y procesar. En el pasado, todos los gases residuales se expulsaban directamente a la atmósfera; pero la expulsión generalizada ocasionaba problemas de seguridad y ambientales. Por lo tanto, actualmente, en la práctica se acostumbra recolectar dichos gases en un sistema cerrado de antorcha y quemarlos a medida que se descargan de una torre de antorcha elevada. Alternativamente, los gases pueden descargarse y quemarse a nivel del suelo con protección contra llamas.

El sistema de antorcha se usa principalmente como un método seguro para la disposición de los gases residuales excesivos. Sin embargo, el sistema de la antorcha en sí puede presentar problemas adicionales de seguridad. Estos incluyen el potencial de explosión de la antorcha, peligros de radiación térmica de la llama y el problema de asfixia tóxica durante el apagado de la antorcha. Aparte de la seguridad, existen otros varios problemas asociados con el quemado de gases, los cuales deben tratarse durante el diseño y la operación de un sistema de antorcha. Estos problemas caen dentro del área general de las emisiones de las antorchas e incluyen la formación de humo, la luminosidad de la llama, ruido durante el quemado y la posible emisión de contaminantes del aire durante las operaciones de quemado de gases.

#### 7.4.1 Aplicaciones del Quemado para la Disposición de Gases Residuales

Existen tres aspectos fundamentales que se toman en cuenta al decidir la manera como quemar un gas residual. Estas son: (1) la variabilidad del flujo, (2) el volumen máximo esperado y (3) el contenido de calor.

Una alta variabilidad del flujo es el factor más importante. Una antorcha se diseña para operar prácticamente una gama infinita de flujos que van de más a menos. Los sistemas alternativos de disposición de gases residuales, como los incineradores o los dispositivos de combustión posterior, necesitan un control adecuado del flujo y pueden usarse únicamente en flujos de gas razonablemente continuos.

El volumen también es un factor importante. Con volúmenes muy grandes, la combustión directa de llamas por incineración o un dispositivo de combustión posterior de llamas se hacen imprácticas debido al tamaño del equipo que se requiere. La capacidad de una antorcha elevada puede incrementarse fácilmente aumentando el diámetro de la torre. Una antorcha pequeña típica, con una torre de cuatro pulgadas de diámetro, tiene una capacidad de 30 000 scfh. Una antorcha con una capacidad de 5 000 000 scfh requeriría de una torre de antorcha con un diámetro de sólo 36 pulgadas.

El contenido de calor de un gas determina dos clases. Los gases bien pueden mantener su propia combustión o bien pueden no hacerlo. En general, un gas residual con un valor de combustión mayor que 200 Btu/pie<sup>3</sup> puede quemarse exitosamente. Por debajo de 200 Btu/pie<sup>3</sup>, podría ser

necesario enriquecer el gas residual mediante la inyección de un gas con valor de combustión alto. La adición de dicho gas se denomina quemado endotérmico. No es factible quemar un gas con un valor de combustión menor a 100Btu/pie<sup>3</sup>. Si el flujo del gas con bajo BTU es continuo, se puede emplear la incineración para su disposición. Para flujos intermitentes de este tipo de gas, el quemado endotérmico es la única posibilidad.

Las antorchas son adecuadas para disponer de flujos intermitentes de grandes y pequeños volúmenes de gases que tienen un valor de combustión apropiado para mantener la combustión. Para flujos intermitentes de gases residuales con bajo valor de combustión, deberá añadirse más combustible a la corriente de gas residual. Dado que el valor del combustible adicional puede ser considerable y se pierde completamente durante el quemado, el proceso de quemado endotérmico puede resultar costoso. Sin embargo, si los flujos intermitentes de gases residuales con bajo calor son grandes, la única alternativa práctica es expulsar los gases directamente a la atmósfera. Esto es inaceptable por razones ambientales.

La mayoría de antorchas se usan para disponer de los flujos intermitentes. Existen algunas antorchas continuas, pero éstas deberán usarse para pequeños volúmenes de gases: 500 cfm (15 m<sup>3</sup>/min) o menos. El valor de grandes flujos continuos de un alto valor de combustión es demasiado elevado. Es preferible la recuperación de vapores o el uso del vapor como combustible para el calentador del proceso al quemado de gases. Para grandes flujos continuos de gas con valor de combustión bajo, se debería añadir combustible complementario al gas en un incinerador protegido, en vez de hacerlo en la llama de una antorcha. Para flujos continuos pequeños de gases, algunas veces se emplean las antorchas aún cuando el combustible o el calor se pierda o desperdicie. En estos casos, los costos por equipo son a veces más importantes que los ahorros en combustible, por lo cual el uso de una antorcha resulta más económico.

Las antorchas se usan, en su mayoría, para la disposición de hidrocarburos. Los gases residuales compuestos de gas natural, propano, etileno, butadieno y butano, probablemente constituyan más del 95% del material quemado. Las antorchas se han usado para controlar exitosamente los gases malolientes como los mercaptanos y las aminas. Sin embargo, se debe tener

cuidado al quemar estos gases. A menos que la antorcha sea muy eficiente y tenga buena combustión, humos nocivos pueden escapar sin quemarse y ocasionar problemas.

Se deberá evitar el quemado de sulfuro de hidrógeno debido a su toxicidad y bajo umbral de olor. Inclusive el quemado de pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno puede crear suficiente dióxido de azufre para ocasionar daños a los cultivos o disturbios locales. No se recomienda la disposición por quemado de gases cuyos productos de combustión ocasionen problemas, como aquéllos que contienen sulfuro de hidrógeno o hidrocarburos clorinados.

#### 7.4.2 Métodos de Quemado de Gases

La antorcha elevada es el sistema que más comúnmente se usa en la actualidad. En esta antorcha, se descarga el gas sin una mezcla previa sustancial, se enciende y se quema en el punto de

descarga. La combustión de los gases descargados tiene lugar en el aire atmosférico del ambiente por difusión. Este tipo de combustión por lo común genera un suministro insuficiente de aire y, por tanto, una llama humeante. La legislación peruana exige una llama sin humo, la cual puede obtenerse con una cantidad adecuada de aire de combustión, mezclado con el gas para que pueda quemarse completamente. El quemado sin humo se cumple mediante el uso de un mezclado especial de aire y coronas de inducción de la antorcha o mediante la inyección de vapor en la llama.

La antorcha elevada moderna permite que se quemen con seguridad y economía grandes volúmenes de gases residuales. Sin embargo, la antorcha elevada también puede presentar otros problemas, incluyendo la emisión a la atmósfera de ruido, luz y contaminantes químicos del aire. La legislación exige la minimización de las emisiones de ruido y luz, especificando los niveles máximos de los demás contaminantes. Ver capítulo 5, cuadro 1.

Un segundo tipo de antorcha es la de tierra. Una antorcha de tierra consiste en un quemador y sus accesorios localizados al nivel del suelo o cerca de éste. El quemador puede o no tener protección, pero debe permitir el libre escape de la llama y de los productos de combustión. Las antorchas de tierra presentan la ventaja de ser capaces de tener protegida la llama. En comparación con las antorchas elevadas, requieren de más terreno, si no están protegidas, o bien los quemadores, controles y protección pueden resultar más costosos que una torre. Además, si el sistema de encendido o piloto falla, la antorcha de tierra no puede dispersar los gases tan bien como una antorcha elevada.

Un tercer sistema que puede emplearse donde el ruido, la luminosidad y la formación de humo son criticados por los residentes locales, es una antorcha de tierra de "bajo nivel" protegida, usada en conjunción con una antorcha elevada. Más del 95% del tiempo, la carga que va a la antorcha es menor que el 10% de la capacidad de diseño. La antorcha de tierra de "bajo nivel" está diseñada para manejar este volumen, mientras que los grandes volúmenes restantes por liberar usan ambos sistemas. Este sistema, llamado antorcha integrada, puede reducir considerablemente las emisiones de humo, ruido y luz que ocasionan las quejas.

El quemado de tiro forzado, en donde el aire de combustión es mecánicamente soplado para premezclarlo con el gas antes del encendido, es ideal en cuanto se refiere a la combustión. Este tipo de antorcha consigue el quemado sin humo, sin necesidad de usar la inyección de vapor. Sin embargo, este método tiene una proporción limitada de rechazo y requiere de una torre mucho más grande para el aire de combustión que se añade. Este enfoque se ha utilizado para algunas aplicaciones especiales, por lo general, no es un procedimiento económico.

Si hay un flujo continuo de gas, se deberá considerar un sistema de recuperación de vapores. Mientras que la recolección, almacenamiento y retorno del gas es costoso, el desecho continuo de gas puede serlo aún más. Los gastos de capital para comprimir inmensos volúmenes, liberados

en forma intermitente e irregular, exceden los gastos de la operación de quemar el gas. Muchas instalaciones tienen un sistema de tres componentes para los gases residuales, el cual consiste en un sistema de recuperación de vapores, una antorcha de bajo nivel para la mayoría de ocurrencias de antorcha, que sobrecargan el sistema de recuperación de vapor, y una antorcha elevada para grandes liberaciones de emergencia que sobrecargan la antorcha de bajo nivel.

Un sistema de protección de alta integridad nunca puede eliminar totalmente las válvulas de descarga de seguridad en una planta y, en consecuencia, la necesidad de una antorcha. Sin embargo, la carga a la antorcha se reduciría considerablemente y se usará dicha antorcha sólo en situaciones de emergencia mayores.

Este capítulo describirá el equipo disponible para el quemado de gases residuales y presentará los datos sobre costos relativos a los diferentes sistemas.

#### 7.5.1 Antorchas Elevadas

El sistema de antorcha elevada se compone de la corona de la antorcha, algún tipo de trampa de gases directamente debajo de la corona, un sistema de piloto y encendido en la parte superior de la corona de la antorcha y, finalmente, la torre y su soporte. Cuando se requiere quemado sin humo, también se debe proveer un sistema de inyección de vapor en la parte superior de la antorcha. Los sellos de agua y cilindros separadores también son necesarios generalmente por razones de seguridad.

Una corona de antorcha debe ser capaz de operar sobre un amplio rango de proporciones de rechazo. Para lograrlo, la antorcha debe tener una excelente llama que mantenga las características de capacidad y mezcla. El mantenimiento de la llama se asegura proporcionando pilotos múltiples continuos alrededor de la corona de combustión. La corona de la antorcha por lo general está hecha de acero inoxidable o de alguna otra aleación resistente a altas temperaturas y a la corrosión.

El quemado sin humo se puede lograr con coronas de antorcha especiales que inyecten agua, gas natural o vapor en la llama, aumentando la mezcla aire-gas para asegurar la combustión completa. La inyección de agua presenta muchas desventajas, incluyendo la formación de hielo en el invierno, neblinas durante el verano, así como la alta cabeza de presión que se requiere



para una antorcha elevada y una proporción de rechazo mucho menor que el vapor, haciendo que el control sea muy difícil con la posibilidad de apagar la llama.

El vapor es el elemento más frecuentemente usado para el quemado sin humo. Hay dos técnicas básicas de inyección de vapor que se usan en las antorchas elevadas. En un método, el vapor se inyecta directamente de las boquillas en un anillo externo que se encuentra alrededor de la parte superior de la corona. En el segundo método, el vapor se inyecta por una boquilla única ubicada concéntricamente en la corona del quemador. Los proveedores utilizan diversos tipos de boquillas para crear un efecto circular, helicoidal, de abanico, de chorro o Coanda.

Los reglamentos ambientales exigen que las antorchas no emitan humo para las grandes relaciones de rechazo. Para asegurar la operación satisfactoria, se han combinado los dos tipos de inyección de vapor en una misma corona. La boquilla interna proporciona vapor a velocidades bajas de flujo, mientras que los chorros externos se encuentran disponibles para grandes velocidades de flujo.

Mientras que estos son los tipos más comunes de coronas, existen varios otros tipos disponibles para propósitos especiales. En una modificación de corona de inyección de vapor, se usa una boquilla interna para inyectar tanto vapor como aire en la corona. Se requiere de una corona más grande debido al incremento en la caída de la presión y porque los gases pueden quemarse en el interior de la corona. El quemado en el interior de la corona puede acortar drásticamente la vida de la misma. Se puede usar una punta con mezclador de vórtice a chorro con gases de relativamente alta presión, que requieren de muy poco o nada de vapor para las operaciones sin humo. Otras coronas para propósitos especiales se encuentran a disposición, incluyendo las coronas endotérmicas que inyectan gas para elevar el valor de combustión de la corriente y coronas con adición de mufles para un quemado más silencioso.

La inyección de vapor a la corona de la antorcha se puede controlar manual o automáticamente. Se recomienda el control automático porque reduce el uso de vapor, reduce considerablemente la cantidad de humo y minimiza el ruido. Los sistemas automáticos utilizan dispositivos de medición de flujos con control de proporción sobre el vapor. Dado que la medición de la velocidad de flujo no puede incluir las variables del grado de saturación y peso molecular, el control de proporción por lo general se fija para cierta composición de hidrocarburos promedio. Por lo general, es necesario tener una cantidad fija de vapor que fluye en todo momento para enfriar las boquillas de distribución en la corona.

Para prevenir la migración de aire en la torre de la antorcha como resultado de los efectos de viento o la diferencia de densidad entre el aire y el gas de la antorcha, se mantiene un flujo de gas de purga continuo a través del sistema de la antorcha. El sistema se puede purgar con gas natural, gas procesado, gas inerte o nitrógeno. Para reducir la cantidad de gas de purga requerido y mantener el aire fuera del sistema de antorcha, por lo general se colocan dispositivos para atrapar gas en la torre,

directamente debajo de la corona de la antorcha.

Un tipo de trampa de gas que se encuentra disponible en el mercado es el sello molecular. Este tipo de trampa puede no evitar que el aire penetre en la torre como resultado del enfriamiento de gas en los colectores de la antorcha. Se encuentran disponibles sistemas de instrumentación para aumentar automáticamente la velocidad de purga y evitar así que el aire ingrese en la torre durante el rápido enfriamiento del gas. Otro desarrollo en las trampas de gas es el Sello Fluido. Este sello pesa mucho menos que el molecular y puede colocarse mucho más cerca de la corona de la antorcha.

El mecanismo de encendido de una antorcha consiste en los quemadores pilotos y los encendedores del quemador piloto. Los quemadores pilotos sirven para encender los gases que fluyen hacia afuera y para mantener el encendido del gas. Estos pilotos deben proporcionar una llama estable para encender los gases de la antorcha y, en muchos casos, para mantenerlos encendidos. Para lograrlo, se usan dos o más -por lo general, tres o cuatro- quemadores pilotos. Además, algunas veces, los quemadores pilotos se proporcionan con protectores de viento separados.

Se debe suministrar un sistema separado para el encendido del quemador piloto, para efectos de protección contra fallas de la antorcha. El método usual es encender una mezcla de gas- aire en una cámara de encendido por medio de una chispa. El frente de llamas viaja a través de un tubo encendedor hacia el quemador piloto en la parte superior de la antorcha. Este sistema permite que el encendedor se coloque a una distancia segura de la antorcha, hasta de 100 pies, y aún así encienda satisfactoriamente los pilotos. El dispositivo completo está montado en un panel de encendido e instalado en un lugar accesible en el suelo. El panel de encendido debe ser a prueba de explosiones, tener una vida ilimitada y no ser sensible a todas las condiciones climáticas. En las antorchas elevadas, la llama del piloto usualmente no es visible, por lo que es deseable un sistema de alarma para indicar una falla en la misma. Por lo general, esto se hace a través de una termocupla en la llama del quemador piloto. En caso de una falla de la llama, la temperatura cae y suena una alarma.

Se usan diferentes métodos para soportar la torre de la antorcha completa. Estas torres deben proporcionarse con una escalera que posea una jaula y una plataforma en el extremo superior para propósitos de reparación y mantenimiento. Las torres pueden fluctuar entre 150 y 400 pies de longitud. Las torres de antorcha con una relación de longitud a diámetro no menor de 30, generalmente se construyen como torres auto soportantes; las torres con una relación de  $L/D < 100$ , tienen un soporte conformado por un único conjunto de vientos o tirantes; cuando la proporción es de  $L/D > 100$ , las torres son confeccionadas con dos o más conjuntos de vientos. Las torres autosoportantes en la mayoría de las veces no se construyen con más de 50 pies de longitud debido a los grandes y costosos cimientos que requieren.

Los vientos necesitan una gran área para torres altas. A menudo, es preferible construir soportes de acero a los cuales se fija la torre. Por lo común, se trata de un armazón de acero con una sección transversal cuadrada, ensanchada en la base. Una

sección transversal triangular es más económica y se ha usado en varios casos. La torre de la antorcha se expandirá debido al flujo de gas caliente, por lo cual la estructura de soporte debe tener la capacidad de acomodar esta expansión.

Los sellos de agua y los parallamas se usan para evitar que un frente de llamas ingrese en el sistema de la antorcha. Los parallamas presentan la tendencia a taponar y obstruir el flujo y no son capaces de detener un frente de llamas en una mezcla de aire con hidrógeno, acetileno, óxido de etileno y disulfuro de carbono, de modo que son de poco valor.

Los sellos de agua se usan para evitar que un frente de llamas y aire ingrese en el sistema de recolección de gases de la antorcha. El peso del sello de agua hace que éste se localice a nivel o casi a nivel del suelo y por lo tanto no puede usarse para evitar que el aire ingrese en la torre.

Los cilindros separadores se ubican en o cerca a la base de las antorchas elevadas para separar los líquidos de los gases que se están quemando. Si no se eliminan las grandes gotas líquidas, podrían quemarse mientras caen al suelo. Diseñadas para transportar gases, las líneas de antorcha pueden contener líquidos de las descargas de expansión de líquidos, el líquido arrastrado de las descargas de gas y vapores condensados. El cilindro separador se usa para eliminar estos líquidos antes de que se quemen los gases. Los sellos de agua y los cilindros separadores se encuentran en la mayoría de sistemas de antorcha por razones de seguridad.

#### 7.5.2 Antorchas de Tierra

Una antorcha de tierra consiste en un quemador y sus accesorios, como un sello, quemador y encendedor piloto. Uno de los tipos consiste en los quemadores convencionales que descargan horizontalmente sin protecciones. Esta antorcha debe instalarse en una gran área abierta para su operación segura y por protección contra incendios. Si el sistema de encendido no funciona, no es capaz de dispersar los gases como lo haría una antorcha elevada. Este tipo de antorcha de tierra sólo tiene aplicaciones limitadas.

Las antorchas de tierra también pueden consistir en múltiples quemadores protegidos dentro de un casco refractario. El propósito esencial de una antorcha de bajo nivel es la atenuación total de las llamas de la antorcha, así como el quemado sin humo a un nivel bajo de ruido. Los gases quemados se conectan por un colector múltiple a una serie de cabezas de quemador que descargan el gas en la protección refractaria. Se obtiene la mezcla del gas y el aire por una serie de boquillas múltiples a chorro. El aire para la combustión es proporcionado por el tiro natural dentro del casco protector. Se logra el quemado sin humo con poco vapor, o en ausencia de éste, debido a la turbulencia y temperatura del quemado. El tamaño de la protección depende de la

capacidad de la antorcha, pero puede ser bastante grande. Una antorcha de tierra protegida, con una capacidad de 25 000 lb/hr tiene un casco de 100 pies de alto y 20 de diámetro. Esta misma capacidad podría manejarse con una antorcha elevada

de 8 pulgadas de diámetro.

El costo inicial de una antorcha, protegida de tierra generalmente limita su capacidad a solo una porción de las ratas de descarga de emergencia de una planta. Sin embargo, la antorcha de tierra puede diseñarse para manejar la mayor parte de operaciones de antorcha, mientras que las grandes liberaciones restantes pueden desviarse hacia una antorcha elevada. Este tipo de sistema de antorcha integrado actualmente se está haciendo común, especialmente en áreas pobladas.

### 7.5.3 Antorchas de Tiro Forzado

La antorcha de tiro forzado utiliza el aire proporcionado por un soplador para proporcionar aire y turbulencia primarios, necesarios para el quemado sin humo de los gases de descarga, sin el uso de vapor. Este tipo de antorcha combina el quemado sin humo con costos operativos bajos y buena confiabilidad debido a que el tiro forzado es menos afectado por el viento.

Sin embargo, esta antorcha también tiene un costo inicial alto. El costo puede ser de dos a tres veces el costo de una antorcha convencional, principalmente porque son necesarias dos torres para mantener separados el gas y el aire hasta que se mezclen y enciendan en la corona. Una antorcha de soplador deberá tener un dispositivo automático de rechazo del aire para evitar que un exceso de aire apague las llamas y cree humo, si se reduce la velocidad del gas. Sopladores o compuertas de velocidad variable, conectados a dispositivos de detección de flujo, se han usado en estas antorchas para extender su proporción de rechazo. Debido a las limitaciones de costos y de proporción de rechazo, esta antorcha se ha usado mayormente en aplicaciones especiales para proporcionar quemado sin humos cuando no hay disponibilidad de vapor. También se ha utilizado en transferencia y ventilación de tanques y en conjunción con una antorcha elevada sin control, con el objeto de brindar quemado sin humo durante el quemado de gases cotidianos.

### 7.5.4 Comparación de Costos de los Sistemas de Antorcha

Los costos de capital y operación para un sistema de antorcha dado dependen de la disponibilidad de vapor, del tamaño de la antorcha, de la composición del gas residual y de la frecuencia del quemado de gases. Cada instalación es un problema especial, cuya economía debe resolverse conforme al caso específico.

Vanderlinde estimó el costo relativo del equipo usado en los sistemas de antorcha sin generación de humo. Los costos de equipo incluyen una torre con vientos, tubería de encendido, tubería de pilotos, anillo quemador y accesorios. Como se muestra en el cuadro a continuación, Vanderlinde descubrió que el costo relativo de los sistemas de antorcha sin humo no dependían del diámetro de la torre. Por otro lado, el costo relativo del equipo para un sistema de aire forzado sí depende del diámetro, dado que se adquiere una torre dentro de otra.

