



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

INGENIERÍA QUÍMICA

“ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO SEGURO Y EFICIENTE DEL H₂S CONTENIDO EN EL GAS ASOCIADO A LA EXTRACCIÓN DEL PETRÓLEO EN INSTALACIONES COSTA FUERA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A :

JOSE FERNANDO CARRASCO LUGO

Director: I.Q. René de la Mora Medina





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN
ESCOLAR
P R E S E N T E.

Comunico a usted que al alumno(a) Carrasco Lugo Jose Fernando con número de cuenta 405002135 de la carrera Ingeniería Química, se le ha fijado el día 23 del mes de mayo de 2014 a las 18:00 horas para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE	I.Q. ARTURO ENRIQUE MÉNDEZ GUTIÉRREZ
VOCAL	I.Q. RENÉ DE LA MORA MEDINA
SECRETARIO	I.Q. CUAUHTÉMOC LAGOS CHÁVEZ
SUPLENTE	DR. EDTSON EMILIO HERRERA VALENCIA
SUPLENTE	I.Q. JUAN ÁNGEL LUGO MALDONADO



Handwritten signatures of the jury members, including "Eduardo Herrera Valencia".

El título de la tesis que se presenta es: Alternativas para el manejo seguro y eficiente del H₂S contenido en el gas asociado a la extracción del petróleo en instalaciones costa fuera.

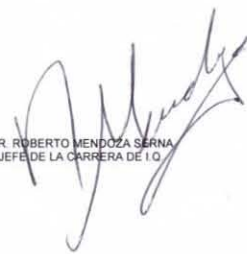
Opción de Titulación: Tesis profesional

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México, D.F. a 7 de abril de 2014.

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NUÑEZ
DIRECTOR
ZARAGOZA
DIRECCIÓN

RECIBÍ:
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES
Y DE GRADO

Vo.Bo.
DR. ROBERTO MENDOZA SERNA
JEFE DE LA CARRERA DE I.Q.



AGRADECIMIENTOS

A MI ASESOR, I.Q. René de la Mora Medina, por su apoyo y asesoría invaluable en la elaboración de este trabajo.

A LOS INTEGRANTES DEL JURADO, por su tiempo asesoría y participación en la revisión de este trabajo.

AL INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO (IMP), por ser la instancia que me ha permitido un mayor desarrollo profesional y personal.

A MI PADRE, Estevan Fernando Carrasco Ortega, por su incansable esfuerzo y arduo trabajo para que yo pudiera ser un hombre de bien. Gracias papá por ser mi ejemplo a seguir y la más grande razón por la que hoy soy un profesionista.

A MI MADRE, Leticia Lugo Ramírez, por todo su esfuerzo y apoyo para que yo pudiera concretar todas mis metas. Gracias por ser la mujer fuerte y luchadora que nos ha sacado adelante a mí y a mis hermanos.

A MIS HERMANOS, Martín y Orlando, por ser una parte importante en mi vida y ser partícipes de lo que hoy he logrado.

A LOS INGENIEROS DEL IMP, Gabriel Morales Urdiales, Víctor Manuel Santa Cruz Negrete, Domingo Badillo Abrego, José Issac Muñoz Ocotero, Arturo Acuayte Soni por su apoyo y enseñanzas.

A Karina Georgina Noriega Espíndola el amor que tanta alegría me ha traído, la persona más importante que forma parte de mi vida, gracias por tu paciencia y comprensión. Te amo, eres parte de mí ser.

A MIS AMIGOS, Yesenia, Manuel y Pedro, por compartir conmigo tantos momentos agradables y por estar conmigo cuando más los he necesitado.

Índice

OBJETIVO.....	2
JUSTIFICACIÓN.....	2
I. INTRODUCCIÓN.....	3
II. TECNOLOGÍAS EXISTENTES DE EQUIPO DE INCINERACIÓN.....	9
II.1 INSTALACIONES COSTA AFUERA.....	10
II.1.1 EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS.....	11
II.1.2 DESCRIPCIÓN DE PLATAFORMAS MARINAS DE PERFORACIÓN Y PRODUCCIÓN.....	12
II.1.3 NECESIDADES DE USO DE INCINERADORES O QUEMADORES.....	17
II.2 INCINERADORES EN CAMPO.....	22
II.2.1 TIPOS Y DESCRIPCIÓN.....	24
II.2.2 DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN.....	30
II.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	50
II.3 QUEMADORES ELEVADOS.....	52
II.3.2 DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN.....	57
III. MARCO REGULATORIO.....	79
III.1 NORMATIVIDAD NACIONAL.....	84
III.2 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL.....	87
IV. MECANISMOS DE COMBUSTIÓN.....	91
IV.1 REACCIONES DE COMBUSTIÓN.....	97
IV.2 COMBUSTIÓN DEL H ₂ S.....	104
IV.3 CARACTERIZACIÓN DE Y DISPERSIÓN DEL H ₂ S.....	114
IV.4 CARACTERIZACIÓN DE Y DISPERSIÓN DEL SO ₂ Y FORMACIÓN DE LLUVIA ÁCIDA.....	117
V. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS EXISTENTES.....	120
V.1 EFICIENCIA.....	121
V.2 COSTOS.....	122
V.3 SERVICIOS REQUERIDOS.....	125
V.4 RIESGOS Y ACCIDENTES.....	126
V.5 EMISIONES.....	134
V.6 MANTENIMIENTO.....	136
V.6 OPERABILIDAD.....	139
V.7 COMPARACIÓN TECNOLÓGICA.....	146
VI. EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA.....	147
VI.1 EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	149
VI.2 CRITERIOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA.....	158
CONCLUSIONES.....	162
BIBLIOGRAFÍA.....	164
ANEXOS.....	167

OBJETIVO.

Se pretende sustentar que un quemador bien diseñado y especificado, genera más beneficios que un incinerador en campo, asimismo se propone considerar un nuevo criterio para el diseño y especificación de los quemadores elevados, basado en la velocidad de salida de los gases ácidos.

JUSTIFICACIÓN.

La intención de esta trabajo es evaluar los problemas a los que se enfrenta la industria petrolera en la eliminación del ácido sulfhídrico (H_2S), los riesgos asociados a su eliminación, los efectos ecológicos, los daños en salud pública, las restricciones gubernamentales durante sus emisiones, los beneficios que se esperan de la combustión de los gases ácidos y sus mecanismos de dispersión.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN.

Durante la extracción en México de petróleo crudo en las plataformas marinas, se produce gas amargo asociado a la mezcla del petróleo líquido extraído. La composición de este gas contiene H_2S cuyas proporciones dependen del campo explotado; en la actualidad este gas ácido alcanza hasta un 5 % de la composición del gas producido, provocando diferentes tipos de corrosión en equipos, tuberías y accesorios.

Para el uso de gas amargo como gas combustible es necesario eliminar el H_2S mediante un proceso denominado endulzamiento. Existen diferentes tecnologías para el endulzamiento del gas amargo, todas eliminan el gas ácido, produciendo lo que se denomina gas dulce y como desecho, se obtiene una corriente de gas ácido.

Este gas ácido es enviado a los quemadores elevados con la intención de ser incinerado en estos equipos, sin embargo los reportes muestran que la combustión del gas ácido no es efectiva, por lo que a través del quemador estos gases son enviados al medio ambiente para su dispersión en la atmósfera.

El gas ácido está constituido principalmente de H_2S con un porcentaje significativo de CO_2 y en menor grado pequeñas cantidades de hidrocarburos.

El ácido sulfhídrico (H_2S) es un producto tóxico con un alto grado de letalidad que difícilmente es quemado en condiciones normales. Al igual que todos los desfogues y venteos está regulado por normas ecológicas y de sanidad, cuyas restricciones son cada vez más estrictas.

Bajo este escenario, varias entidades de la industria petrolera nacional (y también internacional) han propuesto que los gases ácidos como el H_2S sean quemados o incinerados en equipos especiales, cuya principal ventaja es la conversión por combustión del H_2S a SO_2 garantizando hasta un 99% de eficiencia.

Los incineradores son equipos que demandan diferentes servicios, son voluminosos y su operabilidad genera un riesgo a las instalaciones, en tanto que los quemadores elevados, aunque son equipos indispensables para la seguridad de las plataformas, en lo que respecta a los gases ácidos, al parecer, no son eficientes en el quemado del H_2S .

El propósito de esta trabajo es evaluar los problemas a los que se enfrenta la industria petrolera en la eliminación de estos gases ácidos, los riesgos asociados a su eliminación, los efectos ecológicos, los daños en salud pública, las restricciones gubernamentales durante sus emisiones, los beneficios que se esperan de la combustión de los gases ácidos y sus mecanismos de dispersión.

Finalmente, el trabajo pretende sustentar que un quemador bien diseñado y especificado, genera por mucho más beneficios que un incinerador en campo, la tesis plantea durante su desarrollo, que un sistema de incineración además de no traer ventajas ecológicas, de seguridad o sanidad pública constituye un gasto innecesario en la compra del paquete de incineración, complicaciones operativas, mantenimiento, consumo adicional de gas combustible y riesgo asociado a la operabilidad de estos equipos.

La tesis propuesta propone considerar un nuevo criterio para el diseño y especificación de los quemadores elevados, basado en la velocidad de salida de los gases ácidos como un parámetro que determinará el tiempo requerido para la combustión de estos gases, este valor estará en función del flujo y diámetro de la boquilla del quemador seleccionada (actualmente el diámetro de la boquilla está asociado a la velocidad de salida del gas bajo un criterio hidráulico expresado en MACH, y determinado por la normatividad existente y la tecnología actual de quemadores, el cálculo del diámetro de los quemadores, actualmente no se asocia al tiempo de combustión).

Los puntos fundamentales que se determinan en esta evaluación considera: la eficiencia de destrucción del H_2S , la dispersión del H_2S , la letalidad en la

salud del personal operario, los criterios de la EPA y el consumo de gas combustible.

Las aportaciones del trabajo, pueden resumirse en los siguientes puntos:

1. Identificación y descripción de las tecnologías existentes para la disposición de gases ácidos.
2. Determinación de los riesgos, daños ecológicos, daños a la salud pública y a las instalaciones provocados por la emisión de gases ácidos.
3. Regulaciones ambientales y normas ecológicas.
4. Descripción técnica de quemadores elevados, incineradores y equipo de detección de gases ácidos; diseño y especificaciones.
5. Filosofías y mecanismos de combustión de las tecnologías existentes que se presentan.
6. Evaluación técnica de las tecnologías existentes y contraste de éstas.
7. Contraste y beneficios de los quemadores elevados contra los incineradores en campo.
8. Nuevos criterios de ingeniería para el diseño y especificación de quemadores elevados.

Este trabajo, está orientado a incrementar la seguridad operativa en instalaciones costafuera, disminuir los efectos ambientales por las emisiones petroleras, evitar gastos innecesarios en plataformas marinas y disminuir las

complicaciones operativas y de mantenimiento en las instalaciones petroleras.

El desarrollo de esta tesis comprende los siguientes puntos:

En el capítulo uno, se indica que durante la extracción del petróleo se produce gas amargo asociado a la mezcla del petróleo extraído, se menciona la necesidad de utilizar ese gas amargo como gas combustible para el cual se necesita remover el ácido sulfhídrico (H_2S) mediante un proceso llamado endulzamiento, este proceso genera corrientes de desecho que contiene gas ácido, para el cual es necesario quemarlo en equipos llamados “quemadores” o “incineradores”.

En el capítulo dos, se describe de manera general el funcionamiento de las instalaciones costa fuera (plataformas de perforación y producción), además se presentan las tecnologías existentes empleadas para el quemado de gases ácidos, especialmente los quemadores elevados y los incineradores de gas, su operabilidad, sus filosofías y una tabla comparativa de ventajas y desventajas de ambos. Adicionalmente se describe brevemente su metodología de diseño y la especificación de los mismos.

El capítulo tres, presenta el marco regulatorio; Normatividad mexicana (NRF, NOM y NMX), normatividad internacional (EPA, ISO, OSHA).

El cuarto capítulo, trata sobre los mecanismos de combustión y las variables consideradas en las tecnologías analizadas. Características técnicas y sanitarias de las sustancias involucradas en este proceso; H_2S , SO_2 y gases de combustión. También se revisan los mecanismos de dispersión de estos gases y sus efectos primarios y secundarios en su medio ambiente y salud pública. En este capítulo se analiza qué tanto ganamos al convertir el H_2S a

SO₂, para que posteriormente este se convierta a H₂SO₃ que constituye el compuesto principal de la lluvia ácida.

En el quinto capítulo, se realiza el contraste entre un quemador elevado y un incinerador de campo, en esta comparación se considera la eficiencia de cada uno, la dispersión, el costo, el control del sistema, los servicios requeridos, mantenimiento, inversión y asistencia del operador.

En el sexto capítulo, se realiza la evaluación y se establecen los criterios que deberán considerarse para la adquisición de un quemador que maneje gases ácidos.

Capítulo II

TECNOLOGÍAS EXISTENTES DE EQUIPO DE INCINERACIÓN.

II.1 INSTALACIONES COSTA AFUERA.

Una de las necesidades primarias en el progreso de la civilización ha sido la energía. Avances industriales se abastecieron, primero por el carbón, después el petróleo y el gas. Hoy en día, el petróleo y el gas son productos esenciales en el comercio mundial.

La exploración que en un principio comenzó en tierra se ha movido a zonas costa fuera (offshore), en un principio, en aguas poco profundas y ahora en aguas más profundas, debido a las posibilidades cada vez más reducidas de nuevos yacimientos en aguas poco profundas.

Una estructura costa fuera (offshore) no tiene acceso fijo a la tierra seca y puede ser obligada a permanecer en su posición en todas las condiciones climatológicas que se presenten. Las estructuras costa fuera (offshore) pueden ser fijadas al fondo marino o pueden estar flotando. Las estructuras flotantes pueden ser amarradas al fondo del mar, posicionadas dinámicamente por propulsores o puede estar a la deriva libremente.

Para la producción de crudo desde pozos ubicados en altamar, es necesario instalar y operar plataformas en las cuales se utilizan instrumentos equipos y sistemas que permitan extraer, recolectar y bombear a terminales o barcos el crudo, condensados (gasolinas ligeras) o gas obtenidos.

Las instalaciones costa fuera, se encuentran localizadas en la Sonda de Campeche principalmente frente a las costas de los estados de Tabasco y Campeche. Estas instalaciones de producción de petróleo crudo y gas, se encuentran ubicadas sobre estructuras de acero, llamadas plataformas. Estas estructuras por su diseño pueden ser:

Trípodes: Estructura metálica de tres patas (columnas) donde generalmente se localiza equipo para prueba de pozos o equipo para telecomunicaciones.

Tetrápodos: Estructura metálica de cuatro patas (columnas) donde generalmente se localiza equipo de servicios y módulos habitacionales.

Octápodos: Estructura metálica de ocho patas (columnas) donde generalmente se localiza equipo de proceso y de servicios auxiliares para la extracción de petróleo crudo y gas, producción de petróleo crudo, compresión de gas amargo, tratamiento y bombeo de agua utilizada para la recuperación secundaria.

Dodecápodos: Estructura metálica de doce patas (columnas) donde generalmente se localiza equipo de proceso y de servicios auxiliares para producción de petróleo crudo y compresión de gas amargo.

II.1.1 EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS.

La extracción, producción o explotación del petróleo se hace de acuerdo con las características propias de cada yacimiento. Para poner un pozo a producir se baja una especie de cañón y se perfora la tubería de revestimiento a la altura de las formaciones donde se encuentra el yacimiento. El petróleo fluye por esos orificios hacia el pozo y se extrae mediante una tubería de menor diámetro, conocida como "tubería de producción".

Si el yacimiento tiene energía propia, generada por la presión subterránea y por los elementos que acompañan al petróleo (por ejemplo gas y agua), éste saldrá por sí solo. En este caso se instala en la cabeza del pozo un equipo llamado "árbol de navidad", que consta de un conjunto de válvulas para regular el paso del petróleo.

Si no existe esa presión, se emplean otros métodos de extracción. El más común ha sido el "balancín", el cual, mediante un permanente balanceo, acciona una bomba en el fondo del pozo que succiona el petróleo hacia la superficie.

El petróleo extraído generalmente viene acompañado de sedimentos, agua y gas natural, por lo que deben construirse previamente las facilidades de producción, separación y almacenamiento. Una vez separado de esos elementos, el petróleo se envía a los tanques de almacenamiento y a los

oleoductos que lo transportarán hacia las refinerías o hacia los puertos de exportación.

II.1.2 DESCRIPCIÓN DE PLATAFORMAS MARINAS DE PERFORACIÓN Y PRODUCCIÓN.

a) Plataformas de perforación.

El crudo y gas extraídos del yacimiento de los pozos de producción, se recolectan en una plataforma de perforación. Estas plataformas son capaces de captar el flujo de varios pozos de producción. La plataforma de perforación se encarga de controlar la presión de descarga de crudo-gas de cada uno de los pozos asociados, así como del control de la "camisa" del ducto que conecta dichos pozos a la plataforma.

El control de las variables mencionadas es importante debido a que el rebasar niveles críticos puede conducir a situaciones difíciles e incluso ocasionar el descontrol total del pozo. En la plataforma de perforación además se realizan muestreos para determinar la relación de gas - crudo proveniente de cada uno de los pozos mediante el uso de un separador de prueba y en algunas ocasiones esta plataforma juega el papel de enlace con plataformas de perforación más distantes.

Las plataformas de perforación tienen como función, realizar la perforación de los pozos, extraer y separar las corrientes de crudo y gas, además de su medición, para poder integrar estas corrientes a las plataformas de producción y compresión respectivamente. Generalmente, la perforación se realiza mediante equipo marino fijo, el cual está integrado por paquetes, localizados en el segundo nivel de la plataforma. En la figura 2.1 se muestra un diagrama de bloques de la plataforma de perforación.

- Paquete de lodos.
- Paquete de líquidos,
- Paquete de bombas.

- Paquete de almacenamiento.
- Paquete de máquinas (motogeneradores)
- Torre o mástil de perforación, localizada en la zona de pozos.
- Paquete habitacional.
- Helipuerto.

Una vez realizada la perforación de los pozos, el equipo de perforación es retirado y llevado a otra estructura. Una vez retirado el equipo de perforación, el equipo de proceso instalado en el primer nivel de la plataforma queda operando.

- Pozos productores o inyectores.
- Separador de prueba con medición de crudo y gas.
- Separador de crudo y gas.
- Envío del crudo por ducto a otra instalación, con dispositivos de limpieza (trampa de diablos).
- Envío del gas por ducto a otra instalación, con dispositivos de limpieza (trampa de diablos).

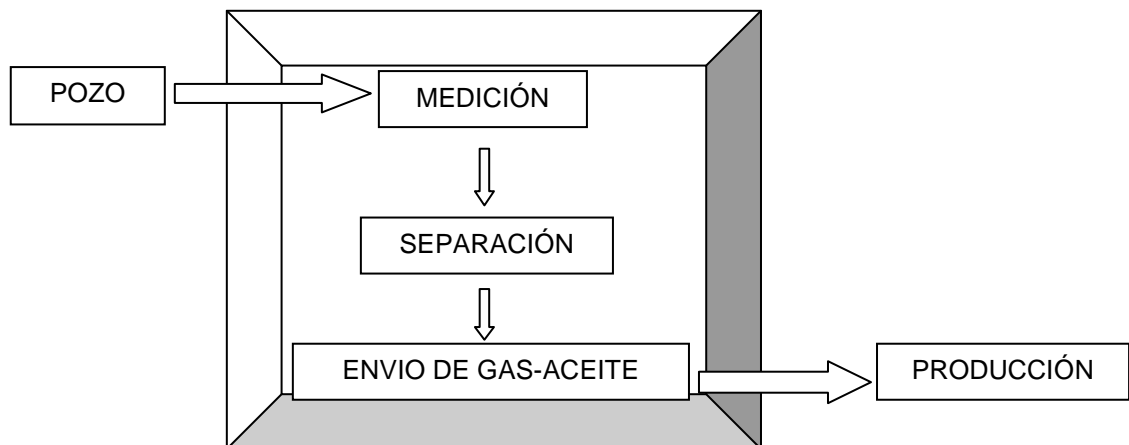


Figura 2.1 Diagrama de bloques plataforma de perforación. (Jose Fernando Carrasco Lugo).

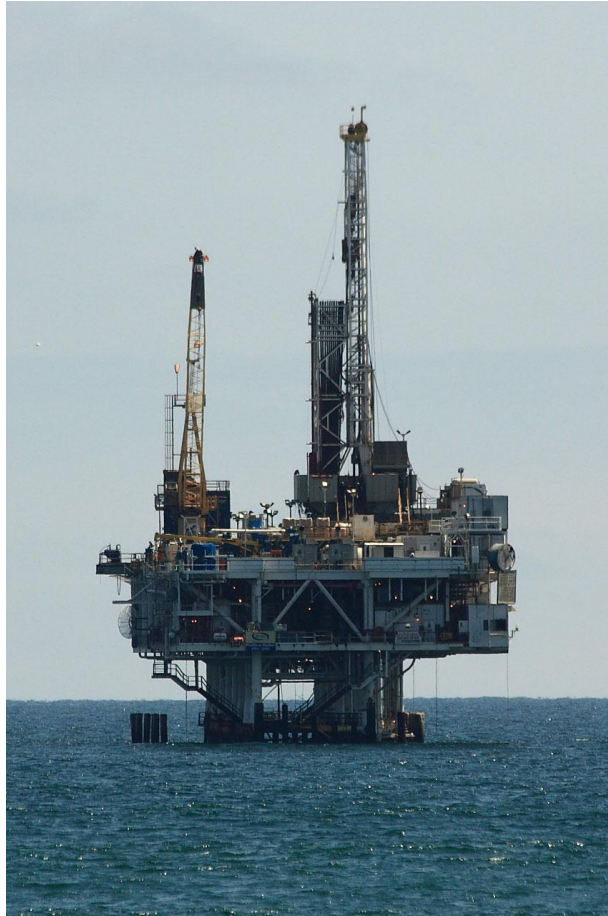


Figura 2.2 Plataforma perforación. (<http://www.publicdomainpictures.net>)

b) Plataformas de producción.

Las plataformas de producción llevan a cabo la separación primaria de crudo, gas y agua de tal manera que crudo y gas puedan ser transferidos a tierra a través de líneas independientes.

La alimentación en dos fases (gas y crudo-agua) proveniente de la plataforma de enlace se separa, se precalienta y envía a la primera etapa de separación donde se separan crudo, gas y agua a alta presión. El crudo se envía a una segunda etapa de separación donde se lleva a cabo la operación anterior a baja presión. La corriente de crudo del separador de la segunda etapa se deshidrata y enfría para su posterior bombeo a la plataforma de enlace.

El gas del separador de la segunda etapa, se enfría y envía a la primera etapa de compresión, mientras que el gas del separador de la primera etapa se une con el gas de salida de la primera etapa de compresión, se enfría y somete a una segunda etapa de compresión, seguida de enfriamiento y de una tercera etapa final de compresión. El gas comprimido se enfría y separa en dos corrientes, una de las cuales se deshidrata y envía a la plataforma de enlace de gas, y la otra se endulza para ser utilizada como combustible en la misma plataforma.

El agua eliminada en los drenajes a presión (descargas intermitentes provenientes de las purgas de bombas, filtros, etc.) y en cada una de las etapas de estabilización, se somete a un tratamiento con el fin de recuperar el crudo arrastrado y evitar así la contaminación por la descarga de aguas oleosas; el agua remanente es enviada al mar.

Las plataformas de producción tienen como función principal, recibir el petróleo crudo para estabilizarlo, deshidratarlo y realizar el bombeo de éste a través de ductos de transporte a tierra.

Las operaciones principales que se realizan en este tipo de plataforma son:

- Recibo de crudo por ducto, con dispositivo de limpieza (trampa de diablos).
- Separación de crudo y gas.
- Estabilización de crudo.
- Deshidratación de crudo.
- Bombeo de crudo.
- Envío del crudo por ducto a tierra con dispositivos de limpieza (trampa de diablos).

En la figura 2.3 se muestra un diagrama de bloques de la plataforma de producción.

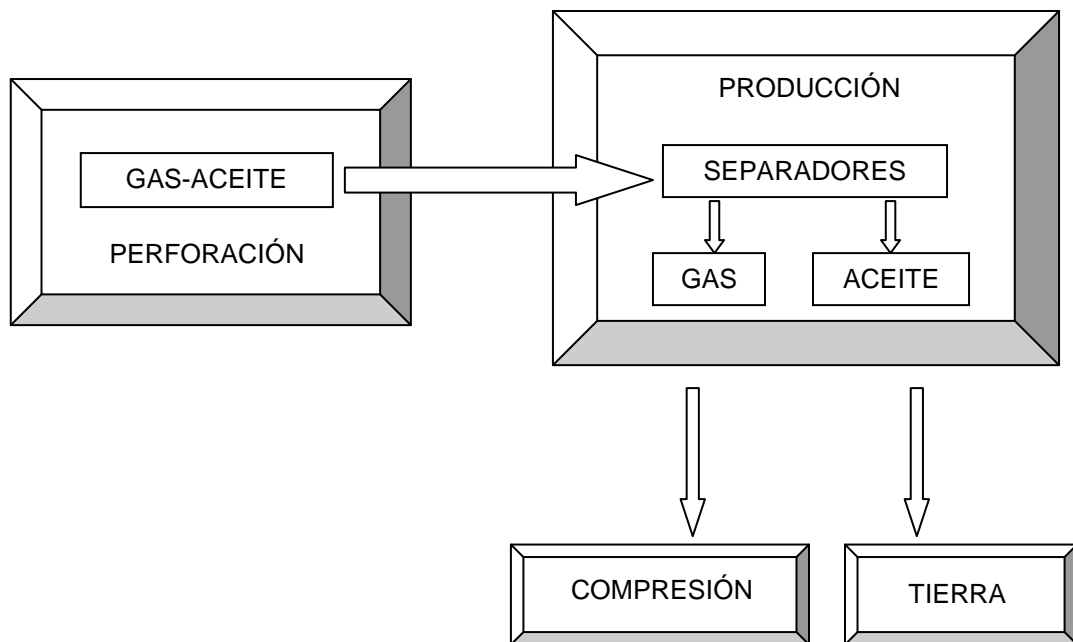


Figura 2.3 Diagrama de bloques plataforma de producción. (Jose Fernando Carrasco Lugo).



Figura 2.4 Plataforma de Perforación, Enlace y Producción/Compresión (www.ici.es)

II.1.3 NECESIDADES DE USO DE INCINERADORES O QUEMADORES.

Para muchos desechos, la incineración o el quemado es una elección atractiva y necesaria para la gestión de estos residuos. En la actualidad, en las plataformas de producción se puede contar con más de una planta endulzadora con capacidades considerables de gas. La operación de estas plantas endulzadoras implica la generación de una cantidad importante de gases ácidos en las secciones de regeneración de DEA para la cual es importante contar con la infraestructura necesaria que permita la disposición de dichos gases ácidos de manera eficiente y segura, cumpliendo con la normatividad vigente.

Procesos de Endulzamiento.

En una clasificación general existen dos clases de procesos de endulzamiento regenerativos, dependiendo del tipo de agente que se utilice para endulzar el gas amargo:

- a) Procesos con agentes líquidos.
- b) Procesos con agentes sólidos.

Los procesos con agentes líquidos involucran la recirculación de una solución a contracorriente con la corriente gaseosa. La solución que se enriquece en gas ácido, se regenera por medio de calor y/o reducción de presión.

Los procesos con agentes sólidos de endulzamiento emplean un lecho a través del cual el gas amargo fluye para extraerle los componentes del gas ácido. La regeneración del lecho sólido generalmente se realiza reduciendo la presión y suministrando calor.

Los procesos de absorción líquida son los más empleados para el endulzamiento del gas amargo.

Absorción química con un líquido.

Proceso	Extrae		Medio absorbente	Estado
	H ₂ S	CO ₂		
Monoetanolamina	SI	SI	MEA	Activo
Dietanolamina	SI	SI	DEA	Activo
Trietanolamina	SI	SI	TEA	Comerc. no es importante
Metildietanolamina	SI NO		MDEA	Comerc. no es importante
Econoamina	SI	SI	DGA	Activo
Sulfinol	SI	SI	Sulfolane/Diisopropanolamina	Activo

Tabla 2.1 Procesos de endulzamiento. (Jose Fernando Carrasco Lugo).

El proceso de DEA se aplica comúnmente en el endulzamiento de gas de refinería y líquidos amargos, estas corrientes contienen además de H₂S y CO₂ cantidades apreciables de sulfuro de carbonilo y disulfuro de carbono, contaminantes con los que la DEA no reacciona. Actualmente este proceso se está empleando también para el endulzamiento de gas natural. Una ventaja que tiene sobre la MEA consiste en que su presión de vapor es menor, con lo que se tienen menores pérdidas por vaporización de la solución.

El proceso de DEA no es selectivo y remueve tanto el H₂S como el CO₂. El H₂S puede eliminarse tanto en el gas como en el líquido dulce hasta una concentración de 50 ppm, y el CO₂ hasta 1,000 ppm, sin embargo, para el tratamiento de gas natural y operando a presiones superiores a 220 psig se obtiene el gas dulce con 4 ppm de H₂S.

A continuación se hará la descripción del proceso general que comprende el endulzamiento de gas y líquido amargos, figura 2.5.

El gas amargo se alimenta al Absorbedor para ponerse en contacto a contracorriente con una solución de DEA pobre (DEA regenerada) que se inyecta por la parte superior. Por el domo del Absorbedor se obtiene gas dulce como producto y por el fondo una solución de DEA rica (DEA con gas ácido). En los tres primeros platos de la parte superior se recircula agua a contracorriente con los gases ácidos, con el fin de llevar a cabo el lavado de éstos y evitar pérdidas de DEA por arrastre. El líquido amargo se alimenta al Contactor por la parte inferior y a contracorriente se pasa solución de DEA pobre. El líquido dulce obtenido en el domo se envía a un Separador, donde por diferencia de densidades se separa la DEA que eventualmente pudiera haber sido arrastrada. La solución de DEA rica proveniente del Absorbedor se une con la del Contactor y se envía al Acumulador de DEA rica, donde por reducción de la presión, se separan aquellos hidrocarburos que se habían solubilizado.