Tipo de Antorcha	
12" día	
24" día	
Corona estándar con humo	1,00
	1,00
Corona de vapor sin humo	1,25
	1,25
Corona de gas	1,30
	1,30
Corona de agua	1,20
	1,20
Tiro forzado	2,80
	3,38

Las antorchas protegidas de bajo nivel, con la capacidad equivalente de una antorcha elevada, pueden resultar hasta 10 veces más costosas. Por esta razón, la antorcha protegida sólo se diseña para manejar operaciones de antorcha de poco volumen y cotidianas.

Esta discusión cubre factores de importancia en la locación de la antorcha, el equipo involucrado y el diseño.

#### 7.6.1 Sistema de Antorcha

Un sistema de quemado de gases consiste en instalaciones para poner en combustión -con seguridad- hidrocarburos que se expulsan a una caída de presión que no compromete los sistemas de seguridad de la planta. La condición operativa ideal sería eliminar la necesidad de antorchas, según se discutió en el capítulo 6. Sin embargo, las instalaciones para recuperar grandes cantidades de hidrocarburos liberados bajo condiciones de emergencia no son económicamente justificables.

Un sistema de quemado típico consiste en una serie de tuberías dentro de una unidad (incluyendo una mezcla de válvulas y respiraderos para regular la presión), una línea hacia la locación de la antorcha, un cilindro separador para eliminar hidrocarburos líquidos de la corriente de gas, un sello líquido opcional para proporcionar presión de colector positiva, sin tener que compensar y proteger contra el retorno de llama, una torre de antorcha con corona de antorcha, un sistema opcional de asistencia para mantener un encendido sin humo, un sistema de gas combustible para las luces pilotos junto con encendedores e instrumentación. El sistema típico de quemado de gases maneja la descarga de todo lo que expele una unidad dada o varias unidades dentro de una planta.

El diseño de un sistema de antorcha es una tarea compleja. Como con cualquier unidad de proceso, el diseñador debe estar

familiarizado con todos los factores que influyen en el producto deseado. El propósito del presente punto es revisar estos factores y ofrecer soluciones específicas que satisfagan los criterios anteriormente señalados.

### 7.6.2 Múltiple de Colección

El sistema de antorcha puede definirse de manera que incluya todo el equipo: desde la boquilla de descarga de alivio de un depósito hasta el proceso de combustión de la antorcha. La primera pieza del equipo que realmente ve o inicia una descarga es la válvula de alivio del depósito. En condiciones operativas anormales o de emergencia, este dispositivo permite que los flujos de gas/líquido escapen del depósito hacia el colector.

Los criterios de diseño para las válvulas de alivio están bien documentados en las publicaciones API RP-520 y RP-521. Estos documentos proporcionan guías específicas para determinar la presión de descarga y el flujo de descarga requerido para cualquier depósito dado. La mayoría de sistemas de antorcha consiste en múltiples válvulas de alivio que descargan en un múltiple de colección común o sistema colector. En muchos sistemas, se utilizan colectores de descarga de baja presión y de alta presión separados. Esto permite la segregación de las válvulas de alivio desde las fuentes de alta presión, como los depósitos, torres, etc., y de fuentes de baja presión como tanques de almacenamiento y limpieza de coches tanques. Los gases de cada múltiple de colección son quemados a través de una sola antorcha. Un aspecto clave que influye en el diseño del sistema de antorcha es la contrapresión permisible para la válvula de alivio. La caída permisible de la presión del sistema desde la descarga de la válvula que pasa a través de la corona de la antorcha es igual a la contrapresión permisible de la válvula de alivio. En un sistema de válvulas de descarga múltiple, este valor es igual a la más baja de las válvulas del colector. Este valor se ha mantenido limitado a un máximo del 10 por ciento de la presión mínima establecida para la válvula de alivio. Utilizando válvulas de descarga operadas por asiento balanceado o por piloto, esta contrapresión permisible puede aumentarse hasta en un 50 por ciento de la presión establecida, pero esto no es recomendable.

El aumento de la contrapresión permisible de la válvula de alivio puede tener varios efectos sobre los componentes del sistema de antorcha, por ejemplo:

- a) Colectores y tuberías más pequeños.
- b) Cilindros separadores y de sello líquido más pequeños.
- c) Mayores tamaños de las válvulas de alivio.
- d) Antorchas más pequeñas con velocidades más bajas de purga y vida operativa mejorada.
- e) Reducción significativa o eliminación de servicios (aire, vapor, etc.) requeridos para el quemado sin humo, a través de la utilización de la energía cinética incrementada en la corona de la antorcha.

Los ahorros en costos de capital del equipo, como resultado del incremento en la caída de presión, son atractivos, pero no constituyen el factor principal por considerar. Los ahorros por reducción en los costos operativos continuos pueden ser muy significativos durante la vida de un sistema de antorcha promedio. El ahorro sólo en la reducción de purga puede ser de hasta el 99%.

### 7.6.3 Cilindros

Un sistema de antorcha adecuadamente diseñado incluye por lo menos dos depósitos para propósitos especiales: un cilindro de sello líquido y un cilindro separador. Estos depósitos sirven, cada uno, para una función especial tendiente a aumentar la seguridad del sistema total.

El potencial de introducción de líquido, o de formación de condensados (vapor de hidrocarburos o de agua) en el colector de la antorcha es inherente a todo sistema de antorcha. Si se permite que esta fase líquida llegue a la zona de combustión, se producirán por lo menos dos serios problemas. Si hay grandes gotas presentes, existe el potencial de que se produzca una lluvia de fuego de hidrocarburos desde la llama. Esto puede dar por resultado gotas flameantes que cubran el área o líquido flameante que se derrame de la corona de la antorcha, generando un serio peligro para la instalación y el personal. La incorporación en el sistema de un cilindro separador adecuadamente diseñado puede resolver este problema. El segundo inconveniente es la presencia de gotas parejas muy pequeñas, que pueden reducir dramáticamente la capacidad de la antorcha de funcionar sin humo. Las gotas muy pequeñas, que pasan a través del cilindro separador, con frecuencia se condensan para formar gotículas mayores en la corriente del sistema que sale del cilindro separador. Este problema puede eliminarse localizando el cilindro separador muy cerca o en la base de la torre de la antorcha. La remoción de gotas líquidas muy pequeñas no se puede lograr a través de una simple reducción en la velocidad de la corriente de gas. Para eliminar efectivamente las gotas líquidas muy pequeñas, deberá emplearse un ciclón centrífugo modificado para superficies húmedas u otro dispositivo similar.

El diseñador deberá garantizar que la capacidad de retención del cilindro sea suficiente para cualquier taco previsto de flujo líquido. Además, la capacidad de bombeo debe ser adecuada para evacuar el cilindro. Se deberá disponer o almacenar todo condensado removido por el cilindro separador.

El sello líquido se instala en un sistema de antorcha para proteger el colector de antorcha de la infiltración de aire y el potencial retorno de llama asociado. Una antorcha elevada, llena de gas más liviano que el aire, debido al peso molecular o a la temperatura, tendrá una presión manométrica negativa en la base, como resultado de esta flotación de gas. Si existe presión negativa en la base

de la torre, el sistema colector completo de la antorcha estará bajo presión negativa. La operación del sistema de la antorcha bajo presión negativa aumenta considerablemente el potencial de infiltración de aire en el sistema colector a través de

filtraciones o válvulas abiertas. La instalación de un sello líquido en el sistema asegura que la presión positiva en el colector de la antorcha reduzca significativamente el potencial de infiltración de aire.

Un sello líquido apropiadamente diseñado puede funcionar como parallamas positivo. Las pruebas indican que el sello líquido puede diseñarse para detener efectivamente la propagación de las llamas que resultarían inafectadas por los parallamas convencionales de tipo laberinto. La localización del sello líquido en la base de la torre ofrece la máxima protección del sistema, aislando completamente la fuente de encendido de la antorcha de las unidades del proceso y del colector múltiple de la antorcha.

Un sello líquido con componentes internos impropios puede operar con un efecto acoplado entre el líquido sellante y el flujo de gas para producir un sistema no amortiguado. El resultado es una presión sinusoidal versus tiempo de respuesta. Esta variación da por resultado una llama tipo bocanadas que hace imposible que se realice un quemado de gases eficiente, sin humo. La solución es añadir amortiguación a través de los componentes internos adecuadamente diseñados.

El sello líquido y el cilindro separador pueden combinarse en un solo depósito de dos componentes. Una combinación de sello líquido y cilindro separador localizada en la base de la torre de la antorcha proporciona varios beneficios:

- q Los dos cilindros se encuentran en una locación de procesamiento óptima.
- q El depósito puede actuar como parte de una estructura de soporte integrada.

Se acumulan ahorros significativos de costos en las siguientes áreas:

- v Se pueden ahorrar dos cimientos
- v Se pueden eliminar las tuberías entre los depósitos
- v El acero del cilindro puede usarse como parte de la torre de la antorcha

#### 7.6.4 Ubicación de la Antorcha

La economía y la seguridad dictan por lo general la cantidad y la ubicación del espacio de tierra asignado a la antorcha. Los reglamentos de seguros a menudo dictan la proximidad permisible de la antorcha a otros equipos e instalaciones del proceso.

En un área fijada, se pueden utilizar diferentes tipos y configuraciones de antorchas. Existen tres tipos básicos de sistemas a disposición:

La ubicación también tomará en consideración las demás estructuras erigidas en el área. Otra complicación con frecuencia pasada por alto es la localización de los alambres de los vientos y su posible interferencia.

La dirección y velocidad del viento afectan la radiación del calor, influyendo en la longitud y ángulo de la llama. El diseño normal emplea la velocidad promedio del viento y toma en cuenta toda posible dirección del mismo.



Las inversiones de temperatura y otras condiciones meteorológicas afectan la estabilidad atmosférica y reducen la dispersión de olores, concentraciones tóxicas y humo. Estas condiciones se deben considerar en base a la frecuencia de las ocurrencias de inversión de la temperatura y el efecto esperado en la población del área. Donde ocurren inversiones de temperatura, es posible que los máximos niveles permisibles de emisión (capítulo 5, cuadro 1) se excedan en el punto de medición especificado (ver capítulo 8) .

El tipo de gas por quemar afecta el diseño y el tamaño de la corona de la antorcha. No es aceptable diseñar sólo en base al peso molecular. Algunos gases se queman sin gases de apoyo, mientras otros, tales como los gases con bajo contenido de BTU, deben ser suplementados. Algunos gases requieren de asistencia para poder quemarse sin emitir humo. La selección del método de asistencia es importante en la seguridad de la antorcha. ¿Cuál es el grado de confiabilidad del medio de asistencia? ¿Estará éste disponible en las cantidades necesarias durante una emergencia? ¿Cuál método de asistencia es el más económico?

Al revisar la composición del gas, la primera preocupación es garantizar la eficiencia de destrucción. Una buena eficiencia de destrucción se asegura si se puede establecer una llama estable. El logro de esto supone diferentes técnicas para diversas propiedades del gas.

Una de las reales preocupaciones en cuanto a seguridad es que se transporten materiales inapropiados hacia el sistema de la antorcha. El gas acuoso descargado a 500oF en 1000 pies de colector de descarga frío, podría ser un sólido al otro extremo de la línea. La línea de vapor conectada a la línea de descarga podría generar un bloque de hielo en clima de invierno. Estos factores deben considerarse en un diseño seguro.

Otro aspecto es dónde ocurre la descarga de alivio. El bloqueo del colector de la antorcha significa la pérdida de la protección de la válvula de alivio. Esto puede ocurrir por gas húmedo o por un sistema deficientemente dimensionado que coloca contrapresión excesiva en la válvula de alivio. La disposición y la selección de la válvula de alivio -más las instrucciones de operación del sistema de alivio- necesitan considerar este problema.

A medida que los gases residuales entran en combustión, cierta cantidad del calor producido se transfiere en la forma de radiación térmica. El nivel de radiación producido a grandes velocidades de flujo de gas puede poner en peligro al personal tanto en estructuras a nivel del suelo como en aquéllas elevadas que se encuentren cerca de la antorcha. Además, las estructuras de madera, como las torres de enfriamiento, también pueden ponerse en peligro. Esta radiación normalmente controla la altura de la torre de la antorcha. Durante las operaciones normales, su intención es limitar la intensidad del calor al nivel del suelo hasta niveles que sean lo suficientemente bajos para que los puedan soportar los humanos, así como para proteger los equipos de daños por calor. La intensidad de calor se mide en términos de BTU/hr/pie cuadrado. El nivel de

diseño recomendado para áreas de planta es de 1500 Btu/hr/pie cuadrado. Este nivel de intensidad permitirá que una persona adecuadamente vestida realice funciones normales en el área. Los equipos pueden soportar hasta 3000 Btu/hr/pie cuadrado. Cuando se efectúa trabajo de mantenimiento por encima del nivel del suelo mientras la antorcha está en operación, los trabajadores de mantenimiento, si no toman precauciones especiales, pueden recibir más calor del recomendado.

Por lo general, la mayor liberación de gas (y de calor) ocurre cuando se presenta una dificultad importante; por ejemplo, pérdida de energía eléctrica, pérdida de agua de enfriamiento o incendio. Una descarga de gas de este tipo es una verdadera situación de emergencia. La adición de las capacidades de la válvula de alivio de aquellas válvulas comprendidas en el peor caso de emergencia dictarán la velocidad de diseño que debe manejar la antorcha. El tamaño del volumen del sistema usualmente amortiguará los picos temporales. (Deberá notarse que las válvulas de alivio en los depósitos pueden no abrirse todas o permanecer abiertas simultáneamente).

El uso por varias unidades de una misma antorcha complica el dimensionamiento debido a la probabilidad de que varias unidades descarguen a la antorcha al mismo tiempo. Las dimensiones de la antorcha deberían tomar en cuenta la posibilidad de que ocurra una falla común que pueda ocasionar que se descargue hacia la misma antorcha al mismo tiempo.

Otro caso por considerar es la radiación de más de una antorcha en una sola área. En este caso, no sólo se deberá considerar la radiación combinada, sino que también se deberá considerar, al establecer la distancia entre las antorchas, el trabajo de mantenimiento por encima del nivel del suelo en una antorcha, mientras la otra esté en operación.

Las expansiones de unidades normalmente aumentan la posible liberación de calor desde una antorcha. Cualquier adición considerable deberá automáticamente generar la revisión de la liberación de calor y efecto de la radiación. Por seguridad, podrá requerirse una corona de antorcha nueva y, tal vez, una torre más alta. La caída de la presión del colector es una función especialmente crítica en este escenario.

Otro método que se puede utilizar para reducir la radiación es el concepto de antorcha de puntos múltiples. Utilizando un número de coronas de antorcha pequeñas, pero de alta eficiencia, en lugar de una sola corona grande se puede reducir considerablemente la longitud total de la llama y su capacidad de emisión. Como resultado, se obtiene una altura menor de la torre y una llama más limpia.

Este tema ha sido previamente discutido, en el capítulo sobre los cilindros separadores. Si el sistema de antorcha que se está diseñando presenta potencial de emisiones de líquido, se debe asumir que eventualmente ocurrirá cierto arrastre. Tanto la dirección prevaleciente del viento como el equipo que funciona en condiciones donde no lo hay deberán tenerse en cuenta al momento de seleccionar la ubicación de la antorcha, así como si se va a utilizar una antorcha de tierra o elevada.

Las antorchas adecuadamente diseñadas y operadas son muy efectivas para convertir los hidrocarburos potencialmente tóxicos y explosivos en productos de combustión seguros, ambientalmente más aceptables. Pueden lograrse eficiencias de destrucción de más del 99,9 por ciento. Algunos gases típicos de las antorchas de plantas de procesamiento (aquellos que contienen azufre, cloro, etc.) son tóxicos tanto cuando están en su forma en combustión como cuando no lo están. Para el quemado de gases que contienen tales compuestos tóxicos, se debe dar el tamaño apropiado a la antorcha y se debe asegurar el encendido a través del uso de pilotos constantemente encendidos. Los compuestos tóxicos en su forma después de combustión y combinados con los otros productos de combustión deben dispersarse de manera adecuada en la atmósfera para proporcionar concentraciones seguras a nivel del suelo (CNS).

Las concentraciones a nivel del suelo son una función de la velocidad del flujo contaminante, velocidad del viento, condiciones atmosféricas, velocidad de descarga y altura efectiva de la torre. Están a disposición algunos métodos aceptados por la industria que calculan la CNS de contaminantes. Todos dan resultados similares dependiendo del terreno y de los límites del modelo. Los niveles más bajos de CNS, en la dirección del viento, comúnmente se obtienen de antorchas de tierra protegidas. Esto es debido a que la altura efectiva de la torre es mayor que en las unidades elevadas. La combustión protegida en una antorcha de tierra crea temperaturas mayores con el resultante incremento en la elevación térmica.

Una concentración objetivo de diseño al nivel del suelo, en la dirección del viento, es de 0,10 ppm o menos. Para la mayoría de sustancias tóxicas o nocivas esta concentración es satisfactoria: sin embargo, hay algunas cuantas sustancias para las cuales, incluso esta pequeña concentración, es demasiado alta y se generan severas molestias de olor o deterioro de suelos.

En el capítulo 5, cuadro 1, se dan los límites para los compuestos tóxicos más comunes en campos petroleros (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO), los mismos que son considerados en la legislación peruana en vigencia. El volumen 2 del manual "Disposal of Refinery Wastes, Waste Gases and particulate Matter", publicado por el Instituto Estadounidense del Petróleo, recomienda los límites que se indican para las siguientes sustancias:

Compuesto ppm

alcohol isobutílico 0,003

alcohol isoamílico 0,0026

mercaptano de metilo 0,041

mercaptano de etilo 0,0028

mercaptano de n-propilo 0,0016

mercaptano de n-butilo 0,001

mercaptano de isoamilo 0,00043

p-tiocresol 0,0027

sulfuro de metilo 0,0037

sulfuro de etilo 0,000056

sulfuro de propilo 0,011

sulfuro de n-butilo 0,015

Las preguntas sobre el mantenimiento pueden cambiar el diseño del sistema: ¿Se puede retirar de servicio al sistema cuando la unidad está parada? ¿Cuántos días podrá estar fuera del servicio el sistema por reparaciones? El vaporizado y la purga de una unidad reducen el tiempo disponible para trabajar en la antorcha.

¿Hay otras torres que estén descargando en el área que harían peligroso trabajar en altura debido a la concentración de contaminantes o a la radiación de calor? Con frecuencia, las estructuras elevadas se pasan por alto en las evaluaciones de diseño.

#### 7.6.5 Purgado

Las antorchas pueden plantear uno de los más serios peligros de seguridad para la instalación, si se operan inadecuadamente. Existe el potencial de que se produzca una explosión o detonación seria en cualquier sistema de antorcha.

Dos de los tres elementos requeridos para una explosión están siempre presentes en un sistema de este tipo. El combustible está disponible en la forma de descarga y fuga de gases en el sistema. Los pilotos proporcionan una fuente constante de encendido. La seguridad del sistema de antorcha depende, pues, totalmente de evitar que el oxígeno (aire) se infiltre en la antorcha. El sello líquido del que ya se ha discutido puede mantener una presión positiva del gas en el colector de la antorcha y evitar el ingreso de una fuente de aire. La torre de la antorcha por encima del sello líquido y los sistemas de antorcha que no contienen sellos líquidos, generalmente son protegidos por la introducción de un gas de purga.

Dado que los costos de energía se han incrementado, se ha venido dando mayor atención al costo de estos gases de purga. Al mismo tiempo, se han incrementado los esfuerzos por reducir o eliminar las fugas de las válvulas de alivio. El resultado neto es la reducción de dichas fugas, así como los esfuerzos simultáneos por reducir los requerimientos de gas de purga, los cuales han producido una reducción importante en el flujo normal hacia la antorcha. Hay disponibles diversos tipos de dispositivos de sellado para reducir el gas de purga que se requiere para proteger el sistema de la antorcha.

Se ha probado que los sellos de densidad de gas son dispositivos confiables, de conservación efectiva de la purga, a través de años de operación en el campo. Este tipo de sellos ofrece las velocidades de purga más bajas posibles, la máxima seguridad y un reembolso extremadamente rápido en ahorros de purga.

Los sellos de densidad de gas operan mediante el establecimiento de bolsones segregados de gases de diferente composición y densidad. El ingreso de aire se restringe a la velocidad de difusión en la que el oxígeno puede penetrar estos bolsones de densidad de gas, tal ingreso es bloqueado completamente mediante el mantenimiento de una purga mínima que fluye continuamente a través de la zona del bolsón de densidad afectado por la difusión de gas hacia fuera de la antorcha. El proceso de difusión, además, es un fenómeno que depende del tiempo. Aún cuando se interrumpa el flujo de gas de purga, la infiltración de aire en el sistema de la antorcha se bloqueará por el periodo que le tome al oxígeno difundirse a través del bolsillo de densidad de gas. Con un sello molecular, se puede restringir la infiltración de aire durante las interrupciones por purga que excedan las dos horas.

Las velocidades de purga son aproximadamente 1/50 de las velocidades requeridas en una torre de antorcha que no posee ningún dispositivo de sellado.

El sello molecular ofrece las siguientes ventajas:

- q La velocidad de purga y costos operativos más bajos posibles.
- q Cero por ciento de oxígeno debajo del sello.
- q Protección extendida en caso de pérdida de purga.
- q Rápido reembolso
- q No hay piezas que se muevan.
- q Mantenimiento mínimo.

Cuando el costo inicial de inversión es más importante que los costos operativos, o en los casos en que haya disponibilidad de gas de purga barato, un tipo de sello de velocidad de gas es una elección excelente. Las pruebas indican que la infiltración de aire en la antorcha ocurre a través de la adhesión de flujo a la pared de la antorcha. El tipo de sello de velocidad de gas elimina esta adhesión de flujo y devuelve el aire ingresante al centro de la antorcha, donde la velocidad del gas de purga lo barre fuera del sistema. Este tipo de dispositivo de sellado funcionará en tanto se mantenga la velocidad de gas de purga.