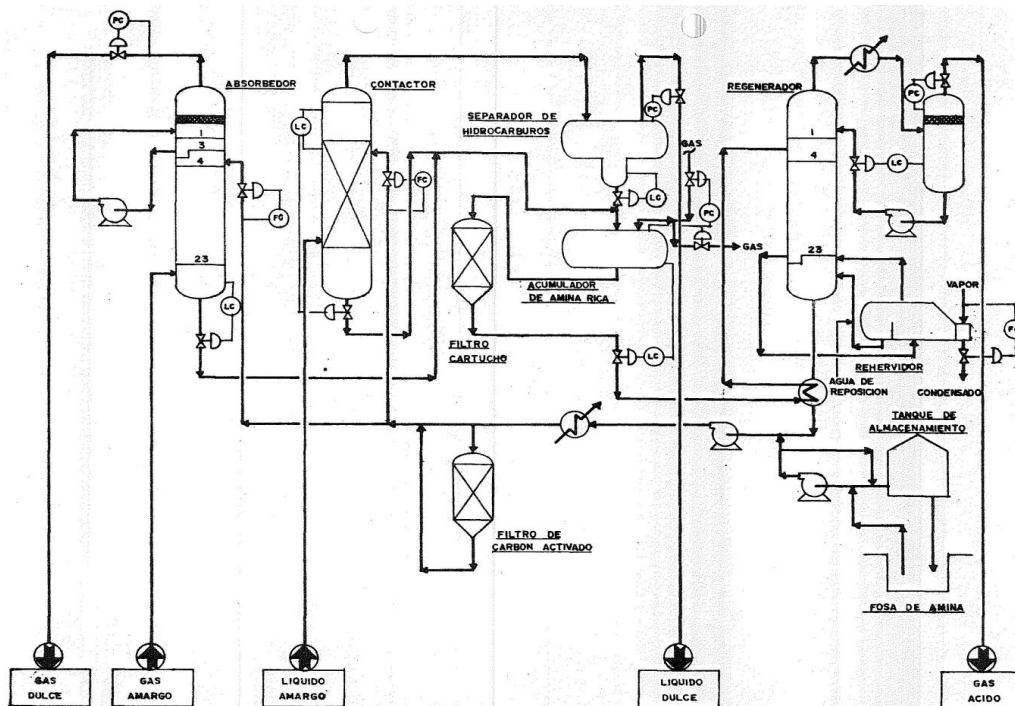


Figura 2.5 Proceso de endulzamiento.

La solución se filtra (filtro de cartuchos) para remover los sólidos producto de la erosión/corrosión y parte de los productos de degradación de la DEA para posteriormente alimentarse al regenerador previo calentamiento con solución de DEA pobre.

El gas ácido obtenido por el domo del regenerador se separa del agua mediante condensación de ésta y se envía a recuperación a una planta de Azufre.

La solución de DEA regenerada después de intercambiar calor con la solución de DEA rica se enfría, se filtra (20% en volumen de la corriente) en un filtro de carbón activado para eliminar hidrocarburos condensados, partículas de sulfuro de fierro y de óxido de fierro, productos de degradación de la DEA y contaminantes que son causa de corrosión y formación de espuma, para luego alimentarse al absorbedor y al contactor, cerrándose de esta manera el ciclo. El medio de calentamiento para proporcionar el calor necesario para la desorción de los gases ácidos puede ser vapor saturado de baja presión o aceite de calentamiento.

La preparación de la solución de DEA a la concentración especificada, se hace en la Fosa de DEA y de aquí se bombea para su almacenamiento a un tanque atmosférico. A este tanque se le inyecta una cantidad adecuada de querosina para evitar la oxidación de la solución de DEA. Cuando en el sistema disminuye la concentración especificada para la solución, del tanque atmosférico se realiza una inyección de solución hasta restablecer la concentración en el sistema.

Sección de regeneración.

- *Regenerador de DEA.*

En este equipo se lleva a cabo la regeneración de la solución de DEA al separar de ella los gases ácidos mediante el calor que se desprende de la condensación de los vapores producidos en el rehervidor, al subir la

temperatura de la amina. Esta torre puede ser empacada o de platos. La altura que se recomienda para el lecho empacado es de 32 ft. Para el caso en el que se emplee una torre con platos, el número de unidades de transferencia será de 23 del tipo válvulas. Los primeros tres platos se utilizan para lavar el gas ácido que irá a una planta de azufre, al mismo tiempo que se evitan pérdidas de DEA. La alimentación de la solución de DEA rica se realiza en el plato 4. La extracción de solución hacia el rehervidor se lleva a cabo del último plato (23). La máxima temperatura de operación en el fondo de la torre es de 260°F (21 psig) para evitar problemas de corrosión debidos a la degradación de la amina.

Condensador del Regenerador.

Este equipo proporciona el reflujo necesario para efectuar la regeneración de la solución de DEA. Se recomienda una relación de reflujo en el rango de 2 a 3. La temperatura de condensación normalmente es de 120°- 100°F dependiendo de las condiciones que se requieran en límites de batería para la entrega del gas ácido.

Acumulador de Reflujo del Regenerador.

La función de este equipo es la de separar agua del gas ácido que sale como producto a una planta de azufre o que se envía a quemadores. Cuando el destino del gas ácido es a una planta de azufre se aconseja instalar en el recipiente una malla para evitar corrosión en la tubería, lo que ocasionaría fallas en la misma y probablemente algún accidente al personal. También para ayudar a la separación se instalará una mampara de choque en la entrada de la alimentación.

Rehervidor del Regenerador.

Este equipo proporciona la carga térmica necesaria para llevar a cabo la regeneración de la amina. Esta carga térmica incluye:

- El valor sensible requerido para elevar la temperatura de la solución de amina que se alimenta al regenerador hasta aquella de la solución regenerada que sale del rehervidor.
- El calor de reacción requerido para la disolución de los gases ácidos de la amina.
- El calor de vaporización del agua que deja la sección de agotamiento y que se condensa para retomar a la torre como reflujo.

Tanque de Almacenamiento de DEA.

Este equipo es un tanque atmosférico que tiene como función almacenar la solución de DEA que se va a alimentar a la planta y así mismo la de almacenar la solución de DEA total de la planta cuando ésta se encuentre en mantenimiento.

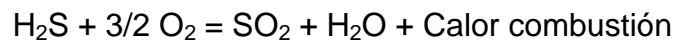
II.2 INCINERADORES EN CAMPO.

La incineración ha sido desarrollada en el transcurso del tiempo como un medio principal de disposición de varios tipos de desechos. Recientemente la aplicación de la incineración para los desechos peligrosos ha tenido una gran importancia. Desde un punto de vista ambiental, la incineración puede ser el mejor método para disponer de ciertos desechos peligrosos. Sin embargo aproximadamente el 60% de los desechos peligrosos puede ser incinerados con éxito.

La incineración es un proceso que usa la descomposición térmica por oxidación para reducir el volumen del desecho, toxico o no toxico. Un desecho debe ser combustible para la incineración, para que sea una disposición aplicable. Existen dos importantes condiciones de operación para una incineración apropiada, las cuales son la temperatura y el tiempo de residencia.

La incineración es la combustión completa de materia orgánica e inorgánica hasta su conversión en cenizas, la cual es usada sobre todo en el tratamiento de residuos sólidos urbanos, industriales peligrosos y hospitalarios, entre otros. Los productos de la combustión son cenizas, gases y partículas tóxicas, así como calor.

Un incinerador de gases ácidos es un equipo que consta de una cámara de combustión, una chimenea, un sistema de regulación de gas y un sistema de monitoreo y control de quemado. El objetivo del equipo es incinerar el H₂S mediante la siguiente reacción de combustión controlada:



Para llevar a cabo la combustión el incinerador requiere aire ya sea a través de una tubería o alimentado en forma natural y gas combustible como apoyo para la combustión y calentamiento de los gases de combustión. El incinerador es uno de los equipos utilizados para la quema de gases residuales, ya que tienen una eficiencia de conversión de H₂S del 99.99%, emitiendo a la atmósfera los gases de combustión como dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y dióxido de azufre (SO₂).

En comparación con un quemador, donde la combustión depende de la composición del gas y de las condiciones ambientales, en un incinerador la combustión se produce en un lugar cerrado que no es afectado por los vientos, evitando el desprendimiento de partículas contaminantes a la atmósfera.

El tipo de incinerador utilizado para disponer de un residuo peligroso tendrá una influencia sobre las continuas emisiones expuestas en el medio ambiente al que está expuesto. Los Incineradores operan a diferentes temperaturas, presiones y niveles de exceso de aire y estos factores afectan las concentraciones relativas de los componentes de los gases.

Aunque una variedad de diseños de incineradores han sido utilizados para eliminar los desechos peligrosos, se describirán algunas tecnologías comerciales usadas por la industria:

- a) Incinerador Térmico.
- b) Incinerador Tipo Regenerativo.
- c) Incinerador Tipo Recuperativo.
- d) Incinerador Catalítico.

II.2.1 TIPOS Y DESCRIPCIÓN.

a) Incinerador térmico.

La incineración u oxidación térmica, es el proceso de oxidar materiales combustibles elevando la temperatura del material por encima de su punto de auto-ignición en la presencia de oxígeno y manteniéndolo a alta temperatura por un tiempo suficiente para completar su combustión a bióxido de carbono y agua. El tiempo, la temperatura, la turbulencia (para mezclado) y la disponibilidad de oxígeno afectan la velocidad y la eficiencia del proceso de combustión (Ver Figura 2.6).

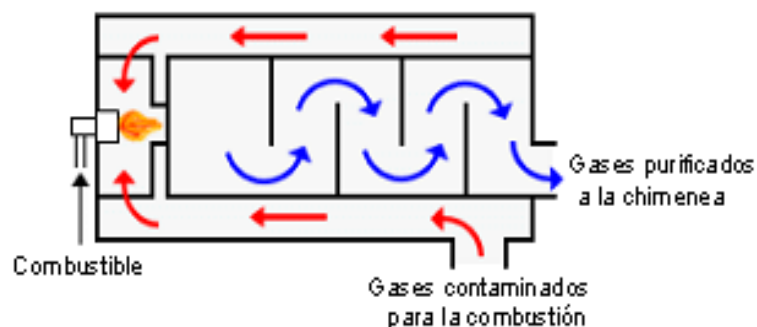


Figura 2.6 Proceso de Combustión de un Incinerador Térmico.

(<http://www.bvsde.paho.org>)

Un incinerador térmico sencillo está compuesto por la cámara de combustión, sin incluir recuperación de calor de los gases de escape. La mayoría de las unidades térmicas están diseñadas para proporcionar no más que un segundo de tiempo de residencia al gas de desecho con temperaturas de 650 a 1100°C (1200 a 2000°F).

Características de la corriente de emisión:

- Flujo de aire: 0.24 - 24 m³/s (500 - 50,000 PCSM).
- Temperatura: 980°C - 1200°C (1800°F - 2200°F).
- Carga de Contaminantes: La concentración de orgánicos en el gas de desecho debe ser menor al límite Explosivo Inferior (25% del LIE).

Límite Inferior de Explosividad (LIE): Se define como la concentración mínima de gas en el aire, por debajo de la cual no existe propagación de la llama al ponerse en contacto con una fuente de ignición. Aunque un gas este en concentración dentro de los límites de explosividad, si no hay punto de ignición o no se alcanzó la temperatura de auto-ignición no habrá inflamación.

b) Incinerador Tipo Regenerativo.

A este tipo de incinerador también se le refiere como un oxidador térmico regenerativo (OTR), el cual utiliza un medio de alta densidad tal como un lecho empacado en cerámica todavía caliente de un ciclo previo para precalentar una corriente de gas de desecho cargada de compuestos orgánicos volátiles (VOC's).

Los gases precalentados y parcialmente oxidados entran a una cámara de combustión en donde son calentados por la combustión de un combustible auxiliar (gas natural) a una temperatura de oxidación final típicamente entre 760°C a 820°C (1400°F a 1500 °F) y mantenidos a esta temperatura para alcanzar una destrucción máxima de los VOC's; sin embargo, se pueden alcanzar temperaturas hasta de 1100°C (2000°F) si fuera necesario, para eficiencias de control muy altas de ciertos VOC's tóxicos. Los gases

purificados y calientes salen de esta cámara y son dirigidos hacia uno o más lechos empacados en cerámica enfriados por un ciclo anterior. El calor proveniente de los gases purificados es absorbido por estos lechos antes de que los gases sean ventilados al ambiente.

El lecho empacado y recalentado empieza entonces un nuevo ciclo calentando una nueva corriente entrante de gas de desecho (Ver Figura 2.7).

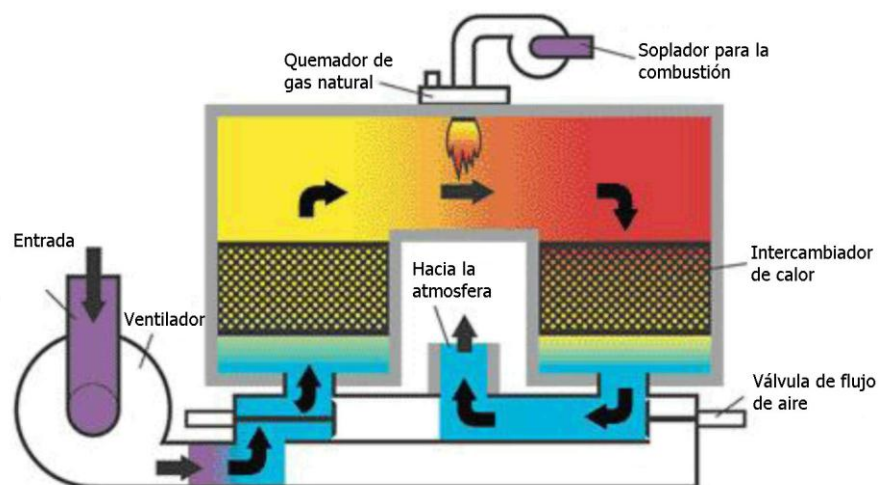


Figura 2.7 Proceso de Combustión de un Incinerador Regenerativo.
(<http://www.marketplacelists.com>)

Para el caso de los incineradores tipo oxidador catalítico regenerativo (OCR) operan de la misma manera que un oxidador térmico regenerativo (OTR); sin embargo, utiliza un material catalítico en vez del material de cerámica en el lecho empacado. Esto permite la destrucción de los VOC's a una temperatura de oxidación más baja. Un oxidador catalítico regenerativo (OCR) utiliza un catalizador de metal en el lecho empacado, permitiendo que la oxidación ocurra a aproximadamente 400°C (800°F).

El requisito de una temperatura más baja reduce la cantidad de gas natural necesario para alimentar el sistema de reducción de los VOC's y el tamaño total del incinerador. Los catalizadores utilizados típicamente para la incineración de VOC's incluyen el platino y el paladio.

Características de la corriente de emisión:

Flujo de aire: Las velocidades típicas del flujo de aire para los incineradores regenerativos son de 2.4 - 240 m³/s (5,000 - 500,000 PCSM).

Temperatura: Un oxidador termal regenerativo (OTR) utiliza gas natural para calentar el gas de desecho entrante típicamente de 760°C a 820°C (1400°F a 1500°F), sin embargo, es capaz de operar hasta los 1100°C (2000°F) para aquellos casos en donde una destrucción máxima es necesaria. Un oxidador catalítico regenerativo (OCR) usa catalizador de metal, el cual permite que la oxidación ocurra a aproximadamente 400°C (800°F).

Carga de Contaminantes: La concentración de orgánicos en el gas de desecho debe ser menor al Límite Inferior de Explosividad (25% del LIE).

Otras Consideraciones:

Hay que evaluar las características de la corriente de entrada en detalle, debido a la sensibilidad de los sistemas oxidador catalítico regenerativo (OCR) a las cargas de entrada de materia y VOC's, las cuales podrían causar la desactivación del catalizador.

c) Incinerador Tipo Recuperativo.

El incinerador recuperativo está compuesto por la cámara de combustión, el precalentador del gas de desecho y, si fuese apropiado, un intercambiador de calor por recuperación de energía secundario (Ver Figura 2.8).

Los dos tipos de intercambiadores de calor utilizados más comúnmente son el de "placa a placa" y el de "armazón y tubo".

La mayoría de estas unidades se diseñan para proporcionar no más que un segundo de tiempo de residencia al gas de desecho con temperaturas típicas de 650 a 1100°C (1200 a 2000°F). Una vez que la unidad es diseñada y construida, el tiempo de residencia no se cambia fácilmente, de manera que

la temperatura de reacción requerida se vuelve una función de la especie gaseosa en particular y del nivel de control deseado.



Figura 2.8 Proceso de Combustión de un Incinerador Recuperativo.
(<http://www.inghor.es>)

Características de la corriente de emisión

Flujo de aire: 0.24 - 24 m³/s (500 - 50,000 PCSM).

Temperatura: La mayoría de los incineradores de desechos son operados de 980°C a 1200°C (1800°F - 2200°F) para asegurar la destrucción casi completa de los compuestos orgánicos en el equipo.

Carga de Contaminantes: La concentración de orgánicos en el gas de desecho debe ser menor al Límite Inferior de Explosividad (25% del LIE).

d) Incinerador Catalítico.

Los incineradores catalíticos operan de una manera muy similar a los incineradores térmicos/recuperativos, con la diferencia principal de que el gas, después de atravesar el área de la flama, pasa a través de un lecho de catalizador. El catalizador tiene el efecto de incrementar la velocidad de la reacción de oxidación, permitiendo la conversión a menores temperaturas de reacción que en las unidades de incineradores termales. Por lo tanto, los

catalizadores también permiten un tamaño menor de incinerador. Los catalizadores utilizados típicamente para la incineración de VOC's incluyen el platino y el paladio.

En un incinerador catalítico, la corriente de gas es introducida a una cámara de mezclado donde también es calentada. El gas de desecho generalmente pasa a través de un intercambiador recuperativo de calor donde es precalentado por un gas de post-combustión. El gas calentado atraviesa enseguida el lecho de catalizador.

El oxígeno y los VOC's emigran hacia la superficie del catalizador por medio de difusión gaseosa y son absorbidos en los sitios activos del catalizador donde enseguida ocurre la oxidación. Los productos de la reacción de oxidación a su vez son desorbidos de los sitios activos por el gas y transferidos de vuelta por difusión hacia la corriente de gas (Ver Figura 2.9). Los incineradores catalíticos de lecho fijo pueden usar un catalizador monolítico o un catalizador de lecho modular:

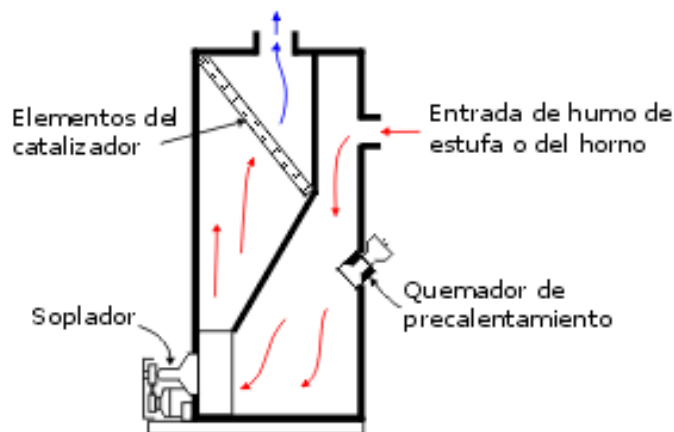


Figura 2.9 Proceso de Combustión de un Incinerador Catalítico.

(<http://www.bvsde.paho.org>)

Características de la corriente de emisión

Flujo de aire: 0.33 - 24 m³/s (700 - 50,000 PCSM).

Temperatura: El gas de desecho es calentado por quemadores auxiliares a aproximadamente 320°C a 430°C (600°F a 800°) antes de entrar al lecho catalítico. La temperatura máxima de escape de diseño del catalizador es típicamente de 540°C a 675°C (1000°F a 1250°F).

Carga de Contaminantes: Los incineradores catalíticos han sido utilizados efectivamente a bajas cargas de entrada; por debajo de 1 parte por millón por volumen (ppmv) o menos.

Tal como con los incineradores termales y recuperativos, por consideraciones de seguridad, la concentración de orgánicos en el gas de desecho debe ser menor al Límite Inferior de Explosividad (25% del LIE).

Otras Consideraciones

Los incineradores catalíticos ofrecen muchas ventajas para la aplicación apropiada. Sin embargo, la selección de un incinerador catalítico debe ser considerada cuidadosamente, ya que la sensibilidad de los incineradores catalíticos a las condiciones del flujo de la corriente de entrada de los COV y la desactivación del catalizador limita su aplicabilidad para varios procesos industriales.

II.2.2 DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN.

A continuación solo se mencionara el diseño de dos de las tecnologías más usadas el incinerador térmico y el incinerador catalítico.

a) Incinerador térmico.

La incineración térmico (ver figura 2.10) es una técnica de control de la contaminación del aire ampliamente utilizado mediante el cual los vapores orgánicos se oxidan a altas temperaturas. La incineración (ambas termal y catalítica), se considera un método de disposición final en el que las corrientes gaseosas contaminantes son convertidas y colectadas.

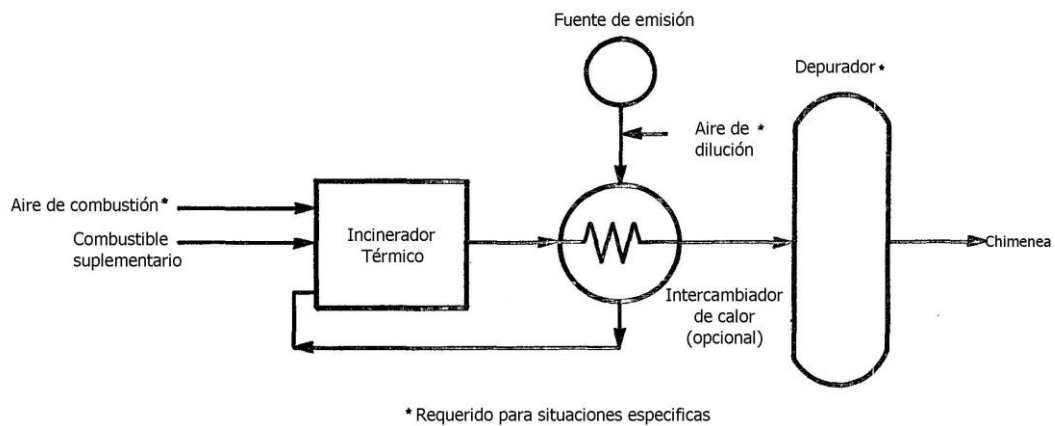


Figura 2.10 Incineración térmico. [1] Control Technologies for Hazardous Air Pollutants.

Una de las principales ventajas de la incineración es que prácticamente cualquier corriente orgánica gaseosa puede ser incinerada de manera segura y limpia, teniendo en cuenta el diseño, la instalación, operación y mantenimiento. Además del alto porcentaje (99%) de eficiencia de destrucción manejan una amplia variedad de flujos de emisión. A continuación se presenta una metodología para estimar rápidamente el diseño del incinerador térmico.

Las variables más importantes a considerar para el diseño de los incineradores son la temperatura de combustión y el tiempo de residencia porque estas variables de diseño determinan la eficiencia de destrucción en el incinerador. Esta eficiencia también asume que hay suficiente oxígeno presente en la cámara de combustión de manera que no se requiera aire. Además, a una temperatura de combustión dada y tiempo de residencia, la eficiencia de destrucción se ve afectada por el grado de turbulencia, o mezclando la corriente de emisión y los gases calientes de la combustión, en el incinerador. Los gases de combustión del incinerador se descargan a altas temperaturas y contienen un valor energético de calor.

Las corrientes de emisión de los incineradores contienen vapores orgánicos con alógenos o componentes de azufre que requieren un control adicional.

Por ejemplo si el azufre y/o el cloro están presentes en la corriente de emisión, el resultado es un gas que contiene dióxido de azufre (SO₂) y/o cloruro de hidrógeno (HCl). Dependiendo del grado de concentración de estos componentes presentes en la corriente de gas y las regulaciones aplicables, se requiere depurar para reducir la concentración de estos componentes.

Los datos necesarios para realizar un cálculo de la corriente de la emisión:

- Flujo máximo.
- Temperatura.
- Contenido calórico.
- Contenido de oxígeno.
- Presencia de compuestos orgánicos halogenados.

Pre tratamiento de la corriente de emisión requerimientos de aire de dilución.

Si la corriente de emisión contiene oxígeno/aire y vapores inflamables, la concentración de los vapores inflamables está limitada generalmente a menos del 25% del límite inferior de explosividad (LIE), para satisfacer los requisitos de seguridad impuestos por las compañías de seguros. El límite inferior de explosividad (LIE) para un vapor inflamable se define como la concentración mínima de gas en el aire, por debajo de la cual no existe propagación de la llama al ponerse en contacto con una fuente de ignición. Aunque un gas este en concentración dentro de los límites de explosividad, si no hay punto de ignición o no se alcanzó la temperatura de auto-ignición no habrá inflamación.

En general las emisiones de las corrientes a tratar en un incinerador termal son mezclas diluidas de compuestos orgánicos volátiles y aire y por lo general no requieren más dilución. Para emisiones de corrientes con concentraciones de oxígeno menores a 20% y contenido calórico grande de 176 BTU/lb o 13 BTU/scf (en la mayoría de los casos correspondientes a la concentraciones

flamables del vapor de aproximadamente 25% del límite inferior de explosividad (LIE). La siguiente ecuación se puede utilizar para obtener un valor para el aire de dilución Q_d :

$$Q_d = [(h_0 / h_d - 1)] Q_0 \dots\dots Ec. 2.1$$

Donde:

Q_0 = Flujo máximo, SCFM.

Q_d = Requerimiento de aire de dilución, SCFM.

h_0 = Contenido calorífico de la corriente de emisión, BTU/SCF.

h_d = Contenido de calor deseado de la corriente de emisión.

Variables de diseño, eficiencia de destrucción.

Las siguientes tablas 2.2 y 2.3 contienen valores de la temperatura de combustión y tiempo de residencia para los incineradores térmicos para lograr una eficiencia de destrucción determinada.

CORRIENTE NO HALOGENADA.		
Eficiencia de destrucción requerida (%)	Temperatura de combustión T_0 (°F)	Tiempo de residencia t_r (seg)
98	1,600	0.75
99	1,800	0.75

Tabla 2.2 Variables de diseño del incinerador térmico [1] Control Technologies for Hazardous Air Pollutants.

CORRIENTE HALOGENADA.		
Eficiencia de destrucción requerida (%)	Temperatura de combustión $T_0(^{\circ}F)$	Tiempo de residencia t_r (seg)
98	2,000	1.0
99	2,200	1.0

Tabla 2.3 Variables de diseño del incinerador térmico [1] Control Technologies for Hazardous Air Pollutants.

Se muestran dos conjuntos de valores en las tablas, un conjunto para los flujos de emisión no halogenados y otro conjunto para los flujos de emisión halogenados. La temperatura de combustión y los valores del tiempo de residencia mencionados, asumen una mezcla adecuada de gases en el incinerador y una mezcla adecuada de oxígeno en la cámara de combustión. Los criterios establecidos en estas tablas 2.2 y 2.3 no son las únicas condiciones para lograr las eficiencias de destrucción especificadas.

Para una eficiencia de destrucción dada, las corrientes de emisión pueden ser incineradas a temperaturas más bajas con tiempos de residencia más largos. Sin embargo los valores reflejados en las tablas 2.2 y 2.3 reflejan temperaturas y tiempos de residencia encontrados en aplicaciones industriales, basados en una eficiencia de destrucción requerida.

Puesto que el rendimiento de un incinerador térmico está altamente relacionado con la cámara de combustión y la temperatura de salida del gas, debe estar equipado con un sistema de seguimiento continuo de la temperatura.

La mayoría de los vendedores rutinariamente equipa los incineradores térmicos con tal sistema. Sin embargo, algunas unidades pueden no tener un

sistema de vigilancia continua de la temperatura. En este caso, el revisor debe solicitar una retroalimentación del sistema. Para obtener una indicación del volumen de la cámara de combustión correspondiente a un tiempo de residencia dado.

La correcta mezcla de las corrientes de gas es esencial para su correcto funcionamiento. Desafortunadamente, la mezcla no puede medirse y cuantificarse como una variable de diseño. Típicamente, la mezcla se mejora y se ajusta en un incinerador después de la puesta en marcha. En última instancia es responsabilidad del usuario para garantizar el correcto funcionamiento y el mantenimiento del incinerador térmico, una vez que se realice la puesta en marcha.

La tabla 2.4 contiene la combustión teórica de la cámara con temperaturas del 99.99% de eficiencia de destrucción para varios componentes con un tiempo de residencia de 1 segundo. Note que las temperaturas teóricas de la tabla 2.4 son considerablemente bajas que las que se muestran en las tablas 2.2 y 2.3.

Esta diferencia de valores es porque en la tabla 2.4 son valores teóricos de componentes específicos. Mientras los valores dados en la tabla 2.3 son valores más generales diseñados para ser aplicables a una variedad de compuestos y son conservativamente altos.

La tabla 2.4 se proporciona para indicar que ciertas aplicaciones específicas pueden no requerir una temperatura tan alta en la cámara de combustión como los que figuran en la Tabla 2.2 y 2.3. Dado que los valores indicados en la tabla 2.4 son teóricos, pueden no ser tan precisos como los valores dados en la tabla 2.2 y 2.3.

Como una cuestión práctica, una temperatura específica para proporcionar una eficiencia de destrucción específica no se puede calcular a priori. Por lo general, los proveedores de incineradores pueden proporcionar guías

generales para la eficiencia de la destrucción basado en una amplia experiencia.

Compuesto	Temperatura de combustión (°F)	Tiempo de residencia (segundos)
Acrilonitrilo	1,344	1
Cloruro de alilo	1,276	1
Benceno	1,350	1
Clorobenceno	1,407	1
1,2-dicloroetano	1.368	1
Cloruro de metilo	1,596	1
Tolueno	1,341	1
Cloruro de vinilo	1,369	1

Tabla 2.3 Combustión teórica y tiempos requeridos para un 99.99% de eficiencia de destrucción. [1] Control Technologies for Hazardous Air Pollutants.

Las tablas 2.2, 2.3 y 2.4 se presentan para mostrar una amplia gama de diferencia entre los valores teóricos y generales. En esencia, estas tablas se utilizan como un sustituto para las ecuaciones de diseño relacionadas con la eficiencia de destrucción de los parámetros de los equipo, ya que las ecuaciones de diseño rara vez se utilizan en el análisis.

La mayoría de los problemas operativos con los incineradores térmicos afectan al quemador. Los problemas típicos encontrados incluyen bajas tasas de quemado, la mala atomización del combustible, flujos de aire/ combustible pobres, suministro de aire inadecuado y extinción de la llama del quemador.

Estos problemas conducen a bajas eficiencias de destrucción de los contaminantes aéreos peligrosos.

Estos problemas incluyen la producción de humo o una disminución de la temperatura de la cámara de combustión. Si un sistema incinerador térmico comienza a mostrar estos síntomas, el operador de la instalación debe tomar medidas inmediatas para corregir cualquier problema de funcionamiento.

Determinación de las variables de operación del incinerador.

➤ **Requerimientos de combustible suplementario:**

El combustible suplementario es añadido al incinerador térmico para alcanzar una combustión deseada (T_0). Para una temperatura de combustión dada la cantidad de calor necesaria para mantener la temperatura de combustión en el incinerador térmico se proporciona por: (a) el calor suministrado por la combustión del combustible suplementario, (b) el calor generado por la combustión de hidrocarburos en la corriente de emisión, (c) el calor sensible contenido en la corriente de emisión a medida que sale de la fuente de emisión, y (d) el calor sensible adquirido por la corriente de emisión a través de intercambio de calor con una corriente caliente gaseosa.

En general, las corrientes de emisión tratadas por incineración térmica son mezclas diluidas de (VOC) y aire, y por lo general no requieren aire de combustión adicional. Utilizando la siguiente ecuación simplificada para los flujos diluidos para el cálculo de los requerimientos de calor adicionales (basados en gas natural):

$$Q_f = \frac{D_0(Q_0) [Cp_{aire} (1.1T_0 - T_{h0} - 0.1T_r) - h_0]}{D_f [h_f - 1.1Cp_{ire} (T_0 - T_r)]} \dots\dots Ec. 2.2$$

Donde:

Q_f = Flujo del gas natural, SCFM.

D_0 = Densidad de la corriente del gas, lb/SCF.

D_f = Densidad del gas combustible, lb/SCF.

Q_0 = Emisión del flujo de la corriente, SCFM.

$C_{p_{aire}}$ = Significa la capacidad de calor de aire entre T_0 y T_r , BTU/lb-°F.

T_0 = Temperatura de combustión °F.

T_{h0} = Emisión de la temperatura de la corriente después de la recuperación de calor, °F.

T_r = Temperatura de referencia, 77°F.

h_0 = Contenido de calor del gas, BTU/lb.

h_f = Valor bajo de calentamiento del gas natural, Btu/lb.

Se calcula el valor de T_{h0} utilizando la siguiente expresión si el valor para T_{h0} no se especifica:

$$T_{h0} = (HR/100)T_0 + [1 - (HR/100)]T_0 \dots\dots Ec. 2.3$$

Donde:

HR = recuperación de calor en el intercambiador, %.

T_0 = temperatura de la corriente de emisión, °F.

Se asume un valor del 70 por ciento de HR si no se dispone de información acerca de este valor. El factor de 1.1 en la ecuación 2.1 es para tomar en cuenta una pérdida estimada de calor del 10 por ciento en el incinerador.

Los requerimientos de calor suplementario se basan en la tasa de flujo de la corriente máxima de emisión, y por lo tanto dará lugar a un diseño conservador.

Flujo de gas.

El gas de combustión se genera como resultado de la combustión del combustible suplementario y la corriente de emisión. Se Utiliza la siguiente ecuación para calcular el flujo de gas de combustión:

$$Q_{fg} = Q_0 + Q_f + Q_d \dots\dots Ec. 2.4$$

Donde:

Q_{fg} = flujo de gas, SCFM.

Q_0 = flujo de la corriente de emisión, SCFM.

Q_f = flujo del gas natural, SCFM.

Q_d = requerimientos de aire de dilución, SCFM.

Volumen de la cámara de combustión.

Para obtener una indicación del tiempo de residencia, el volumen de la cámara de combustión (V_0) debe calcularse. Primero la emisión del flujo de la corriente a condiciones actuales debe ser calculada con la siguiente ecuación.

$$Q_{fga} = Q_{fg} \left[\frac{(T_0 + 460)}{537} \right] \dots\dots Ec. 2.5$$

Donde:

Q_{fga} = flujo actual del gas, ACFM.

Q_{fg} = flujo de gas, SCFM (de la ecuación 2.3).

El volumen de la cámara de combustión V_0 es determinada por medio del tiempo de residencia t_r , los valores de la tabla 2.2 y 2.3 y el valor de q_{fga} que se obtiene.

$$V_0 = \left[\left(Q_{fga} / 60 \right) t_r \right] * 1.05 \dots \dots \text{Ec.2.6}$$

El factor de 1.05 se usa para tomar en cuenta las fluctuaciones en el flujo como lo practican en la industria.

b) Incinerador catalítico.

El incinerador catalítico figura 2.11 es una técnica por la cual una corriente de emisión que contenga compuestos orgánicos volátiles sean oxidados con la ayuda de un catalizador. Un catalizador es una sustancia que acelera una reacción a una temperatura dada sin ser apreciablemente cambiada durante la reacción. Los típicos catalizadores usados para la incineración de los compuestos orgánicos volátiles incluyen al platino y paladio, otras formulaciones también se utilizan, incluyendo óxidos metálicos para corrientes de emisión que contengan componentes clorados. La cama del catalizador (o matriz) en el incinerador es generalmente una malla-tapete, panel de cerámica, u otras estructuras cerámicas de la matriz estructurada para maximizar el área de superficie del catalizador. Los catalizadores también pueden estar en forma de esferas o gránulos. Antes de pasar a través de la cama catalizadora, la corriente de emisión es precalentada, si es necesario, en un precalentador de gas natural y/o por medio de intercambio de calor con el gas de combustión.

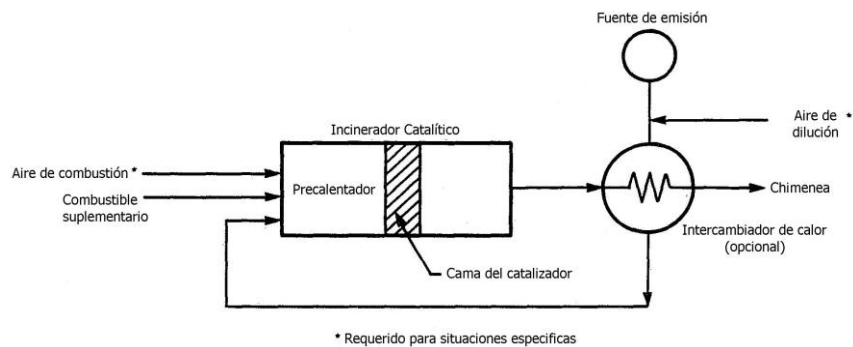


Figura 2.11 Diagrama esquemático de un incinerador catalítico. [1] Control Technologies for Hazardous Air Pollutants.

Los recientes avances en catalizadores han ampliado la aplicabilidad de la incineración catalítica. Los catalizadores que ahora existen son relativamente tolerantes a compuestos que contienen azufre o cloro. Estos nuevos catalizadores son a menudo óxidos metálicos simples o mixtos y son soportados mecánicamente por un transportador mecánicamente fuerte. Una cantidad significativa de esfuerzo se ha dirigido hacia la oxidación de compuestos orgánicos volátiles que contienen cloro. Estos compuestos se usan ampliamente como disolventes y desengrasantes, y con frecuencia se encuentran en las corrientes de emisión. Catalizadores tales como el cromo/alúmina, óxido de cobalto, y óxido de cobre/manganeso se han demostrado para controlar las corrientes de emisión que contienen compuestos clorados. Catalizadores a base de platino se emplean a menudo para el control de compuestos orgánicos volátiles que contienen azufre, pero son sensibles al envenenamiento por cloro.

A pesar de los avances en los catalizadores, algunos compuestos simplemente no se prestan bien a la oxidación catalítica estos incluyen a compuestos que contienen átomos de arsénico y fósforo. A menos que la concentración de tales compuestos sea suficientemente baja, o se haga uso de un sistema de eliminación corriente arriba, la oxidación catalítica no debe ser considerada en estos casos.

El funcionamiento de un incinerador catalítico es afectado por los siguientes factores: (a) temperatura de operación, (b) velocidad espacial (recíproco al tiempo de residencia), (c) composición y concentración de los compuestos orgánicos volátiles, (d) propiedades del catalizador, (e) presencia de venenos/inhibidores en la corriente de emisión. En el diseño del incinerador catalítico, las variables importantes son la temperatura de operación en la entrada de la cama del catalizador, la temperatura aumenta a través de la cama del catalizador, y la velocidad espacial suponiendo que hay suficiente oxígeno. La temperatura de operación para una eficiencia de destrucción en

particular depende de la concentración y composición de los compuestos orgánicos volátiles en la corriente de emisión y el tipo de catalizador utilizado.

La velocidad espacial se define como el flujo volumétrico de las corrientes combinadas de gas (por ejemplo corriente de emisión + combustible suplementario + aire de combustión) la cama del catalizador está dividida por el volumen de la cama. Así como la velocidad espacial también depende del tipo de catalizador usado. A una velocidad espacial dada, incrementa la temperatura de operación a la entrada de la cama del catalizador incrementando la eficiencia de destrucción. Los incineradores catalíticos pueden lograr una eficiencia de destrucción de compuestos aéreos peligrosos de alrededor del 95% con velocidades espaciales en el rango de 30,000–40,000 hr⁻¹, usando metales preciosos como catalizadores o 10,000-15,000 hr⁻¹, usando metales como catalizadores.

El funcionamiento de los incineradores catalíticos es sensible a las características de contaminantes y condiciones de proceso (por ejemplo fluctuaciones de flujo). Después de la oxidación de la corriente de emisión, la energía en los gases de combustión que salen de la cama del catalizador se puede recuperar de varias maneras, incluyendo: (a) el uso de un intercambiador de calor recuperativo para precalentar la corriente de emisión y/o aire de combustión, o (b) mediante el uso de la energía disponible para los requisitos de calor de proceso (por ejemplo, el reciclaje de los gases de combustión para el proceso, producción agua caliente o vapor, etc). En el intercambio de calor recuperativo, sólo un precalentamiento limitado es posible debido a la elevación de la temperatura a través de la cama del catalizador, como resultado de la combustión de los compuestos orgánicos volátiles en la corriente de emisión. Altas temperaturas de precalentamiento acompañadas por un incremento de temperatura a través de la cama del catalizador conducir altas temperaturas en la cama del catalizador, causando un sobrecalentamiento en la cama del catalizador y eventualmente pierde su actividad.

Los datos necesarios para realizar un cálculo de la corriente de la emisión:

- Flujo máximo, SCFM.
- Temperatura, °F.
- Contenido calorífico, BTU/lb o BTU/SCF.
- contenido de oxígeno, %.

Pre tratamiento de la corriente de emisión:

- Requerimientos de aire de dilución.

En general, la aplicación de un incinerador catalítico es empleada para la dilución de corrientes de emisión. Si la corriente de emisión con una alta concentración de contaminantes orgánicos volátiles, son tratadas por el incinerador catalítico que pueden generar suficiente calor tras la combustión para desactivar el catalizador. Por lo tanto, es necesario reducir la concentración de los compuestos orgánicos volátiles diluyendo la corriente de emisión con el aire. Estos valores de corte se suelen tomar de una publicación de la EPA.

Típicamente la concentración de los vapores inflamables en las corrientes de emisión contienen aire que se limitan a menos del 25% del límite inferior de explosividad (LIE) correspondiendo a un valor calorífico de 176 BTU/lb/ o 13 BTU/SCF por requerimientos de seguridad. Para corrientes de emisión que sean mezclas o gases inertes y componentes orgánicos volátiles, se sume que la aplicación de un incinerador catalítico es aplicable si el contenido de calor de la corriente de emisión es menor o igual a 15 BTU/SCF.

De lo contrario el aire de dilución será requerido para reducir el contenido de calor a niveles por debajo de estos valores de corte. Por ejemplo 10 y 15 BTU/SCF). Para corrientes de emisión que no puedan ser caracterizadas como aire + compuestos orgánicos volátiles o inertes + mezclas de compuestos orgánicos volátiles se aplica el valor más conservativo de corte de 10 BTU/SCF para determinar los requerimientos de aire de dilución.

Los requerimientos de dilución pueden ser calculados con la siguiente ecuación:

$$Q_d = [(h_0 / h_d) - 1] Q_0 \dots\dots Ec. 2.7$$

Donde:

Q_d = Requerimientos de aire de dilución, SCFM

h_0 = Contenido calorífico de la corriente de emisión, BTU/SCF.

h_d = Contenido calorífico deseado de la corriente de emisión, BTU/SCF.

Tomando en cuenta que el aire de dilución cambiara los parámetros de la corriente de emisión.

Variables de diseño, eficiencia de destrucción.

La tabla 2.5 presenta los valores y límites de las variables de diseño de un sistema de incinerador catalítico para lograr una eficiencia de destrucción del 95% sugerido. La mayoría de los incineradores catalíticos que actualmente se venden están diseñados para lograr una eficiencia del 95 %.

Eficiencia de destrucción requerida (%)	Temperatura en el catalizador entrada de la cama T_{ci} (°F)	Temperatura en el catalizador salida de la cama T_{co} (°F)	Velocidad espacial (hr^{-1})	
			Metal	Metal precioso
95	600	1,000-1,200	Metal	Metal precioso
98-99	600	1,000-1,200	10,000-15,000	30,000-40,000

Tabla 2.5 Variables de diseño para un incinerador catalítico. [1] Control Technologies for Hazardous Air Pollutants.

En casos seleccionados, los incineradores catalíticos pueden alcanzar eficiencias del orden de 98 a 99 %, pero las pautas generales para velocidades espaciales en estas eficiencias no se pueden encontrar. Para aplicaciones específicas, otras temperaturas y velocidades espaciales pueden ser apropiadas dependiendo del tipo de catalizador empleado y las características de la corriente de emisión (es decir, composición y concentración).

Por ejemplo, la temperatura del gas de combustión que sale de la cama del catalizador puede ser menor que 1,000 °F para los flujos de emisión que contienen compuestos fácilmente oxidables y aun así lograr la eficiencia de la destrucción deseada.

La eficiencia de destrucción para un compuesto dado puede variar dependiendo de los compuestos orgánicos volátiles en la corriente de emisión, o es parte de una mezcla de compuestos orgánicos volátiles. La eficiencia de destrucción para un compuesto dado en diferencia de las mezclas de los compuestos orgánicos volátiles puede variar con respecto a la composición de la mezcla.

El funcionamiento de un incinerador catalítico depende en gran medida de la temperatura y la presión diferencial a través de la cama del catalizador suponiendo una temperatura de operación correcta en la entrada de la cama del catalizador. La diferencial de temperatura o un aumento a través de la cama del catalizador es el índice de referencia fundamental para un sistema de incineración catalítica, ya que indica directamente la oxidación de compuestos orgánicos volátiles. La diferencia de presión a través de la cama del catalizador sirve como una indicación del volumen presente en el catalizador. La caída de presión disminuye con el tiempo.

Para asegurar el funcionamiento adecuado del sistema, se recomienda que tanto el aumento de temperatura sobre la cama del catalizador y la caída de presión a través de la cama del catalizador sean controlados continuamente.

Actualmente la mayoría de vendedores incluyen un monitoreo continuo de estos parámetros como parte de un paquete.

Determinación de las variables de operación del incinerador.

Requerimientos de combustible suplementario.

El combustible suplementario se añade al sistema de incineración catalítica para proporcionar el calor necesario para llevar la corriente de emisión hasta la temperatura de oxidación catalítica necesaria (T_{co}) para un nivel deseado de eficiencia de destrucción. Para una T_{co} dada, la cantidad de calor adicional que se necesita es proporcionada por: (a) el calor suministrado por la combustión del combustible suplementario, (b) el calor sensible contenido en la corriente de emisión, ya que entra en el sistema de incinerador catalítico, y (c) el calor sensible ganado por la corriente de emisión a través de intercambiado de calor con el calor de combustión del flujo de gas.

Dado que los flujos de emisión tratados por la incineración catalítica son mezclas diluidas de compuestos orgánicos volátiles y aire, por lo general no requieren de aire de combustión adicional. Antes de realizar cálculos los requisitos de calor suplementarios, la temperatura del gas de combustión que sale de la cama del catalizador (T_{co}) debe ser estimado para asegurar que una velocidad de reacción global adecuada se puede lograr para dar la eficiencia de destrucción deseada sin dañar los catalizadores. En otras palabras T_{co} cae en un intervalo de 1,000 °F- 1,200 °F para asegurar una eficiencia de destrucción alta sin dañar el catalizador. La siguiente ecuación es utilizada para calcular T_{co} esta ecuación asume 50 °F de incremento de temperatura para 1 BTU/SCF de contenido calorífico:

$$T_{co} = T_{ci} + 50h_0 \dots\dots Ec. 2.8$$

Donde:

h_0 = contenido calorífico de la corriente de emisión, BTU/SCF.

En esta expresión, se asume el contenido calorífico de la corriente de emisión, y la combinación de la corriente de gas.

Para determinar T_{co} que se encuentra en el rango de 1,000 °F-1,200 °F. Si esto es verdadero entonces el valor inicial de T_{ci} es satisfactorio. Si T_{co} es menor que 1000 °F se debe de usar la siguiente ecuación para determinar el apropiado valor para T_{ci} (por encima de 600 °F) y se debe usar el nuevo valor de T_{ci} en los cálculos.

$$T_{ci} = 1 - 50h_0 \dots\dots Ec. 2.9$$

El valor de T_{ci} obtenido de la ecuación 2.9 es usado en la ecuación 2.10.

Para los incineradores catalíticos, se asume un 50% de eficiencia en el intercambiador de calor, mientras que para la incineración térmica se asume un 70% de eficiencia en el intercambiador. Para calcular los requerimientos de calor suplementario (basados en el gas natural como combustible), se utiliza la siguiente ecuación simplificada para la dilución de corrientes de emisión que no requieren de aire para la combustión adicional:

$$Q_f = \frac{D_0 Q_0 [Cp_{aire} (1.1T_{ci} - T_{h0} - 0.1T_r)]}{D_f [h_f - (1.1Cp_{aire} (T_{ci} - T_r))]} \dots\dots Ec. 2.10$$

Donde:

Q_f = flujo del gas combustible, SCFM.

D_0 = densidad de la corriente de emisión, lb/ft³ (típicamente 0.0739 lb/ft³).

D_f = densidad del gas combustible (0.0408 lb/ft³).

Q_0 = flujo de la corriente de emisión, SCFM.

Cp_{aire} = calor específico medio del aire en un intervalo de temperatura dado, BTU/lb-°F.

T_{ci} = temperatura combinada de la corriente de gas entrando a la cama del catalizador, °F.

T_r = temperatura de referencia, 77 °F.

T_{h0} = temperatura de la corriente de emisión después del recuperador de calor, °F.

h_f = valor bajo de calentamiento del gas natural, BTU/lb.

Note que para el caso de no contar con un recuperador de calor $T_{h0} = T_0$. El factor 1.1 se estima para una pérdida de calor del 10 por ciento en el incinerador. Los requerimientos de calor suplementario están basados en la emisión de un flujo máximo y por lo tanto dará lugar a un diseño conservador.

En contraste con la incineración térmica, no hay ningún requisito de calor suplementario especificado para la incineración catalítica ya que no se necesita combustible para la estabilización de la llama. Dependiendo de la concentración de los contaminantes aéreos peligrosos, la temperatura de la corriente de emisión, y el nivel de recuperación de calor, los requisitos de calor suplementario pueden ser cero cuando se emplea la recuperación de calor.

El cálculo de T_{h0} se determina de la siguiente ecuación si el valor para T_{h0} no se especifica.

$$T_{h0} = (HR/100)T_{co} + [1 - (HR/100)]T_0 \dots\dots Ec. 2.11$$

Flujo combinado de la corriente de gas entrando a la cama del catalizador.

Para calcular la cantidad requerida de catalizador, el flujo combinado de la corriente de gas (corriente de emisión + productos de la combustión de combustible suplementarios) a la entrada de la cama del catalizador tiene que ser determinado. Usando la siguiente ecuación:

$$Q_{com} = Q_0 + Q_r + Q_d \dots\dots Ec. 2.12$$

Donde:

Q_{com} = flujo de la corriente combinada de gas, SCFM.

Q_0 = flujo de la corriente de emisión, SCFM.

Q_r = flujo del gas natural, SCFM.

Q_d = requerimientos de aire de dilución, SCFM.

Flujo del gas dejando la cama del catalizador.

Con el fin de determinar los costos para los incineradores, se debe determinar la tasa de flujo de gas de combustión que sale de la cama del catalizador. Supongamos que la velocidad de flujo de la corriente de gas combinada que entra en la cama del catalizador es aproximadamente igual a la velocidad de flujo del gas de combustión que sale de la cama del catalizador en condiciones estándar.

El cambio de volumen a través de la cama del catalizador debido a la combustión de los contaminantes aéreos peligrosos en la corriente de gas mixta es pequeña, especialmente cuando se tratan corrientes de emisión diluidas. Por lo tanto: $Q_{fg} = Q_{com}$

Donde:

Q_{fg} = flujo del gas dejando la cama del catalizador, SCFM.

Cuando se calculan los costos, se asume que el incinerador catalítico está diseñado para un mínimo Q_{fg} de 2,000 SCFM. Por lo tanto si Q_{fg} es menor que 2,000 SCFM, Q_{fg} se define como 2,000 SCFM.

En algunos casos, los costos de operación se basan en la tasa de flujo de gas de combustión en condiciones actuales. Sin embargo, si es necesario la siguiente ecuación se puede usar para convertir de SCFM a ACFM:

$$Q_{fga} = Q_{fg} \left[\frac{(T_{co} + 460)}{537} \right] \dots\dots Ec. 2.13$$

Donde:

Q_{fga} = flujo de gas a condiciones actuales (ACFM).

Requerimientos para el catalizador de la cama.

El volumen total del catalizador requerido para una eficiencia de destrucción dada se determina a partir de la velocidad espacial de diseño de la siguiente ecuación:

$$V_{bed} = 60 Q_{com} / SV \dots\dots Ec. 2.14$$

Donde:

V_{bed} = volumen requerido del catalizador de la cama, ft³.

II.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

a) Incinerador térmico.

Ventajas:

- Tiene una eficiencia de hasta el 99.9999%. Los incineradores térmicos son la mejor selección cuando se necesitan altas eficiencias y el gas de desecho está por encima del 20% del límite inferior de explosividad (LIE).

Desventajas:

- Los costos de operación del incinerador térmico es relativamente alto debido a los costos del combustible suplementario.

- Los incineradores térmicos no están bien indicados para corrientes con flujo altamente variable debido al tiempo reducido de residencia y al mezclado deficiente durante condiciones de flujo incrementado, los cuales disminuyen por completo la combustión. Esto causa que la temperatura de la cámara de combustión descienda, y de este modo disminuya la eficiencia de destrucción (Ref. EPA, 1991).
- Los incineradores, en general, no son recomendables para controlar gases que contengan compuestos que contienen halógeno o azufre debido a la formación de gases altamente corrosivos. En tales casos, pudiera ser necesario instalar un sistema de tratamiento de gases ácidos de post-oxidación, dependiendo de la concentración en la salida (Ref. EPA, 1996a).

b) Incinerador catalítico.

Ventajas.

- Menores requisitos de combustible.
- Menores temperaturas de operación.
- Pocos o ningún requisito de aislamiento.
- Peligros de incendio reducidos.
- Problemas reducidos de retroceso (flashback).
- Menor volumen / tamaño requerido.

Desventajas.

- Costo inicial alto.
- Es posible el envenenamiento del catalizador.

- El catalizador usado que no pueda ser regenerado pudiera necesitar ser desechado.

II.3 QUEMADORES ELEVADOS.

Es frecuente encontrar en la literatura técnica el término de "flare", el cual se asocia directamente a un quemador de campo. Un "flare", es un quemador de campo especialmente diseñado para quemar en forma segura gases de desecho durante una operación normal o de emergencia, originados en refinerías, plantas químicas, terminales de almacenamiento, tuberías y servicios de producción, incluyendo instalaciones costa fuera. Los quemadores de campo se pueden clasificar en; quemadores elevados, quemadores encerrados. Algunas de las consideraciones principales de seguridad en el diseño de un quemador de campo son; propiedades el fluido y masa a relevar, emisión de humo, estabilidad de flama, arrastre de líquidos, radiación térmica, riesgo de explosión, nivel de ruido, partes mecánicas movibles, espacio para su instalación, costos de instalación y operación, etc. El hecho de que los quemadores sean elevados reside principalmente en mantener la flama y el calor generado que la misma irradia lo suficientemente alejado de los equipos de proceso y zonas de operación, de tal manera que no resulten dañados la infraestructura y el personal operativo, además de que los gases contienen en la mayoría de los casos sustancias tóxicas que se tienen que dispersar. Un quemador elevado consiste de una chimenea, la cual puede ser guiada con una estructura soporte o auto soportado, con una boquilla de quemado, quemadores pilotos, con un sistema de gas combustible asociado, un ignitor y dispositivos auxiliares. Los sistemas de quemado son usados comúnmente para disponer gases y vapores por combustión en una atmosfera abierta. El objetivo del quemado es convertir, a través de la oxidación, de los combustibles en la corriente del gas para ser oxidados de una manera segura. En el caso de los hidrocarburos, los productos más deseables son el dióxido de carbono y el vapor de agua. Un buen diseño debe tener en cuenta las cuestiones de seguridad, así como las emisiones de otros contaminantes de humo, incluido el ruido, la radiación y el

olor. El quemado de una manera segura también es una preocupación para la industria pública y los gobiernos. Un sistema de quemado básicamente forma parte de un sistema de relevo de seguridad, pero si está bien diseñado, puede funcionar como sistemas de control de emisiones con altas eficiencias de combustión.

II.3.1 Tipos y descripción.

Los quemadores pueden ser agrupados bajo las siguientes categorías.

a) vertical.

Los quemadores verticales generalmente están orientados para el fuego en ascenso o hacia arriba. El punto de descarga es en una posición relativamente elevada con respecto a los alrededores y/o equipos cercanos. Existen muchos tipos de soporte para los quemadores verticales los cuales son:

Auto - soportado.

En la figura 2.12 se muestra un diseño mecánico y estructural de un quemador auto soportado.

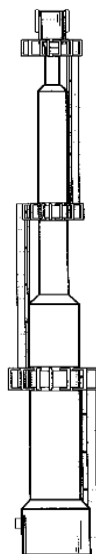


Figura 2.12 Quemador auto soportado. [20] API standard 537 first edition.

Guiado.

Un quemador elevado con el apoyo de cables. Los cables están unidos a la estructura del quemador, para limitar la deflexión de la estructura. Los cables (guy-wires) son típicamente posicionados en un plan triangular para proporcionar un soporte fuerte, ver figura 2.13.

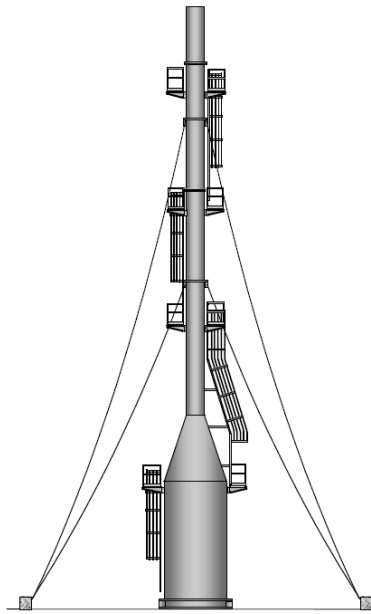


Figura 2.13 quemador guiado. [20] API standard 537 first edition.

Soporte “derrick”.

Estructura de acero que soporta uno o más quemadores elevados.

- 1) Derrick fijo. El quemador está permanentemente soportado por la estructura. la unta puede ser mantenida por una grúa. el quemador debe estar fuera de servicio cuando se retira la punta ver figura 2.14.
- 2) Derrick desmontable (múltiples secciones elevadas).

El quemador está montado a una estructura ascendente, para permitir un grado de servicio. Este grado permite un nivel de acceso hacia el quemador. Muchos Derrick desmontables son diseñados para soportar

múltiples quemadores elevados. El Derrick puede ser diseñado de manera que todos los quemadores, excepto el que está siendo mantenido, puede ser operado durante el mantenimiento.

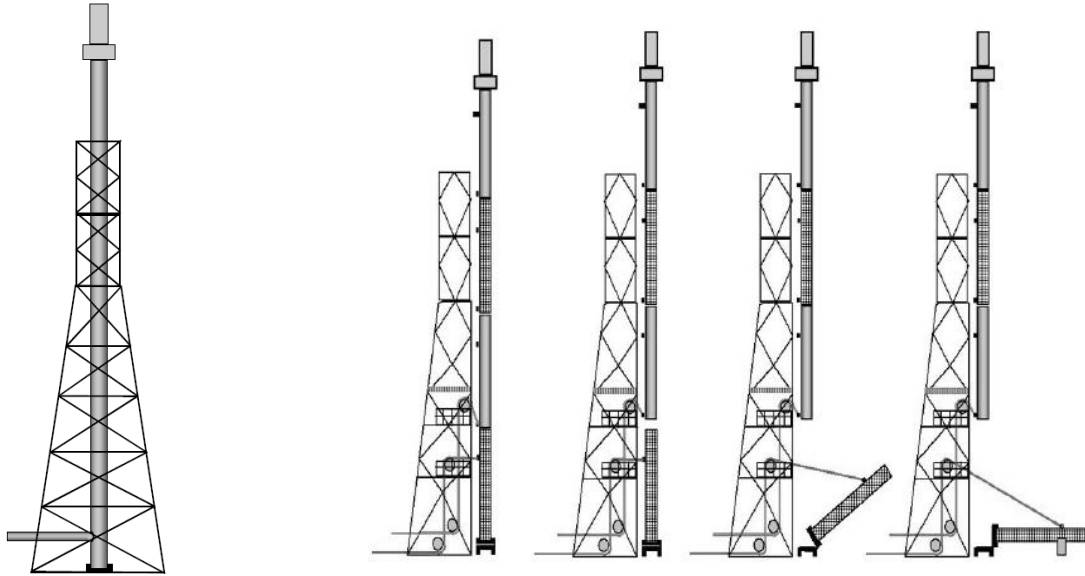


Figura 2.14a Derrick fijo. [20] Figura 2.14b Derrick múltiple desmontable. [20] API standard 537 first edition.

La figura 2.14a ilustra un Derrick con una sección simple desmontable en una posición normal de operación. Con secciones superiores levantadas ligeramente en el inicio de la operación de descenso ver figura 2.14b, durante el proceso de reducción de la sección inferior ver figura 2.14c y con la sección inferior completamente bajada ver figura 2.14d.

3) Derrick desmontable (sección simple elevada).