Este tipo de sello de velocidad de gas ofrece varias ventajas:

- v Operación e instalación baratas
- v No se añade carga estructural de viento
- v No requiere mantenimiento

La reducción de purga que se ofrece con los dispositivos anteriormente señalados requiere que el diseñador del sistema trate

de cerca el problema de encogimiento o condensación de los gases de descarga en la cabeza de la antorcha luego de una descarga caliente. La reducción en volumen, después de una descarga así, requiere la introducción de volúmenes muy grandes de purgado durante el periodo de enfriamiento. Comúnmente, este volumen de gas de purga se introduce de modo continuo.

Un sistema de purga para compensar la temperatura mide el estado termodinámico del desecho de descarga e inyecta gas de purga sólo en la medida que se requiera durante el enfriamiento. El sistema consiste en sensores y controles de estado termodinámico que accionan una válvula de inyección auxiliar de gas de purga. Las velocidades suplementarias de purga se determinan conforme al pronóstico de la peor condición de descarga.

#### 7.6.6 Resumen

Las cinco causas más frecuentes de accidentes en las antorchas son:

- q Explosión interna
- q Arrastre de líquidos
- q Obstrucciones del sistema
- q Procedimientos de mantenimiento defectuosos
- q Pérdida de encendido

Un sistema de antorcha funcional y seguro toma en cuenta todos los factores de diseño. Recordar siempre que de los tres elementos de un desastre, dos están siempre presentes en un sistema de antorcha: el combustible y el fuego. Si mantenemos el control adecuado, el oxígeno no se presentará.

El logro del objetivo primordial de un sistema de antorcha expone a ésta a un ambiente hostil. Los factores que influyen en el ambiente de la antorcha son:

- q El viento
- q La velocidad de flujo
- q La composición del gas
- q Los líquidos
- q Los contaminantes transportados en el aire

Toda antorcha está expuesta al viento y debe diseñarse para poder soportarlo. Limitar las consideraciones de diseño a la respuesta estructural ante las cargas de viento puede ser desastroso para la vida de la antorcha. Las velocidades máximas del viento son importantes para la consideración de la estructura y para ciertas consideraciones de combustión, como el encendido. Sin embargo, un viento modesto puede producir fuerzas inducidas que empujen y jalen la llama y que sean un contribuyente importante a la falla de la antorcha. Los vientos en los emplazamientos mar afuera y en algunos situados en la

costa o en el desierto presentan un reto especial debido a su alta velocidad promedio y, en algunos casos, dirección casi constante.

Algunos diseñadores de sistemas de antorcha consideran su tarea completa cuando han previsto una disposición segura y efectiva a una velocidad máxima de flujo. En verdad, esta es una consideración de principal importancia. Sin embargo, la mayor parte de daños a la antorcha ocurre a velocidades de flujo bajas a intermedias.

Las instalaciones de antorchas mar afuera y en la costa deben reconocer que los contaminantes transportados por el aire, tales como la sal o incluso el agua salada, estarán presentes. Sin embargo, dicha presencia debe ponerse en su real perspectiva con relación a otros factores.

Ignorar o no dar la debida importancia al ambiente de la antorcha puede conducir a fallas prematuras de la misma. El impacto financiero de una falla de antorcha es serio, puesto que se deben considerar los costos de parada de la instalación, de trabajo y equipos de repuesto, así como de la antorcha misma.

Al considerar la falla de la antorcha, se debe hacer la siguiente pregunta: "¿Cuándo es inaceptable la condición de la antorcha?". Existen tres modos principales de falla de la antorcha que deben considerarse:

- q Restricción de flujo

- q Falla de quemado

- q Falla mecánica

El funcionamiento seguro del sistema de antorcha requiere que el sistema sea capaz de disponer de la velocidad máxima de flujo sin exceder la contrapresión permisible en los dispositivos de alivio. El calor puede hacer que el quemador de la antorcha -o ciertos dispositivos de regulación de flujo en el quemador mismo- se deformen, generando una restricción del flujo y un aumento de la caída de presión. Cuánta deformación es aceptable, ya es materia de criterio, el cual debe basarse en la cantidad de restricción, no en la apariencia. Por ejemplo, una antorcha puede experimentar un óvalo considerable antes de que el flujo se restrinja seriamente.

La falla de quemado puede ser ocasionada por la pérdida de funcionamiento del piloto o daño a los estabilizadores de llama.

La falla del piloto generalmente se puede rastrear en una falla del sistema de suministro de gas al piloto, antes que en el piloto mismo. La falla del estabilizador de llamas es más serio en condiciones de flujo elevado.

El combado severo, rajaduras o partes que caen del quemador de la antorcha son obviamente inaceptables.

#### 7.9.1 Quemado Interno

Uno de los mecanismos más insidiosos de falla de la antorcha es el quemado interno. Este es casi imposible de observar durante el día. En la oscuridad, el quemado interno severo puede calentar las superficies metálicas hasta la incandescencia.

El viento que sopla perpendicularmente al eje de un quemador de antorcha ocasiona el desarrollo de una zona interna de baja presión. A velocidades de flujo muy bajas, las fuerzas creadas por la zona interna de baja presión no son satisfechas sólo por el gas, por lo que se jala aire hacia el quemador de la antorcha. Cuando el aire y el gas se mezclan se produce el quemado interno.

Las antorchas horizontales o las colocadas a cierto ángulo entre vertical y horizontal son particularmente susceptibles al quemado interno. Toda dirección de viento que haga entrar algún componente del viento en la boca de la antorcha intensificará el quemado interno y aumentará el rango de flujo sobre el cual puede ocurrir dicho quemado interno. Para la mayoría de aplicaciones, la mejor posición de la antorcha es vertical o lo más vertical que sea posible.

Si no se ha considerado adecuadamente en el diseño de la antorcha, el quemado interno puede ocasionar fallas mecánicas o de materiales.

#### 7.9.2 Quemado Externo

Las velocidades de flujo incrementadas superan la zona interna de baja presión y el quemado se produce en el exterior del quemador de la antorcha. El quemado externo es influido por la fuerza

misma del viento, así como por zonas de presión creadas por él. Cuando el viento golpea la antorcha, se desarrolla una zona de alta presión en el lado del viento y una zona de baja presión a sotavento.

Las velocidades altas de flujo superan la fuerza de la zona de baja presión, desarrollándose una llama que se proyecta hacia arriba. Sin embargo, a una velocidad de flujo un poco más baja, la fuerza de la zona de baja presión más la fuerza del viento hacen que la llama se mueva hacia la zona de baja presión a sotavento de la antorcha. Luego, una parte de la antorcha es expuesta a intenso calor y, en algunos casos, a una atmósfera reductora, ocasionando fallas mecánicas o de materiales.

#### 7.9.3 Ataque Químico

Además de la exposición a altas temperaturas y condiciones reductoras, la antorcha también está sujeta al ataque químico. Los componentes del gas de descarga, los productos de combustión y contaminantes transportados en el aire pueden estar presentes en la atmósfera que circunda al quemador de la antorcha.

El sulfuro de hidrógeno, SO<sub>x</sub>, cloro, NO<sub>x</sub> y agua están entre los contribuyentes más comunes del ataque químico. La selección de material para la antorcha debe reconocer su presencia.

#### 7.9.4 Fuegos Secundarios



Muchas antorchas se destruyen a causa de los sistemas de remoción de líquidos inapropiadamente diseñados u operados. En el peor de los casos, la porción líquida se hace tan grande que el líquido empieza a correr por el lado del quemador de la antorcha hacia la estructura de soporte. La llama resultante y la condición reductora engloban la antorcha y sus accesorios conduciendo rápidamente a daños serios.

Un fuego secundario menos obvio pero igualmente destructivo puede ser ocasionado por pilotos impropriadamente diseñados u operados. La alta confiabilidad del piloto a un consumo bajo de gas para pilotos demanda el uso de un diseño de piloto del tipo con mezcla previa que incluye un inspirador de aire. Este debe localizarse en un punto algo lejano de la corona del piloto.

El gas del piloto inspira aire y la mezcla de aire-gas se quema en la corona del piloto. El diseño o la operación impropia puede ocasionar que el gas se queme en el inspirador de aire, no así en la corona. La llama que se produce puede destruir el piloto y dañar severamente o destruir el quemador de la antorcha.

#### 7.10.1 Dimensiones de la Antorcha

Normalmente se diseñan las dimensiones de los quemadores de antorcha de acuerdo con dos criterios: caída de presión o máxima velocidad de salida permisible para un quemado estable. La caída de presión y la velocidad de salida están relacionadas. La caída de presión permisible se fija por el diseño total del sistema de antorcha y por los requerimientos de contrapresión máxima para los dispositivos de alivio. En algunos casos, los límites de caída de presión mantienen la velocidad de salida, bastante por debajo de la máxima permisible. En otros, hay disponibilidad de una considerable presión y la velocidad de salida es la que limita el tamaño del quemador de la antorcha.

La norma API RP 521 sugiere limitar la velocidad de salida máxima de las antorchas a un número Mach de 0,5 para asegurar el quemado estable. La experiencia demuestra que la velocidad de salida máxima permisible depende de la composición del gas de descarga; sin embargo se recomienda la consulta de API RP 521 para los sistemas de antorcha en las instalaciones de producción y exploración de petróleo, así como de gas que se encuentran en el Perú.

El uso prudente de la caída de presión de la que se dispone puede permitir que se mantenga el tamaño del quemador de antorcha al mínimo. Esto incrementa la velocidad de salida para una velocidad de flujo dada, reduciendo de este modo el choque de llamas y mejorando la vida de la antorcha. Un beneficio adicional de los tamaños más pequeños de antorchas es una reducción en el tamaño de las problemáticas zonas de baja presión.

#### 7.10.2 Separación de la Carga

La separación de la carga, por lo general, requiere el uso de dos o más antorchas, como se discutió en el capítulo 7.4.2 "Métodos de Quemado".

Un sello líquido desvía pequeños flujos a la antorcha de primera etapa, mientras que -al mismo tiempo- proporciona un medio para descargar con seguridad altas velocidades hacia la antorcha para emergencias. Un sistema semejante minimiza el

quemado interno y externo, y mejora significativamente la vida de la antorcha.

Otros sistemas de antorcha tienen dos niveles distintos de alivio de presión. En estas situaciones, habrá tanto un colector de baja presión como uno de alta o bien un colector de alta presión más uno de presión media. La caída de presión permisible en el colector de baja presión podría ser tan baja como unas cuantas pulgadas de columna de agua, mientras que la permisibilidad en el colector de alta presión podrá ser de hasta varias libras por pulgada cuadrada. Los objetivos de quemado de gases de un sistema semejante pueden requerir el uso de un sistema de antorcha dual. La situación es usualmente que uno o ambos sistemas pueden aliviar al mismo tiempo.

Sin embargo, el quemado sin generación de humo de los gases de baja presión presenta un problema de diseño interesante.

Dado que la corriente está a baja presión, contribuye muy poco al nivel de energía cinética de la zona de combustión. Para tener éxito en el quemado sin humo se requerirá el uso de una segunda fuente para añadir energía cinética.

En una aplicación semejante, los gases de alivio de alta presión podrían usarse como fuente secundaria. Sin embargo, el empleo de los gases de alta presión depende del sistema de alivio de alta presión. Se podría extraer gas de alta presión del sistema de separación, pero esto representa un desperdicio innecesario de recursos.

#### 7.10.3 Sistemas de Purga Apropriados

Muchos operadores usaron una velocidad de purga en el sistema de antorcha lo suficientemente alta para producir una llama fácilmente visible durante el día. Los altos costos de energía han producido un deseo por conservar el gas de purga. No existen dudas que un dispositivo de conservación de la purga, como un sello molecular o dispositivo para evitar el ingreso de aire, reducirán considerablemente los costos de purga. Muchos pasan por alto el hecho de que la reducción en la purga aumentará la vida de la antorcha. Cuando se reduce la cantidad de purga, también se reduce la cantidad de calor liberado. Una liberación menor de calor significa menores daños a la antorcha inducidos por el calor.

#### 7.10.4 Protección contra Choque de Llamas

El choque de llamas por quemado interno o externo puede ser una causa importante de falla de la antorcha. La atención cuidadosa al diseño y la aplicación de la antorcha puede minimizar o prevenir el choque de llamas.

El daño a la antorcha debido al quemado interno puede retardarse por el uso apropiado de un revestimiento refractario interno.

Incluso un revestimiento refractario delgado puede reducir significativamente la temperatura del metal y evitar la atmósfera reductora ocasionada por el choque de llamas en el metal.

La vida del quemador de antorcha puede mejorarse minimizando el choque externo de llamas. La protección contra este tipo de choque de llamas puede lograrse por medios activos o pasivos.

Los escudos o deflectores de viento patentados y comercialmente disponibles pueden contribuir a reducir el efecto de la zona

de baja presión a sotavento. Además de interrumpir la zona de baja presión, el escudo evita que las llamas entren en contacto con el quemador de la antorcha. Tal protección pasiva es adecuada para muchas aplicaciones.

Las condiciones severas pueden requerir el uso de energía suplementaria para evitar el choque externo de llamas. Los quemadores usan una fuente de energía suplementaria, como aire de baja presión, para superar el efecto de la zona de baja presión e imprimir una dirección hacia arriba de la llama. El ahorro que se obtiene por el incremento en la vida de la antorcha es mucho mayor que el costo nominal de operación.

#### 7.10.5 Antorchas de Puntos Múltiples

Ya se ha visto que la separación de la carga de la antorcha en dos puntos de quemado puede mejorar considerablemente la vida de la antorcha. Una ventaja incluso mayor puede lograrse usando varios puntos de quemado individuales en un sistema por etapas o no. Las ventajas son:

- q Vida prolongada
- q Bajo mantenimiento
- q Bajo consumo de energía
- q Llamas cortas
- q Radiación reducida
- q Los líquidos arrastrados se queman
- q Capacidades muy superiores de no generar humo

#### 7.10.6 Metalurgia

Puede haber muchas causas de fallas en la antorcha. La selección apropiada de material puede mejorar la vida de la antorcha pero no puede, sola, superar todos los problemas que ya se han discutido. Un diseño de quemador de antorcha que exponga el metal a un choque frecuente de llamas está destinado a fallar a pesar de la metalurgia. Ningún metal puede soportar un choque repetido de llamas.

Es importante comprender que los fabricantes de antorchas no hacen las planchas de material que frecuentemente se usan en la construcción de antorchas. Los proveedores de materiales tienen un interés válido en promover una aleación particular. El interés del operador deberá ser el de mejorar la vida de la antorcha.

La experiencia es un factor muy importante en la selección del material para la antorcha. Se requiere de tiempo considerable para acumular una amplia base de datos sobre el rendimiento real de los metales en condiciones de quemado de gases. Se ha descubierto que la mayoría de aplicaciones no se beneficia del uso de aleaciones especiales y frecuentemente costosas. Para comprender la selección de materiales, se debe entender cómo ocurren las fallas en los metales.

La degradación térmica es una falla de un metal debido a ciclos térmicos repetidos. El choque de llamas inducido por el viento es generalmente cíclico en su naturaleza, como los vendavales, y los cambios en la velocidad de flujo ocasionan el movimiento del punto de choque. Esto genera ciclos

repetidos de alta temperatura, seguidos por enfriamiento. La exposición a altas temperaturas ocasiona que se forme un óxido o costra en las superficies metálicas. La formación de costras en sí misma no es necesariamente nociva para el metal. Sin embargo, las costras tienen un coeficiente de expansión algo diferente, lo que da por resultado la separación de las costras del metal de base. Por lo tanto, cada ciclo ocasiona pérdida de peso.

Cuando se selecciona un material, es necesario estudiar con cuidado las características del ciclo térmico y la aplicación exacta.

Por ejemplo, si su aplicación no los expone a altas temperaturas, los materiales como el S.S. 302, 316, 321 e incluso el acero de carbono, pueden usarse efectivamente para ciertas piezas de la antorcha.

La presencia de azufre en el gas residual ha llevado a los proveedores de materiales a recomendar el uso de la aleación 800 para las antorchas. La experiencia de campo real demuestra que esta aleación no es la mejor elección para tales aplicaciones.

La combinación de alta temperatura, atmósfera reducida y azufre, puede dar por resultado una rápida falla de la aleación 800.

La aleación 310 S.S. es una mejor opción.

El cloruro en la atmósfera alrededor de la antorcha puede sugerir el uso de materiales, tales como el Hasteloy. Sin embargo, la experiencia con antorchas expuestas a una atmósfera de agua salada indican que no se requiere el uso de dicho material.

El diseño mecánico inapropiado puede llevar a falla del metal, aún cuando la selección del material haya sido básicamente correcta. El no tomar debidamente en cuenta las fuerzas que se desarrollan durante la fabricación o la expansión térmicas han condenado a muchas antorchas antes incluso de que fueran puestas en uso.

La eficiencia de combustión del quemado de gases es una medida de la destrucción de hidrocarburos. Bajo condiciones estables, la mayoría de sistemas logrará un 98% o más. Ver cuadro 2. Las condiciones inestables de llamas darán por resultado eficiencias considerablemente más pobres y emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y particulados. Se debe observar que una antorcha humeante puede aún lograr una buena destrucción de hidrocarburos.

Se deberán mantener las siguientes condiciones para asegurar un patrón de llamas estable:

- v Las emisiones visibles no deben exceder 5 minutos en un periodo de 2 horas.
- v En todo momento debe estar presente una llama.
- v Se debe monitorear la presencia de una llama piloto para detectar una llama.
- v El valor de combustión neto del gas deberá ser por lo menos de 11,2 MJ/Nm<sup>3</sup> para las

no antorchas asistidas por vapor o aire y de por lo menos 7,45 MJ/Nm<sup>3</sup> para las antorchas asistidas.

## SISTEMAS DE ANTORCHA

Los sistemas de antorcha tienen una amplia aplicación en la industria del petróleo: desde la perforación y la producción pasando por diversos tipos de procesamiento hasta la comercialización. Cada sistema de antorcha presenta consideraciones especiales de aplicación. Gran parte de la investigación realizada sobre las antorchas ha sido efectuada sobre refinerías, en esta guía se han adaptado dichos resultados a los emplazamientos de exploración y producción.

El diseño de los sistemas de antorchas es un tema complejo. Sobre la base de los requerimientos de aplicación, el diseñador del sistema de antorcha debe considerar los siguientes puntos fundamentales de diseño:

- q Encendido
- q Prevención de infiltraciones de aire
- q Remoción de líquidos
- q Localización
- q Supresión de humos
- q Ruido
- q Otros niveles de emisión

Además, el diseñador debe tomar en cuenta el ambiente de la antorcha, los mecanismos de falla de la antorcha y las técnicas de diseño que puedan mejorar la vida de la antorcha. Deberá existir una conciencia permanente de que el diseño y la operación nunca deben comprometer el objetivo primordial del sistema de antorcha: la disposición segura y efectiva de gases.

Los gases y líquidos indeseados o liberados pueden provenir de una amplia variedad de fuentes, tales como:

- v Emergencias en la planta
- v Venteos de emergencia
- v Gases de la cabeza de revestimiento
- v Gases del manipuleo de productos
- v Gases y líquidos de procesamiento
- v Pruebas de la producción de pozo petrolero

v Derrames de petróleo

v Subproductos de la producción de petróleo

Sin tener en cuenta la fuente o la situación, el objetivo primordial del sistema de antorcha debe ser la disposición segura y efectiva de gases. Todos los aspectos del sistema deben apuntar a cumplir este objetivo. No se puede permitir que consideraciones secundarias, como el deseo de incrementar la vida del quemador de antorcha, comprometan la seguridad.

Tan pronto como el diseñador de la instalación empiece a trabajar en el sistema de la antorcha, debe tomar conciencia de ciertos factores que pueden influir en el diseño del equipo de quemado de gases. Los principales de estos factores son los siguientes:

- q Velocidad del flujo
- q Composición de los gases
- q Presión disponible del gas
- q Temperatura del gas
- q Costos y disponibilidad de energía
- q Requerimientos ambientales
- q Requerimientos de seguridad
- q Requerimientos sociales

Un diseñador debe conocer todas estas variables antes de empezar la especificación del equipo. A continuación se comenta brevemente sobre algunos de estos factores.

La velocidad del flujo afecta obviamente el tamaño de la línea, así como de la radiación y puede tener otras influencias. Por ejemplo, el quemado sin generación de humo de pequeñas cantidades de un gas puede ser simple cuando se compara con el quemado de mayores cantidades del mismo gas.

La composición del gas puede influir sobre el diseño de la antorcha en una serie de formas. La relación en peso del hidrógeno al carbono (H/C) puede afectar considerablemente el quemado sin producción de humo. El sulfuro de hidrógeno o grandes cantidades de materias inertes requieren de consideraciones especiales de diseño. La experiencia demuestra que el uso apropiado de la energía potencial (presión) de una corriente de gas puede mejorar significativamente el proceso de combustión.

Nunca se debe comprometer la seguridad en el diseño de grandes sistemas. Los detalles sobre el uso que se pretende, especificaciones de la aplicación, etc., deben discutirse abiertamente.

Luego de haberse informado sobre los aspectos esenciales de estos factores, el diseñador deberá dirigir su atención hacia ciertas consideraciones de diseño. Algunos de los puntos por considerar son los siguientes:

- w Encendido
- w Prevención de infiltraciones de aire
- w Remoción de líquidos
- w Supresión de humos
- w Ruido
- w Localización
- w Llamas visibles
- w Recuperación de recursos

Un proyecto dado debe considerar todos estos puntos.

La remoción de líquidos es una consideración importante. En el Perú, todo el quemado de líquidos debe hacerse sin emisiones importantes de humo y sin exceder las concentraciones permisibles de contaminantes. (Artículo 43, Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos).

En todo sistema de antorcha, existe el potencial de arrastre de líquidos. El simple hecho de prolongar la línea no asegura la remoción adecuada de los líquidos; velocidades de flujo tan bajas como de un metro por segundo pueden mantener partículas de gran tamaño en suspensión.

La separación completa de gas-líquido puede hacerse a través de una trampa de neblina apropiadamente diseñada. El desentrapado debe complementarse por medio del espacio adecuado para retención de líquidos, así como con medios de remoción.