Un Derrick con un simple cable (riser), utilizando un sistema guía el cual permite que el quemador se eleve. La figura 2.15 ilustra un Derrick con una sección simple desmontable en una posición normal de operación (A), durante el proceso de descenso (B), y completamente bajado para permitir un nivel de acceso hacia el quemador (C).

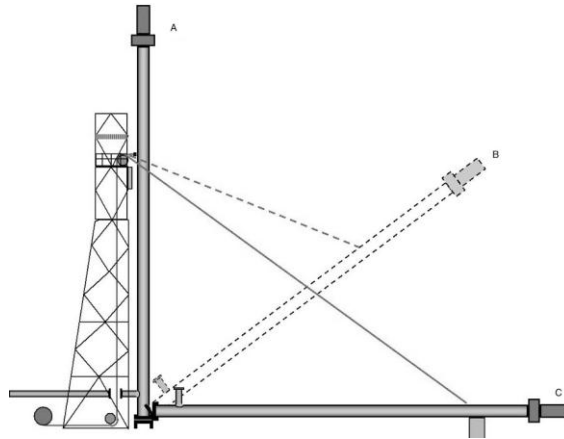


Figura 2.15 Derrick desmontable (sección simple elevada). [20] API standard 537 first edition.

b) Quemadores horizontales.

Los líquidos y gases a quemar son transportados mediante una tubería hacia el quemador horizontal, que descargan en un pozo de excavación ver figura 2.16.

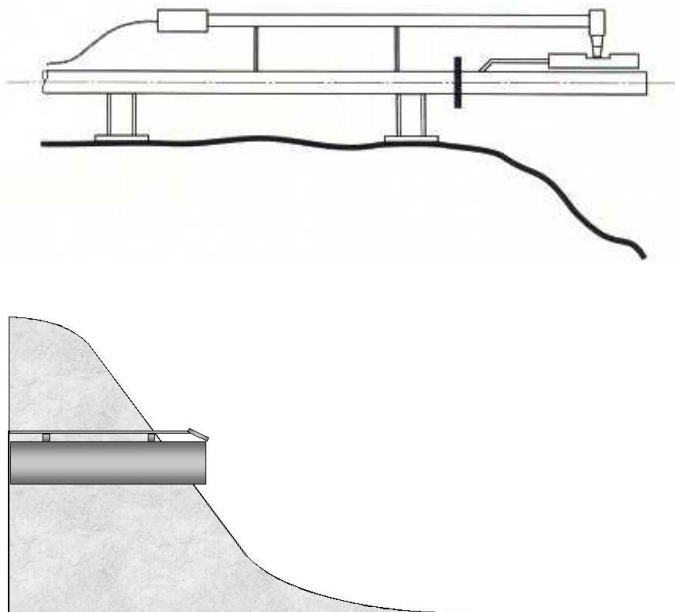


Figura 2.16 Quemadores horizontales. [20] API standard 537 first edition.

c) Quemadores enclaustrados.

Los quemadores enclaustrados son construidos para ocultar la flama a vista directa. Pueden reducir el ruido y minimizar la radiación.

A diferencia de un incinerador una amplia cobertura es inherente a estos sistemas. El flujo normal permite la facilidad para la puesta en marcha, apagado, y operar sobre una base diaria sin exposición a la flama del quemador.

A veces múltiples etapas son usadas en el quemador enclaustrado, la figura 2.17 ilustra un quemador enclaustrado.

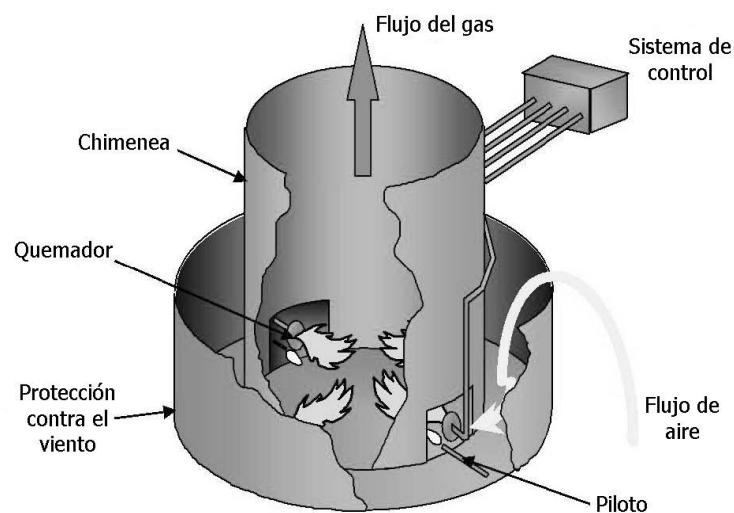


Figura 2.17 Quemador enclaustrado. [20] API standard 537 first edition.

II.3.2 DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN.

a) Quemadores elevados.

Los componentes principales y opcionales para un quemador elevado son:

- Quemador (flare burner) con o sin capacidad de supresión de humo.
- Pilotos.

- Pilotos de ignición.
- Detectores de flama a pilotos (opcional).
- Flotabilidad o velocidad de sello (opcional).
- Estructura de soporte.
- Tanque “Knock-out drum” (opcional).
- Arrestador de flama/detonación (opcional).
- Sello líquido (opcional).
- Tubería.
- Sistema de control para la supresión de humo (opcional).
- Sopladores (opcional).
- Flujo, composición, contenido de calor o video monitoreo (opcional).
- Escaleras (enjaulado o con sistema de seguridad para escalar) y plataformas (opcional).
- Escudos para la radiación de calor (opcional).
- Escudos para la lluvia (opcional).

El diseño de un quemador debe aproximarse desde un punto de vista sistemático. Cada uno de los criterios de diseño debe ser evaluado por su impacto en otros criterios, los principales criterios de diseño para un sistema de quemado son los siguientes:

- 1) Quema efectiva fiable.

La combustión efectiva es necesaria para reducir emisiones hasta niveles permitidos.

2) Hidráulica del sistema.

La hidráulica del sistema debe ser suficiente para que se distribuya todo el gas de desecho y gas combustible auxiliar. La presión del sistema no puede exceder la presión máxima permisible de trabajo a cualquier causa de relevo, venteo o servicios suministrados.

3) Eliminación de líquidos.

Los líquidos deben ser removidos para prevenir una combustión pobre, gotas de líquido quemándose, y obstrucción del quemador (flare burner).

4) Infiltración de aire.

La infiltración de aire dentro del sistema puede causar daño o lesiones para todo el equipo cercano, estructuras y personal.

5) Supresión de humo.

La supresión de humo puede ser requerida donde las consideraciones ambientales o estéticas lo ordenen.

6) Ruido y luz visible.

El ruido y la luz visible se deben limitar a los niveles permitidos. El diseño del sistema debe considerar a comunidades cercanas al quemador.

Equipos que componen un quemador elevado.

1) Quemador (flare burner).

Su diseño debe proporcionar la descarga segura del flujo máximo de gas relevado a la caída de presión permisible del sistema. El quemador (flare burner) mezcla combustible y aire a velocidades turbulentas y concentraciones requeridas para establecer y mantener una correcta ignición y una combustión estable. El quemador (flare burner) enciende y los vapores descargados en el proceso, para una condición de arranque y emergencia.

Este dispositivo mecánico debe controlar el proceso de combustión de las condiciones específicas de relevo, y debe producir la eficiencia de destrucción/combustión deseada.

2) Quemador sin asistir.

Un quemador sin asistir es usado donde no se requiere la quema sin humo. La ignición de la flama del quemador es producida por los pilotos. Los pilotos se encienden por un sistema de ignición de piloto. El quemador sin asistir puede tener dispositivos mecánicos u otros medios para mantener una flama estable. El encendido de la descarga de gas es inicialmente encendido por la interacción con las flamas de los pilotos. Una vez que el piloto se enciende el quemador estabiliza la flama, el quemador debe mantener la estabilidad de la flama sobre el rango de diseño de operación.

La flama producida por un quemador sin asistir será función de la composición de gas de relevado y la velocidad de salida del gas. A velocidades altas del gas, la energía de descarga del gas jalara el aire de combustión dentro de la flama, y producirá una flama corta que tiene una gran resistencia para la deflexión ocasionada por el viento. A una baja velocidad de salida del gas, el aire será principalmente atraído a la flama por la flotabilidad de los productos de combustión calentados. Una flama flotante es típicamente suave, larga y más afectada por el viento, que una flama que utiliza altas velocidades de salida de gas.

La velocidad baja de salida de gas y la flotabilidad dominando la flama pueden ser empleados para una combustión exitosa de un valor bajo de calentamiento del gas de relevo. La velocidad alta de salida del gas puede ser empleada para el relevo de gases de hidrocarburos de alto valor de calentamiento o gases relevados ricos en hidrogeno.

El ruido de la combustión en el quemador es influenciado por la velocidad de salida del gas. Incrementando la cantidad relevada del gas la velocidad de salida puede producir una mayor turbulencia de combustión y tener niveles de

ruido de combustión altos. El nivel de ruido de combustión es realizado cuando el quemador (flare burner) se le permite operar a una velocidad de salida del gas, donde ocurre una inestable combustión. La combustión inestable es definida como una flama que se ilumina.

La acción del viento a flujos bajos de quemado puede producir quemado interno y/o flamas externas que permanecen unidas en el quemador (flare burner). El quemador (flare burner) debe ser diseñado para resistir los efectos de dicho quemado interno y las flamas externas. Revestimientos refractarios internos se emplean a veces para mitigar los efectos térmicos de un quemado interno. Los revestimientos refractarios reducen el alto gradiente térmico que produce abolladuras en el quemador (flare burner). Las abolladuras en el quemador (flare burner) es la primera señal de casi todas las fallas en el quemador (flare burner).

3) Quemador asistido por vapor.

La estabilización de la flama para para un quemador asistido por vapor es similar al quemador descrito anteriormente. El equipamiento para el vapor asistido no debe interrumpir los mecanismos básicos de estabilización de la flama en el quemador (flare burner) y puede en algunos casos ser hecho para asistir la estabilización de la flama, las velocidades de salida del gas son limitadas para el quemador asistido por vapor (flare tip).

La inyección potencial de vapor diluye los gases de relevo, incluso operándolo con un flujo mínimo de purga, por consiguiente requieren más mezcla de gas combustible para lograr una eficiencia de destrucción deseada. La flama producida por un quemador asistido por vapor es función de la característica de los gases relevados, la velocidad de salida del gas y el diseño de la inyección del vapor.

El quemador asistido por vapor es utilizado para controlar la formación de humo que acompaña a los gases de hidrocarburos relevados. Las funciones de inyección de vapor para producir la combustión sin humo por educación de

aire de combustión, por consiguiente incrementa la turbulencia en la flama del quemador. La adición del aire de combustión y la turbulencia pueden producir una flama característica sin humo donde se produce una flama más corta e intensa. Estas flamas tendrán una gran resistencia para la deflexión ocasionada por el viento y puede reducir fracciones de radiación.

La cantidad requerida de vapor para un quemado sin humo es una función de la composición del gas, el tamaño del quemador y el diseño, el diseño del inyector de vapor y la presión de operación y las condiciones ambientales. Mientras que el vapor asistido mejora la combustión de los gases relevados que producen humo adversamente hará el mismo efecto para la combustión de los gases con alto nivel de inertes.

El relevo de los gases con altos niveles de inertes para un quemador asistido por vapor puede requerir un gran valor calorífico para mantener la estabilidad requerida de la flama y la eficiencia de destrucción de hidrocarburos.

El vapor a menudo es inyectado en la descarga de los gases relevados en la punta del quemador (flare burner). Típicamente, es empleado un anillo de vapor que tiene un número de boquillas de inyección o ranuras. El diseño y la ubicación para las boquillas de inyección varían debido a los diferentes diseños que proporcionan los fabricantes. El consumo de vapor varía ampliamente en función particular del gas que está siendo quemado y los diseños de fabricantes del quemador.

La función de inyección de vapor en la parte superior del quemador es para proporcionar aire y fuerza a la descarga de los gases de relevo en el quemado. El patrón de inyección de vapor también debe mejorar la mezcla de aire y combustible y puede agregarse en el momento de la descarga de los gases de relevo. El vapor y el aire actúan para diluir el contenido de hidrocarburos combustibles contenidos también reduce la tendencia de humo. El vapor de agua también puede participar en la cinética de combustión que ayuda a la conversión del carbono en monóxido de carbono.

Aire comprimido u otros gases a alta presión, incluyendo vapores de hidrocarburo con peso molecular ligero, pueden ser usados en un anillo de vapor, pero el vapor es el medio más efectivo. La adición efectiva del vapor desde una parte superior utilizando un anillo de vapor incrementa la turbulencia en la combustión, el nivel de ruido de combustión incrementara.

También se producirá ruido en las boquillas de vapor. Los quemadores asistidos por vapor pueden tener un incremento significativo en los niveles de ruido en comparación con quemadores que no están asistidos por vapor.

Se debe de poner mucha atención al flujo de vapor que se inyecta, si se agrega muy poco vapor al quemador se producirá una flama ligera y tendera a ser de flexionada por el viento.

Una inyección alta de vapor proporcionara una flama fuerte limpia y no habrá deflexión ocasionada por el viento, la inyección de vapor a altos flujos ocasionara un incremento del nivel de ruido. Si se excede en los flujos de inyección de vapor producirá una inestabilidad en la combustión acompañada de un ruido excesivo de quemado. Si se sobre excede el flujo puede extinguir la flama.

4) Quemador asistido por aire.

Los quemadores asistidos por aire son utilizados cuando se requiere un quemado sin humo. Esto es utilizado cuando no se dispone de vapor. Los quemadores asistidos por aire a menudo emplean distribuidores de gas para promover el mezclado de los gases relevados con un soplador a baja presión que suministra el flujo de aire.

La flama producida por una baja presión, en el quemador asistido por aire es una función de una mezcla de energía combinada de la descarga de los gases relevados y la fuerza ocasionada por la velocidad del flujo de aire. Típicamente la baja presión de aire en el soplador distribuye solo una fracción estequimétrica sin humo flujo del consumo de aire de combustión. Esta

fracción de aire es usada para promover el mezclado con la descarga de los gases de relevo.

El flujo de quemado sin humo y la característica de la flama de alguna manera es ajustado por la cantidad de aire de combustión utilizado y por la energía de descarga. La altura para un quemador asistido por aire debe ser diseñado limitando los casos cuando el quemador pueda ser requerido para operar sin asistencia de aire. Este caso puede producir una gran radiación.

La principal preocupación con la operación de un quemador asistido por aire es el diseño hidráulico para el sistema de quemado (la caída de presión permitida y los límites de velocidad de combustión de la flama) y las características de quemado de la flama deseada.

El quemado sin humo es alcanzado con un suministro de aire forzado. La cantidad y velocidad del flujo de aire forzado puede ser proporcionado para el flujo de gas por un soplador. Alternamente, el flujo de aire forzado puede ser controlado por pasos, por el uso de múltiples sopladores.

El sistema de soplado debe ser diseñado para proporcionar un flujo y una velocidad del aire al quemador considerando la distribución de aire en el sistema. La potencia del soplador debe ser seleccionado con respecto a la distribución del aire más denso (temperatura ambiente más fría). Sopladores de todo tipo, incluidos axiales, centrífugos, etc. Han sido utilizados para el quemador asistido por aire.

5) Quemador a alta presión.

Los quemadores a alta presión son utilizados donde se requiere un quemado sin humo y los gases de relevo son descargados del quemador a alta presión. La presión requerida depende de la composición del gas, el diseño del quemador y otros factores. La presión del gas relevado es convertida en energía cinética para promover el arrastre de aire y el mezclado que produce la quema sin humo.

La flama de los quemadores a alta presión puede ser estabilizada usando efectos aerodinámicos de la descarga de los gases de relevo. A menudo no se necesitan dispositivos mecánicos de retención de flama. Como un quemador a alta presión opera con velocidades de salida alta de gas la composición de gas quemado con este equipo debe ser rica en hidrocarburo combustible contenido y/o hidrogeno.

La tecnología del quemador a alta presión no debe ser usada para la estabilidad de combustión de gases limitados de relevo, tales como los que contienen alto contenido de inertes. Para los casos de gas relevado con suficiente contenido de hidrocarburo combustible, los quemadores de alta presión han mostrado una muy alta eficiencia de destrucción de hidrocarburos excediendo un 98%.

La flama producida por un apropiado diseño y operando el quemador a alta presión, convierte la presión del gas en energía cinética que entra y la mezcla de aire de combustión con el combustible para producir una flama sin humo que es resistente a la deflexión ocasionada por el viento. El uso adecuado de la energía de presión de gas requiere que la energía cinética del gas tiene acceso a arrastrar aire de combustión. Para algunos tipos de flujo de gas y composiciones esto requiere el uso de múltiples boquillas o distribuidores de gas.

La tecnología de un quemador de alta presión es particularmente efectiva para las instalaciones de producción de gas y petróleo. Los quemadores a alta presión pueden reducir en gran medida la radiación de la flama emitida por el quemador.

La operación de un quemador a alta presión tiene como objetivo primordial que el flujo de la descarga del gas relevado desde la punta del quemador ocurra con el diseño hidráulico para el sistema de quemado (con la caída de presión permisible y los límites de velocidad de combustión de la flama).

Si se utilizan múltiples boquillas, estas boquillas deben estar ubicadas para asegurar un encendido adecuado de la descarga de gas desde cada boquilla. La composición del gas y/o flujos bajos no son compatibles con el diseño del quemador de alta presión deben ser evitados.

La operación de un quemador a alta presión producirá ruido en la combustión (debido a la alta intensidad de la flama producida). La operación de un quemador a alta presión produce flamas que son dominadas por la energía cinética del gas descargado. Estas flamas no son afectadas por el efecto del viento.

6) Pilotos.

El piloto debe encenderse de manera viable. Si el piloto falla los hidrocarburos sin quemar y/o gases tóxicos pueden liberarse hacia la atmosfera, potencialmente resultando en una nube de vapor explosiva, problemas de olor y efectos adversos a la salud. En la mayoría de la aplicación de los quemadores elevados, el piloto no puede tener servicio o remplazamiento cuando el quemador está en operación.

El sistema piloto debe ser lo suficientemente confiable para operar durante años sin mantenimiento, ver figura 2.16.

Existen muchos diseños de pilotos. La mayoría se puede describir como la liberación de calor fijo, auto-inspirada, pre-mezclada. Las principales ventajas de este tipo de pilotos son:

- La fiabilidad del piloto depende solo de un servicio (por ejemplo gas combustible) desde que el aire es auto-inspirado.
- El tipo de diseño pre-mezclado permite una mayor estabilidad y fiabilidad en relación con el gas crudo o el tipo de difusión de la flama.

En algunos casos, los pilotos pre-mezclados con aire comprimido tienen que ser usados en lugar del piloto del tipo inspirado. En adición para el suministro

de gas combustible pilotos de aire comprimido dependen de la fiabilidad del sistema de aire comprimido. Para utilizar de forma segura los pilotos de aire comprimido, se debe hacer un esfuerzo para garantizar que la instalación se realiza a través de una de las siguientes condiciones:

- El sistema de aire comprimido tiene la suficiente fiabilidad. La probabilidad de falla del piloto debido a la falta de suministro de aire es aceptablemente bajo.
- El quemador se puede tomar inmediatamente fuera de servicio si el sistema de aire comprimido falla.
- La función del piloto automáticamente se revertirá a inspirado si el suministro de aire comprimido falla.
- Un ajuste independiente de piloto inspirado es instalado como apoyo.

Con el fin de garantizar una operación e ignición estable para el quemado del gas la recomendación mínima de calor liberado por el piloto es 13.2 MW (45,000 BTU/hr), cuando los gases de hidrocarburo se queman con un valor bajo de calentamiento de 11175 KJ/Nm³ (300 BTU/SCF) o mayor. El calor liberado por el piloto en rangos de práctica común oscila en los 102.5 MW (350,000 BTU/hr).

El piloto debe permanecer encendido y mantener la ignición en el quemador con vientos que van desde los 160.9 Km/hr (100 mph) bajo condiciones secas y 136.7 Km/hr (85 mph) cuando se combina con 2 pulgadas de lluvia por hora. El número de pilotos requeridos es una función del diámetro del quemador, para quemadores pequeños un solo piloto 13.2 MW (45,000 BTU/hr) el piloto encenderá de manera fiable el gas en el quemador.

Sin embargo, cabe señalar que si sólo se utiliza un único piloto, un solo fallo del piloto representaría un fallo completo del sistema de encendido. El número mínimo de pilotos recomendado para la mayoría de los quemadores

esta dado en la tabla 2.6. Como función del diámetro del quemador (flare burner) tamaño de la conexión actual, no diámetro hidráulico. Cuando los gases de hidrocarburo se queman con un valor bajo de calentamiento de 11175 Kj/Nm^3 (300 BTU/SCF) o mayor.

Número mínimo de pilotos recomendado	Diámetro del quemador (mm)	Diámetro del quemador (in.)
1	Arriba de 200	Arriba de 8
2	Arriba de 600	Arriba de 24
3	Arriba de 1050	Arriba de 42
4	Arriba de 1500	Arriba de 60

Tabla 2.6 Número mínimo de pilotos recomendados para la mayoría de los quemadores. [20] API standard 537 first edition.

Mientras que el número mínimo recomendado de pilotos para un quemador de 200 mm (8 in) o menos es solo uno, se puede alcanzar una mayor fiabilidad si por lo menos son instalados dos pilotos en cada quemador.

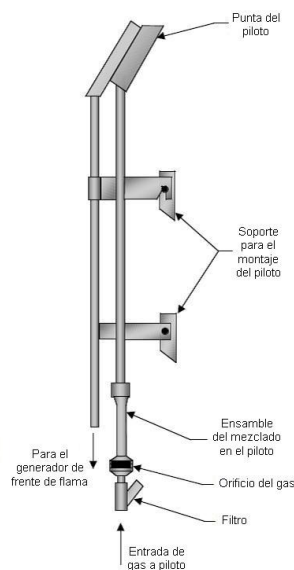


Figura 2.16 Piloto. [20] API standard 537 first edition.

b) Quemador enclaustrado.

Hay circunstancias en las que es deseable que la totalidad o parte de una carga a quemar sea dispuesta de alguna manera que cause el mínimo de perturbación para la localidad inmediata.

1. Para eliminar o reducir la radiación de calor a equipos cercanos o áreas de trabajo.
2. Para reducir el ruido.
3. Para hacer menos visible la flama del quemador.
4. Para lograr potencialmente emisiones mejoradas.

La flama producida por el quemador enclaustrado quema el gas desde u quemador colocados tan cerca del suelo como sea posible para garantizar un buen funcionamiento. Las flamas resultantes están ocultas a simple vista por un muro o cámara que rodea al quemador. Lo alto de la cámara se encuentra abierto a la atmosfera y el fondo de la cámara esta echo para permitir el ingreso de aire para la combustión. Es común para la cámara estar rodeada por protección contra el viento para modificar el efecto del viento cruzado sobre el proceso de combustión y para prevenir acceso no autorizado.

Un sistema de quemador enclaustrado tiene un número de componentes clave, estos son:

- Cámara de combustión.
- Quemadores.
- Sistema de tubería.
- Protección contra el viento.
- Control operacional y de seguridad.

La flama producida por un quemador enclaustrado es más compleja que un simple instalado de una tubería de quemado dentro de una cámara de combustión. El diseño de este quemador requiere ingeniería del proceso de combustión, con consideraciones para el flujo de aire dentro de la cámara de combustión y el flujo de gas desde la cámara. El diseño de los quemadores tiene un desarrollo especial para los requerimientos de la combustión de la flama del quemador enclaustrado.

❖ **Tamaño de la cámara de combustión y forma.**

La cámara de combustión de un quemador encerrado necesita consideraciones para dar el tamaño de la flama. El tamaño de la flama es función del diseño del quemador, la caída de presión del lado del aire, la energía de descarga del gas, el combustible y condiciones de aire. Las flamas pequeñas pueden producirse con el uso de mayor energía de aire y gas.

La cámara de combustión típicamente diseñada para resultados en liberación de calor volumétrico aproximadamente de 1.12 M KJ/Nm^3 (30,000 BTU/Hr/Ft³). El diseño del calor volumétrico liberado es función del diseño y tamaño del quemador, la geometría de la cámara de combustión, composición del gas relevado y otros factores. La flama larga de un quemador enclaustrado opera a capacidad más allá de 90,000 kg por hora (200,000 libras por hora). La flama pequeña de un quemador enclaustrado opera a capacidad solo a unos pocos cientos de libras por hora de flujo de gas de relevado.

La cámara de combustión puede ser configurada en muchas formas incluyendo cilíndrica vertical, rectangular y con varios lados. La elección de la forma incluye un número de procesos, seguridad, preocupaciones estructurales y económicas. Fabricación del sitio y los factores económicos a menudo son de suma importancia en la selección de la forma de un quemador encerrado.

La parte superior de la cámara de combustión es normalmente abierta para la descarga gas. Ninguna de las formas de la cámara de combustión tiene una ventaja inherente en la mitigación del ruido en la combustión ver figura 2.18.

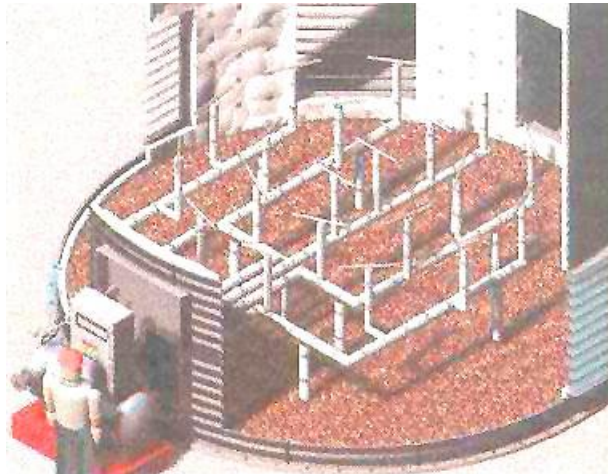


Figura 2.18 Quemador enclaustrado. [20] API standard 537 first edition.

❖ Quemadores.

Los quemadores y el sistema de control de quemado para los quemadores enclaustrados esta ingeniado específicamente para flujo de gas y composición. Los quemadores pueden ser in asistir, asistidos por vapor, asistidos por aire o energizados por presión para producir un quemado sin humo y para asistir el control del volumen de la flama. Los quemadores pueden enriquecerse con gas combustible para alcanzar una eficiencia de combustión deseable para un valor bajo de calentamiento y una fuerte combustión de los gases relevados.

Todos los quemadores enclaustrados, a excepción de los más pequeños en tamaño, los quemadores múltiples típicamente operan en sistema de etapas. Los quemadores típicamente tienen una combustión variada de la composición del gas y el flujo. Los sistemas con etapa y sin etapa de quemado necesitan diferentes consideraciones de diseño. Con un sistema de quemado por etapas, sólo la primera etapa rechaza el flujo de purga. Además

de que el quemado proporciona el control de la energía del gas descargado en los quemadores para asegurar un mezclado apropiado del combustible con el aire y por lo tanto el control del volumen de la flama.

Grandes flujos de gas a presiones de descarga bajas producen flamas más suaves y largas, tales flamas pueden ser difíciles de contener en la cámara de combustión y tienen una propensión a producir humo y mala combustión. Si se utiliza un sistema de quemado sin etapa entonces todos sus quemadores requieren rechazar el flujo mínimo de purga.

El diseño de los quemadores para el quemador enclaustrado es proporcionado por los fabricantes. El diseño del quemador debe considerar:

- Se ingeniado para los flujos de gas relevado y su composición, los posibles rangos de presión y temperatura de los gases.
- Considerar los servicios que estén disponibles para la operación del quemador.
- Considerar las condiciones de operación conocidas.
- Operar flujos de aire y velocidades con los rangos diseñados.
- Lograr el nivel deseado de las emisiones de combustión de flama con volúmenes que están contenidos dentro de la cámara de combustión.
- Producir flamas estables para todas las condiciones y composiciones de flujo de gas relevado.

Experiencia con el diseño del quemador operando como parte de un diseño completo de quemador enclaustrado es recomendado. El diseño del flujo de aire dentro de la cámara de combustión establece la distribución y velocidad con la cual el aire es mezclado con la descarga del combustible. Una vez que el quemador principal es establecido, el quemador debe ser estable y mantener una ignición continua de la flama. La estabilidad de la flama de un

quemador principal no debería tener que depender totalmente de la flama del piloto. La estabilidad de la flama en el quemador es proporcionada por el fabricante.

❖ **Flujo de gas combustible y aire.**

El diseño de un quemador enclaustrado debe proveer el flujo de aire dentro de la cámara de combustión y el flujo de los gases calientes saliendo de la cámara de combustión. El calor producido en el proceso de combustión es absorbido por largas cantidades de aire en exceso de manera que la temperatura del gas de combustión resultante es lo suficientemente baja para permitir el uso de materiales refractarios comunes.

El flujo de aire en la cámara de combustión puede ser por tiro natural o tiro forzado. El tiro natural es a menudo lo más empleado en tamaños largos de quemadores enclaustrados. El nivel de tiro natural producido a cualquier flujo quemado es función de:

- Flujo de gas, composición y calor liberado.
- Dinámica del flujo de aire dentro de la cámara de combustión.
- Perdidas de presión por fricción y como se propaga al flama.
- Flujo a través de la cámara de combustión.
- La pérdida de presión de los gases de los gases de combustión que salen de la cámara.
- Dimensiones de la cámara de combustión.

Estos factores pueden ser ingeniados para un desempeño del quemador desde flujos mínimos hasta flujos máximos. La cámara de combustión opera a un máximo de temperatura y es ajustada por la ingeniería. Para tiro natural la temperatura de la cámara de combustión en el quemador encerrado a

cualquier flujo menor que el máximo será menor y el exceso de aire operando será mayor. Los quemadores enclaustrados pueden obtener una mayor combustión y eficiencia de destrucción con el quemador contenido en una cámara de combustión.

El tiro natural del flujo de aire puede también ser controlado por el uso de amortiguadores u otros medios para controlar el flujo de aire en la cámara de combustión. El control del flujo de aire puede permitir el control de la cámara de combustión operando la temperatura sobre la variación del flujo de gas relevado y la composición. El control de la temperatura de combustión puede alcanzar una mayor eficiencia de destrucción de hidrocarburos.

El movimiento de aire de tiro forzado puede ser usado para múltiples propósitos en los quemadores enclaustrados.

1. Algunos diseños de aire asistido usan aire forzado para suplemento de la energía de la flama, ocasionando una flama sin humo y reduciendo su volumen.
2. Diseños para un 100% de volumen de aire de tiro forzado son controlables, y así controlar la temperatura de combustión en la cámara del quemador enclaustrado.

El uso excesivo del tiro forzado en el quemador enclaustrado puede contribuir al ruido, resonancia y preocupación de vibraciones. El uso de un ventilador de tiro forzado impacta en la disponibilidad de todo el sistema.

El flujo de gas desde el quemador enclaustrado ocurre a temperatura de operación dada en la cámara de combustión. Típicamente el factor de la temperatura domina la dispersión de los productos de la combustión. Si el volumen de la flama es contenido con la cámara de combustión, es muy pequeña la posibilidad de medir la radiación térmica desde la pluma. El flujo del gas a través del quemador, el flujo de aire dentro de la cámara de

combustión y el flujo de los gases calientes saliendo de la cámara de combustión, todo debe ser diseñado para un exitoso quemador encerrado.

❖ **Protección contra el viento.**

Los quemadores enclaustrados con tiro natural utilizan protección contra el viento u otros diseños para mitigar el apagado potencial por el viento. EL flujo uniforme de aire en todos los lados del quemador es importante para conseguir un control de la combustión.

La protección contra el viento en los alrededores del quemador protege a la entrada de aire y es diseñado para permitir el flujo de aire distribuyéndose hacia los quemadores. Sin protección contra el viento, el viento puede perturbar el tiro natural de la cámara de combustión. Esto puede resultar en flamas saliendo de la base del quemador enclaustrado, ver figura 2.19.

La protección contra el viento también ofrece seguridad y protección al personal de la radiación y las superficies externas de la cámara de combustión, el interior de la superficie de la protección contra el viento y todos sus componentes dentro de la cámara de combustión deben ser ingenieros para temperaturas que se experimentaran a partir de la radiación térmica de las flamas visibles.

El acceso del personal dentro de la protección contra el viento en la operación de un quemador enclaustrado está restringido. La protección contra el viento también aísla la toma de aire para el quemador enclaustrado desde el entorno del nivel de suelo adyacente. La elevación de la toma de aire puede mitigar la posible ignición de combustibles de hidrocarburos a nivel del suelo (nube de vapores).

Este es un importante factor para localizar el quemador enclaustrado en la cercanía de almacenamiento de hidrocarburos o equipo de proceso.

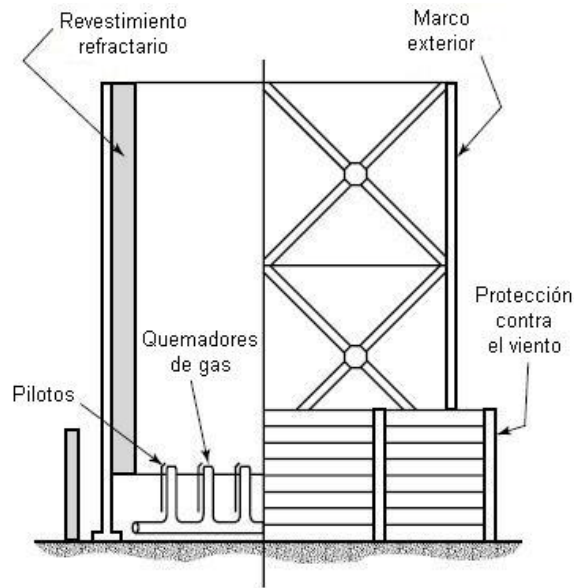


Figura 2.19 Protección contra el viento. [20] API standard 537 first edition.

II.3.3 Ventajas y Desventajas

a) Quemador elevado.

Ventajas

1.- El quemador elevado requiere una área menor debido a su alta elevación puede estar situado dentro de un área de proceso o en la periferia del sitio de la planta, ya que los efectos de radiación y la concentración de contaminantes puede mantenerse dentro de los límites permisibles.

2.- El costo de la tubería suele ser bajo.

Desventajas

1.- El costo de operación inicial es demasiado alto.

2.- El mantenimiento es difícil y tedioso.

3.- La visibilidad de la flama.

4.- El sistema requieren más vapor para producir un brote sin humo.

5.- El nivel del ruido es relativamente alto.

b) Quemador enclaustrado.

Ventajas.

1.- No requiere una estructura de soporte.

2.- La construcción es relativamente sencilla y requiere partes ligeras.

3.- El mantenimiento es fácil.

4.- La flama del quemador no es visible ya que está escondida en una cámara. Se requiere menos vapor para producir un brote sin humo, el quemado produce una flama no luminosa relativamente debido a la combustión controlada.

Desventajas.

1.- Deben estar bien aislados del resto de la planta y de las líneas de prioridad, por lo que requiere un espacio considerable y tuberías de interconexión largas.

2.- La concentración de los gases tóxicos es relativamente alta, debido a que la combustión se realiza a nivel de suelo.

3.- Utiliza atomización de agua, esto a menudo es evitado por un alto consumo de agua, además de la posibilidad de extinguir el quemado de pilotos.

4.- Existe un potencial daño a la instrumentación ocasionado por la atomización del agua.

La selección del tipo de quemador y los factores para el diseño deben estar influenciados por la disponibilidad del espacio, características del gas a quemar (por ejemplo la composición, cantidad y el nivel de presión), los costos de operación.

En general, los quemadores elevados se recomiendan con más frecuencia. A pesar de las numerosas ventajas de los quemadores de suelo, el requisito de la gran área requerida y el correspondiente alto costo inicial lo hace menos atractivo que al sistema del quemador elevado. Sin embargo, en algunos casos, la visibilidad de la flama, dependiendo de las regulaciones locales, podría ser el factor determinante.

Capítulo III

MARCO REGULATORIO.

El impacto del quemado de interés nacional e internacional, es uno de los problemas energéticos y ambientales más difíciles que enfrenta el mundo hoy en día. En las instalaciones donde existe el quemado existe una gran presión para eliminar el humo y reducir la contaminación a la atmosfera. Una de las fuentes de contaminación es el humo, que resulta de una insuficiente aireación de la flama de los hidrocarburos. El humo es producido por el agrietamiento y reacciones de polimerización que toman lugar en regiones de la flama donde el oxígeno es carente, y existen altas temperaturas.

Los productos químicos intermedios de tales reacciones y las partículas de carbón emiten una fuerte radiación en la banda infrarroja y contribuyen significativamente a la radiación emitida por el quemador. El humo puede ser eliminado por la improvisación de mezclado de aire atmosférico (oxígeno) dentro del quemador, desde que las reacciones de oxidación son cinéticamente muy rápidas estas implican la formación de humo precursor. La reducción en las partículas de carbón y automáticamente reduce la radiación emitida.

Igualmente es de suma importancia la dispersión del ácido sulfhídrico (H_2S) y el SO_2 (dióxido de azufre). El ácido sulfhídrico (H_2S) es toxico, corrosivo e inflamable a concentraciones de 10 – 500 PPM, causa dolores de cabeza, tos y dolor en vías respiratorias, mareo, nausea e irritación ocular. La exposición a concentraciones de 500 – 700 ppm causa un moderado envenenamiento. La inhalación a concentraciones mayores a 700 ppm provoca un paro respiratorio. Por otro lado, el dióxido de azufre (SO_2) es muy irritante debido a su formación de ácidos sulfurosos y sulfúricos en contacto con tejidos húmedos y las membranas mucosas. Las exposiciones agudas son, afortunadamente, poco frecuente, pero dan lugar a una intensa irritación de los ojos y en el sistema respiratorio.

El grado en que los contaminantes descargados de diversas fuentes concentrados en un área particular dependen de las condiciones

meteorológicas. Incluso si la descarga total de contaminantes a la atmósfera en un área determinada se mantiene constante día a día, el grado de contaminación del aire puede variar ampliamente debido a las diferencias en las condiciones meteorológicas y sólo las condiciones climáticas pueden desencadenar un episodio de contaminación del aire.

Por lo tanto, es necesario el conocimiento de las condiciones climáticas locales y algunas condiciones meteorológicas para evaluar la intensidad de la contaminación del aire. Las condiciones meteorológicas importantes que influyen en la contaminación del aire son:

Dirección y velocidad del viento: El viento en o cerca del punto de descarga lleva los contaminantes lejos de la fuente. La velocidad del viento es la principal fuente de dispersión horizontal.

Altura de la mezcla: La altura de mezcla puede ser definida como la altura sobre la superficie de la tierra a la cual los contaminantes relacionados se ampliarán, principalmente a través de la acción de la turbulencia atmosférica.

La estabilidad atmosférica y la temperatura: En condiciones normales la temperatura disminuye en la dirección hacia arriba. Esto hace que el movimiento de flotación de aire, que mejora inestabilidades atmosféricas, la mezcla y dispersión de contaminantes en dirección vertical. Si este no es el caso, habrá menos movimiento y los contaminantes se mantendrán en el nivel del suelo. La clase de estabilidad atmosférica va desde la A hasta la F, donde A: extremadamente inestable, B: moderadamente inestable, C: un poco inestable, D: neutral, E: estable, y F: muy estable.

Una norma se define como la especificación técnica establecida con la cooperación y el consenso o la aprobación general de todas las partes interesadas, basada en los resultados conjuntos de la ciencia, la tecnología y la experiencia.

Los documentos emitidos son:

- Jurídicos: Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos, tratados y convenios internacionales, leyes y reglamentos.
- Administrativos: Políticas, bases y lineamientos.
- Técnicos: Normas oficiales mexicanas, normas mexicanas, normas internacionales y normas de referencia.

Las características de un documento normativo son:

- Emitidos por comités de normalización o áreas con facultades y atribuciones en la materia.
- Objetivo específico o propósito regulatorio.
- Alcance o ámbito de aplicación claro y específico.
- Cubren una necesidad regulatoria.

En cuanto a la organización de documentos normativos se muestra en la figura 3.1



Figura 3.1 Organización de los documentos normativos.

Para aplicar correctamente los marcos normativos es importante tener siempre en cuenta lo siguiente:

- La jerarquía de los documentos normativos.
- La clasificación de los documentos normativos (genéricos, específicos, externos, internos).

Una norma oficial mexicana (NOM), es una regulación técnica de observación obligatoria que establece reglas, especificaciones, atributos, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, y como finalidad.

- Proteger la seguridad de las personas.
- Proteger la salud humana, animal o vegetal, el medio ambiente general y laboral y preservación de los recursos naturales.
- Información al consumidor o usuario.
- Proteger las vías generales de comunicación.
- Apoyos a las denominaciones de origen.

La norma mexicana (NMX), regulación de aplicación voluntaria que constituirá referencia para determinar la calidad de los productos o servicios, particularmente para la protección y orientación de los consumidores.

- La elabora un organismo nacional de normalización privado.
- Son de aplicación voluntaria, salvo que los particulares manifiesten que sus productos, procesos o servicios son conforme a las mismas o cuando las NOM's requieran su observación para fines determinados.

La norma de referencia (NRF), es una norma emitida por las entidades de la administración pública federal (PEMEX, CFE, IMSS, etc.), conforme al

artículo 67 de la LFMN (ley federal sobre metrología y normalización). Se emiten cuando las normas oficiales mexicanas, normas mexicanas o internacionales no cubran los requerimientos de las entidades o bien, las especificaciones contenidas en dichas normas se consideren inaplicables u obsoletas.

Una norma internacional es la norma que elabora un organismo internacional dedicado a la normalización y el cual ha sido reconocido por el gobierno de México en los términos del derecho internacional, algunas de ellas son:

ISO: Organización internacional de normalización.

IEC: Comisión electrotécnica internacional.

NFPA: Asociación Nacional de Protección contra Incendios.

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

ASME: Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

API: Instituto Americano del Petróleo.

III.1 NORMATIVIDAD NACIONAL.

Existen un número de normas aplicables en nuestro país las cuales son:

Norma Oficial Mexicana NOM-137-SEMARNAT-2003.

Esta Norma Oficial Mexicana tiene por objeto establecer las especificaciones y los requisitos del control de emisiones de las plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos, así como los métodos de prueba para verificar el cumplimiento de la misma.

Esta norma es de observancia obligatoria para todos los responsables de plantas desulfuradoras de gas amargo y condensados amargos en todo el territorio nacional, con excepción de aquellas cuya capacidad nominal sea

menor a 2 toneladas al día, de las ubicadas en plataformas marinas, así como de las plantas utilizadas en las refinerías de petróleo. Esta norma permite una emisión de H₂S a la atmósfera menor de 10 ppm en volumen para endulzadoras de gas. Y una eficiencia mínima del 98 % en las plantas recuperadoras de azufre para cualquier capacidad. Y permite que el gas ácido restante que no se alcanza a recuperar como azufre sea incinerado para convertirlo a SO₂.

NOM-085-SEMARNAT-2011.

Esta norma establecer los niveles máximos permisibles de emisión de humo, partículas, monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) de los equipos de combustión de calentamiento indirecto que utilizan combustibles convencionales o sus mezclas, con el fin de proteger la calidad del aire. Es de observancia obligatoria para las personas físicas o morales responsables de las fuentes fijas de jurisdicción federal y local que utilizan equipos de combustión de calentamiento indirecto con combustibles convencionales o sus mezclas en la industria, comercios y servicios.

No aplica en los siguientes casos: Equipos con capacidad térmica nominal menor a 530 megajoules por hora, equipos domésticos de calefacción y calentamiento de agua, turbinas de gas, equipos auxiliares y equipos de relevo. Tampoco aplica para el caso en que se utilicen bioenergéticos.

En esta norma se establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Es de observancia obligatoria para el uso de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, e igualmente sólo en emisiones de bióxido de azufre, para el uso de los equipos de calentamiento directo por combustión.

En esta norma se indica que se exceptúan los quemadores industriales de campo, el sistema de regeneración de las plantas de desintegración catalítica,

las plantas recuperadoras de azufre y los procesos de calentamiento directo que producen bióxido de azufre adicional al proveniente del combustible.

NRF-031-PEMEX-2011.

Establece los requisitos técnicos, documentales y criterios generales que deben cumplir los contratistas y/o proveedores en el suministro de los sistemas de desfuegos y quemadores para las instalaciones industriales terrestres y costa afuera. Esta norma de referencia cubre los requisitos técnicos para el diseño, especificación de materiales, fabricación, inspección, pruebas, almacenamiento y transporte e instalación, de sistemas de desfuegos, incluye los dispositivos de relevo de presión, tuberías, tanques de desfuegos y de sello líquido, quemador, instrumentación y equipos auxiliares para instalaciones industriales terrestres y marinas.

Esta norma de referencia es de aplicación general y observancia obligatoria en la contratación de los bienes y servicios objeto de la misma, que lleven a cabo los centros de trabajo de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios. Por lo que se debe ser incluir en los procedimientos de: licitación pública, invitación a cuando menos tres personas, o adjudicación directa, como parte de los requisitos que debe cumplir el proveedor, contratista, o licitante.

Resolución CNH.06.001/09.

Esta resolución fue emitida por la Comisión Nacional de Hidrocarburos. Este documento da prioridad a las inversiones para evitar o reducir al mínimo la quema de gas o venteo. Establece metodologías que se deberán seguir en el diseño de proyectos de explotación para evitar extraer, aprovechar, conservar o transferir el gas natural de un yacimiento y evitar su destrucción.

Define a la destrucción controlada, la quema, incineración o venteo de gas que no puede ser conservado o aprovechado por razones económicas o técnicas. Además, define quema rutinaria, la combustión controlada y

planificada de gas extraído de un campo, hasta un volumen máximo establecido en las presentes disposiciones, que ocurre dentro de condiciones normales de operación y se realiza con objeto de mantener las condiciones necesarias de seguridad.

También define la destrucción del gas: La incineración, quema, venteo o fugas de gas. Estas prácticas tienen por efecto la pérdida o menoscabo del patrimonio de la nación, en virtud de que se está desperdiciando un recurso que tiene un valor económico, o de que dicho gas puede ser utilizado para otros fines.

En caso de nuevos descubrimientos de hidrocarburos susceptibles a explotación, se debe evaluar y determinar la cantidad de gas asociado presente en el yacimiento, el aceite a producir durante las distintas etapas de su ciclo productivo, desde el inicio de las operaciones hasta su abandono y los requerimientos técnicos que se considerarán para el diseño de los equipos e instalaciones necesarias para la conservación, aprovechamiento o en su caso, para la quema o venteo de gas extraído. Por otra parte, se indica que queda prohibido el venteo de gas que contenga más de 2 a 3 mol de H₂S (ácido sulfhídrico).

III.2 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL.

De igual manera también existe una agencia de protección ambiental “EPA” perteneciente a los Estados Unidos de Norte América. La “EPA” dirige las ciencias ambientales, así como también los esfuerzos investigativos, educativos y de evaluación. La “EPA” trabaja para desarrollar y hacer cumplir las normas y reglamentos que implantan leyes ambientales establecidas por el congreso de los Estados Unidos. La “EPA” es responsable por investigar y establecer estándares nacionales para una variedad de programas ambientales, cuando los estándares correspondientes a los Estados Unidos no son cumplidos, la “EPA” puede emitir sanciones y tomar otras medidas para alcanzar los niveles deseados de calidad ambiental.

La “EPA” se enfrenta a serios retos de salud y medioambientales referente a la contaminación atmosférica. Ha propuesto normas de calidad de aire más estrictas que ayudarán a millones de personas a respirar más fácilmente y a vivir de manera más saludable. Usando eso como base, la “EPA” desarrolla una estrategia completa para un sector energético más limpio y más eficiente con metas firmes pero alcanzables para reducciones de emisiones de SO₂, NO_x, mercurio y otros tóxicos del aire.

Fortaleciendo sus estándares de calidad de aire para contaminantes como SO₂, y NO₂ y logrando reducciones adicionales en tóxicos de aire para una amplia gama de instalaciones industriales. Mejorando el monitoreo, el proceso de permisos, y el acatamiento serán bloques críticos esenciales para mejorar la calidad del aire.

De igual manera la EPA emite manuales o instructivos que presenta una metodología para determinar el rendimiento y el costo de las técnicas de control de contaminación del aire diseñadas para reducir o eliminar las emisiones de contaminantes potencialmente peligrosos a la atmosfera.

Algunos de los documentos emitidos por la EPA son los siguientes:

“Characterization and Minimization of Fine Particulate Emissions from Waste Incinerators by Real-Time Monitoring of Size-Resolved Mass and Chemical Composition” (REPORTE).

Hay una necesidad crítica para la cuantificación en tiempo real de los contaminantes asociados con las partículas finas (las menores de 2.5 micras) en los gases de escape desechados. Los sistemas de control de partículas se utilizan actualmente en los incineradores de residuos son menos eficientes para aquellos tamaños de partícula para el cual los efectos sobre la salud son más grande debido a su penetración profunda en el pulmón humano. Además, estas partículas tienden a ser enriquecidas en compuestos orgánicos condensables tóxicos, sales de ácidos, y metales.

EPA, 1991. U.S. EPA, Office of Research and Development, "Control Technologies for Hazardous Air Pollutants," EPA/625/6-91/014, Washington, D.C., June.

La Ley del aire en el artículo 189 contaminantes tóxicos del aire limpio que deben ser controlados dentro de períodos de tiempo específicos. Dado que muchos de estos compuestos son controlables por las tecnologías de control similares con el diseño adecuado del sistema, este manual ofrece información genérica que pueda ser aplicable en situaciones específicas. Esta edición sustituye el primer manual publicado en 1986 con el mismo título (EPA/625/6-86/014). No hay nuevas tecnologías que se hayan descrito, pero todos los costos han sido actualizadas desde la última literatura y la información del proveedor. El objetivo de este Manual es presentar una metodología para determinar el rendimiento y el costo de las técnicas de control de contaminación del aire diseñadas para reducir o eliminar las emisiones de contaminantes potencialmente peligrosos (HAP) de origen industrial o comercial.

"Standards for Owners and Operators of Hazardous Waste Incinerators and Burning of Hazardous Wastes In Boilers and Industrial Furnaces".

En esta propuesta, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) propone enmendar el reglamento de incineradores de desechos peligrosos para mejorar el control de las emisiones de metales tóxicos, las emisiones de cloruro de hidrógeno, y las emisiones orgánicas residuales; modificar las definiciones de los incineradores y hornos industriales, proponer definiciones de plasma incineradores e incineradores de arco infrarrojos.

EPA 325-F-012-002 "EPA Enforcement Targets Flaring Efficiency Violations".

EPA está dedicando importantes recursos a la aplicación de la corrección de incumplimiento de las normas en los quemadores. Este documento tiene como objetivo informar a los dueños y operadores de esta iniciativa de cumplimiento y para educarlos sobre el funcionamiento adecuado del

quemador. EPA espera que esta alerta impulsara la mejora de las prácticas de explotación de gas residual, incluyendo un mejor control y seguimiento de gas suplementario, aire, vapor de agua, y reducir así las emisiones nocivas para el medio ambiente.

El mejoramiento de las prácticas de operación del quemador tendrán el potencial de mejorar la salud pública a través de: 1) la reducción de las emisiones de contaminantes tóxicos del aire que pueden suponer un riesgo para la salud, y 2) la reducción de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, que a su vez, reducir la formación de ozono, que es potencialmente dañino a las poblaciones vulnerables, como los jóvenes, los ancianos y las personas con problemas respiratorios. Por otra parte, la mejora de la eficiencia de combustión del quemador puede resultar en un ahorro de costos debido a la reducción del uso de vapor.

Capítulo IV

MECANISMOS DE COMBUSTIÓN.

La combustión es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de puntos en forma de calor y luz, manifestándose visualmente gracias al fuego.

En toda combustión existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente), generalmente el oxígeno en forma de O₂ gaseoso. Los explosivos tienen oxígeno ligado químicamente, por lo que no necesitan el oxígeno del aire para realizar la combustión.

Los tipos más frecuentes de combustible son las materias orgánicas que contienen carbono e hidrógeno. En una reacción completa todos los elementos que forman el combustible se oxidan completamente. Los productos que se forman son el dióxido de carbono (CO₂) y el agua, el dióxido de azufre (SO₂) (si el combustible contiene azufre) y pueden aparecer óxidos de nitrógeno (NO_x), dependiendo de la temperatura, la cantidad de oxígeno en la reacción y sobre todo de la presión.

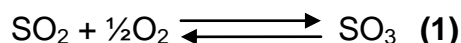
En la combustión incompleta los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada, dando como resultado compuestos como el monóxido de carbono (CO). Además, puede generarse carbón.

Para iniciar la combustión de cualquier combustible, es necesario alcanzar una temperatura mínima, llamada temperatura de ignición, que se define como la temperatura, en °C y a 1 atm de presión, a la que los vapores de un combustible arden espontáneamente.

La temperatura de inflamación, en °C y a 1 atm, es aquella a la que, una vez encendidos los vapores del combustible, éstos continúan por sí mismos el proceso de combustión.

En cualquier sistema de combustión en el cual el azufre o un compuesto que contenga azufre el producto predominante es el dióxido de azufre. La concentración del trióxido de azufre encontrada en un sistema de combustión es muy interesante. Incluso en condiciones muy pobres, la cantidad del trióxido formado es sólo un pequeño porcentaje del dióxido de azufre.

Sin embargo, generalmente la concentración del trióxido de azufre es alta que en el valor del equilibrio, como se puede apreciar en la siguiente reacción.



Estas concentraciones altas en el equilibrio aparecen debido al hecho de que las reacciones homogéneas reducirían el SO_3 a SO_2 y el O_2 se conoce por ser lento. Se sabe que el SO_3 tiene una gran afinidad por el agua y que a bajas temperaturas aparece como ácido sulfúrico. Por encima de los $500\text{ }^\circ\text{C}$, se disocia el ácido sulfúrico casi completamente en trióxido de azufre y agua.

Bajo condiciones ricas de combustible, en adición de dióxido de azufre los productos estables son el sulfuro de hidrógeno, el sulfuro de carbonilo y el azufre elemental. Hay otros óxidos de azufre que, debido a su reactividad, sólo aparecen como productos intermedios en varias reacciones de oxidación. Estos son el monóxido de azufre SO , su dímero $(\text{SO})_2$, y el monóxido de disulfuro S_2O .

Ha habido una gran confusión con respecto a estos óxidos y lo que ahora se conoce como S_2O se pensaba que era SO o $(\text{SO})_2$. El más importante de estos óxidos es el monóxido de azufre, que es el intermediario crucial en todos los sistemas de alta temperatura. Johnson en 1970, calculó la concentración de equilibrio para varias especies de azufre para un equivalente de 1% de SO_2 en una flama de propano – aire. Sus resultados, como una función de la relación combustible - aire, se muestran en la figura 4.1. El dominio del SO_2 en la composición del producto para estos cálculos de equilibrio, incluso en condiciones de aire deficientes, debería señalarse. Los sistemas prácticos revelan que las concentraciones de SO_3 (1 – 2 %) son mayores que los que se representan en la figura 4.1.

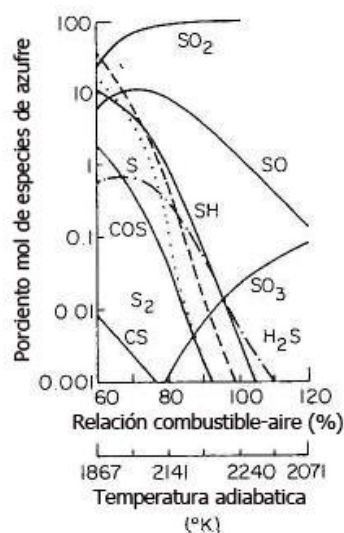
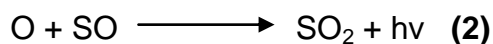


Figura 4.1 Equilibrio distribuido de especies de azufre en una flama propano-aire con gases sin quemar inicialmente conteniendo 1% SO_2 [22] IRVIN GLASSMAN, "COMBUSTION".

La característica del quemado de los combustibles de azufre es que presentan una flama pálida azul a veces muy intensa. Este color se produce a partir de las emisiones como resultado de la siguiente reacción.



Y puesto que se encuentra en todas las flamas de los combustibles de azufre, este color azul sirve para identificar el SO como una reacción intermedia importante en todos los casos. La mayoría de los estudios de oxidación de los combustibles de azufre se han realizado utilizando H₂S como el combustible. La figura 4.2 es una representación general de los límites de explosión de las mezcla H₂S / O₂. Sin embargo, hay una importante diferencia en el carácter de los datos experimentales que determinan los límites de la mezcla H₂S / O₂. En la península de la mezcla H₂S / O₂ y en la tercera región limite, la explosión se produce después de un período de inducción de varios segundos. El esquema de reacción principal para la oxidación a baja temperatura del H₂S, aunque no explícitamente conocido, parece ser.

ΔH

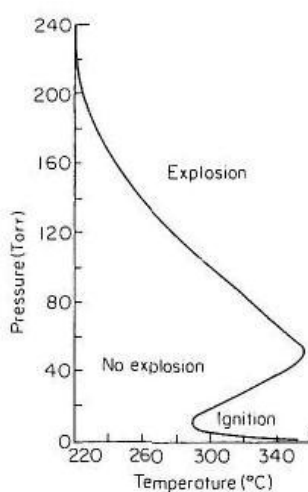
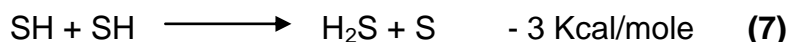


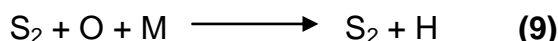
Figura 4.2 Límites de explosión aproximados para mezclas estequiométricas ácido sulfhídrico y oxígeno. [22] IRVIN GLASSMAN, "COMBUSTION".

La adición de la reacción número **(5)** para este esquema es necesaria para la identificación del S₂O en los estudios de los límites de explosión. Merryman y Levy (1971) en su estudio a un quemador demostraron que el S₂O se da corriente arriba del máximo de la concentración del SO y el azufre elemental se encuentra presente en la zona de la pre-ignición.

El sistema más probable para la introducción de azufre elemental es:

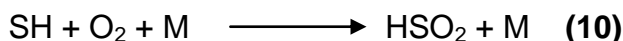


No parece factible cinéticamente a la temperatura en la zona de pre-ignición y a la presión global, de los estudios de la flama se lleve a cabo la reacción:

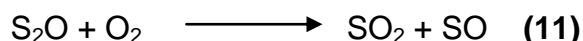


Podría ser responsable de la presencia del S₂O. La desproporción del SO suele dar SO₂ así como S₂O. Como el SO₂ no se encuentra certeramente en experimentos donde el S₂O puede ser identificado.

Entonces la desproporción no sería factible y la reacción **(5)** parece ser el mejor candidato para la presencia del S₂O. La reacción **(4)** es el paso de ramificación en el mecanismo. Davies y Walsh (1973) sugieren que:



Compite con la reacción **(4)** y determina el segundo límite. Cullis y Mulcahy (1972) sugieren la siguiente reacción.



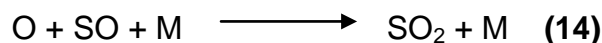
Como el deterioro del paso ramificado. El mecanismo explícito para formar S₂O y su papel en el proceso de la flama debe ser considerado como una gran incertidumbre. A temperaturas más altas la reacción sería:



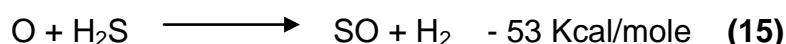
Se vuelve competitiva con la reacción **(7)** e introduce radicales de O dentro del sistema. La presencia de los radicales de oxígeno da otra reacción de ramificación:



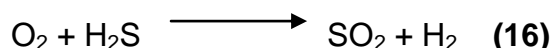
Específicamente la ramificación se mantiene bajo control por la reacción (5) que remueve el SO, y la reacción rápida termolecular:



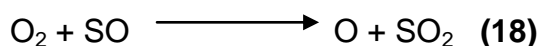
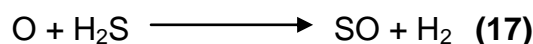
Que elimina tanto los radicales de O y de SO. En los estudios de choque, el SO₂ es formado antes de que aparezcan los radicales de OH. Para explicar este resultado se ha postulado que la reacción es posible:



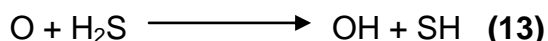
Esta reacción y la reacción (12) dan el paso global:



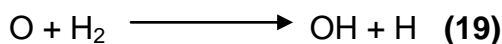
Un muestreo detallado de la flama por Sachjan en (1967), indica que el H₂S se oxida en un proceso de tres pasos. Durante la primera etapa, la mayor parte del H₂S se consume, y los productos son principalmente dióxido de azufre y agua. En la segunda etapa, la concentración del SO disminuye, la concentración del OH alcanza su valor máximo, el SO₂ alcanza su concentración final, y la concentración del agua pasa por un máximo. La interpretación de estos resultados durante la primera etapa el H₂S y el O₂ son consumidos principalmente por las reacciones (17) y (12).