Los sistemas comerciales de antorcha son de dos tipos básicos: antorchas elevadas y antorchas de tierra. Las elevadas se usan para la disposición de desechos gaseosos generados durante emergencias en la planta (fallas de energía, incendios, falla de componentes) y, en consecuencia, se usan en conjunción con sistemas de descarga de vapores en la manufactura de sustancias químicas de gran escala, en las operaciones de refinación de petróleo y en la instalación de producción de campos petrolíferos. Otras aplicaciones limitadas incluyen la ventilación de tanques de almacenamiento y plataformas de carga.

A pesar de que, con frecuencia, se inyecta vapor, agua y aire en el quemador de la antorcha elevada para reducir el humo y la luminosidad, el énfasis del diseño se ha puesto más bien en la disposición rápida y segura de los vapores antes que en el control de la polución. Los sistemas de antorcha de tierra recientemente desarrollados representan un alejamiento del diseño convencional. Con el nuevo énfasis en la reducción de ruidos, emisiones químicas, calor y luminosidad, estas antorchas se van haciendo cada vez más populares para la disposición de las descargas de rutina. Incluyen la disposición de los gases inflamables que fugan del proceso y de las válvulas de seguridad, de las corrientes residuales del proceso y el exceso de producto o productos que no cumple con las especificaciones.

### 7.3.1 Antorchas Elevadas

Los sistemas de antorcha elevada proporcionan un medio para la disposición de corrientes residuales gaseosas con un rango casi ilimitado de flujos y caídas de presión de 0 a 60 pulgadas de H<sub>2</sub>O.

Los criterios de diseño de los sistemas de antorcha elevada se orientan exclusivamente hacia la combustión segura antes que eficiente de los desechos gaseosos. De conformidad con ello, los cálculos de las dimensiones se basan en la caída permisible de la presión y en la dispersión de la radiación térmica o la dispersión de gases tóxicos cuando ocurre la extinción de la antorcha. La descarga de líquidos en el sistema de antorcha puede causar problemas; para la remoción de líquidos se requiere de cilindros "separadores" o de desentrapado de líquidos.

### 7.3.2 Antorchas Protegidas a Nivel del Suelo

Las antorchas a nivel del suelo con combustión protegida se están empleando en conjunción con la antorcha elevada, como respuesta al reciente énfasis que se pone en el problema de la polución. Las antorchas de bajo nivel, a pesar de ser relativamente costosas en cuanto a construcción y mantenimiento, son efectivas ya que reducen el ruido y las emisiones térmicas.

Existe relativamente poca información respecto de sus dimensiones. El diseño de antorchas de bajo nivel comprende una estructura externa de acero, revestida con material refractario. La estructura externa sirve para atenuar las llamas y para prevenir la radiación térmica y luminosa. El material refractario protege la estructura de acero de la exposición directa a los efectos de las altas temperaturas y materiales corrosivos, además, mejora la eficiencia de combustión al minimizar las pérdidas de calor. Los espesores refractarios varían de 4 a 8 pulgadas. El material refractario usado proporciona una respuesta más lenta ante cambios abruptos en el flujo de gas, contribuyendo significativamente en los costos de construcción y mantenimiento de una antorcha de bajo nivel. Debido al calentamiento lento, asociado con la construcción refractaria, la antorcha de bajo nivel generalmente se usa solo para velocidades de flujo bajas o continuas, mientras que la antorcha elevada, de diseño convencional, se usa para acomodar alteraciones repentinas.

### 7.3.3 Equipos Auxiliares

Los equipos auxiliares para el sistema de la antorcha incluyen encendedores, pilotos y equipo de seguridad. Normalmente se proporcionan cilindros separadores para la remoción de líquidos del gas. Se usan sellos de agua, parallas y sellos moleculares para aislar la torre de la antorcha del sistema de recolección de venteos. Los generadores de gas de purga y las trampas de neblina sirven para evitar la formación de mezclas explosivas dentro de la torre de la antorcha. El mantenimiento del nivel de líquido en los sellos de agua y cilindro de desentrapado es un punto fundamental; existen a disposición sistemas de control del nivel de líquido y de alarma para estos sistemas. Los quemadores pilotos, con frecuencia, vienen equipados con sistemas de detección de llamas y de alarma.

### 7.3.4 Costos

Los elevados costos de la antorcha varían considerablemente debido a los costos desproporcionados de los equipos auxiliares y de control, así como por el costo relativamente bajo de la torre y quemador de la antorcha. Como resultado de ello, los costos de los equipos rara vez dependen del diámetro. Los costos típicos fluctúan entre \$50 000 y \$500 000. Las antorchas de bajo nivel son aproximadamente diez veces más costosas para capacidades similares.



Los costos operativos se determinan principalmente por los costos de combustible para el gas de purga y quemadores piloto; por el costo del vapor que se requiere para quemar gases sin producir humo y por los costos de energía y mantenimiento en los sistemas asistidos por aire. Sobre una base de 30 centavos por millón de BTUs de requerimiento de combustible, los elevados costos operativos típicos para la torre de la antorcha (dos pies de diámetro de torre) son de alrededor de \$1500 al año.

### 7.3.5 Rendimiento y Emisiones de la Antorcha

Dado que el quemado de gases tradicionalmente se ha usado para la disposición segura de gases descargados durante condiciones de emergencia, los patrones de rendimiento que se refieren a la eficiencia de combustión y emisiones gaseosas son limitados. Los contaminantes del aire provenientes de antorchas elevadas incluyen CO, hidrocarburos no quemados y particulados. Se deberán esperar estos contaminantes de cualquier proceso de combustión que comprenda grandes llamas de difusión turbulenta y que son el resultado del enfriamiento de dichas llamas. Temperaturas de llama relativamente bajas se observan de manera típica tanto en las antorchas elevadas como en las de bajo nivel. Esto da por resultado factores bajos de emisión de NOx, comparados con otros tipos de equipos de combustión industrial. En el Perú, se exige la medición e información de todos estos contaminantes. Ver capítulos 5 y 8 de esta guía.

En muchas instalaciones de exploración y producción, se producen grandes volúmenes de gas. Estos gases son desechos, subproductos o el resultado de fugas en el equipo operativo que provienen de condiciones de emergencia en la operación normal de una planta en donde los gases deben expulsarse para evitar presiones peligrosamente altas en él; provienen también de los arranques de planta y de las paradas de emergencia. Grandes cantidades de gases pueden resultar de los productos que no pueden ser vendidos. Los flujos son típicamente intermitentes con velocidades de flujo, durante emergencias más graves, de varios millones de pies cúbicos por hora.

El método de control preferido para el exceso de gases y vapores es recuperarlos en un sistema de recuperación de vapor. Sin embargo, grandes fluctuaciones en la cantidad de gas, especialmente durante condiciones de emergencia, son difíciles de contener y procesar. En el pasado, todos los gases residuales se expulsaban directamente a la atmósfera; pero la expulsión generalizada ocasionaba problemas de seguridad y ambientales. Por lo tanto, actualmente, en la práctica se acostumbra recolectar dichos gases en un sistema cerrado de antorcha y quemarlos a medida que se descargan de una torre de antorcha elevada. Alternativamente, los gases pueden descargarse y quemarse a nivel del suelo con protección contra llamas.

El sistema de antorcha se usa principalmente como un método seguro para la disposición de los gases residuales excesivos. Sin embargo, el sistema de la antorcha en sí puede presentar problemas adicionales de seguridad. Estos incluyen el potencial de explosión de la antorcha, peligros de radiación térmica de la llama y el problema de asfixia tóxica durante el apagado de la antorcha. Aparte de la seguridad, existen otros varios problemas asociados con el quemado de gases, los cuales deben tratarse durante el diseño y la operación de un sistema de antorcha. Estos problemas caen dentro del área general de las emisiones de las antorchas e incluyen la formación de humo, la luminosidad de la llama, ruido durante el quemado y la posible emisión de contaminantes del aire durante las operaciones de quemado de gases.

### 7.4.1 Aplicaciones del Quemado para la Disposición de Gases Residuales

Existen tres aspectos fundamentales que se toman en cuenta al decidir la manera como quemar un gas residual. Estas son: (1) la variabilidad del flujo, (2) el volumen máximo esperado y (3) el contenido de calor.

Una alta variabilidad del flujo es el factor más importante. Una antorcha se diseña para operar prácticamente una gama infinita de flujos que van de más a menos. Los sistemas alternativos de disposición de gases residuales, como los incineradores o los dispositivos de combustión posterior, necesitan un control adecuado del flujo y pueden usarse únicamente en flujos de gas razonablemente continuos.

El volumen también es un factor importante. Con volúmenes muy grandes, la combustión directa de llamas por incineración o un dispositivo de combustión posterior de llamas se hacen imprácticas debido al tamaño del equipo que se requiere. La capacidad de una antorcha elevada puede incrementarse fácilmente aumentando el diámetro de la torre. Una antorcha pequeña típica, con una torre de cuatro pulgadas de diámetro, tiene una capacidad de 30 000 scfh. Una antorcha con una capacidad de 5 000 000 scfh requeriría de una torre de antorcha con un diámetro de sólo 36 pulgadas.

El contenido de calor de un gas determina dos clases. Los gases bien pueden mantener su propia combustión o bien pueden no hacerlo. En general, un gas residual con un valor de combustión mayor que 200 Btu/pie<sup>3</sup> puede quemarse exitosamente. Por debajo de 200 Btu/pie<sup>3</sup>, podría ser

necesario enriquecer el gas residual mediante la inyección de un gas con valor de combustión alto. La adición de dicho gas se denomina quemado endotérmico. No es factible quemar un gas con un valor de combustión menor a 100Btu/pie<sup>3</sup>. Si el flujo del gas con bajo BTU es continuo, se puede emplear la incineración para su disposición. Para flujos intermitentes de este tipo de gas, el quemado endotérmico es la única posibilidad.

Las antorchas son adecuadas para disponer de flujos intermitentes de grandes y pequeños volúmenes de gases que tienen un valor de combustión apropiado para mantener la combustión. Para flujos intermitentes de gases residuales con bajo valor de combustión, deberá añadirse más combustible a la corriente de gas residual. Dado que el valor del combustible adicional puede ser considerable y se pierde completamente durante el quemado, el proceso de quemado endotérmico puede resultar costoso.

Sin embargo, si los flujos intermitentes de gases residuales con bajo calor son grandes, la única alternativa práctica es expulsar los gases directamente a la atmósfera. Esto es inaceptable por razones ambientales.

La mayoría de antorchas se usan para disponer de los flujos intermitentes. Existen algunas antorchas continuas, pero éstas deberán usarse para pequeños volúmenes de gases: 500 cfm (15 m<sup>3</sup>/min) o menos. El valor de grandes flujos continuos de un alto valor de combustión es demasiado elevado. Es preferible la recuperación de vapores o el uso del vapor como combustible para el calentador del proceso al quemado de gases. Para grandes flujos continuos de gas con valor de combustión bajo, se debería añadir combustible complementario al gas en un incinerador protegido, en vez de hacerlo en la llama de una antorcha. Para flujos continuos pequeños de gases, algunas veces se emplean las antorchas aún cuando el combustible o el calor se pierda o desperdicie. En estos casos, los costos por equipo son a veces más importantes que los ahorros en combustible, por lo cual el uso de una antorcha resulta más económico.

Las antorchas se usan, en su mayoría, para la disposición de hidrocarburos. Los gases residuales compuestos de gas natural,

propano, etileno, butadieno y butano, probablemente constituyan más del 95% del material quemado. Las antorchas se han usado para controlar exitosamente los gases malolientes como los mercaptanos y las aminas. Sin embargo, se debe tener cuidado al quemar estos gases. A menos que la antorcha sea muy eficiente y tenga buena combustión, humos nocivos pueden escapar sin quemarse y ocasionar problemas.

Se deberá evitar el quemado de sulfuro de hidrógeno debido a su toxicidad y bajo umbral de olor. Inclusive el quemado de pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno puede crear suficiente dióxido de azufre para ocasionar daños a los cultivos o disturbios locales. No se recomienda la disposición por quemado de gases cuyos productos de combustión ocasionen problemas, como aquellos que contienen sulfuro de hidrógeno o hidrocarburos clorinados.

#### 7.4.2 Métodos de Quemado de Gases

La antorcha elevada es el sistema que más comúnmente se usa en la actualidad. En esta antorcha, se descarga el gas sin una mezcla previa sustancial, se enciende y se quema en el punto de

descarga. La combustión de los gases descargados tiene lugar en el aire atmosférico del ambiente por difusión. Este tipo de combustión por lo común genera un suministro insuficiente de aire y, por tanto, una llama humeante. La legislación peruana exige una llama sin humo, la cual puede obtenerse con una cantidad adecuada de aire de combustión, mezclado con el gas para que pueda quemarse completamente. El quemado sin humo se cumple mediante el uso de un mezclado especial de aire y coronas de inducción de la antorcha o mediante la inyección de vapor en la llama.

La antorcha elevada moderna permite que se quemen con seguridad y economía grandes volúmenes de gases residuales. Sin embargo, la antorcha elevada también puede presentar otros problemas, incluyendo la emisión a la atmósfera de ruido, luz y contaminantes químicos del aire. La legislación exige la minimización de las emisiones de ruido y luz, especificando los niveles máximos de los demás contaminantes. Ver capítulo 5, cuadro 1.

Un segundo tipo de antorcha es la de tierra. Una antorcha de tierra consiste en un quemador y sus accesorios localizados al nivel del suelo o cerca de éste. El quemador puede o no tener protección, pero debe permitir el libre escape de la llama y de los productos de combustión. Las antorchas de tierra presentan la ventaja de ser capaces de tener protegida la llama. En comparación con las antorchas elevadas, requieren de más terreno, si no están protegidas, o bien los quemadores, controles y protección pueden resultar más costosos que una torre. Además, si el sistema de encendido o piloto falla, la antorcha de tierra no puede dispersar los gases tan bien como una antorcha elevada.

Un tercer sistema que puede emplearse donde el ruido, la luminosidad y la formación de humo son criticados por los residentes locales, es una antorcha de tierra de "bajo nivel" protegida, usada en conjunción con una antorcha elevada. Más del 95% del tiempo, la carga que va a la antorcha es menor que el 10% de la capacidad de diseño. La antorcha de tierra de "bajo nivel" está diseñada para manejar este volumen, mientras que los grandes volúmenes restantes por liberar usan ambos sistemas. Este sistema, llamado antorcha integrada, puede reducir considerablemente las emisiones de humo, ruido y luz que ocasionan las quejas.

El quemado de tiro forzado, en donde el aire de combustión es mecánicamente soplado para premezclarlo con el gas antes del encendido, es ideal en cuanto se refiere a la combustión. Este tipo de antorcha consigue el quemado sin humo, sin necesidad de usar la inyección de vapor. Sin embargo, este método tiene una proporción limitada de rechazo y requiere de una torre mucho más grande para el aire de combustión que se añade. Este enfoque se ha utilizado para algunas aplicaciones especiales, por lo general, no es un procedimiento económico.

Si hay un flujo continuo de gas, se deberá considerar un sistema de recuperación de vapores. Mientras que la recolección, almacenamiento y retorno del gas es costoso, el desecho continuo de gas puede serlo aún más. Los gastos de capital para comprimir inmensos volúmenes, liberados

en forma intermitente e irregular, exceden los gastos de la operación de quemar el gas. Muchas instalaciones tienen un sistema de tres componentes para los gases residuales, el cual consiste en un sistema de recuperación de vapores, una antorcha de bajo nivel para la mayoría de ocurrencias de antorcha, que sobrecargan el sistema de recuperación de vapor, y una antorcha elevada para grandes liberaciones de emergencia que sobrecargan la antorcha de bajo nivel.

Un sistema de protección de alta integridad nunca puede eliminar totalmente las válvulas de descarga de seguridad en una planta y, en consecuencia, la necesidad de una antorcha. Sin embargo, la carga a la antorcha se reduciría considerablemente y se usará dicha antorcha sólo en situaciones de emergencia mayores.

Este capítulo describirá el equipo disponible para el quemado de gases residuales y presentará los datos sobre costos relativos a los diferentes sistemas.

#### 7.5.1 Antorchas Elevadas

El sistema de antorcha elevada se compone de la corona de la antorcha, algún tipo de trampa de gases directamente debajo de la corona, un sistema de piloto y encendido en la parte superior de la corona de la antorcha y, finalmente, la torre y su soporte. Cuando se requiere quemado sin humo, también se debe proveer un sistema de inyección de vapor en la parte superior de la antorcha. Los sellos de agua y cilindros separadores también son necesarios generalmente por razones de seguridad.

Una corona de antorcha debe ser capaz de operar sobre un amplio rango de proporciones de rechazo. Para lograrlo, la antorcha debe tener una excelente llama que mantenga las características de capacidad y mezcla. El mantenimiento de la llama se asegura proporcionando pilotos múltiples continuos alrededor de la corona de combustión. La corona de la antorcha por lo general está hecha de acero inoxidable o de alguna otra aleación resistente a altas temperaturas y a la corrosión.

El quemado sin humo se puede lograr con coronas de antorcha especiales que inyecten agua, gas natural o vapor en la llama, aumentando la mezcla aire-gas para asegurar la combustión completa. La inyección de agua presenta muchas desventajas, incluyendo la formación de hielo en el invierno, neblinas durante el verano, así como la alta cabeza de presión que se requiere para una antorcha elevada y una proporción de rechazo mucho menor que el vapor, haciendo que el control sea muy difícil con la posibilidad de apagar la llama.

El vapor es el elemento más frecuentemente usado para el quemado sin humo. Hay dos técnicas básicas de inyección de vapor que se usan en las antorchas elevadas. En un método, el vapor se inyecta directamente de las boquillas en un anillo externo que se encuentra alrededor de la parte superior de la corona. En el segundo método, el vapor se inyecta por una boquilla única ubicada concéntricamente en la corona del quemador. Los proveedores utilizan diversos tipos de boquillas para crear un efecto circular, helicoidal, de abanico, de chorro o Coanda.

Los reglamentos ambientales exigen que las antorchas no emitan humo para las grandes relaciones de rechazo. Para asegurar la operación satisfactoria, se han combinado los dos tipos de inyección de vapor en una misma corona. La boquilla interna proporciona vapor a velocidades bajas de flujo, mientras que los chorros externos se encuentran disponibles para grandes velocidades de flujo.

Mientras que estos son los tipos más comunes de coronas, existen varios otros tipos disponibles para propósitos especiales. En una modificación de corona de inyección de vapor, se usa una boquilla interna para inyectar tanto vapor como aire en la corona. Se requiere de una corona más grande debido al incremento en la caída de la presión y porque los gases pueden quemarse en el interior de la corona. El quemado en el interior de la corona puede acortar drásticamente la vida de la misma. Se puede usar una punta con mezclador de vórtice a chorro con gases de relativamente alta presión, que requieren de muy poco o nada de vapor para las operaciones sin humo. Otras coronas para propósitos especiales se encuentran a disposición, incluyendo las coronas endotérmicas que inyectan gas para elevar el valor de combustión de la corriente y coronas con adición de mufles para un quemado más silencioso.

La inyección de vapor a la corona de la antorcha se puede controlar manual o automáticamente. Se recomienda el control automático porque reduce el uso de vapor, reduce considerablemente la cantidad de humo y minimiza el ruido. Los sistemas automáticos utilizan dispositivos de medición de flujos con control de proporción sobre el vapor. Dado que la medición de la velocidad de flujo no puede incluir las variables del grado de saturación y peso molecular, el control de proporción por lo general se fija para cierta composición de hidrocarburos promedio. Por lo general, es necesario tener una cantidad fija de vapor que fluye en todo momento para enfriar las boquillas de distribución en la corona.

Para prevenir la migración de aire en la torre de la antorcha como resultado de los efectos de viento o la diferencia de densidad entre el aire y el gas de la antorcha, se mantiene un flujo de gas de purga continuo a través del sistema de la antorcha. El sistema se puede purgar con gas natural, gas procesado, gas inerte o nitrógeno. Para reducir la cantidad de gas de purga requerido y mantener el aire fuera del sistema de antorcha, por lo general se colocan dispositivos para atrapar gas en la torre, directamente debajo de la corona de la antorcha.

Un tipo de trampa de gas que se encuentra disponible en el mercado es el sello molecular. Este tipo de trampa puede no evitar que el aire penetre en la torre como resultado del enfriamiento de gas en los colectores de la antorcha. Se encuentran disponibles sistemas de instrumentación para aumentar automáticamente la velocidad de purga y evitar así que el aire ingrese en la torre durante el rápido enfriamiento del gas. Otro desarrollo en las trampas de gas es el Sello Fluido. Este sello pesa mucho menos que el molecular y puede colocarse mucho más cerca de la corona de la antorcha.

El mecanismo de encendido de una antorcha consiste en los quemadores pilotos y los encendedores del quemador piloto. Los quemadores pilotos sirven para encender los gases que fluyen hacia afuera y para mantener el encendido del gas. Estos pilotos deben proporcionar una llama estable para encender los gases de la antorcha y, en muchos casos, para mantenerlos encendidos. Para lograrlo, se usan dos o más -por lo general, tres o cuatro- quemadores pilotos. Además, algunas veces, los quemadores pilotos se proporcionan con protectores de viento separados.

Se debe suministrar un sistema separado para el encendido del quemador piloto, para efectos de protección contra fallas de la antorcha. El método usual es encender una mezcla de gas- aire en una cámara de encendido por medio de una chispa. El frente de llamas viaja a través de un tubo encendedor hacia el quemador piloto en la parte superior de la antorcha. Este sistema permite que el encendedor se coloque a una distancia segura de la antorcha, hasta de 100 pies, y aún así encienda satisfactoriamente los pilotos. El dispositivo completo está montado en un panel de encendido e instalado en un lugar accesible en el suelo. El panel de encendido debe ser a prueba de explosiones, tener una vida ilimitada y no ser sensible a todas las condiciones climáticas. En las antorchas elevadas, la llama del piloto usualmente no es visible, por lo que es deseable un sistema de alarma para indicar una falla en la misma. Por lo general, esto se hace a través de una termocupla en la llama del quemador piloto. En caso de una falla de la llama, la temperatura cae y suena una alarma.