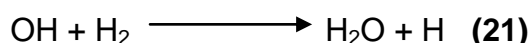
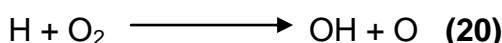
Con algún grado de cadena de ramificación por la reacción (13).



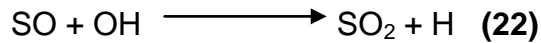
En la segunda etapa la reacción (12) predomina sobre la reacción (17) por que el agotamiento del H₂S y la elevación de la concentración del OH por la reacción (13) y se inicia la oxidación del hidrógeno:



Por supuesto, el mecanismo completo de la flama debe incluir:



Las reacciones (13) y (17) junto con la rápida reacción a temperatura alta:



Explica el hecho conocido de que el H₂S inhibe la oxidación del hidrógeno.

IV.1 REACCIONES DE COMBUSTIÓN.

La combustión es una rápida combinación de oxígeno con un combustible, resultando en la liberación de calor, el oxígeno proviene del aire el cual contiene un porcentaje de oxígeno correspondiente al 21% y 78% de nitrógeno en volumen. La mayoría de los combustibles contienen carbón, hidrogeno y a veces azufre. Como una simplificación podríamos decir que la combustión se compone de los siguientes tres procesos:

- Carbono + Oxígeno \longrightarrow Dióxido de Carbono + Calor
- Hidrogeno + Oxígeno \longrightarrow Vapor de Agua + Calor
- Azufre + Oxígeno \longrightarrow Dióxido de Azufre + Calor

Los tres productos de la combustión mencionados anteriormente se denominan compuestos químicos, y se componen por moléculas en las que los elementos se combinan en ciertas proporciones fijas. Por ejemplo una molécula de dióxido de carbono contiene un átomo de carbono más dos átomos de oxígeno, una molécula de vapor de agua contiene dos átomos de hidrógeno más un átomo de oxígeno. La materia no se crea ni se destruye en el proceso de combustión el calor desprendido en cualquier proceso de combustión es simplemente el exceso de energía que las nuevas moléculas son forzadas a liberar debido a su energía interna. En la figura 4.3 se muestra como un átomo de carbón más dos átomos de oxígeno (una molécula) se quemar para formar una molécula de dióxido de carbono y calor.

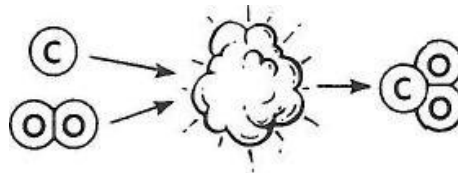


Figura 4.3 $\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{Calor}$ [15] RICHARD J. REED, "NORTH AMERICAN COMBUSTION HANDBOOK.

Asimismo, cuando dos átomos de hidrogeno se quemar, una molécula de agua se forma, ver figura 4.4.

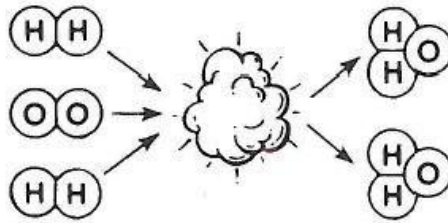


Figura 4.4 $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Calor}$ o $2\text{H} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{Calor}$ [15]
 RICHARD J. REED, "NORTH AMERICAN COMBUSTION HANDBOOK.

La segunda de estas dos figuras es la forma más común de describir este proceso, porque el oxígeno por lo general viene en unidades de paquetes, o moléculas di-atómicas, que contiene dos átomos de oxígeno. La cantidad de calor liberado en este caso es dos veces más grande cuando sólo un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno se utilizan.

La combustión perfecta es obtenida por mezclado y quemando solo exactamente las proporciones adecuadas del combustible y el oxígeno para que no quede nada más como se ilustra en la figura 4.3 y 4.4.

Si se suministra demasiado aire (exceso de aire), se dice que la mezcla es pobre y que el fuego se oxida. Esto da como resultado una flama que tiende a ser más corta y clara. El exceso de oxígeno no juega ningún papel en el proceso. Por ejemplo, si cuatro átomos de oxígeno (en lugar de dos) se mezclaron con un átomo de carbón, sobrarían dos átomos de oxígeno. (Esto es como tener seis ruedas para cada chasis).

Si el combustible es demasiado (o no hay suficiente oxígeno) suministrado, decimos que la mezcla es rica y que el fuego se está reduciendo. (Esto resulta en una flama con tendencia a ser larga y a veces humeante). Este resultado usualmente se llama combustión incompleta es decir, todas las partículas del combustible se combinan con un poco de oxígeno, pero no puede obtener suficiente oxígeno para quemar completamente. (Al igual que el chasis con sólo tres ruedas.)

Por ejemplo, si se mezclan dos átomos de carbono (en lugar de uno) con dos átomos de oxígeno, los átomos de carbono pueden compartir el oxígeno disponible, pero no tiene suficiente para convertirse en dióxido de carbono. En su lugar, se puede formar monóxido de carbono (CO), un compuesto que se quemara para proporcionar más oxígeno al dióxido de carbono. El combustible y el aire no solo deben ser proporcionales también deben

mezclarse completamente. De lo contrario una parte del fuego puede ser rica mientras que la otra parte sería pobre.

El suministro de oxígeno para la combustión normalmente proviene del aire. Dado que el aire contiene una gran proporción de nitrógeno, el volumen de aire requerido es mucho mayor que el volumen requerido de oxígeno puro. El nitrógeno en el aire no participa en la reacción de combustión. Sin embargo, absorbe parte del calor como el resultado de la disipación de la energía térmica que se transmite a lo largo de una gran cantidad de nitrógeno y los productos de combustión. Esto se refiere a que se produce una temperatura de flama baja como resultado de usar aire en lugar de oxígeno puro. El mismo fenómeno ocurre cuando se suministra aire en exceso como se muestra en la figura 4.5. El **aire primario** es aquel que se mezcla con el combustible (o en) el quemador. El **aire secundario** usualmente es aquel que rodea al quemador.

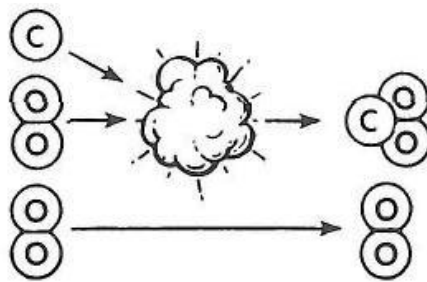


Figura 4.5 $C + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + O_2 + \text{Calor}$ [15] RICHARD J. REED, "NORTH AMERICAN COMBUSTION HANDBOOK.

El carbono, hidrogeno y azufre raramente se queman en su forma pura. La mayoría de los combustibles son mezclas de compuestos químicos llamados hidrocarburos (combinaciones de hidrógeno y carbono). Cuando estos se queman, los productos finales son dióxido de carbono y vapor de agua a menos que exista una escasez de oxígeno, en tal caso los productos pueden contener monóxido de carbono, hidrógeno, hidrocarburos no quemados, y carbono libre.

Hasta ahora se ha hablado sólo de los productos finales de la combustión. Aunque estos productos finales generalmente se limitan a los mismos compuestos para todos los combustibles de hidrocarburos, no siempre se producen por el proceso de combustión. Dentro de diferentes flamas muchos procesos variados y desconocidos junto con los productos intermedios que se

producen a pesar de que los productos finales son los mismos. El carbono y el hidrogeno se forman y reforman dentro de una sucesión de aldehídos inestables y otros compuestos que finalmente se combinan para formar CO_2 y H_2O . Los tipos de compuestos intermedios formados, y su velocidad de formación, dependerán de factores tales como la temperatura, la presión, la cantidad de oxígeno presente, y el grado de mezcla. Una buena combustión requiere:

- Una dosificación adecuada de combustible y aire.
- Una mezcla completa del combustible y del aire.
- Una ignición inicial de la mezcla.

Estos tres puntos, junto con el posicionamiento de la flama, son las funciones de un sistema de combustión.

Mezcla: Un buen mezclado del combustible y el aire es importante para que la mezcla sea uniforme, cada partícula de combustible debe comunicarse con una partícula de aire. La mayoría de los combustibles se convierten en gas antes de que se quemen. Una acción de lavado altamente turbulento contribuye a esta conversión en gas y el mezclado del gas con el aire.

Los combustibles líquidos usualmente se evaporan, y los vapores combustibles resultantes se queman en forma de gases. La velocidad de **atomización** de la evaporación de los líquidos produce millones de pequeñas partículas por consiguiente se proporciona de este modo una gran cantidad de superficie para la evaporación. El calor de la flama adyacente a veces ocasiona un agrietamiento en el combustible o lo descompone, antes de que pueda evaporarse. Este agrietamiento por lo general produce un hidrocarburo más ligero (que se quema como un gas) y un hidrocarburo pesado (que se quema como carbono sólido, produciendo una flama amarilla muy luminosa).

Cuando el carbono sólido se quema el proceso se complica aún más por el hecho de que cada átomo de oxígeno debe estar en contacto con la superficie del carbono, en forma de CO , y luego se desalojan para que pueda entrar más oxígeno. Por lo tanto la combustión de combustibles sólidos consiste en un fenómeno de transferencia de masa (del oxígeno a la superficie y del CO alejándose de la superficie), el mezclado, y de la combinación química. Si los combustibles sólidos se queman en altos rangos comparables a los alcanzables con combustibles gaseosos y líquidos, deben ser pulverizados para aumentar el área superficial para la transferencia de

masa. (Esto puede ser comparado con la situación existente en una estación de autobuses con plataforma de carga única. No importa cuántos autobuses están esperando fuera o cuántas personas están esperando en el interior, el rango máximo de personas que se puede tomar depende de qué tan rápido un autobús puede levantar la plataforma y la rapidez con la que se puede separar para que permita entrar el próximo autobús. La pulverización de un combustible sólido o la atomización de un combustible líquido sería como agregar más plataformas de carga).

Ignición: La combinación química de los combustibles y el aire ocurrirá a temperatura ambiente, pero muy lentamente. Si una pila de carbón se encuentra en un lugar cerrado, la pequeña cantidad de calor liberado por oxidación lenta se acumulara gradualmente, por lo tanto la temperatura en la pila aumenta. A medida que la temperatura se eleva gradualmente, el rango del incremento de la oxidación aumenta y la temperatura se eleva un poco más. Esto continua hasta producirse un incendio, esto se conoce como ignición espontanea. Esto sólo puede ocurrir en lugares muy cerrados donde se permite que el calor se acumule en el material combustible y el aire estancado adyacente.

La ignición se logra generalmente mediante la aceleración de la reacción de oxidación mediante la adición de una fuente de calor externa hasta que la propia reacción libera calor más rápido, que el calor que se pierde en los alrededores hasta que continuamente se enciende sin la fuente de calor externa. La temperatura más baja a la que esto es posible es la temperatura mínima de ignición de la mezcla aire - combustible. Se puede reducirse mediante el aumento de la presión en una mezcla. Una corriente de aire frío o el contacto con una pared fría puede apagar partes de una flama, enfriándola por debajo de la temperatura de ignición, de modo que parte del combustible no se quema.

Estabilización de la flama: Lo que puede hacer la diferencia entre la combustión útil e inútil, es generalmente una función de la configuración de la boquilla del quemador. Una posición de soporte de la flama, el área de iniciación de la flama proporciona:

- Temperatura de ignición.
- Localización de la mezcla aire - combustible dentro de los límites de inflamabilidad.
- Velocidad de alimentación igual a la velocidad de la flama.

Los quemadores industriales deben proporcionar la estabilidad de la flama en un amplio intervalo del rango de quemado y las proporciones del combustible / aire.

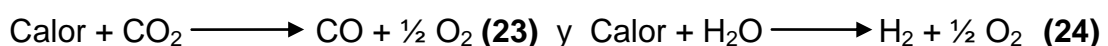
Calor disponible de los combustibles: Las cantidades de calor son medidas en BTU, Kilocalorias, Watt-segundo o Joules. Las medidas experimentales se han realizado para determinar el calor liberado por la combustión perfecta de varios combustibles. Si un cierto combustible se mezcla con la cantidad adecuada de aire y se coloca en una cámara cerrada donde el calor desprendido por la combustión se recogió y se midió, la cantidad total de calor dependerá de la temperatura final de los productos de la combustión. Cuando una mezcla perfecta de combustible -aire originalmente a 60 °F (15.6 °C) es encendida y después enfriada a 60 °F (15.6 °C) el calor total liberado se denomina el valor calorífico superior o valor calorífico bruto del combustible. El termino valor bajo de calentamiento o valor neto de calentamiento raramente se usa.

Temperatura de la flama: El calor liberado por la combinación química de un combustible con aire:

- Calienta los productos de la combustión y la mezcla entrante de aire y combustible.
- Irradia el entorno.
- Es llevado por contacto directo con el entorno.

Naturalmente la temperatura de la flama se incrementa cuando las pérdidas en los alrededores son menores. La adición de aire en exceso o combustible en exceso sólo proporciona más materia para absorber el calor de combustión por lo que la temperatura de la flama no puede ser tan alta como en una mezcla perfecta aire- combustible, tal como en un horno que se calienta en una pequeña casa a 68 °F (20 °C) puede calentar una casa grande a solo 60 °F (15.6 °C).

Bajo ciertas condiciones, particularmente a temperatura alta, ocurre un fenómeno conocido como disociación. La disociación es simplemente combustión inversa, es decir, es la descomposición de los productos de la combustión en combustibles y en oxígeno de nuevo. Este proceso absorbe el calor que originalmente se liberó por la combustión, por ejemplo:



Cuanto mayor sea la temperatura, mayor es la tendencia a disociarse. Por lo tanto, lo más caliente de la flama, la mayor cantidad de calor re-absorbido para revertir el proceso, y el aumento de la temperatura de la flama se detiene en alguna temperatura de equilibrio en el intervalo de 3400 °F a 3800 °F (1,870 °C a 2,090 °C) para la mayoría de los combustibles. Una ecuación simplificada para la temperatura de flama adiabática es:

$$\frac{\text{valor neto de calentamiento del combustible} - \text{efecto de disociación}}{(\text{peso de los productos de combustion}) * (\text{calor específico de combustion de los rproductos})}$$

Con grandes cantidades de aire en exceso, esto se conoce como temperatura de la mezcla caliente.

La **temperatura actual de la flama** es la temperatura teórica de llama menos la caída de temperatura causada por el calor transferido al entorno antes de que el proceso de liberación de calor se complete.

A menos que el combustible y el aire estén pobremente mezclados resultara una combustión incompleta, la temperatura teórica de la flama no es función del diseño del quemador. Sin embargo la temperatura actual de la flama es intencionalmente baja por el incremento de calor transferido de la flama en el quemador diseñado para el exceso de aire, flamas luminosas o con retraso de mezcla.

Velocidad de la flama: Una flama es meramente una cobertura o una zona dentro de la cual la reacción de combustión se produce a una velocidad tal como para producir radiación visible. El frente de la flama es el contorno de tres dimensiones a lo largo de la cual la combustión se inicia, la línea divisoria entre la mezcla aire - combustible y los productos de combustión. En las flamas estables del quemador, el frente de la flama parece ser estacionario. Esto se debe a que la llama se está moviendo hacia el quemador con la misma velocidad que la mezcla de combustible - aire sale del quemador.

Si la mezcla del combustible - aire se introduce en el quemador a una velocidad demasiado rápida, la flama puede apagarse. La mayoría de los quemadores, sin embargo, permiten una considerable gama de velocidades de alimentación mediante un diseño adecuado de la boquilla del quemador. Si la mezcla de combustible - aire se introduce en el quemador a un ritmo demasiado lento, la flama puede retroceder en el quemador. La flama puede retroceder hasta el punto de mezcla.

La velocidad de la flama depende de factores tales como presión, temperatura, tipo de combustible, la relación primaria del combustible / aire, la turbulencia (mezclado), y efectos de enfriamiento del entorno no se puede predecir de forma fiable, excepto en casos muy específicos.

Límites de inflamabilidad: No todas las mezclas de un combustible con aire u oxígeno se queman continuamente en una combustión auto-sostenida. Un ejemplo común de esto es la inundación de un motor de automóvil cuando se produce un exceso de combustible, una mezcla demasiado rica para arder (por encima del límite superior de inflamabilidad). Incluso dentro de los límites de inflamabilidad, hay ciertas limitaciones prácticas para las mezclas de combustible - aire que se pueden utilizar. Una de ellas es que los gases combustibles inseguros CO producidos por un fuego rico. Otro límite es la temperatura o condiciones atmosféricas requeridas para determinados procesos. Los límites de inflamabilidad, también conocidos como límites de explosión (LEL) se expresan como porcentajes en volumen de combustible en una mezcla de combustible - aire.

Intensidad de combustión: Interrelacionada con la temperatura de la flama y la velocidad de la flama son el tiempo de reacción y la intensidad de combustión, que son aproximadamente inversos uno de otro. La intensidad de combustión, como la velocidad de la flama, aumenta con la presión absoluta.

IV.2 COMBUSTIÓN DEL H₂S.

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

- **Clasificación de combustible.**

Los combustibles se clasifican teniendo en cuenta su estado de agregación en sólidos, líquidos y gaseosos. Un ejemplo de combustible sólido es el carbón o la madera. Un ejemplo de combustible líquido es el gasóleo, y de combustibles gaseosos, el propano y el gas natural.

Los combustibles fósiles son aquellos que provienen de restos orgánicos vegetales y animales y se extraen de la naturaleza. Un ejemplo es el petróleo, que si bien es un combustible, no se utiliza directamente como tal, sino como

excelente materia prima de muchos combustibles, como el kerosene o las naftas.

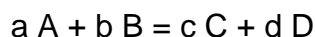
- **Conceptos básicos.**

La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente. El aire es el comburente más usual.

Si se supone (caso más común) que la combustión se realiza con aire, la reacción química que se debe plantear es la del proceso por el cual el combustible reacciona con el aire para formar los productos correspondientes, es decir.



Una forma general de plantear una reacción química es la siguiente:



Donde las letras escritas en mayúsculas indican las sustancias químicas y las minúsculas indican la cantidad de moles de dichas sustancias. Se denominan genéricamente reactantes a las sustancias escritas antes del signo igual (A y B) y productos a las escritas detrás (C y D).

Como se indicó anteriormente, la combustión es una reacción de oxidación exotérmica. Esto significa que durante la reacción se libera calor. La variación de entalpía que acompaña a la combustión completa de un mol de un compuesto se denomina calor de combustión.

Este calor de combustión puede determinarse tanto en forma experimental como por medio de cálculos (teniendo en cuenta las entalpías de los reactivos y productos).

La reacción química entre el combustible y el oxígeno origina sustancias gaseosas. Los productos más comunes son CO₂ y H₂O. A los productos de una reacción de combustión se los denomina, en forma genérica, humos.

Es importante hacer notar que el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire. La composición del aire es 20.99% de O₂, 78.03% de N₂, 0.94% de Ar (argón), 0.03% de CO₂ y 0.01% de H₂. Debido a que ni el N₂ ni el Ar reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar considerando que el

aire está formado por 21% de O_2 y 79% de N_2 . Por lo tanto, el N_2 pasará íntegramente a los humos.

Se puede dar el caso en que el combustible esté formado por una mezcla de sustancias entre las cuales hay una o más que no reaccionan con el O_2 , por ejemplo SO_2 . En este caso, estas sustancias también pasarán en forma completa a los humos. Otro caso en que parte de algún reactivo pasa al producto es cuando hay más aire del que se necesita para la combustión; el O_2 que no se utiliza en la reacción formará parte de los humos. Se habla entonces de reacciones con exceso de aire.

Por último, es útil indicar que los humos pueden contener parte del combustible que no haya reaccionado y sustancias con un grado de oxidación incompleto, como el CO . Cuando el O_2 que se necesita para la reacción no es suficiente, se habla de reacciones con defecto de aire, en la tabla 4.1 se indican las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los humos.

El objetivo principal de estudiar los procesos de combustión es contar con los conocimientos necesarios para introducir mejoras y lograr controlar una combustión eficiente, económica y limpia (sin contaminantes).

- **Propiedades de los combustibles.**

Las propiedades más importantes que caracterizan a los combustibles son las siguientes:

- ❖ Composición.
- ❖ Poder calorífico.
- ❖ Viscosidad.
- ❖ Densidad.
- ❖ Límite de inflamabilidad.
- ❖ Punto de inflamabilidad o temperatura de ignición.
- ❖ Temperatura de combustión.
- ❖ Contenido de azufre.

Formula química.	Nombre.	Procedencia principal.	Otras procedencias.
CO ₂	Dióxido de carbono.	Combustión de sustancias que contienen C.	Componente no combustible del combustible.
H ₂ O	Vapor de agua.	Combustión de sustancias que contienen H ₂ .	Combustible húmedo.
N ₂	Nitrógeno.	Aire.	Componente no combustible del combustible.
O ₂	Oxígeno.	Combustión realizada con aire en exceso.	Un gas combustible puede tener O ₂ en su composición.
CO	Monóxido de carbono.	Combustión realizada con deficiencia de aire.	Un gas combustible puede tener CO en su composición.
H ₂	Hidrógeno.	Combustión realizada con deficiencia de aire.	---
C	Carbono (hollín).	Combustión realizada con deficiencia de aire.	---
SO ₂	Dióxido de azufre.	Presencia de S (azufre) en el combustible.	Un gas combustible puede tener SO ₂ en su composición.

Tabla 4.1 Sustancias que se pueden encontrar en los humos. [23] DR. ING. E. BRIZUELA – DRA. ING. S. D. ROMANO, COMBUSTIÓN 1^{RA} PARTE.

- **Composición.**

La composición de un combustible es fundamental para poder determinar los parámetros estequiométricos característicos de la reacción de combustión. Además, establece si el mismo es apto o no para el uso que se requiere, en función de la presencia de componentes que puedan ser nocivos o contaminantes. La forma habitual de indicar la composición de un gas es como porcentaje en volumen de cada uno de sus componentes, en condiciones normales de temperatura y presión. Si se expresa este porcentaje relativo al 100% total, se obtiene la fracción molar, x_i . Por lo tanto, si el combustible gaseoso tiene n componentes deberá cumplirse que:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \dots\dots Ec. 4.1$$

La unidad es $[x_i] = \text{mol del componente } i / \text{mol de combustible}$

Los componentes más habituales en un combustible gaseoso son:

Hydrocarburos, de fórmula genérica C_nH_m .

- Dióxido de carbono: CO_2 .
- Monóxido de carbono: CO .
- Hidrógeno: H_2 .
- Oxígeno: O_2 .
- Nitrógeno: N_2 .
- Dióxido de azufre: SO_2 .
- Sulfuro de hidrógeno: SH_2 .
- Vapor de agua: H_2O .

Si se trata de un combustible sólido o líquido, lo más usual es indicar la masa de los n componentes referida a un kilogramo de combustible. En consecuencia, si el combustible sólido o líquido tiene n componentes deberá cumplirse que:

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1 \dots\dots Ec. 4.2$$

La unidad es $[y_i] = \text{masa del componente } i / \text{masa de combustible con cenizas}$

Muchas veces se suele expresar la composición seca del combustible; es decir, relativa a la masa de combustible sin agua. Llamando y_i' a la fracción másica de combustible sin agua, se tiene que:

$$y_i' = y_i \frac{1}{1 - y_a} \dots\dots Ec. 4.3$$

Siendo y_a la fracción másica de agua.

- **Poder calorífico.**

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.

- **Viscosidad.**

La viscosidad es una propiedad intensiva (no depende de la cantidad de muestra que se tome para su estudio) que tiene importancia para combustibles líquidos. Su determinación se hace en forma experimental.

- **Densidad.**

La densidad es otra propiedad intensiva que se determina experimentalmente. En el caso de combustibles gaseosos se utiliza tanto la densidad absoluta en (Kg/m^3)

como la relativa al aire (adimensional), definida como:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_a} \dots\dots Ec. 4.4$$

Siendo ρ la densidad absoluta del gas y ρ_a la densidad absoluta del aire, ambas medidas en las mismas condiciones de temperatura y presión. La densidad relativa tiene mucha importancia por el hecho de que determina, por ejemplo, si el gas se acumula en el techo o en el suelo, en caso de una fuga en un local cerrado.

La densidad absoluta del aire, en condiciones normales (0 °C y 1 atm), es de:

$$\rho_a = 1.287 \text{ kg / m}^3$$

Si un combustible está formado por n componentes, cuyas densidades relativas son ρ_{ri} , se puede calcular la densidad relativa media del combustible gaseoso, como:

$$\rho_r = \sum_{i=1}^n x_i \rho_{ri} \dots\dots \text{Ec. 4.5}$$

Otra unidad de densidad que se utiliza normalmente, son los grados API (G). La relación que existe entre ρ (SI: kg/m^3) y G (°API) es:

$$G = \frac{141.5}{\rho} - 131.5 \dots\dots \text{Ec. 4.6}$$

- **Límite de inflamabilidad.**

Esta propiedad se utiliza en combustibles gaseosos. Establece la proporción de gas y aire necesaria para que se produzca la combustión, mediante un límite inferior y uno superior.

Los gases más inflamables son el H_2 y el C_2H_2 (acetileno). En la tabla 4.2 se muestran los límites inferiores y superiores de distintos gases combustibles. Por ejemplo, una mezcla de NH_3 y aire es inflamable si contiene un porcentaje de NH_3 comprendido entre 15.5 y 27% V/V.

Si se quiere determinar los límites de inflamabilidad de una mezcla gaseosa, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L_i}} \dots\dots \text{Ec. 4.7}$$

Siendo x_i la fracción molar del componente i y L_i el límite de inflamabilidad de dicho componente.

Gases Fórmula (nombre)	Límites de inflamabilidad	
	Inferior (% vol/ vol)	Superior (% vol/ vol)
H ₂	4.0	75.0
CH ₄	5.0	15.0
C ₂ H ₆	3.2	12.45
C ₃ H ₈	2.4	9.5
<i>i</i> C ₄ H ₁₀	1.8	8.4
<i>n</i> C ₄ H ₁₀	1.9	8.4
C ₅ H ₁₂ (Pentano)	1.4	7.8
C ₆ H ₁₄ (Hexano)	1.25	6.9
C ₇ H ₁₆ (Heptano)	1.0	6.0
C ₂ H ₄ (Etileno)	3.05	28.6
C ₃ H ₆ (Propileno)	2.0	11.1
C ₄ H ₆ (Butadieno)	2.0	11.5
C ₂ H ₂ (Acetileno)	2.5	81.0
C ₆ H ₆ (Benceno)	1.4	6.75
CO	12.5	74.2
NH ₃	15.5	27.0
SH ₂	4.3	45.5

Tabla 4.2 Límites de inflamabilidad de sustancias gaseosas. [23] DR. ING. E. BRIZUELA – DRA. ING. S. D. ROMANO, COMBUSTIÓN 1^{RA} PARTE.

- **Punto de inflamación o temperatura de ignición.**

Para que se produzca la reacción de combustión, la mezcla de combustible y comburente debe alcanzar una temperatura mínima necesaria, que recibe el nombre de punto de inflamación o temperatura de ignición. Una vez que se alcanza dicha temperatura, el calor producido mantendrá la temperatura por encima de la de ignición y la reacción continuará hasta que se agote el

combustible o el comburente. El punto de inflamación depende del comburente.

- **Temperatura de combustión.**

Otra temperatura importante es la temperatura de combustión o temperatura máxima de llama que se alcanza durante el proceso de combustión.

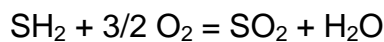
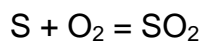
- **Contenido de azufre.**

Es importante conocer el contenido de S de los combustibles ya que esto determina la cantidad de SO₂ que aparecerá en los humos, como resultado de la combustión.

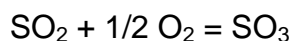
El SO₂ se oxida lentamente a SO₃ (trióxido de azufre) que es el responsable de las llamadas lluvias ácidas. Una forma de reducir la formación de SO₃ es controlar el exceso de aire, de forma tal que se emplee el “mínimo” exceso de aire posible.

Las reacciones de oxidación del S y SH₂ son las siguientes:

- En la combustión.



- En la atmósfera.



Siendo el H₂SO₄, ácido sulfúrico.

- **Distintos tipos de combustión.**

Los procesos de combustión se pueden clasificar en:

- Combustión completa.

Las sustancias combustibles del combustible se queman hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en los humos. En los productos de la combustión se puede encontrar N₂, CO₂, H₂O y SO₂.

➤ Combustión incompleta.

Sucede lo contrario que en la combustión completa. O sea, como el combustible no se oxida completamente, se forman sustancias que todavía pueden seguir oxidándose; por ejemplo, CO.

Estas sustancias se denominan inquemados. La presencia de inquemados indica que la combustión se está realizando en forma incompleta. Otros inquemados pueden ser H_2 , C_nH_m , H_2S y C. Estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión.

➤ Combustión teórica o estequiométrica.

Es la combustión que se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible sin que se produzcan inquemados.

En consecuencia, no se encuentra O_2 en los humos, ya que dicho O_2 se consumió totalmente durante la combustión. Esta combustión se denomina teórica porque en la práctica siempre se producen inquemados, aunque sea en muy pequeña proporción.

➤ Combustión con exceso de aire.

Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión tiende a no producir inquemados. Es típica la presencia de O_2 en los humos.

Si bien la incorporación de aire permite evitar la combustión incompleta y la formación de inquemados, trae aparejada la pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, la eficiencia y la longitud de la flama.

➤ Combustión con deficiencia de aire.

En esta combustión, el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible. Por lo tanto, se producen inquemados.

IV.3 CARACTERIZACIÓN DE Y DISPERSIÓN DEL H₂S.

La caracterización de una emisión es el proceso donde se definen las fuentes que producen la emisión y la recolección de datos necesarios específicos de cada una de las fuentes de emisión, de manera que la deposición atmosférica y modelos de riesgo se pueden realizar.

La estrategia de la caracterización de las emisiones enfatiza la utilización de los datos de emisiones reportadas. Los datos de las emisiones se pueden obtener de las bases de datos de emisiones reguladoras federales y estatales, y mediante la revisión de la documentación de registro, las solicitudes de permisos y otros documentos relacionados, tales como informes de las quemas.

El enfoque para la caracterización de las emisiones en términos generales se centra en:

- La identificación de la existencia de fuentes de emisiones potenciales.
- La obtención de los datos sobre las emisiones, necesarios para completar los componentes del aire y de modelización del riesgo en concordancia con los objetivos del estudio.