Se usan diferentes métodos para soportar la torre de la antorcha completa. Estas torres deben proporcionarse con una escalera que posea una jaula y una plataforma en el extremo superior para propósitos de reparación y mantenimiento. Las torres pueden fluctuar entre 150 y 400 pies de longitud. Las torres de antorcha con una relación de longitud a diámetro no menor de 30, generalmente se construyen como torres auto soportantes; las torres con una relación de  $L/D < 100$ , tienen un soporte conformado por un único conjunto de vientos o tirantes; cuando la proporción es de  $L/D > 100$ , las torres son confeccionadas con dos o más conjuntos de vientos. Las torres autosoportantes en la mayoría de las veces no se construyen con más de 50 pies de longitud debido a los grandes y costosos cimientos que requieren.

Los vientos necesitan una gran área para torres altas. A menudo, es preferible construir soportes de acero a los cuales se fija la torre. Por lo común, se trata de un armazón de acero con una sección transversal cuadrada, ensanchada en la base. Una sección transversal triangular es más económica y se ha usado en varios casos. La torre de la antorcha se expandirá debido al flujo de gas caliente, por lo cual la estructura de soporte debe tener la capacidad de acomodar esta expansión.

Los sellos de agua y los parallamas se usan para evitar que un frente de llamas ingrese en el sistema de la antorcha. Los parallamas presentan la tendencia a taponar y obstruir el flujo y no

son capaces de detener un frente de llamas en una mezcla de aire con hidrógeno, acetileno, óxido de etileno y disulfuro de carbono, de modo que son de poco valor.

Los sellos de agua se usan para evitar que un frente de llamas y aire ingrese en el sistema de recolección de gases de la antorcha. El peso del sello de agua hace que éste se localice a nivel o casi a nivel del suelo y por lo tanto no puede usarse para evitar que el aire ingrese en la torre.

Los cilindros separadores se ubican en o cerca a la base de las antorchas elevadas para separar los líquidos de los gases que se están quemando. Si no se eliminan las grandes gotas líquidas, podrían quemarse mientras caen al suelo. Diseñadas para transportar gases, las líneas de antorcha pueden contener líquidos de las descargas de expansión de líquidos, el líquido arrastrado de las descargas de gas y vapores condensados. El cilindro separador se usa para eliminar estos líquidos antes de que se quemen los gases. Los sellos de agua y los cilindros separadores se encuentran en la mayoría de sistemas de antorcha por razones de seguridad.

### 7.5.2 Antorchas de Tierra

Una antorcha de tierra consiste en un quemador y sus accesorios, como un sello, quemador y encendedor piloto. Uno de los tipos consiste en los quemadores convencionales que descargan horizontalmente sin protecciones. Esta antorcha debe instalarse en una gran área abierta para su operación segura y por protección contra incendios. Si el sistema de encendido no funciona, no es capaz de dispersar los gases como lo haría una antorcha elevada. Este tipo de antorcha de tierra sólo tiene aplicaciones limitadas.

Las antorchas de tierra también pueden consistir en múltiples quemadores protegidos dentro de un casco refractario. El propósito esencial de una antorcha de bajo nivel es la atenuación total de las llamas de la antorcha, así como el quemado sin humo a un nivel bajo de ruido. Los gases quemados se conectan por un colector múltiple a una serie de cabezas de quemador que descargan el gas en la protección refractaria. Se obtiene la mezcla del gas y el aire por una serie de boquillas múltiples a chorro. El aire para la combustión es proporcionado por el tiro natural dentro del casco protector. Se logra el quemado sin humo con poco vapor, o en ausencia de éste, debido a la turbulencia y temperatura del quemado. El tamaño de la protección depende de la

capacidad de la antorcha, pero puede ser bastante grande. Una antorcha de tierra protegida, con una capacidad de 25 000 lb/hr tiene un casco de 100 pies de alto y 20 de diámetro. Esta misma capacidad podría manejarse con una antorcha elevada de 8 pulgadas de diámetro.

El costo inicial de una antorcha, protegida de tierra generalmente limita su capacidad a solo una porción de las tasas de descarga de emergencia de una planta. Sin embargo, la antorcha de tierra puede diseñarse para manejar la mayor parte de operaciones de antorcha, mientras que las grandes liberaciones restantes pueden desviarse hacia una antorcha elevada. Este tipo de sistema de antorcha integrado actualmente se está haciendo común, especialmente en áreas pobladas.

### 7.5.3 Antorchas de Tiro Forzado

La antorcha de tiro forzado utiliza el aire proporcionado por un soplador para proporcionar aire y turbulencia primarios, necesarios para el quemado sin humo de los gases de descarga, sin el uso de vapor. Este tipo de antorcha combina el quemado sin humo con costos operativos bajos y buena confiabilidad debido a que el tiro forzado es menos afectado por el viento.

Sin embargo, esta antorcha también tiene un costo inicial alto. El costo puede ser de dos a tres veces el costo de una antorcha convencional, principalmente porque son necesarias dos torres para mantener separados el gas y el aire hasta que se mezclen y enciendan en la corona. Una antorcha de soplador deberá tener un dispositivo automático de rechazo del aire para evitar que un exceso de aire apague las llamas y cree humo, si se reduce la velocidad del gas. Sopladores o compuertas de velocidad variable, conectados a dispositivos de detección de flujo, se han usado en estas antorchas para extender su proporción de rechazo. Debido a las limitaciones de costos y de proporción de rechazo, esta antorcha se ha usado mayormente en aplicaciones especiales para proporcionar quemado sin humos cuando no hay disponibilidad de vapor. También se ha utilizado en transferencia y ventilación de tanques y en conjunción con una antorcha elevada sin control, con el objeto de brindar quemado sin humo durante el quemado de gases cotidianos.

#### 7.5.4 Comparación de Costos de los Sistemas de Antorcha

Los costos de capital y operación para un sistema de antorcha dado dependen de la disponibilidad de vapor, del tamaño de la antorcha, de la composición del gas residual y de la frecuencia del quemado de gases. Cada instalación es un problema especial, cuya economía debe resolverse conforme al caso específico.

Vanderlinde estimó el costo relativo del equipo usado en los sistemas de antorcha sin generación de humo. Los costos de equipo incluyen una torre con vientos, tubería de encendido, tubería de pilotos, anillo quemador y accesorios. Como se muestra en el cuadro a continuación, Vanderlinde descubrió que el costo relativo de los sistemas de antorcha sin humo no dependían del diámetro de la torre. Por otro lado, el costo relativo del equipo para un sistema de aire forzado sí depende del diámetro, dado que se adquiere una torre dentro de otra.

#### COSTOS RELATIVOS DE LOS SISTEMAS DE ANTORCHAS

Tipo de Antorcha	
12" día	
24" día	
Corona estándar con humo	1,00
Corona de vapor sin humo	1,00
Corona de gas	1,25
Corona de agua	1,25
Tiro forzado	1,30
	1,30
	1,20
	1,20
	2,80
	3,38

Las antorchas protegidas de bajo nivel, con la capacidad equivalente de una antorcha elevada, pueden resultar hasta 10 veces más costosas. Por esta razón, la antorcha protegida sólo se diseña para manejar operaciones de antorcha de poco volumen y cotidianas.



Esta discusión cubre factores de importancia en la locación de la antorcha, el equipo involucrado y el diseño.

### 7.6.1 Sistema de Antorcha

Un sistema de quemado de gases consiste en instalaciones para poner en combustión -con seguridad- hidrocarburos que se expulsan a una caída de presión que no compromete los sistemas de seguridad de la planta. La condición operativa ideal sería eliminar la necesidad de antorchas, según se discutió en el capítulo 6. Sin embargo, las instalaciones para recuperar grandes cantidades de hidrocarburos liberados bajo condiciones de emergencia no son económicamente justificables.

Un sistema de quemado típico consiste en una serie de tuberías dentro de una unidad (incluyendo una mezcla de válvulas y respiraderos para regular la presión), una línea hacia la locación de la antorcha, un cilindro separador para eliminar hidrocarburos líquidos de la corriente de gas, un sello líquido opcional para proporcionar presión de colector positiva, sin tener que compensar y proteger contra el retorno de llama, una torre de antorcha con corona de antorcha, un sistema opcional de asistencia para mantener un encendido sin humo, un sistema de gas combustible para las luces pilotos junto con encendedores e instrumentación. El sistema típico de quemado de gases maneja la descarga de todo lo que expele una unidad dada o varias unidades dentro de una planta.

El diseño de un sistema de antorcha es una tarea compleja. Como con cualquier unidad de proceso, el diseñador debe estar familiarizado con todos los factores que influyen en el producto deseado. El propósito del presente punto es revisar estos factores y ofrecer soluciones específicas que satisfagan los criterios anteriormente señalados.

### 7.6.2 Múltiple de Colección

El sistema de antorcha puede definirse de manera que incluya todo el equipo: desde la boquilla de descarga de alivio de un depósito hasta el proceso de combustión de la antorcha. La primera pieza del equipo que realmente ve o inicia una descarga es la válvula de alivio del depósito. En condiciones operativas anormales o de emergencia, este dispositivo permite que los flujos de gas/líquido escapen del depósito hacia el colector.

Los criterios de diseño para las válvulas de alivio están bien documentados en las publicaciones API RP-520 y RP-521. Estos documentos proporcionan guías específicas para determinar la presión de descarga y el flujo de descarga requerido para cualquier depósito dado. La mayoría de sistemas de antorcha consiste en múltiples válvulas de alivio que descargan en un múltiple de colección común o sistema colector. En muchos sistemas, se utilizan colectores de descarga de baja presión y de alta presión separados. Esto permite la segregación de las válvulas de alivio desde las fuentes de alta presión, como los depósitos, torres, etc., y de fuentes de baja presión como tanques de almacenamiento y limpieza de coches tanques. Los gases de cada múltiple de colección son quemados a través de una sola antorcha. Un aspecto clave que influye en el diseño del sistema de antorcha es la contrapresión permisible para la válvula de alivio. La caída permisible de la presión del sistema desde

la descarga de la válvula que pasa a través de la corona de la antorcha es igual a la contrapresión permisible de la válvula de alivio. En un sistema de válvulas de descarga múltiple, este valor es igual a la más baja de las válvulas del colector. Este valor se ha mantenido limitado a un máximo del 10 por ciento de la presión mínima establecida para la válvula de alivio.

Utilizando válvulas de descarga operadas por asiento balanceado o por piloto, esta contrapresión permisible puede aumentarse hasta en un 50 por ciento de la presión establecida, pero esto no es recomendable.

El aumento de la contrapresión permisible de la válvula de alivio puede tener varios efectos sobre los componentes del sistema de antorcha, por ejemplo:

- a) Colectores y tuberías más pequeños.
- b) Cilindros separadores y de sello líquido más pequeños.
- c) Mayores tamaños de las válvulas de alivio.
- d) Antorchas más pequeñas con velocidades más bajas de purga y vida operativa mejorada.
- e) Reducción significativa o eliminación de servicios (aire, vapor, etc.) requeridos para el quemado sin humo, a través de la utilización de la energía cinética incrementada en la corona de la antorcha.

Los ahorros en costos de capital del equipo, como resultado del incremento en la caída de presión, son atractivos, pero no constituyen el factor principal por considerar. Los ahorros por reducción en los costos operativos continuos pueden ser muy significativos durante la vida de un sistema de antorcha promedio. El ahorro sólo en la reducción de purga puede ser de hasta el 99%.

### 7.6.3 Cilindros

Un sistema de antorcha adecuadamente diseñado incluye por lo menos dos depósitos para propósitos especiales: un cilindro de sello líquido y un cilindro separador. Estos depósitos sirven, cada uno, para una función especial tendiente a aumentar la seguridad del sistema total.

El potencial de introducción de líquido, o de formación de condensados (vapor de hidrocarburos o de agua) en el colector de la antorcha es inherente a todo sistema de antorcha. Si se permite que esta fase líquida llegue a la zona de combustión, se producirán por lo menos dos serios problemas. Si hay grandes gotas presentes, existe el potencial de que se produzca una lluvia de fuego de hidrocarburos desde la llama. Esto puede dar por resultado gotas flameantes que cubran el área o líquido flameante que se derrame de la corona de la antorcha, generando un serio peligro para la instalación y el personal. La incorporación en el sistema de un cilindro separador adecuadamente diseñado puede resolver este problema. El segundo inconveniente es la presencia de gotas parejas muy pequeñas, que pueden reducir dramáticamente la capacidad de la antorcha

de funcionar sin humo. Las gotas muy pequeñas, que pasan a través del cilindro separador, con frecuencia se condensan para formar gotículas mayores en la corriente del sistema que sale del cilindro separador. Este problema puede eliminarse localizando el cilindro separador muy cerca o en la base de la torre de la antorcha. La remoción de gotas líquidas muy pequeñas no se puede lograr a través de una simple reducción en la velocidad de la corriente de gas. Para eliminar efectivamente las gotas líquidas muy pequeñas, deberá emplearse un ciclón centrífugo modificado para superficies húmedas u otro dispositivo similar.

El diseñador deberá garantizar que la capacidad de retención del cilindro sea suficiente para cualquier taco previsto de flujo líquido. Además, la capacidad de bombeo debe ser adecuada para evacuar el cilindro. Se deberá disponer o almacenar todo condensado removido por el cilindro separador.

El sello líquido se instala en un sistema de antorcha para proteger el colector de antorcha de la infiltración de aire y el potencial retorno de llama asociado. Una antorcha elevada, llena de gas más liviano que el aire, debido al peso molecular o a la temperatura, tendrá una presión manométrica negativa en la base, como resultado de esta flotación de gas. Si existe presión negativa en la base

de la torre, el sistema colector completo de la antorcha estará bajo presión negativa. La operación del sistema de la antorcha bajo presión negativa aumenta considerablemente el potencial de infiltración de aire en el sistema colector a través de filtraciones o válvulas abiertas. La instalación de un sello líquido en el sistema asegura que la presión positiva en el colector de la antorcha reduzca significativamente el potencial de infiltración de aire.

Un sello líquido apropiadamente diseñado puede funcionar como parallasas positivo. Las pruebas indican que el sello líquido puede diseñarse para detener efectivamente la propagación de las llamas que resultarían inafectadas por los parallasas convencionales de tipo laberinto. La localización del sello líquido en la base de la torre ofrece la máxima protección del sistema, aislando completamente la fuente de encendido de la antorcha de las unidades del proceso y del colector múltiple de la antorcha.

Un sello líquido con componentes internos impropios puede operar con un efecto acoplado entre el líquido sellante y el flujo de gas para producir un sistema no amortiguado. El resultado es una presión sinusoidal versus tiempo de respuesta. Esta variación da por resultado una llama tipo bocanadas que hace imposible que se realice un quemado de gases eficiente, sin humo. La solución es añadir amortiguación a través de los componentes internos adecuadamente diseñados.

El sello líquido y el cilindro separador pueden combinarse en un solo depósito de dos componentes. Una combinación de sello líquido y cilindro separador localizada en la base de la torre de la antorcha proporciona varios beneficios:

- q Los dos cilindros se encuentran en una locación de procesamiento óptima.

q El depósito puede actuar como parte de una estructura de soporte integrada.

Se acumulan ahorros significativos de costos en las siguientes áreas:

v Se pueden ahorrar dos cimientos

v Se pueden eliminar las tuberías entre los depósitos

v El acero del cilindro puede usarse como parte de la torre de la antorcha

#### 7.6.4 Ubicación de la Antorcha

La economía y la seguridad dictan por lo general la cantidad y la ubicación del espacio de tierra asignado a la antorcha. Los reglamentos de seguros a menudo dictan la proximidad permisible de la antorcha a otros equipos e instalaciones del proceso.

En un área fijada, se pueden utilizar diferentes tipos y configuraciones de antorchas. Existen tres tipos básicos de sistemas a disposición:

La ubicación también tomará en consideración las demás estructuras erigidas en el área. Otra complicación con frecuencia pasada por alto es la localización de los alambres de los vientos y su posible interferencia.

La dirección y velocidad del viento afectan la radiación del calor, influyendo en la longitud y ángulo de la llama. El diseño normal emplea la velocidad promedio del viento y toma en cuenta toda posible dirección del mismo.

Las inversiones de temperatura y otras condiciones meteorológicas afectan la estabilidad atmosférica y reducen la dispersión de olores, concentraciones tóxicas y humo. Estas condiciones se deben considerar en base a la frecuencia de las ocurrencias de inversión de la temperatura y el efecto esperado en la población del área. Donde ocurren inversiones de temperatura, es posible que los máximos niveles permisibles de emisión (capítulo 5, cuadro 1) se excedan en el punto de medición especificado (ver capítulo 8) .

El tipo de gas por quemar afecta el diseño y el tamaño de la corona de la antorcha. No es aceptable diseñar sólo en base al peso molecular. Algunos gases se queman sin gases de apoyo, mientras otros, tales como los gases con bajo contenido de BTU, deben ser suplementados. Algunos gases requieren de asistencia para poder quemarse sin emitir humo. La selección del método de asistencia es importante en la seguridad de la antorcha. ¿Cuál es el grado de confiabilidad del medio de asistencia? ¿Estará éste disponible en las cantidades necesarias durante una emergencia? ¿Cuál método de asistencia es el más económico?

Al revisar la composición del gas, la primera preocupación es garantizar la eficiencia de destrucción. Una buena eficiencia de destrucción se asegura si se puede establecer una llama estable. El logro de esto supone diferentes técnicas para diversas propiedades del gas.

Una de las reales preocupaciones en cuanto a seguridad es que se transporten materiales inapropiados hacia el sistema de la antorcha. El gas acuoso descargado a 500oF en 1000 pies de colector de descarga frío, podría ser un sólido al otro extremo de la línea. La línea de vapor conectada a la línea de descarga podría generar un bloque de hielo en clima de invierno. Estos factores deben considerarse en un diseño seguro.

Otro aspecto es dónde ocurre la descarga de alivio. El bloqueo del colector de la antorcha significa la pérdida de la protección de la válvula de alivio. Esto puede ocurrir por gas húmedo o por un sistema deficientemente dimensionado que coloca contrapresión excesiva en la válvula de alivio. La disposición y la selección de la válvula de alivio -más las instrucciones de operación del sistema de alivio- necesitan considerar este problema.

A medida que los gases residuales entran en combustión, cierta cantidad del calor producido se transfiere en la forma de radiación térmica. El nivel de radiación producido a grandes velocidades de flujo de gas puede poner en peligro al personal tanto en estructuras a nivel del suelo como en aquéllas elevadas que se encuentren cerca de la antorcha. Además, las estructuras de madera, como las torres de enfriamiento, también pueden ponerse en peligro. Esta radiación normalmente controla la altura de la torre de la antorcha. Durante las operaciones normales, su intención es limitar la intensidad del calor al nivel del suelo hasta niveles que sean lo suficientemente bajos para que los puedan soportar los humanos, así como para proteger los equipos de daños por calor. La intensidad de calor se mide en términos de BTU/hr/pie cuadrado. El nivel de diseño recomendado para áreas de planta es de 1500 Btu/hr/pie cuadrado. Este nivel de intensidad permitirá que una persona adecuadamente vestida realice funciones normales en el área. Los equipos pueden soportar hasta 3000 Btu/hr/pie cuadrado. Cuando se efectúa trabajo de mantenimiento por encima del nivel del suelo mientras la antorcha está en operación, los trabajadores de mantenimiento, si no toman precauciones especiales, pueden recibir más calor del recomendado.

Por lo general, la mayor liberación de gas (y de calor) ocurre cuando se presenta una dificultad importante; por ejemplo, pérdida de energía eléctrica, pérdida de agua de enfriamiento o incendio. Una descarga de gas de este tipo es una verdadera situación de emergencia. La adición de las capacidades de la válvula de alivio de aquellas válvulas comprendidas en el peor caso de emergencia dictarán la velocidad de diseño que debe manejar la antorcha. El tamaño del volumen del sistema usualmente amortiguará los picos temporales. (Deberá notarse que las válvulas de alivio en los depósitos pueden no abrirse todas o permanecer abiertas simultáneamente).

El uso por varias unidades de una misma antorcha complica el dimensionamiento debido a la probabilidad de que varias unidades descarguen a la antorcha al mismo tiempo. Las dimensiones de la antorcha deberían tomar en cuenta la posibilidad de que ocurra una falla común que pueda ocasionar que se descargue hacia la misma antorcha al mismo tiempo.

Otro caso por considerar es la radiación de más de una antorcha en una sola área. En este caso, no sólo se deberá considerar

la radiación combinada, sino que también se deberá considerar, al establecer la distancia entre las antorchas, el trabajo de mantenimiento por encima del nivel del suelo en una antorcha, mientras la otra esté en operación.

Las expansiones de unidades normalmente aumentan la posible liberación de calor desde una antorcha. Cualquier adición considerable deberá automáticamente generar la revisión de la liberación de calor y efecto de la radiación. Por seguridad, podrá requerirse una corona de antorcha nueva y, tal vez, una torre más alta. La caída de la presión del colector es una función especialmente crítica en este escenario.

Otro método que se puede utilizar para reducir la radiación es el concepto de antorcha de puntos múltiples. Utilizando un número de coronas de antorcha pequeñas, pero de alta eficiencia, en lugar de una sola corona grande se puede reducir considerablemente la longitud total de la llama y su capacidad de emisión. Como resultado, se obtiene una altura menor de la torre y una llama más limpia.

Este tema ha sido previamente discutido, en el capítulo sobre los cilindros separadores. Si el sistema de antorcha que se está diseñando presenta potencial de emisiones de líquido, se debe asumir que eventualmente ocurrirá cierto arrastre. Tanto la dirección prevaleciente del viento como el equipo que funciona en condiciones donde no lo hay deberán tenerse en cuenta al momento de seleccionar la ubicación de la antorcha, así como si se va a utilizar una antorcha de tierra o elevada.