La caracterización de emisiones para literalmente cientos de fuentes ubicadas en el área de evaluación debe considerar:

- Asegúrese que los datos adecuados estén disponibles para apoyar los componentes de modelización de aire y riesgos, para un riesgo a escala comunitario.
- Minimizar el seguimiento y la gestión de datos innecesarios para que los recursos de gestión de datos no sea difícil.
- Apoyar el diseño flexible de la fuente y la evaluación de los riesgos específicos de contaminantes, priorización y gestión.

Como se señaló anteriormente, la caracterización de las emisiones y los parámetros físicos de cada fuente de emisión, requieren de información para apoyar la implementación de los componentes del aire y de modelización del riesgo de para una evaluación de dimensión comunitaria.

Las emisiones gaseosas como tales, sufren una dispersión en la atmósfera que rebaja la concentración de la sustancia emitida, al tiempo que la extiende sobre regiones cada vez mayores de espacio.

El uso de modelos de dispersión permite predecir las concentraciones de la sustancia emitida para un lugar y tiempo determinado, esto es función de las condiciones de la emisión y las condiciones atmosféricas.

Los modelos de dispersión se utilizan para predecir el área afectada en función del tamaño y forma de la nube; la distancia a la cual se alcanza una concentración de interés, como puede ser el límite de explosividad inferior, (LEI) de los vapores corriente abajo del punto de emisión y en todas direcciones; para evaluar efectos por explosión y fuego; estimar datos de concentración en función del tiempo a distancias dadas para evaluar efectos tóxicos en trabajadores y al público en general.

Los modelos de dispersión describen el transporte aéreo de los materiales tóxicos o inflamables desde el sitio de la emisión hacia otros puntos. Estos modelos se basan en la ecuación de difusión gausseana de un gas y para su aplicación es necesario establecer una concentración máxima permisible de exposición, lo cual permite estimar el área de evacuación en caso de una contingencia.

Se tiene una amplia variedad de parámetros que afectan la dispersión atmosférica de los modelos tóxicos, siendo los principales:

Dirección de la fuga: Determina la dirección principal de propagación de la emisión, y por lo tanto, las áreas con mayor probabilidad de sufrir las consecuencias generadas.

Velocidad del viento: Conforme aumenta la velocidad, las sustancias emitidas llegarán más rápido a un receptor, pero también se favorece la dilución al estar involucrada una mayor cantidad de aire y una turbulencia. La velocidad del viento hace referencia a la dirección horizontal. Conforme la velocidad del viento se incrementa, la pluma se vuelve más larga y puntiaguda incrementándose al mismo tiempo la dilución de la misma y las sustancias se transportan más rápido corriente abajo.

Frecuencia y Persistencia: La frecuencia del viento en una dirección determinada indica el porcentaje de tiempo durante el cual el viento tiene esa orientación. La persistencia es la cualidad que se refiere a la constancia con que el viento sopla en una dirección determinada.

Estabilidad Atmosférica: La estabilidad atmosférica hace referencia a condiciones meteorológicas relevantes respecto al nivel de mezclado vertical entre las capas de aire, provocada en gran medida por los efectos de gradientes de temperatura. Debido a lo difícil que es tener en cuenta todas las condiciones meteorológicas, se ha desarrollado un parámetro que resume las condiciones relevantes desde el punto de vista de la dispersión de vapores en la atmósfera. El modelo relaciona el mezclado vertical del aire al considerar la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar en el medio.

La escala de estabilidad más utilizada es la de Pasquill, con seis clases de estabilidad desde la A (inestabilidad alta, mezcla intensa) hasta la F (la más estable con poca mezcla).

CATEGORÍAS DE ESTABILIDAD DE PASQUILL							
Velocidad del viento		Radiación solar recibida			Cobertura de nubes nocturna		
m/s	(mph)	Fuerte	Moderada	Ligera	Delgada < 3/8	Moderada > 3/8	Nublado > 4/5
< 2	< 5	A	A – B	B	-		D
2 – 3	5 – 7	A – B	B	C	E	F	D
3 – 5	7 – 11	B	B – C	C	D	E	D
5 – 6	11 – 13	C	C - D	D	D	D	D
> 6	> 13	C	D	D	D	D	D

A: Condiciones muy inestables.

D: Condiciones neutras.

B: Condiciones inestables.

E: Condiciones estables.

C: Condiciones ligeramente inestables.

F: Condiciones muy estables.

Tabla 4.3 Categorías de estabilidad.

Durante el día, la temperatura del aire atmosférico decrece, por lo general, a medida que aumenta la altura sobre el terreno. Si una masa de aire se desplaza desde una altura Z1 hasta otra mayor Z2, donde existe una presión $P2 > P1$, el aire se expande.

La máxima inestabilidad (clases A y B) se favorece con vientos ligeros y radiación solar alta o moderada. Por lo que en un día despejado con una radiación fuerte se esperaría una mezcla intensa, es decir, alta inestabilidad. La inestabilidad moderada (clase C) ocurre con las mismas condiciones de radiación pero con vientos más altos, o bien con vientos ligeros si el calentamiento solar es ligero (Ej. Una tarde soleada de otoño). La clase D, prevalece en condiciones de nublado completo, tanto de noche como de día, ya que en este caso el calentamiento solar está atenuado.

La clase E y F tienden a ocurrir de noche, con vientos moderados y cielos claros o poco nublados, en cuyo caso las pérdidas de calor por radiación disminuyen rápidamente la temperatura del terreno, que a su vez enfría las capas bajas de aire, con lo que se inhibe la convección natural y aumenta la estabilidad. El fenómeno de aparición de temperaturas crecientes al ascender en la atmósfera se denomina inversión térmica, y tiene gran importancia desde el punto de vista de la dispersión de sustancias en la atmósfera ya que inhibe el movimiento vertical convectivo.

IV.4 CARACTERIZACIÓN DE Y DISPERSIÓN DEL SO₂ Y FORMACIÓN DE LLUVIA ÁCIDA.

En muchas ocasiones el gas ácido es quemado y libera a la atmósfera (SO₂ o H₂S) causando contaminación. Se reconoce que existe una fuerte relación entre los contaminantes ambientales y las enfermedades peligrosas tales como el cáncer. Las emisiones del dióxido de carbono (CO₂) y el ácido sulfhídrico (H₂S), derivados del quemado, incineración o combustión del gas ácido o amargo tienen daños potencialmente adversos.

La lluvia ácida se refiere a veces como la deposición ácida. Se forma cuando los contaminantes del aire el SO₂ se transportan a través de largas distancias y se llevan a la tierra después de ponerse en contacto con algún tipo de humedad en la atmósfera (por ejemplo, la lluvia) y se forma el ácido sulfúrico (figura 4.6). Teniendo en cuenta que a pesar de un nivel de fondo natural de la lluvia ácida (por ejemplo, las erupciones volcánicas) que han existido durante mucho tiempo, siempre ha existido un aumento dramático en los niveles de lluvia ácida en los últimos dos siglos, debido a la proliferación de la combustión.

Los componentes primarios causantes de que la lluvia sea ácida son el ácido sulfúrico (H₂SO₄) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂), con ácido nítrico (HNO₃) también es un factor. La lluvia común es ligeramente ácida (pH <7) debido a

la presencia de dióxido de carbono en la atmósfera. En ausencia de contaminación, el pH típico de la lluvia sería de aproximadamente 5.6.

Si bien no es universalmente aceptado, la lluvia se define a veces en forma de lluvia ácida con un pH de menos de 5.6. La lluvia ácida fue inicialmente relacionada con la quema de carbón en las centrales eléctricas, pero desde entonces se ha ampliado para incluir a todos los tipos de procesos de quema de combustibles. Los contaminantes atmosféricos primarios que dan origen a la lluvia ácida pueden recorrer grandes distancias, antes de precipitar en forma de rocío, lluvia, llovizna, granizo, nieve, niebla o neblina. Cuando la precipitación se produce, puede provocar importantes deterioros en el ambiente.

La lluvia normalmente presenta un pH de aproximadamente 5.6 (ligeramente ácido), debido a la presencia del CO_2 atmosférico, que forma ácido carbónico, H_2CO_3 . Se considera lluvia ácida si presenta un pH de menos de 5.6. Estos valores de pH se alcanzan por la presencia de ácidos como el ácido sulfúrico, H_2SO_4 , y el ácido nítrico, HNO_3 . Estos ácidos se forman a partir del dióxido de azufre, SO_2 , y el monóxido de nitrógeno que se convierten en ácidos. Los hidrocarburos y el carbón usados como fuente de energía, en grandes cantidades, pueden también producir óxidos de azufre, nitrógeno, y dióxido de azufre emitidos por fábricas, centrales eléctricas y vehículos que queman carbón o productos derivados del petróleo. En interacción con el vapor de agua, estos gases forman ácido sulfúrico y ácidos nítricos. Finalmente, estas sustancias químicas suben a la atmósfera forman una nube y después caen a la tierra acompañando a las precipitaciones, constituyendo la lluvia ácida.

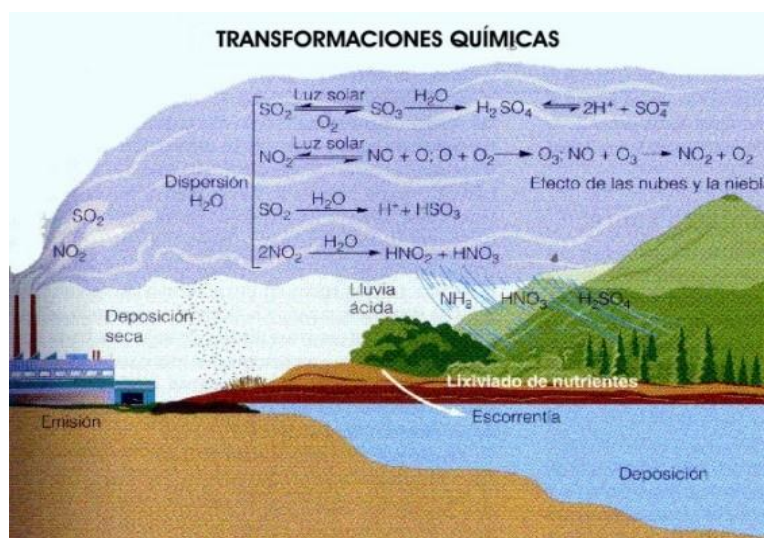


Figura 4.6 Formación de Lluvia ácida. (www.epa.gov)

En general muchas especies diferentes de contaminantes se encuentran en la atmósfera. Aquellos de principal importancia para la deposición ácida son el dióxido de azufre, óxido nítrico, amoníaco, hidrocarburos y sus derivados. Estos se derivan de diferentes fuentes, algunas naturales, otras derivadas de las actividades del hombre. En principio, es importante conocer la elevación de cada fuente por encima del suelo, cualquier aumento inherente debido a la flotabilidad, la magnitud media de la emisión, las tendencias y los ciclos que pueden ser evidentes. Las emisiones a menudo presentan ciclos diarios, semanales y anuales, en respuesta a las necesidades del hombre y los patrones de trabajo, así como las variaciones más impredecibles en respuesta a las condiciones climáticas.

Existe un nivel de incertidumbre básica en los valores de emisión de cualquier área en cualquier momento. Después de haber entrado en la atmósfera, los contaminantes son disipados por el viento. La propiedad principal del viento en este sentido es su dirección. Tanto la dirección del viento y la velocidad del viento son determinados objetivamente analizando los vientos y presiones medidas en una red escasa de estaciones de observación meteorológica.

Las reacciones químicas pueden tener lugar en la nube, a menudo durante la absorción en las gotas de lluvia en crecimiento. Estas reacciones son a veces rápidas, lo que implica que lo que sale en la lluvia es física y químicamente muy diferente de la que entró en la nube. Otras transformaciones que tienen lugar fuera de la nube llamadas reacciones en fase gas.

En conjunto, estos cambios se producen más lentamente, transformando las emisiones contaminantes primarias por ejemplo dióxido de azufre (SO_2) y óxido de nitrógeno (NO) a contaminantes secundarios por ejemplo (sulfato y ácido nítrico) a una velocidad típica de un poco porcentaje por hora. Por consiguiente, en términos muy generales, los contaminantes primarios son importantes en un alcance corto cerca de las principales regiones de origen mientras que los contaminantes secundarios se vuelven relativamente más importantes en largas distancias. Debido a las transformaciones implicadas, las propiedades de deposición y los efectos ecológicos pueden ser muy diferentes en los dos rangos.

Capítulo V

COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS EXISTENTES.

Para la disposición de los gases de desecho es de suma importancia contrastar ambas tecnologías en cuanto a su eficiencia, dispersión, costo, servicios auxiliares etc. Para poder tener un punto de vista para la disposición de los gases de desecho.

V.1 EFICIENCIA.

Incineradores.

a) Incinerador térmico.

La eficiencia de destrucción de COV depende de los criterios de diseño (esto es, la temperatura de la cámara, el tiempo de residencia, la concentración de COV a la entrada, el tipo de compuesto, y el grado de mezclado). Las eficiencias típicas de diseño de un incinerador térmico varían dentro de un rango de 98 a 99.9999%, dependiendo de los requisitos del sistema y las características de la corriente contaminada.

Las condiciones típicas de diseño necesarias para satisfacer un control de 98% o una concentración de salida del compuesto de 20 partes por millón por volumen (ppmv) son: una temperatura de 870°C (1600°F), un tiempo de residencia de 0.75 segundos, y un mezclado adecuado. Para las corrientes de COV halogenados, se recomienda una temperatura de combustión de 1100°C (2000°F), un tiempo de residencia de 1.0 segundo, y el uso de un depurador de gases ácidos en el ducto de salida.

b) Incinerador catalítico.

La eficiencia de destrucción de los compuestos orgánicos volátiles (COV) depende de la composición y concentración de COV, la temperatura de operación, la concentración de oxígeno, las características del catalizador, y la space velocity (velocidad en el espacio). La velocidad en el espacio se define comúnmente como el flujo volumétrico de gas entrando en la cámara de la cama del catalizador, dividido por el volumen de la cama del catalizador.

La relación entre la velocidad en el espacio y la eficiencia de destrucción está fuertemente influenciada por la temperatura de operación del catalizador. A medida que aumenta la velocidad en el espacio, disminuye la eficiencia de destrucción de COV, y a medida que aumenta la temperatura, aumenta la eficiencia de destrucción de COV. Como ejemplo, una unidad catalítica operando a aproximadamente 450°C (842°F) con un volumen del lecho del catalizador de 0.014 a 0.057 metros cúbicos (m³) (0.5 a 2 pies cúbicos (ft³))

por 0.47 metros cúbicos a condiciones estándares por segundo (m^3/s) (1,000 SCFM – pies cúbicos estándar por minuto) de gas de emisión pasando a través del dispositivo puede alcanzar una eficiencia de destrucción de COV del 95 por ciento. Se pueden lograr mayores eficiencias de destrucción (98 - 99 por ciento) pero requieren mayores volúmenes de catalizador y/o temperaturas más altas, y son diseñados generalmente en base a un sitio específico.

Quemador.

a) Elevado.

La eficiencia depende de una temperatura adecuada de la flama, el tiempo de residencia suficiente en la zona de combustión, y un mezclado turbulento. Esto incluye a los quemadores asistidos o vapor, asistidos por aire, no asistidos, asistidos por presión y quemadores a nivel del suelo.

Un quemador operado apropiadamente puede alcanzar una eficiencia de destrucción del 98 por ciento o mayor al controlar corrientes de emisión con contenidos de calor mayores de 11 Megajoules por metro cubico estándar (MJ/SM^3) (300 BTU).

V.2 COSTOS.

Incineradores.

a) Incinerador térmico.

A continuación se presentan los rangos de los costos (expresados en dólares correspondientes al año 2002) para incineradores térmicos de diseño modular bajo condiciones típicas de operación, desarrollados utilizando los formatos de la "EPA" para la estimación de costos (Ref. EPA, 1996a) y referidos a la velocidad del flujo volumétrico de la corriente de desecho tratada.

Como regla, las unidades más pequeñas que se encuentren controlando una corriente de desecho a una concentración baja serán mucho más costosas (por unidad de velocidad de flujo volumétrico) que una unidad grande limpiando un flujo con una carga alta de contaminantes.

- **Costo de Capital:** \$53,000 a 190,000 por m^3/s (\$25 a \$90 por scfm).
- **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$11,000 a \$160,000 por m^3/s (\$5 a \$75 por scfm), anualmente.

- **Costo Anualizado:** \$17,000 a \$208,000 por m³/s (\$8 a \$98 por scfm), anualmente.
- **Efectividad de Costo:** \$440 a \$3,600 por tonelada métrica (\$400 a \$3,300 por tonelada corta), costo anualizado por tonelada por año de contaminante controlado.

b) Incinerador catalítico

A continuación se presentan los rangos de los costos (expresados en dólares correspondientes al año 2002) para incineradores catalíticos de diseño modular con lechos fijos, bajo condiciones típicas de operación desarrollados, utilizando los formatos de la EPA para la estimación de costos (EPA, 1996a) y referidos a la velocidad del flujo volumétrico de la corriente de desecho tratada. Los costos pueden ser sustancialmente más altos que los rangos mostrados cuando son utilizados para las corrientes con concentraciones bajas de COV (menores de alrededor de 100 ppmv).

Como regla, las unidades más pequeñas que se encuentren controlando una corriente de desecho a una concentración baja serán mucho más costosas (por unidad de velocidad de flujo volumétrico) que una unidad grande limpiando un flujo con una carga alta de contaminantes. Los costos de operación y mantenimiento, el costo anualizado, y la efectividad de costo están dominados por el costo del combustible suplementario necesario.

- **Costo de Capital:** \$47,000 a 191,000 por m³/s (\$22 a \$90 por scfm).
- **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$8,500 a \$53,000 por m³/s (\$4 a \$25 por scfm), anualmente.
- **Costo Anualizado:** \$17,000 a \$105,000 por m³/s (\$8 a \$50 por scfm), anualmente.
- **Efectividad de Costo:** \$105 a \$5,500 por tonelada métrica (\$100 a \$5,000 por tonelada corta), costo anualizado por tonelada por año de contaminante controlado. Sin embargo, cuando se le utiliza para controlar concentraciones muy bajas de contaminantes peligrosos del aire (menos de 100 ppmv), el costo por tonelada removida podría ser de muchos miles de dólares, porque solamente una pequeña parte del contaminante está siendo destruido.

Quemador

- a) Elevado.

Los costos para los sistemas de quemadores elevados pueden variar entre los \$10,000 y \$3,000,000 (expresados en dólares correspondientes al año 2002), dependiendo de la aplicación. Los factores que controlan el costo de los quemadores son la estructura básica de soporte del quemador, el tamaño, la altura, y el equipo auxiliar. Otros factores que influyen en el costo son el grado de sofisticación deseado (esto es, si se desea un control manual o un control automático) y el número de accesorios seleccionados, tales como los tanques (knockout drum), sellos, controles, escaleras, etc. El diámetro mínimo de un quemador es de 1 pulgada; el diámetro máximo de los quemadores disponibles comercialmente en la actualidad es de 90 pulgadas.

Los costos de operación para un quemador elevado depende mayormente del diseño del quemador (o sea, un quemador asistido por vapor requerirá vapor), la velocidad de flujo (esto determinará el diámetro de la boquilla del quemador), y el valor de calentamiento del gas a ser controlado (esto será un factor en la determinación de la altura del quemador y la cantidad de gas natural auxiliar requerido para alcanzar la temperatura de destrucción deseada).

A continuación se presentan los rangos de costo (expresados en dólares correspondientes al año 2002) para quemadores elevados asistidos por vapor de diseño convencional bajo condiciones típicas de operación, desarrollados utilizando los formatos de la EPA para estimación de costos (EPA, 1996) y referidos a la velocidad de flujo volumétrico de la corriente de desecho tratada.

Los costos fueron calculados para quemadores con boquillas entre 1 pulgada y 90 pulgadas de diámetro, quemando el 100 por ciento del gas de desecho (sin aire) con un contenido calorífico de aproximadamente 4000 kilocalorías por metro cúbico (kcal/m^3) (450 Btu por pie cúbico a condiciones estándares (Btu/scf)), y operadas entre 1 hora y 100 horas por año. Debido a que los quemadores son sobre todo dispositivos de seguridad que tratan con flujos de corta duración (por lo general una condición alterada o liberación accidental proveniente de un proceso) más bien que un dispositivo de control que trata una corriente de desecho continua, no es del todo apropiado comparar la efectividad de costo de los quemadores a otros dispositivos de control.

El costo por tonelada de contaminante controlado depende grandemente de las horas de operación anuales. El uso infrecuente del quemador (aproximadamente diez horas por año) resultará en un mayor costo por tonelada de contaminante controlado, mientras el uso más frecuente (aproximadamente 100 horas por año) está representado por los costos

menores por tonelada de contaminante controlado en los rangos presentados a continuación.

- **Costo de Capital:** \$30,000 a \$2,000,000 por m³/s (\$15 a \$1,000 por scfm).
- **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$1,500 a \$130,000 por m³/s (\$1 a \$60 por scfm), anualmente.
- **Costo Anualizado:** \$5,000 a \$350,000 m³/s (\$2 a \$165 por scfm), anualmente.
- **Efectividad de Costo:** \$14 a \$6,400 por tonelada métrica (\$13 a \$5,800 por tonelada corta), costo anualizado por tonelada por año de contaminante controlado.

V.3 SERVICIOS REQUERIDOS.

A continuación se mencionan los servicios auxiliares que se requieren en estos equipos.

Incineradores.

- a) Incinerador térmico.
 - Gas combustible.
 - Aire.

- b) Incinerador catalítico.
 - Gas combustible.
 - Aire.
 - Catalizador.

Quemador.

- a) Elevado.
 - Gas combustible.
 - Energía eléctrica.
 - Aire de planta e instrumentos.
 - Agua.

V.4 RIESGOS Y ACCIDENTES.

- Incineradores.

Un primer paso en la realización del análisis de accidentes para las tecnologías industriales de incineración es identificar escenarios de accidentes que pueden tener el potencial de causar efectos adversos para la salud humana o a la comunidad circundante. Estos escenarios se identifican a través de una revisión general del diseño y operación de las instalaciones para las tecnologías industriales de incineración. Dado que un gran número de escenarios hipotéticos de potencial preocupación, se selecciona un subconjunto de eventos de accidentes para el análisis cuantitativo. Estos eventos son elegidos para representar a los tipos generales o clases de accidentes que pudieran ocurrir, tal como un derrame o incendio. La identificación inicial de los escenarios de accidentes implica los siguientes pasos:

- Una revisión de antecedentes generales del diseño de las instalaciones y el diseño, junto con información sobre los procedimientos de operación y los controles. Los datos sobre accidentes disponibles reportados para las tecnologías industriales de incineración.
- Elaboración de una lista preliminar de los eventos de accidentes basados en la revisión de antecedentes.

Una opinión general a fondo de la información pertinente a los accidentes en las instalaciones de tecnologías industriales de incineración se centra en la identificación de áreas en las que se transportan materiales peligrosos, recibo, manipularse, almacenarse o tratarse. Esto implica una revisión de la solicitud de permiso y el permiso para la instalación de la tecnología industrial de incineración, así como una revisión del plano de localización general.

Los incendios en las instalaciones industriales de incineración son detectados, a través de un sistema computarizado de monitoreo y control, es puesto en marcha por un operador que se encuentra en el cuarto de control. A través de un panel de control. El operador es capaz de controlar todas las áreas de proceso, asegurando así que estén funcionando normalmente. El operador es capaz de cerrar los procesos y equipos de las instalaciones, incluyendo la electricidad, calefacción, ventilación, aire acondicionado y sistemas de escape, debe surgir un problema. La instalación fue diseñada por cierre ordenado en el caso de una falla del equipo o corte de energía.

Muchos de los eventos son muy similares, difiriendo solo de la localidad donde ocurre el accidente y las cantidades de químicos involucrados. Los escenarios potenciales de accidentes de las tecnologías de incineración pueden ser agrupados dentro de las siguientes categorías generales:

- Derrame o escape de residuos líquidos, seguido por:
 - Evaporación y dispersión atmosférica de los componentes peligrosos.
 - Fuego con el arrastre y la dispersión de componentes peligrosos, generación y dispersión de productos peligrosos de la combustión o la combustión incompleta, de ebullición, vaporización y la dispersión de los componentes peligrosos en estrecha proximidad al fuego.

- La mezcla de desechos incompatibles, seguido por:
 - Ventilación y dispersión de la reacción de productos gaseosos.
 - Explosión del tanque o tubería y liberación de residuos líquidos.

- Explosión del tanque o tubería (hidráulica o sobrepresión térmica) con la liberación de los desechos líquidos.

- El fallo del equipo de control de contaminación del aire.

- Liberación y dispersión de sustancias peligrosas del incinerador debido a fugas, explosiones o fallo de componentes.

- Accidentes de transporte, seguido de un derrame o fuga.

Los escenarios que implican incendios o generación rápida de gas, también pueden implicar explosiones, dependiendo de la naturaleza del accidente y de los residuos. A continuación se mencionan algunos escenarios generales que se consideran de preocupación primordial.

Derrame – “dentro de la instalación”.

El derrame ocurre a causa de numerosas situaciones, incluyendo fugas desde los tanques que no están en buen estado o se encuentran dañados, fugas ocasionadas por un mal sello, sobrellenado de tanques, líneas de transferencias defectuosas o defectos estructurales.

Fuego – “dentro de la instalación”.

Varios eventos, incluyendo un derrame dentro de la instalación, podrían causar un incendio si una fuente de ignición se encuentra presente. El fuego puede resultar debido al aumento de la volatilización de los componentes de desecho, así como la formación de productos de combustión de preocupación, particularmente cuando los residuos contienen nitrógeno, azufre o halógenos (por ejemplo, cloro o bromo) son quemados.

Mientras que la combustión completa típicamente resulta en la formación de compuestos relativamente simples, tales como dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y cloruro de hidrógeno (HCl), otras sustancias más complejas también puede ser producida como resultado de la combustión incompleta.

Los tipos de sustancias que se forman dependerán de un número de factores, incluyendo la composición química de los residuos, la temperatura de combustión, y el grado de mezcla con el aire. Además de la liberación de estos productos de la combustión y la combustión incompleta, los efectos del fuego podrían provocar que el contenido de los tanques de almacenamiento cercanos hierva.

La mayoría de los incendios y explosiones en instalaciones de incineración de residuos peligrosos se han asociado con las operaciones del sistema de combustión. Los eventos más frecuentes incluyen explosiones de vapor que resultan de la caída de desechos fundidos, incendios y explosiones en el equipo de control de contaminación del aire.

Mezclado de desechos incompatibles. - “dentro de la instalación”.

Los desechos que contienen ciertos productos químicos pueden reaccionar cuando se mezclan, dando como resultado una variedad de consecuencias adversas, incluyendo la generación de gases inflamables o tóxicos, incendios o explosiones, o los efectos del calor. Los residuos que reaccionan para producir dichos efectos adversos se refieren a veces como residuos "incompatibles". El resultado específico de la mezcla de residuos incompatibles depende de las concentraciones y los volúmenes de los reactivos, la velocidad de reacción, el tipo de recipiente en el que se produce la reacción, y la presencia o ausencia de dispositivos de mitigación.

Entre estas posibles consecuencias, la generación de un producto de reacción gaseoso tóxico (por ejemplo, HCl o Cl) puede afectar a la mayor área fuera del sitio debido a que los productos químicos se pueden llevar a

distancias considerables a favor del viento. Por ejemplo, la liberación y migración de vapores tóxicos y corrosivos como HCl, fosgeno y otros gaseosos halogenados se pueden producir compuestos si los hidrocarburos halogenados se mezclan con ácidos minerales (oxidante o no oxidante), aminas (alifáticos o aromáticos), o fuertes agentes oxidantes (Sax y Lewis 1989; ASTM 1986; Bretherick 1985).

Derrame de un camión cisterna – “fuera de la instalación”.

Escenarios de derrame fuera del sitio implican la liberación de los contenidos, o una porción de los contenidos, de un camión cisterna. Colisiones, lo que podría resultar en la liberación de la mayoría de los contenidos de la cisterna en una única ubicación, por lo general se espera que tenga el mayor potencial de consecuencias adversas en la comunidad. El mayor potencial de exposición humana aguda implicaría la inhalación de volatilización de sustancias químicas.

Derrame de un camión cisterna con fuego – “fuera de la instalación”.

Si una fuente de ignición está presente fuera del sitio, si ocurre un derrame de un camión cisterna, como consecuencia se podría producir un incendio. No se tiene identificación del número de residuos peligrosos o de incidentes en el transporte de materiales peligrosos con fuego. Por lo tanto, no se sabe de un porcentaje de incidentes envueltos en fuego.

Los criterios utilizados en la selección de estos escenarios generales son:

1. La posibilidad de consecuencias importantes fuera de las instalaciones, y
2. La posibilidad de que ocurran durante la vida útil prevista de la instalación (30 años), con base en los datos disponibles.

Posibles impactos afuera de las instalaciones debido a las condiciones y accidentes que ocurren en el área del incinerador son juzgados de menor preocupación que otros tipos de accidentes. Las consecuencias de estos tipos de eventos relativos a los accidentes que implican el almacenamiento de residuos, la manipulación o el transporte son generalmente más bajos, principalmente debido a que la cantidad de residuos que se procesa por el incinerador en un momento dado es mucho menor que las cantidades que se almacenan, manipulan o transportan. Como resultado, se espera que los accidentes con el almacenamiento, manipulación y transporte de los residuos tengan consecuencias más graves fuera de las instalaciones que los accidentes que afectan directamente al incinerador.

En la evaluación de los accidentes fuera de las instalaciones, los análisis consideran el transporte de residuos a través de la comunidad local. Aunque en teoría es posible que en un futuro los residuos se reciban en camión o ferrocarril, el transporte local de residuos se produce actualmente en camión. El transporte por ferrocarril representa una opción a futuro. Por lo tanto, solo se mencionan los accidentes potenciales de camiones.

- **Quemadores.**

Durante la etapa de diseño del quemador un análisis detallado se debe dar, debido a los problemas rutinarios de mantenimiento y operación del sistema. La contaminación de los sistemas de relevo y purga con oxígeno o materiales reactivos crea un particular peligro y preocupación, para prevenir la entrada de estos contaminantes dentro del sistema durante situaciones normales o inusuales. A continuación se mencionan tres causas de peligro en los quemadores.

Explosión ocasionada en un quemador como resultado de la contaminación con aire durante el mantenimiento.