Las antorchas adecuadamente diseñadas y operadas son muy efectivas para convertir los hidrocarburos potencialmente tóxicos y explosivos en productos de combustión seguros, ambientalmente más aceptables. Pueden lograrse eficiencias de destrucción de más del 99,9 por ciento. Algunos gases típicos de las antorchas de plantas de procesamiento (aquellos que contienen azufre, cloro, etc.) son tóxicos tanto cuando están en su forma en combustión como cuando no lo están. Para el quemado de gases que contienen tales compuestos tóxicos, se debe dar el tamaño apropiado a la antorcha y se debe asegurar el encendido a través del uso de pilotos constantemente encendidos. Los compuestos tóxicos en su forma después de combustión y combinados con los otros productos de combustión deben dispersarse de manera adecuada en la atmósfera para proporcionar concentraciones seguras a nivel del suelo (CNS).

Las concentraciones a nivel del suelo son una función de la velocidad del flujo contaminante, velocidad del viento, condiciones atmosféricas, velocidad de descarga y altura efectiva de la torre. Están a disposición algunos métodos aceptados por la industria que calculan la CNS de contaminantes. Todos dan resultados similares dependiendo del terreno y de los límites del modelo. Los niveles más bajos de CNS, en la dirección del viento, comúnmente se obtienen de antorchas de tierra protegidas. Esto es debido a que la altura efectiva de la torre es mayor que en las unidades elevadas. La combustión protegida en una antorcha de tierra crea temperaturas mayores con el resultante incremento en la elevación térmica.

Una concentración objetivo de diseño al nivel del suelo, en la dirección del viento, es de 0,10 ppm o menos. Para la mayoría de sustancias tóxicas o nocivas esta concentración es satisfactoria: sin embargo, hay algunas cuantas sustancias para las cuales, incluso esta pequeña concentración, es demasiado alta y se generan severas molestias de olor o deterioro de suelos.

En el capítulo 5, cuadro 1, se dan los límites para los compuestos tóxicos más comunes en campos petroleros (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO), los mismos que son considerados en la legislación peruana en vigencia. El volumen 2 del manual "Disposal of Refinery Wastes, Waste Gases and particulate Matter", publicado por el Instituto Estadounidense del Petróleo, recomienda los límites que se indican para las siguientes sustancias:

Compuesto ppm

alcohol isobutílico 0,003

alcohol isoamílico 0,0026

mercaptano de metilo 0,041

mercaptano de etilo 0,0028

mercaptano de n-propilo 0,0016

mercaptano de n-butilo 0,001

mercaptano de isoamilo 0,00043

p-tiocresol 0,0027

sulfuro de metilo 0,0037

sulfuro de etilo 0,000056

sulfuro de propilo 0,011

sulfuro de n-butilo 0,015

Las preguntas sobre el mantenimiento pueden cambiar el diseño del sistema: ¿Se puede retirar de servicio al sistema cuando la unidad está parada? ¿Cuántos días podrá estar fuera del servicio el sistema por reparaciones? El vaporizado y la purga de una unidad reducen el tiempo disponible para trabajar en la antorcha.

¿Hay otras torres que estén descargando en el área que harían peligroso trabajar en altura debido a la concentración de contaminantes o a la radiación de calor? Con frecuencia, las estructuras elevadas se pasan por alto en las evaluaciones de diseño.

#### 7.6.5 Purgado

Las antorchas pueden plantear uno de los más serios peligros de seguridad para la instalación, si se operan inadecuadamente. Existe el potencial de que se produzca una explosión o detonación seria en cualquier sistema de antorcha.

Dos de los tres elementos requeridos para una explosión están siempre presentes en un sistema de este tipo. El combustible está disponible en la forma de descarga y fuga de gases en el sistema. Los pilotos proporcionan una fuente constante de encendido. La seguridad del sistema de antorcha depende, pues, totalmente de evitar que el oxígeno (aire) se infiltre en la antorcha. El sello líquido del que ya se ha discutido puede mantener una presión positiva del gas en el colector de la antorcha y evitar el ingreso de una fuente de aire. La torre de la antorcha por encima del sello líquido y los sistemas de antorcha que no contienen sellos líquidos, generalmente son protegidos por la introducción de un gas de purga.

Dado que los costos de energía se han incrementado, se ha venido dando mayor atención al costo de estos gases de purga. Al mismo tiempo, se han incrementado los esfuerzos por reducir o eliminar las fugas de las válvulas de alivio. El resultado neto es la reducción de dichas fugas, así como los esfuerzos simultáneos por reducir los requerimientos de gas de purga, los cuales han producido una reducción importante en el flujo normal hacia la antorcha. Hay disponibles diversos tipos de dispositivos de sellado para reducir el gas de purga que se requiere para proteger el sistema de la antorcha.

Se ha probado que los sellos de densidad de gas son dispositivos confiables, de conservación efectiva de la purga, a través de años de operación en el campo. Este tipo de sellos ofrece las velocidades de purga más bajas posibles, la máxima seguridad y un reembolso extremadamente rápido en ahorros de purga.

Los sellos de densidad de gas operan mediante el establecimiento de bolsones segregados de gases de diferente composición y densidad. El ingreso de aire se restringe a la velocidad de difusión en la que el oxígeno puede penetrar estos bolsones de densidad de gas, tal ingreso es bloqueado completamente mediante el mantenimiento de una purga mínima que fluye continuamente a través de la zona del bolsón de densidad afectado por la difusión de gas hacia fuera de la antorcha. El proceso de difusión, además, es un fenómeno que depende del tiempo. Aún cuando se interrumpa el flujo de gas de purga, la infiltración de aire en el sistema de la antorcha se bloqueará por el periodo que le tome al oxígeno difundirse a través del bolsillo de densidad de gas. Con un sello molecular, se puede restringir la infiltración de aire durante las interrupciones por purga que excedan las dos horas.

Las velocidades de purga son aproximadamente 1/50 de las velocidades requeridas en una torre de antorcha que no posee ningún dispositivo de sellado.

El sello molecular ofrece las siguientes ventajas:

- q La velocidad de purga y costos operativos más bajos posibles.
- q Cero por ciento de oxígeno debajo del sello.



- q Protección extendida en caso de pérdida de purga.
- q Rápido reembolso
- q No hay piezas que se muevan.
- q Mantenimiento mínimo.

Cuando el costo inicial de inversión es más importante que los costos operativos, o en los casos en que haya disponibilidad de gas de purga barato, un tipo de sello de velocidad de gas es una elección excelente. Las pruebas indican que la infiltración de aire en la antorcha ocurre a través de la adhesión de flujo a la pared de la antorcha. El tipo de sello de velocidad de gas elimina esta adhesión de flujo y devuelve el aire ingresante al centro de la antorcha, donde la velocidad del gas de purga lo barre fuera del sistema. Este tipo de dispositivo de sellado funcionará en tanto se mantenga la velocidad de gas de purga.

Este tipo de sello de velocidad de gas ofrece varias ventajas:

- v Operación e instalación baratas
- v No se añade carga estructural de viento
- v No requiere mantenimiento

La reducción de purga que se ofrece con los dispositivos anteriormente señalados requiere que el diseñador del sistema trate de cerca el problema de encogimiento o condensación de los gases de descarga en la cabeza de la antorcha luego de una descarga caliente. La reducción en volumen, después de una descarga así, requiere la introducción de volúmenes muy grandes de purgado durante el periodo de enfriamiento. Comúnmente, este volumen de gas de purga se introduce de modo continuo.

Un sistema de purga para compensar la temperatura mide el estado termodinámico del desecho de descarga e inyecta gas de purga sólo en la medida que se requiera durante el enfriamiento. El sistema consiste en sensores y controles de estado termodinámico que accionan una válvula de inyección auxiliar de gas de purga. Las velocidades suplementarias de purga se determinan conforme al pronóstico de la peor condición de descarga.

#### 7.6.6 Resumen

Las cinco causas más frecuentes de accidentes en las antorchas son:

- q Explosión interna
- q Arrastre de líquidos
- q Obstrucciones del sistema
- q Procedimientos de mantenimiento defectuosos
- q Pérdida de encendido

Un sistema de antorcha funcional y seguro toma en cuenta todos los factores de diseño. Recordar siempre que de los tres elementos de un desastre, dos están siempre presentes en un sistema de antorcha: el combustible y el fuego. Si mantenemos el control adecuado, el oxígeno no se presentará.

El logro del objetivo primordial de un sistema de antorcha expone a ésta a un ambiente hostil. Los factores que influyen en el ambiente de la antorcha son:

- q El viento
- q La velocidad de flujo
- q La composición del gas
- q Los líquidos
- q Los contaminantes transportados en el aire

Toda antorcha está expuesta al viento y debe diseñarse para poder soportarlo. Limitar las consideraciones de diseño a la respuesta estructural ante las cargas de viento puede ser desastroso para la vida de la antorcha. Las velocidades máximas del viento son importantes para la consideración de la estructura y para ciertas consideraciones de combustión, como el encendido. Sin embargo, un viento modesto puede producir fuerzas inducidas que empujen y jalen la llama y que sean un contribuyente importante a la falla de la antorcha. Los vientos en los emplazamientos mar afuera y en algunos situados en la costa o en el desierto presentan un reto especial debido a su alta velocidad promedio y, en algunos casos, dirección casi constante.

Algunos diseñadores de sistemas de antorcha consideran su tarea completa cuando han previsto una disposición segura y efectiva a una velocidad máxima de flujo. En verdad, esta es una consideración de principal importancia. Sin embargo, la mayor parte de daños a la antorcha ocurre a velocidades de flujo bajas a intermedias.

Las instalaciones de antorchas mar afuera y en la costa deben reconocer que los contaminantes transportados por el aire, tales como la sal o incluso el agua salada, estarán presentes. Sin embargo, dicha presencia debe ponerse en su real perspectiva con relación a otros factores.

Ignorar o no dar la debida importancia al ambiente de la antorcha puede conducir a fallas prematuras de la misma. El impacto financiero de una falla de antorcha es serio, puesto que se deben considerar los costos de parada de la instalación, de trabajo y equipos de repuesto, así como de la antorcha misma.

Al considerar la falla de la antorcha, se debe hacer la siguiente pregunta: "¿Cuándo es inaceptable la condición de la antorcha?". Existen tres modos principales de falla de la antorcha que deben considerarse:

q Restricción de flujo

q Falla de quemado

q Falla mecánica

El funcionamiento seguro del sistema de antorcha requiere que el sistema sea capaz de disponer de la velocidad máxima de flujo sin exceder la contrapresión permisible en los dispositivos de alivio. El calor puede hacer que el quemador de la antorcha -o ciertos dispositivos de regulación de flujo en el quemador mismo- se deformen, generando una restricción del flujo y un aumento de la caída de presión. Cuánta deformación es aceptable, ya es materia de criterio, el cual debe basarse en la cantidad de restricción, no en la apariencia. Por ejemplo, una antorcha puede experimentar un óvalo considerable antes de que el flujo se restrinja seriamente.

La falla de quemado puede ser ocasionada por la pérdida de funcionamiento del piloto o daño a los estabilizadores de llama.

La falla del piloto generalmente se puede rastrear en una falla del sistema de suministro de gas al piloto, antes que en el piloto mismo. La falla del estabilizador de llamas es más serio en condiciones de flujo elevado.

El combado severo, rajaduras o partes que caen del quemador de la antorcha son obviamente inaceptables.

#### 7.9.1 Quemado Interno

Uno de los mecanismos más insidiosos de falla de la antorcha es el quemado interno. Este es casi imposible de observar durante el día. En la oscuridad, el quemado interno severo puede calentar las superficies metálicas hasta la incandescencia.

El viento que sopla perpendicularmente al eje de un quemador de antorcha ocasiona el desarrollo de una zona interna de baja presión. A velocidades de flujo muy bajas, las fuerzas creadas por la zona interna de baja presión no son satisfechas sólo por el gas, por lo que se jala aire hacia el quemador de la antorcha. Cuando el aire y el gas se mezclan se produce el quemado interno.

Las antorchas horizontales o las colocadas a cierto ángulo entre vertical y horizontal son particularmente susceptibles al quemado interno. Toda dirección de viento que haga entrar algún componente del viento en la boca de la antorcha intensificará el quemado interno y aumentará el rango de flujo sobre el cual puede ocurrir dicho quemado interno. Para la mayoría de aplicaciones, la mejor posición de la antorcha es vertical o lo más vertical que sea posible.

Si no se ha considerado adecuadamente en el diseño de la antorcha, el quemado interno puede ocasionar fallas mecánicas o de materiales.

#### 7.9.2 Quemado Externo

Las velocidades de flujo incrementadas superan la zona interna de baja presión y el quemado se produce en el exterior del quemador de la antorcha. El quemado externo es influido por la fuerza

misma del viento, así como por zonas de presión creadas por él. Cuando el viento golpea la antorcha, se desarrolla una zona de alta presión en el lado del viento y una zona de baja presión a sotavento.

Las velocidades altas de flujo superan la fuerza de la zona de baja presión, desarrollándose una llama que se proyecta hacia arriba. Sin embargo, a una velocidad de flujo un poco más baja, la fuerza de la zona de baja presión más la fuerza del viento hacen que la llama se mueva hacia la zona de baja presión a sotavento de la antorcha. Luego, una parte de la antorcha es expuesta a intenso calor y, en algunos casos, a una atmósfera reductora, ocasionando fallas mecánicas o de materiales.

### 7.9.3 Ataque Químico

Además de la exposición a altas temperaturas y condiciones reductoras, la antorcha también está sujeta al ataque químico. Los componentes del gas de descarga, los productos de combustión y contaminantes transportados en el aire pueden estar presentes en la atmósfera que circunda al quemador de la antorcha.

El sulfuro de hidrógeno, SO<sub>x</sub>, cloro, NO<sub>x</sub> y agua están entre los contribuyentes más comunes del ataque químico. La selección de material para la antorcha debe reconocer su presencia.

### 7.9.4 Fuegos Secundarios

Muchas antorchas se destruyen a causa de los sistemas de remoción de líquidos inapropiadamente diseñados u operados. En el peor de los casos, la porción líquida se hace tan grande que el líquido empieza a correr por el lado del quemador de la antorcha hacia la estructura de soporte. La llama resultante y la condición reductora engloban la antorcha y sus accesorios conduciendo rápidamente a daños serios.

Un fuego secundario menos obvio pero igualmente destructivo puede ser ocasionado por pilotos impropriamente diseñados u operados. La alta confiabilidad del piloto a un consumo bajo de gas para pilotos demanda el uso de un diseño de piloto del tipo con mezcla previa que incluye un inspirador de aire. Este debe localizarse en un punto algo lejano de la corona del piloto. El gas del piloto inspira aire y la mezcla de aire-gas se quema en la corona del piloto. El diseño o la operación impropia puede ocasionar que el gas se queme en el inspirador de aire, no así en la corona. La llama que se produce puede destruir el piloto y dañar severamente o destruir el quemador de la antorcha.

### 7.10.1 Dimensiones de la Antorcha

Normalmente se diseñan las dimensiones de los quemadores de antorcha de acuerdo con dos criterios: caída de presión o máxima velocidad de salida permisible para un quemado estable. La caída de presión y la velocidad de salida están relacionadas. La caída de presión permisible se fija por el diseño total del sistema de antorcha y por los requerimientos de

contrapresión máxima para los dispositivos de alivio. En algunos casos, los límites de caída de presión mantienen la velocidad de salida, bastante por debajo de la máxima permisible. En otros, hay disponibilidad de una considerable presión y la velocidad de salida es la que limita el tamaño del quemador de la antorcha.

La norma API RP 521 sugiere limitar la velocidad de salida máxima de las antorchas a un número Mach de 0,5 para asegurar el quemado estable. La experiencia demuestra que la velocidad de salida máxima permisible depende de la composición del gas de descarga; sin embargo se recomienda la consulta de API RP 521 para los sistemas de antorcha en las instalaciones de producción y exploración de petróleo, así como de gas que se encuentran en el Perú.

El uso prudente de la caída de presión de la que se dispone puede permitir que se mantenga el tamaño del quemador de antorcha al mínimo. Esto incrementa la velocidad de salida para una velocidad de flujo dada, reduciendo de este modo el choque de llamas y mejorando la vida de la antorcha. Un beneficio adicional de los tamaños más pequeños de antorchas es una reducción en el tamaño de las problemáticas zonas de baja presión.

#### 7.10.2 Separación de la Carga

La separación de la carga, por lo general, requiere el uso de dos o más antorchas, como se discutió en el capítulo 7.4.2 "Métodos de Quemado".

Un sello líquido desvía pequeños flujos a la antorcha de primera etapa, mientras que -al mismo tiempo- proporciona un medio para descargar con seguridad altas velocidades hacia la antorcha para emergencias. Un sistema semejante minimiza el quemado interno y externo, y mejora significativamente la vida de la antorcha.

Otros sistemas de antorcha tienen dos niveles distintos de alivio de presión. En estas situaciones, habrá tanto un colector de baja presión como uno de alta o bien un colector de alta presión más uno de presión media. La caída de presión permisible en el colector de baja presión podría ser tan baja como unas cuantas pulgadas de columna de agua, mientras que la permisibilidad en el colector de alta presión podrá ser de hasta varias libras por pulgada cuadrada. Los objetivos de quemado de gases de un sistema semejante pueden requerir el uso de un sistema de antorcha dual. La situación es usualmente que uno o ambos sistemas pueden aliviar al mismo tiempo.

Sin embargo, el quemado sin generación de humo de los gases de baja presión presenta un problema de diseño interesante. Dado que la corriente está a baja presión, contribuye muy poco al nivel de energía cinética de la zona de combustión. Para tener éxito en el quemado sin humo se requerirá el uso de una segunda fuente para añadir energía cinética.

En una aplicación semejante, los gases de alivio de alta presión podrían usarse como fuente secundaria. Sin embargo, el empleo de los gases de alta presión depende del sistema de alivio de alta presión. Se podría extraer gas de alta presión del sistema de separación, pero esto representa un desperdicio innecesario de recursos.

#### 7.10.3 Sistemas de Purga Apropriados

Muchos operadores usaron una velocidad de purga en el sistema de antorcha lo suficientemente alta para producir una llama fácilmente visible durante el día. Los altos costos de energía han producido un deseo por conservar el gas de purga. No existen dudas que un dispositivo de conservación de la purga, como un sello molecular o dispositivo para evitar el ingreso de aire, reducirán considerablemente los costos de purga. Muchos pasan por alto el hecho de que la reducción en la purga aumentará la vida de la antorcha. Cuando se reduce la cantidad de purga, también se reduce la cantidad de calor liberado. Una liberación menor de calor significa menores daños a la antorcha inducidos por el calor.

#### 7.10.4 Protección contra Choque de Llamas

El choque de llamas por quemado interno o externo puede ser una causa importante de falla de la antorcha. La atención cuidadosa al diseño y la aplicación de la antorcha puede minimizar o prevenir el choque de llamas.

El daño a la antorcha debido al quemado interno puede retardarse por el uso apropiado de un revestimiento refractario interno. Incluso un revestimiento refractario delgado puede reducir significativamente la temperatura del metal y evitar la atmósfera reductora ocasionada por el choque de llamas en el metal.

La vida del quemador de antorcha puede mejorarse minimizando el choque externo de llamas. La protección contra este tipo de choque de llamas puede lograrse por medios activos o pasivos.

Los escudos o deflectores de viento patentados y comercialmente disponibles pueden contribuir a reducir el efecto de la zona de baja presión a sotavento. Además de interrumpir la zona de baja presión, el escudo evita que las llamas entren en contacto con el quemador de la antorcha. Tal protección pasiva es adecuada para muchas aplicaciones.

Las condiciones severas pueden requerir el uso de energía suplementaria para evitar el choque externo de llamas. Los quemadores usan una fuente de energía suplementaria, como aire de baja presión, para superar el efecto de la zona de baja presión e imprimir una dirección hacia arriba de la llama. El ahorro que se obtiene por el incremento en la vida de la antorcha es mucho mayor que el costo nominal de operación.

#### 7.10.5 Antorchas de Puntos Múltiples

Ya se ha visto que la separación de la carga de la antorcha en dos puntos de quemado puede mejorar considerablemente la vida de la antorcha. Una ventaja incluso mayor puede lograrse usando varios puntos de quemado individuales en un sistema por etapas o no. Las ventajas son:

- q Vida prolongada

- q Bajo mantenimiento

- q Bajo consumo de energía

- q Llamas cortas
- q Radiación reducida
- q Los líquidos arrastrados se queman
- q Capacidades muy superiores de no generar humo

#### 7.10.6 Metalurgia

Puede haber muchas causas de fallas en la antorcha. La selección apropiada de material puede mejorar la vida de la antorcha pero no puede, sola, superar todos los problemas que ya se han discutido. Un diseño de quemador de antorcha que exponga el metal a un choque frecuente de llamas está destinado a fallar a pesar de la metalurgia. Ningún metal puede soportar un choque repetido de llamas.

Es importante comprender que los fabricantes de antorchas no hacen las planchas de material que frecuentemente se usan en la construcción de antorchas. Los proveedores de materiales tienen un interés válido en promover una aleación particular. El interés del operador deberá ser el de mejorar la vida de la antorcha.

La experiencia es un factor muy importante en la selección del material para la antorcha. Se requiere de tiempo considerable para acumular una amplia base de datos sobre el rendimiento real de los metales en condiciones de quemado de gases. Se ha descubierto que la mayoría de aplicaciones no se beneficia del uso de aleaciones especiales y frecuentemente costosas. Para comprender la selección de materiales, se debe entender cómo ocurren las fallas en los metales.

La degradación térmica es una falla de un metal debido a ciclos térmicos repetidos. El choque de llamas inducido por el viento es generalmente cíclico en su naturaleza, como los vendavales, y los cambios en la velocidad de flujo ocasionan el movimiento del punto de choque. Esto genera ciclos

repetidos de alta temperatura, seguidos por enfriamiento. La exposición a altas temperaturas ocasiona que se forme un óxido o costra en las superficies metálicas. La formación de costras en sí misma no es necesariamente nociva para el metal. Sin embargo, las costras tienen un coeficiente de expansión algo diferente, lo que da por resultado la separación de las costras del metal de base. Por lo tanto, cada ciclo ocasiona pérdida de peso.

Cuando se selecciona un material, es necesario estudiar con cuidado las características del ciclo térmico y la aplicación exacta. Por ejemplo, si su aplicación no los expone a altas temperaturas, los materiales como el S.S. 302, 316, 321 e incluso el acero de carbono, pueden usarse efectivamente para ciertas piezas de la antorcha.

La presencia de azufre en el gas residual ha llevado a los proveedores de materiales a recomendar el uso de la aleación 800 para las antorchas. La experiencia de campo real demuestra que esta aleación no es la mejor elección para tales aplicaciones. La combinación de alta temperatura, atmósfera reducida y azufre, puede dar por resultado una rápida falla de la aleación 800. La aleación 310 S.S. es una mejor opción.

El cloruro en la atmósfera alrededor de la antorcha puede sugerir el uso de materiales, tales como el Hasteloy. Sin embargo, la experiencia con antorchas expuestas a una atmósfera de agua salada indican que no se requiere el uso de dicho material.

El diseño mecánico inapropiado puede llevar a falla del metal, aún cuando la selección del material haya sido básicamente correcta. El no tomar debidamente en cuenta las fuerzas que se desarrollan durante la fabricación o la expansión térmicas han condenado a muchas antorchas antes incluso de que fueran puestas en uso.

La eficiencia de combustión del quemado de gases es una medida de la destrucción de hidrocarburos. Bajo condiciones estables, la mayoría de sistemas logrará un 98% o más. Ver cuadro 2. Las condiciones inestables de llamas darán por resultado eficiencias considerablemente más pobres y emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y particulados. Se debe observar que una antorcha humeante puede aún lograr una buena destrucción de hidrocarburos.

Se deberán mantener las siguientes condiciones para asegurar un patrón de llamas estable:

- v Las emisiones visibles no deben exceder 5 minutos en un periodo de 2 horas.
- v En todo momento debe estar presente una llama.
- v Se debe monitorear la presencia de una llama piloto para detectar una llama.
- v El valor de combustión neto del gas deberá ser por lo menos de 11,2 MJ/Nm<sup>3</sup> para las antorchas asistidas por vapor o aire y de por lo menos 7,45 MJ/Nm<sup>3</sup> para las antorchas no asistidas.

## MONITOREO

El monitoreo debe realizarse en concordancia con la legislación peruana que incluye el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire, publicado por la Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Energía y Minas, y el Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Hidrocarburos que exige:

1. Medición de las velocidades de flujo de las emisiones de gases en metros cúbicos por segundo (artículo 25,a.)
2. Determinación de los contaminantes, conforme se han definido en el capítulo 5, cuadro 1 de la presente guía (artículo 25,b), en donde también se especifican los límites máximos permisibles de esos mismos contaminantes.



Además, estos diversos contaminantes se deben medir en el gas producido que se expelle en el gas de alimentación hacia las antorchas, en el gas de combustión y en el aire.

Esto se encuentra definido en el cuadro 4 de la legislación, el mismo que se adjunta a la presente guía.

Inicialmente, este monitoreo deberá realizarse una vez al mes por lo menos durante el primer año y, posteriormente, según lo proponga el Programa de Adecuación y Manejo Ambiental. Se recomienda que estas frecuencias de medición se consideren como el mínimo absoluto y que se continúen las mediciones mensuales a lo largo de la vida del proyecto.

El artículo 9 exige que se remita un amplio informe de todas las emisiones de la instalación, antes del 31 de marzo de cada año, el cual corresponderá al año anterior, dicho informe deberá ser visado por un auditor ambiental registrado. El formulario de este informe se adjunta a la presente guía como Anexo 1.

Debe observarse que el informe requiere resúmenes de todas las emisiones, por lo que será fundamental que se lleven buenos registros de las mismas.

#### ANEXO 01

### DECLARACIÓN DE LA GENERACIÓN DE EMISIONES RESIDUALES Y/O CORRIENTES DE DESECHOS POR LA INDUSTRIA DE HIDROCARBUROS

Número

Día-Mes-Año

Fecha

**INSTRUCCIONES GENERALES :** Leer atentamente antes de llenar. Usar hojas adicionales si fuera necesario. Deberá un declaración por cada lugar o unidad operativa.

**BASE LEGAL :** Decreto Legislativo N° 613 (Código del Ambiente y Recursos Naturales); Decreto Legislativo N° 757 y Ley N° 26221 (Ley Orgánica de Hidrocarburos)

#### 1.0 DATOS GENERALES

1.1		RUC			N°
.....					
1.2	Nombre	/Nombre	de	la	empresa
.....					
	Dirección	.....	Tel.	.....	Fax
.....					

1.3 NOMBRE.Unidad de Producción

Avenida, Calle, jiron o Carretera N° o Km Tel. Fax

Distrito Provincia Departamento Región

1.4 Area donde se presenta la actividad (metros cuadrados o hectáreas)

1.5 Condiciones ambientales

Temperatura en grados Centígrados

Máxima en verano ..... Promedio en verano

Máxima en invierno ..... Promedio en invierno

Precipitación anual máxima en milímetros :

Dirección y velocidad del viento, máxima en Km/h :

Altitud, en metros sobre el nivel del mar :

Condiciones sísmicas (según Reglamento Nacional de Construcciones )

### 2.0 PROCESO PRODUCTIVO - EXTRACTIVO

Adjuntarm en hoja separada, el diagrama de flujo y describir los puntos de producción, así como los tipos d residuos generales (sólidos, líquidos o gaseosos).

### 3.0 EMISIONES ATMOSFERICAS

(El contenido de contaminantes se puede determinar mediante mediciones, balance metalúrgico, estimaciones razonables, utilizando información de los fabricantes de equipos.

FUENTES

DE

EMISIONES

TIEMPO DE EMISIONES

FLUJO

ALT. DE EMIS.

CONTENIDO (PPM)

EQUIPO DE TRATAMIENTO

hrs/día  
días/año  
(lt/seg)  
(m)  
SO2  
As  
Pb  
Par tí  
Otros

#### 4.0 RESIDUOS LIQUIDOS, SOLIDOS Y LODOSOS

Identificar el residuo con un número de la lista de Residuos Industriales que se adjunta. Si no se puede encontrar el residuo en la lista, usar el "nombre" comúnmente usado y describirlo brevemente.

##### 4.1 Efluentes Líquidos

NOMBRE O NUMERO  
VELOCIDAD DE FLUJO  
(litro/segundos)  
PROPIEDADES FISICAS pH Temp (°C)

PRINCIPALES OBSERVACIONES  
COMPONENTES QUIMICOS  
TRATAMIENTO  
Código  
CODIGO DISPOSICION FINAL

##### 4.2 Residuos Sólidos

---

NOMBRE CANTIDAD (MT/hora)

o FUENTE pH TEMP.

DENSIDAD

NUMERO real estimado (°C)

---

---

---

PRINCIPALES TRATAMIENTO CODIGO

OBSERVACIONES

COMPONENTES Código Capacidad DISPOSICION

QUIMICOS FINAL

---

---

4.3 Lodos

---

---

NOMBRE CANTIDAD (MT/hora) CONC.

o FUENTE pH TEMP. SOLIDOS

DENSIDAD

NUMERO real estimado (°C) (%)

---

---

---

PRINCIP. TRATAMIENTO CODIGO OBSERVA-COMP. REAC- Código Capac. DISPOSICION TIVOS CIONES

QUIMICOS FINAL

---

---

4.4 Tratamiento y Disposición Final

Usar el código conforme al tipo de tratamiento y/o disposición final usada.

CODIGO TRATAMIENTO CODIGO DISPOSICION

FINAL

- (A) servicio preliminar (A) red pública
- (B) tratamiento biológico (B) poza de filtración
- (C) tratamiento físico-químico (C) cuerpos de agua (mar, lago, etc., dar nombre)
- (D) tratamiento biológico (D) reinyección y físico-químico
- (E) segregación (E) extendido o esparcido sobre el terreno
- (F) otro (especificar) (F) otro (especificar)
- (G) no tratado

4.5 Ha pensado en reciclar algunos

de los residuos? SI NO

¿Cuáles? \_\_\_\_\_

¿Cómo? \_\_\_\_\_

4.6 ¿Ha pensado en vender algunos

de los residuos? SI NO

¿Cuáles? \_\_\_\_\_

¿Cómo? \_\_\_\_\_

5.0 RESEÑA GENERICA DEL LUGAR

Especificar las áreas en construcción o existentes y sus respectivos usos hasta una distancia de 100

metros del límite del emplazamiento. Indicar también las distancias hacia los cursos de agua

adyacentes a esta área y a las zonas agrícolas y/o granjas más cercanas.

Nombre del representante legal \_\_\_\_\_

Firma\_\_\_\_\_

Fecha\_\_\_\_\_

Nombre \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_  
responsable\_\_\_\_\_

profesional

Firma\_\_\_\_\_

Fecha\_\_\_\_\_

## RESIDUOS INDUSTRIALES

PRODUCTOS 1 aceite residual (aceite mineral con 10% de agua o sedimentos)

### ACEITOSOS

2 emulsiones de aceite residual

3 otros aceites residuales (sedimentos de la limpieza de tanques, residuos de naves, residuos de preparaciones de aceite y petróleo)

QUIMICOS 4 residuos que contienen PCB

### ORGANICOS

5 residuos que contienen isocianuro

6 residuos que contienen fenol y formol

7 solventes residuales orgánicos que contienen halógenos, azufre y nitrógeno

8 otros solventes residuales (trementina, gas blanco, thinner, xileno, benzeno, cenoles, etc)

9 ácidos orgánicos (acético, etc.)

10 otros residuos orgánicos (pintura, barniz, etc.)

QUIMICOS 11 residuos que contienen cianuro

### INORGANICOS

12 ácidos inorgánicos (sulfúrico, nítrico, etc.)

13 otros residuos inorgánicos (líquidos para baño ácido, baños de galvanizado, líquidos de las industrias gráfica y fotográfica, sales y otros compuestos inorgánicos)

14 residuos que contienen arsénico

15 residuos con materiales oxidantes

16 alcalinos (amoníaco, soda cáustica, etc.)

### METALES

17 metales en general (mercurio, aluminio, etc.)

18 compuestos metálicos (de zinc, de plomo, hierro, etc.)

19 óxidos de metales

20 residuos que contienen compuestos metálicos

#### OTROS

21 residuos que contienen plaguicidas (pesticidas)

22 residuos que contienen productos farmacéuticos

23 residuos que contienen químicos de laboratorio

24 residuos que contienen asbesto

25 polímeros (epoxi-resina, látex, plástico, etc.)

26 materiales filtrados, materiales de tratamiento de lodos y residuos contaminados

27 jabones, papeles, trapos, etc.

28 basura contaminada

29 materiales y lodos o relaves filtrados

30 efluentes de las cámaras de sedimentación

#### EXTRACTOS DE LA NORMA 12

NORMA API 12B "TANQUES DE PRODUCCION EMPERNADOS" (Ene.1977)

APENDICE "A" - "PRACTICA RECOMENDADA PARA VALVULAS DE ALIVIO"

a. Para tanques con un diámetro igual o menor a 15 pies 4 5/8 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 3 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 4 1/2 oz por pulgada cuadrada.

b. Para tanques con un diámetro de 21 pies 6 1/2 pulgadas hasta 29 pies 8 5/8 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 2 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 3 oz por pulgada cuadrada.

c. Para tanques con un diámetro mayor que 29 pies 8 5/8 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 1 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda 1 1/2 oz por pulgada cuadrada.

d. La capacidad de expulsión de las válvulas de alivio al vacío deberá ser tal que el vacío interno no exceda 1/2 oz por pulgada cuadrada a la regulación máxima de la apertura de válvula.

NORMA API 12 D "TANQUES DE PRODUCCION SOLDADOS EN EL CAMPO" (Ene. 1977)

## APENDICE "A" - "PRACTICA RECOMENDADA PARA VALVULAS DE ALIVIO"

- a. Para tanques con un diámetro nominal de 15 pies 6 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 8 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 12 oz por pulgada cuadrada.
- b. Para tanques con un diámetro nominal de 21 pies 6 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 6 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 9 oz por pulgada cuadrada.
- c. Para tanques con un diámetro de 29 pies 9 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 4 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 6 oz por pulgada cuadrada.
- d. Para tanques con un diámetro igual o mayor que 38 pies 8 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 3 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 4 1/2 oz por pulgada cuadrada.
- e. La capacidad de expulsión de las válvulas de alivio al vacío deberá ser tal que el vacío interno no exceda 1/2 oz por pulgada cuadrada a la regulación máxima de la apertura de válvula.

### NORMA API 12F "TANQUES DE PRODUCCION SOLDADOS EN TALLER"(Ene. 1977)

#### APENDICE "A" - PRACTICA RECOMENDADA PARA VALVULAS DE ALIVIO

- a. Para tanques con un diámetro nominal de 7 pies 11 pulgadas hasta 10 pies 0 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 16 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 48 oz por pulgada cuadrada.
- b. Para tanques con un diámetro nominal de 11 pies 0 pulgadas hasta 12 pies 0 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 16 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 24 oz por pulgada cuadrada.
- c. Para tanques con un diámetro nominal de 15 pies 6 pulgadas, la regulación máxima para las válvulas de alivio de presión deberá ser de 8 oz por pulgada cuadrada; las válvulas de alivio serán de una dimensión tal que la presión en el tanque no exceda las 12 oz por pulgada cuadrada.
- d. La capacidad de expulsión de las válvulas de alivio al vacío deberá ser tal que el vacío interno no exceda 1/2 oz por pulgada cuadrada a la regulación máxima de la apertura de válvula.

#### EXTRACTOS, API RP 12R1

La publicación API RP 12R1 sobre calibración, conexión, mantenimiento de tanques de la locación, contiene las siguientes



pautas:

#### Para 1.114

La conexión de la línea de llenado podrá colocarse a través de la plataforma cerca del casco del tanque, o introducirse en el lado del tanque a la altura -o poco más arriba- de la línea de salida. En cualquiera de los dos casos, la conexión de la línea de llenado deberá quedar lo más lejos

posible de la escotilla principal. Si se introduce a través de la plataforma del tanque, la línea deberá preferiblemente extenderse dentro de las 12 pulgadas del fondo del tanque y deberá contar con por los menos dos agujeros de ventilación de 1/2 pulgada directamente por debajo de la plataforma del tanque para permitir el escape de gas y para actuar como rompedor de sifón.

#### Para 1.116

La conexión de la línea equalizadora, si la hubiera, deberá colocarse en el casco, inmediatamente después de la junta del techo con el casco. Esta línea deberá contar con una válvula equipada para el sellado, la cual será fácilmente accesible desde la pasarela.

#### Para 1.117

El respiradero de vapor atmosférico o conexión de línea de respiración deberá colocarse convenientemente en la plataforma del tanque o a través de la cubierta de bóveda, asimismo deberá conectarse de tal manera que el gas expelido no sea un peligro para el personal de medición, bombeo u otros trabajadores.

#### Para 1.118

Si se usa un mezclador de gases o línea de agitación, la línea de conexión deberá colocarse en un lugar de la plataforma del tanque que sea accesible desde la pasarela. Esta línea deberá tener una llave de gas adecuada, equipada con un dispositivo de sellado a prueba de manipulaciones imprudentes.

#### Para 1.311

El tanque y sus conexiones deberán ser herméticas a las fugas de líquido y, si fuera necesario, también al vapor.

#### Para 1.316

Todas las escotillas deberán ser herméticas a fugas de vapor.

#### Para 1.317

Si se usa una válvula combinada de alivio de presión y vacío, ésta deberá ser de tamaño adecuado para evitar la ruptura o distorsión del tanque debido a cambios de temperatura o durante las operaciones de llenado y vaciado. La válvula de presión en la escotilla de medición deberá regularse para operar a una presión ligeramente más elevada que la de la válvula de venteo.

Para 1.318

La línea de llenado deberá terminar dentro del tanque para minimizar la agitación del aceite durante el llenado.

Para 1.417

El respiradero de vapor o línea de respiración deberá extenderse como mínimo 40 pies desde el tanque más cercano en la batería, a menos que los reglamentos locales, la congestión de las baterías de los alrededores u otras estructuras hagan inviable esta distancia.

La línea de venteo desde los tanques deberá formar una pendiente suficiente para evitar la acumulación de líquidos en la misma.

Si la línea de venteo forma una pendiente hacia abajo a partir del tanque, se deberán disponer drenes para extraer la acumulación de líquidos en el extremo más bajo de la línea.

Para 2.11

Todas las escotillas se mantendrán cerradas durante el llenado y vaciado de los tanques, excepto en las operaciones normales de medición y prueba.

## MODELOS PROPUESTOS PARA LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTAL

\*Indica que está en revisión.

Tiempo

Nombre del Unidad de Concentración Estándar promedio

Contaminante de aire ambiental

Acido acético\* microgramos de ácido acético 2 050 1 hora

por metro cúbico de aire

Acetona\* microgramos de acetona por 39 500 1 hora

metro cúbico de aire

Acetileno\* microgramos de acetileno por 46 000 1 hora

metro cúbico de aire

Acrilamida microgramos de acrilamida 15 24 horas

por metro cúbico de aire

Acrilonitrilo microgramos de acrilonitrilo 100 24 horas

por metro cúbico de aire

Sulfonamida de microgramos de sulfonamida de 35 24 horas

N-alkiltolueno N-alkiltolueno por metro cúbico

de aire

Alfa naftol microgramos de alfa naftol por 35 24 horas

metro cúbico de aire

Oxido de microgramos de óxido de aluminio 35 24 horas

aluminio por metro cúbico de aire

Amoníaco\* microgramos de amoníaco por metro 3 000 1 hora

cúbico de aire

Cloruro de microgramos de cloruro de amonio 35 24 horas

amonio por metro cúbico de aire

Antimonio total de microgramos de antimonio 2,5 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire

Arsénico total de microgramos de arsénico 0,3 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire

Arsina microgramos de arsina por metro 5 24 horas

cúbico de aire

Asbesto (fibras de número de fibras por centímetro 0,04 24 horas

longitud mayor a cúbico de aire

5 micrómetros)

Asbesto\* microgramos de asbesto total por 1,6 24 horas

(total) metro cúbico de aire

Bario-total total de microgramos de compuestos 10 24 horas

de bario soluble en agua por metro

cúbico de aire

Benceno\* microgramos de benceno por 3 300 24 horas

metro cúbico de aire

Benzo(a)pireno nanogramos de benzo(a)pireno 1,1 24 horas

(una fuente) por metro cúbico de aire 0,22 1 año

Benzo(a)pireno nanogramos de benzo(a)pireno 0,3 1 año

(todas las por metro cúbico de aire

fuentes)

Benzotiazol microgramos de benzotiazol por 70 24 horas

metro cúbico de aire

Cloruro de microgramos de cloruro de 125 24 horas

benzoilo benzoilo por metro cúbico de aire

Berilio total de microgramos de berilio 0,01 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire

Bifenilo\* microgramos de bifenilo por 60 1 hora

metro cúbico de aire

Borón total de microgramos de borón 35 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire

Tribromuro de microgramos de tribromuro de 35 24 horas

borón borón por metro cúbico de aire

Tricloruro de microgramos de tricloruro de 35 24 horas

borón borón por metro cúbico de aire

Trifluoruro de microgramos de trifluoruro de 2 24 horas

borón borón por metro cúbico de aire

Bromacilo microgramos de bromacilo por 10 24 horas

metro cúbico de aire

Bromuro microgramos de bromuro por 20 24 horas

metro cúbico de aire

N-butanol microgramos de n-butanol por 1 875 1 hora

metro cúbico de aire

2-butanona microgramos de 2-butanona por 31 000 1 hora

(cetona de metro cúbico de aire

metilo-etilo\*)

Acetato de microgramos de acetato de 600 1 horas

n-butilo n-butilo por metro cúbico de aire

Acrilato de microgramos de acrilato de 35 24 horas

butilo butilo por metro cúbico de aire

Estearato de microgramos de estearato de 35 24 horas

butilo butilo por metro cúbico de aire

Cadmio total de microgramos de cadmio 2 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire

Carburo de microgramos de carburo de calcio 10 24 horas

calcio por metro cúbico de aire

Cianuro de microgramos de cianuro de calcio 35 24 horas

calcio (como (como sal total) por metro

sal total) cúbico de aire

Hidróxido de microgramos de hidróxido de 13,5 24 horas

calcio calcio por metro cúbico de aire

Oxido de calcio microgramos de óxido de calcio 10 24 horas

por metro cúbico de aire

Captano microgramos de captano por 25 24 horas

metro cúbico de aire

Negro de humo\* microgramos de negro de humo 10 24 horas

por metro cúbico de aire

Disulfuro de microgramos de disulfuro de 330 24 horas

carbono carbono por metro cúbico de aire

Monóxido de microgramos de monóxido de 36 200 1 hora

carbono carbono por metro cúbico de aire 15 700\* 8 horas

Tetracloruro de microgramos de tetracloruro de 600 24 horas

carbono carbono por metro cúbico de aire

Clorambeno microgramos de clorambeno por 35 24 horas  
metro cúbico de aire

Clordano microgramos de clordano por 5 24 horas  
metro cúbico de aire

Dibenzo dioxinas picogramos de dibenzo dioxinas 30 1 año  
clorinadas clorinadas por metro cúbico de  
(CDDs) aire

Mezclas de picogramos de una mezcla de  
dibenzo dioxinas dibenzo dioxinas clorinadas y  
clorinadas y dibenzo furanos clorinados por  
dibenzo furanos metro cúbico de aire  
clorinados

(CDFs)  $x/30 + y/30(50) = 1$  1 año

x = concentración (pg/m<sup>3</sup>) de

CDDs en aire

y = concentración (pg/m<sup>3</sup>) de

CDFs en aire

Cloro microgramos de cloro por 150 24 horas  
metro cúbico de aire

Dióxido de cloro microgramos de dióxido de cloro 30 24 horas  
por metro cúbico de aire

Clorodifluoro- microgramos de clorodifluoro- 300 000 24 horas  
metano metano por metro cúbico de aire

Cloroformo microgramos de cloroformo por 500 24 horas  
metro cúbico de aire

Cromo total de microgramos de cromo 1,5 24 horas  
en forma libre y combinada por  
metro cúbico de aire

Volátiles de microgramos de volátiles de 1 24 horas  
alquitrán de alquitrán de carbón por metro

carbón (fracción cúbico

soluble)

Cobre total de microgramos de cobre 50 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire

Cresoles microgramos de cresoles por 75 24 horas

metro cúbico de aire

Ciclo sol 63 microgramos de ciclo sol 63 por 5 000 24 horas

metro cúbico de aire

Ciclohexano microgramos de ciclohexano por 100 000 24 horas

metro cúbico de aire

Cromo microgramos de cromo por metro 1,5 24 horas

(en sus formas cúbico de aire

di-, tri- y he-

xavalente)

Sal de sodio microgramos de sal de sodio de 50 24 horas

de dalaponio dalaponio por metro cúbico de aire

Decaborano microgramos de decaborano por 25 24 horas

metro cúbico de aire

1-deceno microgramos de 1-deceno por 60 000 24 horas

metro cúbico de aire

Alcohol de microgramos de alcohol de dia- 815 1 horas

diacetona\* cetona por metro cúbico de aire

Diacinonio microgramos de diacinonio por 3 24 horas

metro cúbico de aire

Diborano microgramos de diborano por

metro cúbico de aire 10 24 horas

Dilaurato de microgramos de dilaurato de 30 24 horas

dibutiltino dibutiltino por metro cúbico

de aire

Ftalato de microgramos de ftalato de 500 24 horas

dicaprilo dicaprilo por metro cúbico de

aire

1,1-dicloro- microgramos de 1,1-dicloro-etano 35 24 horas

etano (cloruro por metro cúbico de aire

de vinilideno)

Difluoro- microgramos de difluoro-dicloro- 500 000 24 horas

diclorometano metano por metro cúbico de aire

Cetona de di- microgramos de cetona de diiso- 400 1 hora

isobutilo butilo por metro cúbico de aire

N,N-dimetil- microgramos de n,n-dimetil-1,3- 20 24 horas

1,3-diamino- diaminopropano por metro cúbico

propano de aire

Disulfuro de microgramos de disulfuro de di- 40 1 hora

dimetilo\* metilo por metro cúbico de aire

Eter de microgramos de éter de dimetilo 2 100 24 horas

dimetilo\* por metro cúbico de aire

Ftalato de microgramos de ftalato de 500 24 horas

dioctilo dioctilo por metro cúbico de aire

Dioxano\* microgramos de dioxano por 3 500 24 horas

metro cúbico de aire

Dioxalano microgramos de dioxalano por 10 24 horas

metro cúbico de aire

Acido sulfónico microgramos de ácido sulfónico de do- 35 24 horas

de dodecil benceno decil benceno por metro cúbico de aire

Dodino microgramos de dodino por metro 10 24 horas

cúbico de aire



Droperidol microgramos de droperidol por 1 24 horas

metro cúbico de aire

Polvo gramos por metro cuadrado 7 30 días

Etanol microgramos de etanol por metro 19 000 1 hora

(alcohol etílico) cúbico de aire

Acetato de microgramos de acetato de etilo 19 000 1 hora

etilo\* por metro cúbico de aire

Acrilato de microgramos de acrilato de etilo 4,5 1 hora

etilo\* por metro cúbico de aire

Antraquinona de microgramos de antraquinona de 10 24 horas

2-etilo 2-etilo por metro cúbico de aire

Benceno de etilo\* microgramos de benceno de etilo 4 000 1 hora

por metro cúbico de aire

Eter de etilo microgramos de éter de etilo por 30 000 24 horas

metro cúbico de aire

Propionato de microgramos de propionato de 120 1 hora

etilo-3-etoxi etilo-3-etoxi por metro cúbico

de aire

Hexanol de microgramos de hexanol de 2- 600 1 hora

2-etilo\* etilo por metro cúbico de aire

Etileno microgramos de etileno por 40 24 horas

metro cúbico de aire

Acido tetra- microgramos de ácido tetraacético 35 24 horas

acético de etileno-diamina por metro cúbico

etileno-diamina de aire

Dicloruro de microgramos de dicloruro de 400 24 horas

etileno etileno por metro cúbico de aire

Eter de etileno microgramos de éter de etileno 300 1 hora

glicol-butilo\* (cello- glicol-butilo por metro cúbico

solve de butilo) de aire

Acetato de etileno- glicol- microgramos de acetato de etileno 425 1 hora

glicol- glicol-butilo por metro cúbico

butilo\* de aire

(Acetato de

cellosolve de

butilo)

Dinitrato de microgramos de dinitrato de etileno 3 24 horas

etileno glicol glicol por metro cúbico de aire

Eter de etileno microgramos de éter de etileno 665 1 hora

glicol-etilo\* glicol-etilo por metro cúbico

(cellosolve) de aire

Acetato de éter microgramos de acetato de éter 180 1 hora

de etileno de etileno glicol-etilo por

glicol-etilo\* metro cúbico de aire

(acetato de

cellosolve)

Oxido de etileno microgramos de óxido de etileno 5 24 horas

por metro cúbico de aire

Citrato de microgramos de citrato de 0,02 24 horas

fentanilo fentanilo por metro cúbico de aire

Oxido férrico microgramos de óxido férrico 25 24 horas

por metro cúbico de aire

Fluoridización microgramos de fluoruros 40 30 días

(estación de totales recolectados en

crecimiento) 100 cm<sup>2</sup> de papel filtro encalado

Fluoridización microgramos de fluoruros 80 30 días

(del 1 de nov. totales recolectados en

al 1 marzo) 100 cm<sup>2</sup> de papel filtro encalado

Fluoruros microgramos de fluoruro 0,86 24 horas

(gaseosos) gaseoso, inorgánico por 0,34 30 días

(del 15 abril metro cúbico de aire

al 15 octubre) expresado como fluoruro de

hidrógeno

Fluoruros microgramos totales de 1,72 24 horas

(totales) fluoruro inorgánico por metro 0,68 30 días

(del 15 abril cúbico de aire expresado

al 15 octubre) como fluoruro de hidrógeno

Fluoruros microgramos totales de fluoruro 3,44 24 horas

(totales) inorgánico por metro cúbico de 1,38 30 días

(del 16 octubre aire expresado como fluoruro de

al 14 abril) hidrógeno

Fluoruros en partes por millón de peso 80 30 días

forraje seco de fluoruros

Fluoruros en partes por millón de peso 60 2 meses

forraje seco de fluoruros (consecut.)

(promedio)

Fluoruros en partes por millón de peso 35 30 días

forraje seco de fluoruros

(criterio-promedio

de estación de

crecimiento)

Fluorinerte microgramos de fluorinerte 35 24 horas

3M-FC-70 3M-FC-70 por metro cúbico

de aire

Formaldehído\* microgramos de formaldehído 65 1 hora

por metro cúbico de aire

Acido fórmico microgramos de ácido fórmico 500 24 horas

por metro cúbico de aire

Furfural\* microgramos de furfural por 1 000 1 hora

metro cúbico de aire

Alcohol de microgramos de alcohol de 1 000 24 horas

furfurilo furfurilo por metro cúbico de aire

Glutaraldehído microgramos de glutaraldehído 14 24 horas

por metro cúbico de aire

Haloperidol microgramos de haloperidol 0,1 24 horas

por metro cúbico de aire

Hexaclorociclo- microgramos de hexaclorociclo- 5 24 horas

hexano hexano por metro cúbico de

(Lindano) aire

Hexaclorociclo- Microgramos de hexaclorociclo- 2 24 horas

pentadieno pentadieno por metro cúbico de aire

Disilazano de microgramos de disilazano de hexa- 2 24 horas

hexametilometilo por metro cúbico de aire

Monomero de microgramos de monomero de diisocianato de hexametileno por

diisocianato de cianato de hexametileno por

hexametileno metro cúbico de aire

Trimer de microgramos de trimer de 1 24 horas

Diisocianato diisocianato de hexametileno

de hexametileno por metro cúbico de aire

Hexano microgramos de hexano por metro 12 000 24 horas

cúbico de aire

Cloruro de microgramos de cloruro de hidrógeno- 40 24 horas

hidrógeno\* geno por metro cúbico de aire

Cianuro de microgramos de cianuro de hidrógeno- 575 24 horas

hidrógeno geno por metro cúbico de aire

Peróxido de microgramos de peróxido de hidrógeno- 30 24 horas

hidrógeno por metro cúbico de aire

Sulfuro de microgramos de sulfuro de 30 1 hora

hidrógeno por metro cúbico de aire

Hierro microgramos de hierro metálico 4 24 horas

(metálico) por metro cúbico de aire

Isobutanol microgramos de isobutanol por 1 600 1 hora

metro cúbico de aire

Acetato de microgramos de acetato de iso- 1 000 1 hora

isobutilo\* butilo por metro cúbico de aire

Isopropanol microgramos de isopropanol 24 000 24 horas

(alcohol de por metro cúbico de aire

isopropilo\*)

Acetato de microgramos de acetato de iso- 1 200 1 hora

isopropilo\* propilo por metro cúbico de aire

Benceno de microgramos de benceno de iso- 100 1 hora

isopropilo\* propilo por metro cúbico de aire

Plomo microgramos totales de plomo 5 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire

Plomo microgramos totales de plomo 3 30 días

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire (media

aritmética)

Plomo microgramos totales de plomo 2 30 días

forma libre y combinada por metro

cúbico de aire (media geométrica)

Plomo en gramos de plomo en polvo por 0,1 30 días

polvo\* metro cuadrado

Litio microgramos totales de litio en 20 24 horas

(no hidruro) compuestos no hidruros por metro

cúbico

Hidruros de microgramos de hidruros de litio 2,5 24 horas

litio por metro cúbico de aire

Oxido de microgramos totales de óxido de 100 24 horas

magnesio magnesio por metro cúbico de aire

Malatión microgramos de malatión por 35 24 horas

metro cúbico de aire

Anhidrido microgramos de anhidrido maleico 30 24 horas

maleico por metro cúbico de aire

Compuestos de microgramos totales de manganeso 10 24 horas

manganeso en forma libre y combinada, incluyendo

permanganato de potasio como man-

ganeso por metro cúbico de aire

Mercaptanos microgramos totales de mercaptanos 20 1 hora

por metro cúbico de aire expresados

como mercaptanos de metil

Mercaptobenzo- microgramos de mercaptobenzo- 35 24 horas

tiazodisulfuro tiazodisulfuro por metro

cúbico de aire

Mercurio microgramos totales de mercurio 2 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire

Mercurio (alkil) microgramos totales de compuestos 0,5 24 horas

de mercurio alkil por metro

cúbico de aire

Metaldehído microgramos de metaldehído por 35 24 horas

metro cúbico de aire

Acido microgramos de ácido metacrílico 2 000 24 horas

metacrílico\* por metro cúbico de aire

Diisocianato de microgramos de diisocianato de 1 24 horas

difenil metano difenil metano por metro cúbico

de aire

Metanol (alcohol microgramos de metanol por 28 000 24 horas

metílico) metro cúbico de aire

Acrilato de microgramos de acrilato de metilo 4 1 hora

metilo por metro cúbico de aire

Bromuro de microgramos de bromuro de metilo 1 350 24 horas

metilo por metro cúbico de aire

Cloruro de microgramos de cloruro de metilo 7 000 24 horas

metilo por metro cúbico de aire

Peróxido de microgramos de peróxido de cetona 80 24 horas

cetona de metil de metil etilo por metro cúbico de

etilo aire

5-metil- microgramos de 5-metil-2-hexanona 380 1 hora

2-hexanona por metro cúbico de aire

Cetona de iso- microgramos de cetona de isobutil 1 200 24 horas

butil metilo metilo por metro cúbico de aire

Metacrilato de microgramos de metacrilato de 860 24 horas

metilo\* metilo por metro cúbico de aire

Salicilato de microgramos de salicilato de 100 24 horas

metilo\* metilo por metro cúbico de aire

Metoxiclor microgramos de metoxiclor por 35 24 horas

metro cúbico de aire

Cloruro de microgramos de cloruro de 100 000 1 hora

metileno\* metileno por metro cúbico

de aire

4,4-metileno- microgramos de 4,4-metileno- 10 24 horas  
bis-2-cloro- bis-2-cloro-anilina por  
anilina metro cúbico de aire

Dianilina de microgramos de dianilina de 10 24 horas  
metileno metileno por metro cúbico de  
aire

Nitrato de microgramos de nitrato de miconazol- 5 24 horas  
miconazol zol por metro cúbico de aire

Leche en polvo microgramos de leche en polvo 20 24 horas  
por metro cúbico de aire

Amina de microgramos de amina de mono- 25 24 horas  
monometilo\* metilo por metro cúbico de aire

Naftalina\* microgramos de naftalina por 30 1 hora  
metro cúbico de aire

Niquel\* microgramos totales de niquel 2 24 horas  
en forma libre y combinada por  
metro cúbico de aire

Carbonilo de microgramos de carbonilo de 0,5 24 horas  
niquel\* niquel por metro cúbico de aire

Acido nítrico microgramos de ácido nítrico 35 24 horas  
por metro cúbico de aire

Acido nitrilo- microgramos de ácido nitrilo- 35 24 horas  
triacético triacético por metro cúbico de aire

Oxidos de microgramos de óxidos de 200 24 horas  
nitrógeno nitrógeno por metro cúbico  
de aire, expresado como NO<sub>2</sub>

Nitroglicerina microgramos de nitroglicerina 3 24 horas  
por metro cúbico de aire



Oxido nitroso microgramos de óxido nitroso 9 000 24 horas  
por metro cúbico de aire

Octano microgramos de octano por 37 400 1 hora  
metro cúbico de aire

1-octeno microgramos de 1-octeno por 50 000 24 horas  
metro cúbico de aire

Acido oxálico microgramos de ácido oxálico 25 24 horas  
por metro cúbico de aire

ozono microgramos de ozono por 165 1 hora  
por metro cúbico de aire

Paladio microgramos totales de compuestos 10 24 horas  
(soluble en H<sub>2</sub>O) de paladio soluble en agua, incluyendo  
cloruro de paladio

Penicilina microgramos de penicilina por 0,1 24 horas  
metro cúbico de aire

Pentaborano microgramos de pentaborano por 1 24 horas  
metro cúbico de aire

Pentacloro- microgramos de pentaclorofenol 20 24 horas  
fenol por metro cúbico de aire

Percloroetileno microgramos de percloroetileno 4 000 24 horas  
por metro cúbico de aire

Fenol\* microgramos de fenol por 100 24 horas  
metro cúbico de aire

Fosgeno microgramos de fosgeno por 45 24 horas  
metro cúbico de aire

Fosfino microgramos de fosfino por 10 24 horas  
metro cúbico de aire

Acido fosfórico microgramos de ácido fosfórico por 100 24 horas  
metro cúbico de aire, expresado como

P2O5

Oxícloruro de microgramos de oxícloruro de 12 24 horas  
fósforo fósforo por metro cúbico de aire

Pentacloruro microgramos de pentacloruro 10 24 horas  
de fósforo de fósforo por metro cúbico de aire

Anhidrido microgramos de anhidrido ftálico 100 24 horas  
ftálico por metro cúbico de aire

Pimocida microgramos de pimocida por 1 24 horas  
metro cúbico de aire

Platino microgramos totales de platino 0,2 24 horas  
(soluble en H<sub>2</sub>O) en compuestos solubles en agua  
por metro cúbico de aire

Polibuteno-1- microgramos de polibuteno-1- 35 24 horas  
sulfonio sulfonio por metro cúbico de aire

Bifeniles nanogramos de bifeniles 150 24 horas  
policlorinados policlorinados por metro 35 1 año  
(riesgo: cúbico de aire  
0,84/millón)

Policloroprén microgramos de policloroprén 35 24 horas  
por metro cúbico de aire

Cianuro de microgramos de cianuro de 35 24 horas  
potasio (como potasio como sal total por  
sal total) metro cúbico de aire

Hidróxido de microgramos de hidróxido de po- 14 24 horas  
potasio tasio por metro cúbico de aire

Nitrato de microgramos de nitrato de potasio 35 24 horas  
potasio por metro cúbico de aire

N-propanol microgramos de n-propanol 16 000 24 horas  
(alcohol de por metro cúbico de aire  
n-propilo)

Propionaldehído microgramos de propionaldehído 2,5 24 horas  
por metro cúbico de aire

Acido propiónico microgramos de ácido propiónico 80 1 hora  
por metro cúbico de aire

Anhidrido microgramos de anhidrido pro- 80 1 hora  
propiónico piónico como equivalente del  
(expresado como ácido propiónico por metro  
ácido propiónico) cúbico de aire

Dicloruro de microgramos de dicloruro de 2 400 24 horas  
propileno propileno por metro cúbico de aire

Eter de metil microgramos de éter de metil 73 200 1 hora  
glicol propileno glicol propileno por metro  
cúbico de aire

Acetato de éter microgramos de acetato de éter 4 100 1 hora  
monometil glicol monometil glicol propileno por  
propileno\* metro cúbico de aire

Oxido de microgramos de óxido de propi- 4 500 24 horas  
propileno leno por metro cúbico de aire

Piridina\* microgramos de piridina por 48 1 hora  
metro cúbico de aire

Selenio microgramos de selenio en 10 24 horas  
forma libre o combinada por  
metro cúbico de aire

Silano microgramos de silano por 150 24 horas  
metro cúbico de aire

Sílice- microgramos de sílice respirable 5 24 horas  
respirable (menos por metro cúbico de aire  
de 10 micrómetros

en diámetro)

Plata microgramos totales de plata 1 24 horas

en forma libre y combinada

por metro cúbico de aire

Clorito de microgramos de clorito de sodio 20 24 horas

sodio por metro cúbico de aire

Cianuro de sodio microgramos de cianuro de sodio co- 35 24 horas

(como sal total) mo sal total por metro cúbico de aire

Hidróxido de microgramos de hidróxido de 10 24 horas

sodio sodio por metro cúbico de aire

Solvesso 100\* microgramos de solvesso 100 1 030 1 hora

por metro cúbico de aire

Solvesso 150\* microgramos de solvesso 150 1 030 1 hora

por metro cúbico de aire

Cloruro de microgramos de cloruro de estaño 10 24 horas

estaño (como como hojalata por metro cúbico

hojalata) de aire microgramos de estireno

Estireno\* por metro cúbico de aire 400 24 horas

Subtilicina microgramos de subtilicina por 0,06 24 horas

(enzima metro cúbico de aire

detergente)

Sulfatación miligramos de trióxido de azufre 0,7 30 días

por 100 centímetros cuadrados

de peróxido de plomo expuesto

Dióxido de microgramos de dióxido de 275 24 horas

azufre azufre por metro cúbico de aire 690 1 hora

aire 55 1 año

(media aritmética)

Acido sulfúrico microgramos de ácido sulfúrico 35 24 horas

por metro cúbico de aire

Materia de partículas microgramos totales de materia 120 24 horas

suspendidas de partículas suspendidas por 60 1 año

(partículas de metro cúbico de aire (media geométrica)

menos de 44

micrones)

Talco microgramos de talco fibroso 2 24 horas

(fibroso) por metro cúbico de aire

Telurio (excepto microgramos de telurio en forma 10 24 horas

teluro de libre y combinada por metro

hidrógeno) cúbico de aire

Tetrabutírea microgramos de tetrabutírea 10 24 horas

por metro cúbico de aire

Tetrahydro- microgramos de tetrahydrofurano 93 000 24 horas

furano\* por metro cúbico de aire

Disulfuro de microgramos de disulfuro de 10 24 horas

tiuram tetra- tiuram tetrametilo por metro

metilo cúbico de aire

Tioúrea microgramos de tioúrea por 20 24 horas

metro cúbico de aire

Hojalata microgramos totales de hojalata 10 24 horas

en forma libre y combinada por

metro cúbico de aire microgramos

Titanio de titanio por metro cúbico de aire 35 24 horas

Sodio de microgramos de sodio de tolmetino 5 24 horas

tolmetino por metro cúbico de aire

Tolueno\* microgramos de tolueno por 2 000 24 horas

metro cúbico de aire

Diisocianato microgramos de diisocianato de 0,5 24 horas  
de tolueno tolueno por metro cúbico de aire

Azufre total microgramos de azufre total 40 1 hora  
reducido (ATR) reducido como equivalente de  
como equivalente H<sub>2</sub>S por metro cúbico de aire  
de H<sub>2</sub>S (del molido  
de pulpa Kraft)

1,2,4-tricloro- microgramos de 1,2,4-tricloro- 35 24 horas  
benceno benceno por metro cúbico de  
aire

1,1,1-tricloro- microgramos de 1,1,1-tricloro- 115 000 24 horas  
etano etano por metro cúbico de  
(cloroformo de aire  
etilo)

Tricloro- microgramos de tricloroetileno 28 000 24 horas  
etileno por metro cúbico de aire

Trifluoro- microgramos de trifluoro-tri- 800 000 24 horas  
tricloro- cloroetano por metro cúbico  
etano de aire

Amina de microgramos de amina de tri- 0,5 1 hora  
trimetilo\* metilo por metro cúbico de aire

1,2,4-trimetil microgramos de 1,2,4-trimetil- 35 24 horas  
benceno benceno por metro cúbico de aire

Metacrilato de microgramos de metacrilato de 1 24 horas  
tripropiltina tripropiltina por metro cúbico de aire

Vanadio microgramos totales de vanadio 2 24 horas  
en forma libre y combinada por  
metro cúbico de aire

Cloruro de microgramos de cloruro de vinilo 280 24 horas

vinilo por metro cúbico de aire

Warfarina microgramos de warfarina por 10 24 horas

metro cúbico de aire

Suero en polvo microgramos de suero en polvo 35 24 horas

por metro cúbico de aire

Xilenos\* microgramos totales de 2 300 24 horas

isómeros de xileno por metro

cúbico de aire

Zinc microgramos totales de zinc 100 24 horas

en forma libre y combinada

por metro cúbico de aire