Se realiza un mantenimiento removiendo una válvula de relevo para inspección y prueba. El sistema se compone de instalaciones de recolección para la ventilación del proceso rutinario y las descargas de las válvulas de alivio de una operación petroquímica. El venteo y los relevos son encaminados hacia un quemador equipado con un piloto de continua quema. El quemador está equipado con un recipiente en la base de la chimenea. Un sello de agua se proporciona en el recipiente. Ver figura 5.1

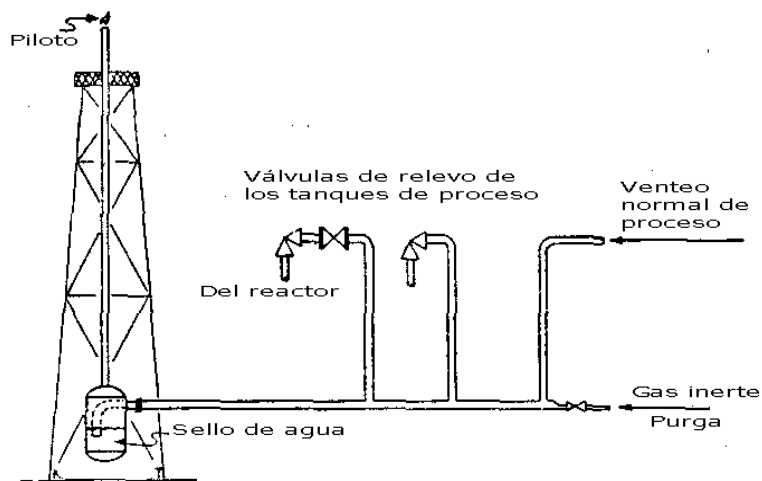


Figura 5.1 Incidente número uno. [24] CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS (VOL 44, NO 6).

Una perturbación del proceso ocurre como resultado en la operación de la válvula de relevo sobre el reactor. La válvula de relevo no se restablece completamente. Fue necesario cerrar el departamento para dar mantenimiento a la válvula de alivio. A esta válvula de alivio en particular se proporcionó con una válvula de bloqueo corriente abajo, para permitir el aislamiento durante el mantenimiento.

Como parte de la secuencia de parada del reactor, los operadores fueron instruidos para cerrar esta válvula. Se envía personal para quitar la válvula de relevo en la parte superior del reactor, la válvula de relevo es removida.

En ese preciso momento ocurre una explosión en el quemador. Fuego emitido desde el reborde abierto desde el que se había quitado la válvula de alivio, se realizó una investigación al respecto arrojando los siguientes resultados.

1. La válvula que se encontraba corriente abajo de la válvula de relevo no había sido cerrada.
2. El sello de agua en el recipiente se había drenado como el resultado de una fuga. Como práctica habitual durante las operaciones normales, el operador reviso que el sello en el recipiente había sido desplazado. Durante este período de cierre, el nivel no se había revisado.
3. Tras la retirada de la válvula de relevo la corriente natural en el sistema permite la infiltración de aire.
4. Los pilotos en la boquilla del quemador sirven como una fuente de ignición para un retroceso.

Caso 2.

Una explosión ocurre como el resultado de la entrada de combustibles dentro del sistema del quemador previo a la liberación de aire del sistema. El sistema había sido cerrado por un mantenimiento rutinario.

El sistema está compuesto por venteos y válvulas de relevo, los venteos y los relevos son encaminados hacia el quemador equipado con un piloto de continua quema. El quemador también cuenta con un tanque en la base de la chimenea. Por razones de proceso el sello líquido no se proporciona en el sistema, ver figura 5.2.

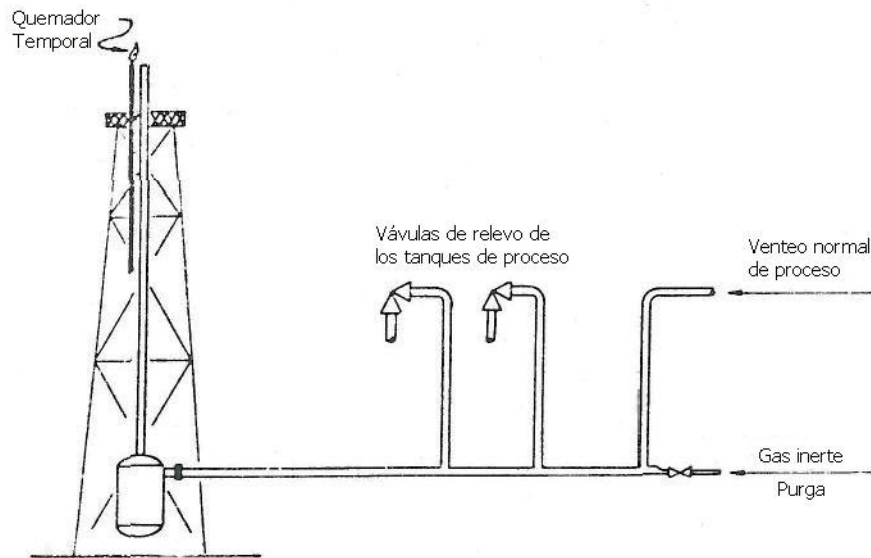


Figura 5.2 Incidente número dos. [24] CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS (VOL 44, NO 6).

El departamento de operación paro el proceso para realizar un mantenimiento rutinario. El sistema de purga había sido descontaminado. Todas las válvulas de relevo y venteo de proceso se dejaron con brida ciega para extraerla del sistema. El piloto sobre el quemador fue extinguido.

En preparación para la puesta en marcha, las bridas ciegas son retiradas del sistema. Al mismo tiempo, el nitrógeno se había introducido corriente arriba del sistema de llenado de aire. Durante este período, se produjo una explosión en el sistema de purga. Se realizó una investigación al respecto arrojando los siguientes resultados.

1. El combustible entra al sistema de purga a través de una válvula de bloqueo de fugas. Después de remover la válvula que se encontraba corriente abajo, ocurre una fuga dentro del sistema.
2. La fuente de ignición era una llamarada temporal en la proximidad del quemador principal. Esta llamarada temporal sirve a una planta piloto en el área adyacente. El departamento operativo del quemador la había utilizado como soporte estructural.

Caso 3.

Una explosión ocurre como el resultado de contaminación del sistema de quemado con materia reactiva. El sistema está compuesto por venteos y

válvulas de relevo, los venteos y los relevos son encaminados hacia el quemador equipado con un piloto de continua quema.

El quemador también cuenta con un tanque en la base de la chimenea. Por razones de proceso el sello líquido no se proporciona en el sistema, ver figura 5.2. El departamento operativo que utiliza este quemador será referenciado como el departamento A.

El sistema de quemado para el departamento A normalmente se ocupa para algunos combustibles, pero bajo condiciones anormales o inusuales, acetileno podría entrar en el sistema. El departamento B que se encuentra en un área adyacente, cuenta con válvulas de relevo y purga similar al sistema de quemado del departamento A.

Este sistema de quemado normalmente se ocupa de inertes y un poco de etileno. Bajo condiciones anormales o inusuales, cloro podría entrar en el sistema. La situación se produjo porque se requiera dar mantenimiento a la chimenea, que requería el departamento B. Con el fin de evitar un paro se instalaron temporalmente tuberías para direccionar el sistema de quemado del departamento B dentro del sistema de quemado del departamento A.

Después de un período de operación con los dos Departamentos utilizando un quemador en común, una explosión interna en el sistema de quemado se produce. Se realizó una investigación al respecto arrojando los siguientes resultados.

1. Después de la combinación temporal de los dos sistemas de quemado, una perturbación operativa ocurre en el departamento B, dando lugar al venteo de cloro hacia el quemador.
2. Después de la ventilación de cloro en el Departamento B, un perturbación del proceso ocurre en el departamento A, resultando en el venteo de acetileno al quemador.
3. La explosión ocurrió después del venteo de acetileno en el departamento A. resultando en daños menores al recipiente para el sistema de quemado.

V.5 EMISIONES.

Las emisiones dependen de un número de factores. En última instancia, la eficiencia de combustión determina los tipos de emisiones. Por ejemplo, la combustión a alta eficiencia asegura que casi todo el metano se convierte en dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua. Si el ácido sulfhídrico (H_2S) está incluido en la corriente de gas residual, casi todo el ácido sulfhídrico es convertido a dióxido de azufre (SO_2).

Si la corriente de gas residual contiene metano y H_2S , una baja eficiencia de combustión del quemador o incinerador pueden emitir H_2S y metano como productos no quemados. La baja eficiencia de combustión también puede dar lugar a otras emisiones, como el humo negro y partículas.

a) Emisiones de los incineradores.

El uso de incineradores para el tratado de corrientes de desecho peligrosas, tiene una cierta oposición pública debido a que la gente esta consiente del riesgo potencial hacia la salud y el ecosistema, debido a las emisiones que estos generan. Cuando una corriente de desecho peligrosa es quemada en presencia de oxígeno, reaccionan y forman productos de combustión como el SO_2 , CO , H_2O , HC y materia particulada (Partículas). Cantidades significativas de otras especies también son liberadas normalmente durante la incineración, incluyendo SO_x , NO_x , ácidos, sales, orgánicos halogenados y aminas.

Los gases de combustión normalmente tienen componentes clasificados como orgánicos o inorgánicos. Los gases inorgánicos producidos por el proceso de combustión normalmente incluyen dióxido de carbón, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre (si está presente).

Las emisiones de monóxido de carbón son normalmente muy bajas debido al alto nivel de combustión y eficiencia de destrucción alcanzado en el incinerador, pero las emisiones de óxido de nitrógeno son usualmente altas debido a la fijación térmica del oxígeno y nitrógeno en la combustión en presencia de aire, a altas temperaturas.

Dependiendo de la corriente de gas desechada, las emisiones de óxido de azufre y otros gases ácidos pueden resultar de la incineración. Los gases ácidos emitidos pueden contener dióxido de azufre, cloruro de hidrogeno, fluoruro de hidrogeno y bromuro de hidrogeno.

b) Emisiones del quemador elevado.

Una variedad de hidrocarburos son producidos cuando se quema petróleo-gas y petróleo-gas-agua. La quema es ineficiente cuando la combustión es afectada por los vientos circundantes y el valor de calentamiento del combustible. La quema ineficiente libera combustible crudo.

La eficiencia del quemador puede depender de varios factores como la composición del flujo a quemar, flujo de los gases a quemar, velocidad del viento, turbulencia ambiental, presencia de gotas de hidrocarburo y agua en la corriente a quemar. Gas natural, propano etileno, propileno butadieno y butano constituyen el 95% de los gases de desecho quemados.

En la combustión, hidrocarburos gaseosos reaccionan con el oxígeno atmosférico para formar dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Durante una reacción de combustión, varios productos intermedios se forman, y, finalmente, la mayoría de ellos se convierten en CO_2 y agua (H_2O). Algunas cantidades de productos intermedios estables, tales como monóxido de carbono, hidrógeno, hidrocarburos y escaparán como emisiones.

La cantidad de las emisiones de hidrocarburos generados depende del grado de combustión. Teóricamente, los procesos de combustión con los gases de combustión completa crean relativamente gases inocuos tales como dióxido de carbono y agua. Sin embargo, la eficiencia de quemado depende de la velocidad del viento, la velocidad de salida de la chimenea, proporciones de mezcla estequiométrica, y el valor de calentamiento, la quema, en realidad, rara vez tiene éxito en el logro de la completa combustión.

También, dependiendo de la composición del gas de desecho y otros factores, las emisiones de contaminantes procedentes de la quema pueden consistir en componentes combustibles sin quemar (por ejemplo, el metano, compuestos orgánicos volátiles), los subproductos de proceso de combustión (por ejemplo, hollín, productos quemados parcialmente, CO , CO_2 , NO_x) y óxidos de azufre (por ejemplo, SO_2).

El objetivo de quemar es el de convertir, a través de la oxidación, las sustancias en la corriente de gas hacia el quemador a su forma más segura posible. En el caso de los hidrocarburos, los productos más deseables son el dióxido de carbono y vapor de agua. Azufre en compuestos como el sulfuro de hidrógeno se convierte en dióxido de azufre.

Otros óxidos, tales como los óxidos de nitrógeno, o compuestos parcialmente oxigenados como el monóxido de carbono o formaldehído son menos

deseables. Los compuestos tóxicos compuestos orgánicos volátiles formados en estas flamas de difusión no pueden ser totalmente consumidos.

V.6 MANTENIMIENTO.

Incinerador.

a) Incinerador térmico.

Un sistema oxidante térmico tiene pocas piezas móviles y por lo tanto, tiene bajos requisitos de mantenimiento. Al igual que con todos los sistemas mecánicos, se requiere alineación y lubricación de los rodamientos para evitar fallos. Se requiere lubricación de articulaciones mecánicas, deslizamiento y otras partes móviles de metal.

Filtros y coladores para combustibles líquidos deben cambiarse periódicamente para asegurar un flujo uniforme. Se requiere tubería en paralelo (duplicado) para coladores y se requieren filtros para el servicio en línea.

Se utilizan prefiltros para evitar la entrada de partículas al incinerador, deben ser cambiados con regularidad para evitar pérdidas y limitaciones en la capacidad. Las puntas del quemador deben ser inspeccionadas y limpiadas para garantizar la mezcla de combustible y se de una combustión eficiente.

La inspección de los incineradores térmicos requieren de una observación periódica de los dispositivos de control (es decir, termopares, monitores de gas, etc.) La mayoría de los incineradores registran de manera continua la entrada y la salida de temperatura y la entrada del combustible auxiliar.

La presión del combustible y de los ventiladores también está generalmente disponible usando un calibrador magnético y un amperímetro, respectivamente. Temperaturas de salida de los intercambios de calor.

Cuando se utiliza un recuperador de calor, a la entrada y a la salida, el calor de los intercambiadores de calor es monitoreado usando termopares. Idealmente, la salida del monóxido de carbono y el oxígeno también serán monitoreados continuamente. Los puntos de ajuste en cada monitor se utilizan para notificar al operador de un mal funcionamiento del incinerador entre las inspecciones (por ejemplo, alta y baja temperatura, niveles altos de CO).

Se debe revisar los gráficos operativos, deben llevarse a cabo una vez por turno, para determinar si las condiciones de operación son típicas en condiciones normales y notar cualquier tendencia. Una inspección física más detallada del sistema debe hacerse sobre una base trimestral. Esto debe incluir los componentes del sistema externos e internos, intercambiadores de calor y sistemas eléctricos.

b) Incinerador catalítico.

Un sistema de incineración catalítica tiene pocas partes móviles y por lo tanto tiene bajos requerimientos de mantenimiento cuando se hace funcionar correctamente. Al igual que con todos los sistemas mecánicos, se requiere alineación y lubricación de los rodamientos para evitar fallos. Se requiere lubricación de articulaciones mecánicas, deslizamiento y otras partes móviles de metal.

Filtros y coladores para combustibles líquidos deben cambiarse periódicamente para asegurar un flujo uniforme. Se requiere tubería en paralelo (duplicado) para coladores y se requieren filtros para el servicio en línea.

Se utilizan prefiltros para evitar la entrada de partículas al incinerador, deben ser cambiados con regularidad para evitar pérdidas y limitaciones en la capacidad. Las puntas del quemador deben ser inspeccionadas y limpiadas para garantizar la mezcla de combustible y se de una combustión eficiente.

El incinerador catalítico requiere de una inspección regular y dispositivos de monitoreo (es decir, termopares, monitores de gas, etc.) La mayoría de los incineradores registran de manera continua la entrada y la salida de temperatura y la entrada del combustible auxiliar. Idealmente la salida del monóxido de carbono y oxígeno serán continuamente registrados. El punto de ajuste de cada monitor es usado para notificar al operador de un mal funcionamiento del incinerador entre las inspecciones.

Se debe revisar los gráficos operativos, deben llevarse a cabo una vez por turno, para determinar si las condiciones de operación son típicas en condiciones normales y notar cualquier tendencia. Una inspección física más detallada del sistema debe hacerse sobre una base trimestral. Esto debe incluir los componentes del sistema externos e internos, refractario, intercambiadores de calor y sistemas eléctricos.

Quemador

a) Elevado.

Los sistemas de quemado son normalmente unidades de diseño personalizado que consta de equipos comunes. Debido a la naturaleza de los materiales manipulados y las condiciones en las que operan los componentes, el sistema de quemado está sujeto a la corrosión, la erosión, la tensión térmica, agrietamiento (cracking), y taponamiento. Sin embargo, surgen los instrumentos y dispositivos de control de procesos. Se recomiendan inspecciones diarias, mensuales y anuales. Sobre una base diaria, del combustible auxiliar, sellos de presión, tanque (knockout drum), monitoreo y los dispositivos eléctricos se debe inspeccionar físicamente para verificar que estén limpios, funcionando y calibrados. Los sellos de presión deben ser firmes e intactos. Los chorros de gas deben estar libres de corrosión, los depósitos limpios y sin obstrucciones. Válvulas y dispositivos eléctricos deben ser revisados para una apropiada posición y condición.

Los medidores de presión, termómetro y/o termopares, los indicadores de nivel todos deben ser inspeccionados por integridad física y calibrados según sea necesario.

Sobre una base mensual piezas móviles tales como ventiladores y sopladores, solenoides, válvulas de retención y amortiguadores deben lubricarse y limpiarse de cualquier materia extraña que pudiera interferir con la operación.

Anualmente o durante, se deberá parar cada equipo, componentes estructurales que incluyen anclajes, correas, fundaciones y cables de retención, deberán ser inspeccionados por integridad. Se debe comprobar para el revestimiento refractario si existen grietas y desprendimientos. La capa exterior de la chimenea y los componentes del sistema, se debe revisar si hay grietas y la fatiga causada por exceso de presión o temperatura. Los quemadores se utilizan normalmente en entornos severos y los problemas de corrosión/erosión deben ser cuidadosamente monitoreados y atendidos cada vez que se encuentren.

Todas las actividades de mantenimiento e inspecciones deben ser registradas y estudiadas para las tendencias y variaciones de diseño, y/o condiciones normales de operación.

La mayoría de los problemas que ocurren con los quemadores tienen un impacto directo sobre las tasas de emisión. Caudales excesivos pueden

causar explosiones, incendios incontrolables y ventilación de gases tóxicos o nocivos.

Por lo tanto el mantenimiento de rutina para asegurar que los dispositivos de seguridad estén intactos y que los controladores de procesos están funcionando correctamente es crítico. El ensuciamiento y taponamiento es ocasionado por deposición de materiales extraños en el exterior y/o interior de boquillas, válvulas, monitores, controladores, y cabezales de quemado. La limpieza de los depósitos es generalmente realizada sólo durante principales paros.

V.6 OPERABILIDAD.

Incinerador.

a) Incinerador térmico.

La incineración, u oxidación térmica, es el proceso de oxidar materiales combustibles elevando la temperatura del material por encima de su punto de auto-ignición en la presencia de oxígeno, y manteniéndolo a alta temperatura por un tiempo suficiente para completar su combustión a bióxido de carbono y agua. Tanto el tiempo como la temperatura, la turbulencia (para mezclado), y la disponibilidad de oxígeno afectan la velocidad y la eficiencia del proceso de combustión. Estos factores proporcionan los parámetros de diseño básico para los sistemas de oxidación de COV (Ref. ICA, 1999: Institute of Clean Air Companies).

Un incinerador térmico sencillo está compuesto por la cámara de combustión y no incluye ninguna recuperación de calor del aire de escape por medio de un intercambiador de calor (a este tipo de incinerador se le refiere como un incinerador recuperativo). El corazón del incinerador térmico es una flama estabilizada por una tobera mantenida por una combinación de combustible auxiliar, compuestos gaseosos de desecho, y aire suplemental añadido cuando sea necesario.

Mientras pasa a través de la flama, el gas de desecho es calentado desde su temperatura precalentada de entrada hasta su temperatura de ignición. La temperatura de ignición varía para diferentes compuestos y por lo general se determina empíricamente. Es la temperatura a la cual la velocidad de reacción de la combustión excede la velocidad de las pérdidas de calor, elevando de esta manera la temperatura de los gases a algún valor mayor.

Por tanto, cualquier mezcla orgánica/aire se encenderá si su temperatura es elevada a un nivel suficientemente alto.

El nivel requerido de control de los COV del gas de desecho que debe ser alcanzado dentro del tiempo que este pasa en la cámara de combustión térmica. Entre más corta sea el tiempo de residencia, más alta deberá ser la temperatura. El tiempo de residencia nominal del gas de desecho reaccionando en la cámara de combustión se define como el volumen de la cámara de combustión dividido por la velocidad del flujo volumétrico del gas.

La mayoría de las unidades térmicas están diseñadas para proporcionar no más que un segundo de tiempo de residencia al gas de desecho con temperaturas típicas de 650 a 1100°C (1200 a 2000°F). Una vez que la unidad es diseñada y construida, el tiempo de residencia no se cambia fácilmente, de manera que la temperatura de reacción requerida se vuelve una función de la especie gaseosa en particular y del nivel de control deseado.

Los estudios basados en datos reales de pruebas de campo, demuestran que los incineradores comerciales deben ser operados generalmente a 870°C (1600°F) con un tiempo de residencia nominal de 0.75 segundo para asegurar el 98% de la destrucción de los orgánicos no halogenados.

b) Incinerador catalítico.

Los incineradores catalíticos operan de una manera muy similar a los incineradores térmicos/recuperativos, con la diferencia principal de que el gas, después de atravesar el área de la flama, pasa a través de un lecho de catalizador. El catalizador tiene el efecto de incrementar la velocidad de la reacción de oxidación, permitiendo la conversión a menores temperaturas de reacción que en las unidades de incineración térmica. Por lo tanto, los catalizadores también permiten un tamaño menor de incinerador. Los catalizadores utilizados típicamente para la incineración de COV incluyen el platino y el paladio. Otras formulaciones incluyen los óxidos metálicos, los cuales son usados en corrientes de gas que contienen compuestos clarinados.

En un incinerador catalítico, la corriente de gas es introducida a una cámara de mezclado donde también es calentada. El gas de desecho generalmente pasa a través de un intercambiador recuperativo de calor donde es precalentado por un gas de post-combustión. El gas calentado atraviesa enseguida el lecho de catalizador. El oxígeno y los COV emigran hacia la

superficie del catalizador por medio de difusión gaseosa y son adsorbidos en los sitios activos del catalizador sobre la superficie del catalizador en donde enseguida ocurre la oxidación. Los productos de la reacción de oxidación a su vez son desorbidos de los sitios activos por el gas y transferidos de vuelta por difusión hacia la corriente de gas.

La materia particulada puede encubrir el catalizador rápidamente de manera que los sitios activos del catalizador son incapaces de ayudar en la oxidación de los contaminantes en la corriente de gas. Este efecto de MP sobre el catalizador se llama blinding (cegado), y al paso del tiempo desactivará el catalizador. Debido a que esencialmente toda la superficie activa del catalizador está contenida en poros relativamente pequeños, la MP no necesita ser grande para cegar al catalizador. No existen reglas generales con respecto a la concentración y tamaño de la MP que puede ser tolerado por catalizadores, porque el tamaño de los poros y el volumen de los catalizadores varían ampliamente. Esta información probablemente se puede obtener de los fabricantes de catalizadores.

El método para hacer el contacto entre la corriente que contiene los COV y el catalizador sirve para distinguir los sistemas de incineración catalítica. Tanto los sistemas de lecho fijo como los de lecho fluido son utilizados.

Los incineradores catalíticos de lecho fijo pueden usar un catalizador monolítico o un catalizador de lecho modular:

- **Incineradores de Catalizador Monolítico:** El método más difundido para hacer contacto entre la corriente que contiene los COV y el catalizador es el catalizador monolítico. En este esquema el catalizador es un bloque sólido poroso que contiene canales paralelos no intersectantes alineados en la dirección del flujo de gas. Los monolitos ofrecen las ventajas de una atrición mínima debida a la expansión/contracción durante el arranque/apagado y una baja caída de la presión total.
- **Incineradores Catalíticos de Lecho Empacado:** Un segundo esquema para hacer contacto es un lecho empacado sencillo en el cual las partículas de catalizador están sostenidas ya sea en un tubo o en bandejas poco profundas a través de las cuales pasa el gas. Este esquema no está en uso muy difundido debido a su caída de presión inherentemente alta, en comparación a un monolito, y el rompimiento de las partículas del catalizador debido a la expansión termal cuando el lecho empacado de catalizador es calentado/enfriado durante el arranque/apagado. Sin embargo, el arreglo tipo bandeja de un

esquema de lecho empacado, en donde el catalizador es granulado, es utilizado por varias industrias (por ejemplo, la impresión en offset de red por solidificación al calor). El catalizador granulado es ventajoso cuando están presentes grandes cantidades de contaminantes tales como los compuestos de fósforo o silicio.

Los incineradores catalíticos de lecho fluido tienen la ventaja de poseer velocidades muy altas de transferencia de masa, aunque la caída de presión total es más bien mayor que la de un monolito. Una ventaja adicional de los lechos fluidos es una alta transferencia del calor al lado del lecho en comparación a un coeficiente normal de transferencia de calor de gases. Esta mayor velocidad de transferencia de calor para calentar los tubos de transferencia sumergidos en el lecho permite mayores velocidades de liberación de calor por unidad de volumen de gas procesado y, por lo tanto, puede permitir que los gases de desecho con mayores valores de calentamiento sean procesados sin exceder las temperaturas máximas permisibles en el lecho de catalizador.

En estos reactores el aumento de la temperatura de la fase gaseosa desde la entrada del gas a la salida del gas es bajo, dependiendo del grado de transferencia de calor a través de las superficies de transferencia de calor incrustadas en el lecho. Las temperaturas de los catalizadores dependen de la velocidad de reacción ocurriendo en la superficie del catalizador y la velocidad de intercambio de calor entre el catalizador y las superficies de transferencia de calor incrustadas en el lecho.

Como regla general, los sistemas de lecho fluido son más tolerantes a la MP en la corriente gaseosa que los catalizadores ya sea de lecho fijo o monolítico. Esto es debido al roce constante de los gránulos fluidizados de catalizador entre sí, que ayudan a remover la MP del exterior de los gránulos de manera continua. Una desventaja del lecho fluido es la pérdida gradual de catalizador por atrición. Sin embargo, se han perfeccionado catalizadores resistentes a la atrición para superar esta desventaja.

Quemador.

a) Elevado.

La eliminación adecuada de los gases residuales de proceso, durante condiciones de rutina y/o de emergencia es crucial para proteger las instalaciones, a los empleados de la planta y la comunidad circundante. La quema es un método práctico y aceptado, utilizado para gestionar de forma

segura los gases de proceso. Sin embargo, esta práctica está bajo un mayor escrutinio.

La quemado es un proceso de control por combustión en el cual los gases de desecho son conducidos por medio de una tubería usualmente elevada a una localidad remota, y quemados en una flama abierta al aire libre utilizando una boquilla de quemador diseñada especialmente, combustible auxiliar y vapor o aire para promover el mezclado para obtener una destrucción casi completa (>98%). La totalidad de la combustión en un quemador está gobernada por la temperatura de la flama, el tiempo de residencia en la zona de combustión, el mezclado turbulento de los componentes de la corriente de gas para completar la reacción de oxidación, y oxígeno disponible para la formación de radicales libres. Una combustión es completa si todos los elementos son convertidos a bióxido de carbono y agua. La combustión incompleta tiene como consecuencia que algunos elementos no sean convertidos a otros compuestos.

Los quemadores se categorizan por lo general de dos maneras: (1) Por la altura de la boquilla del quemador (esto es, al nivel del suelo o elevadas), y (2) por el método de mejorar el mezclado en la boquilla del quemador (esto es, asistidas por vapor, aire o presión, o no asistidas). La elevación del quemador puede evitar condiciones potencialmente peligrosas al nivel del suelo donde la flama abierta (o sea, la fuente de ignición) está localizada cerca de unidades de proceso. La elevación del quemador también permite que los productos de combustión sean dispersados por encima de las áreas de trabajo para reducir los efectos del ruido, calor, humo, y olores indeseables.

En la mayoría de los quemadores, la combustión ocurre por medio de una flama de difusión. Una flama de difusión es aquella en la cual el aire se difunde a través del límite entre la corriente de combustible y la corriente del producto de combustión hacia el centro del flujo de combustible, formando la envoltura de una mezcla combustible alrededor de un núcleo de gas combustible. Esta mezcla, al encendido, establece una zona de flama estable alrededor del núcleo de gas sobre la boquilla del quemador. Este núcleo interno de gas es calentado por la difusión de los productos de combustión desde la zona de la flama.

El craqueo puede ocurrir con la formación de pequeñas partículas calientes de carbón que imparten a la flama su luminosidad característica. Si existe una deficiencia de oxígeno y si las partículas de carbón son enfriadas por debajo de su temperatura de ignición, se genera humo. En flamas grandes de

difusión, se pueden formar vórtices de producto alrededor de las porciones encendidas del gas y obturar el suministro de oxígeno. Esta inestabilidad localizada causa el parpadeo de la flama, la cual puede estar acompañada de la formación de hollín. Como en todos los procesos de combustión, se requiere un suministro de aire adecuado y un buen mezclado para completar la combustión y minimizar el humo. Los diferentes diseños de quemadores difieren, principalmente en su realización del mezclado.

Los quemadores asistidos por vapor son boquillas de quemado individuales, elevadas sobre el nivel del suelo por razones de seguridad, queman el gas venteado en una flama de difusión. De acuerdo a reportes, comprenden a la mayoría de los quemadores instalados y son el tipo predominante de quemadores que se encuentra en las refinerías y plantas químicas. Para asegurar un suministro de aire adecuado y un buen mezclado, este tipo de sistema de quemadores inyecta vapor dentro de la zona de combustión para promover la turbulencia para el mezclado y para inducir al aire hacia dentro de la flama.

Algunos quemadores utilizan el aire forzado para proporcionar el aire para la combustión y el mezclado requerido para una operación sin humo. Estos quemadores son construidos con un quemador en forma de araña (con muchos orificios de gas pequeños) localizados dentro pero cerca de la parte superior de un cilindro de acero de 0.6 metros (24 pulgadas) o más de diámetro.

El aire de combustión es proporcionado por un ventilador al fondo del cilindro. La cantidad de aire de combustión puede ser variada al variar la velocidad del ventilador. La ventaja principal de los quemadores asistidos por aire es que pueden ser utilizados donde no hay vapor disponible. Aunque la asistencia por aire por lo general no se usa en los quemadores grandes (porque generalmente no es económico cuando el volumen de gas es grande).

El quemador no asistido, consiste de una boquilla de quemado sin alguna provisión auxiliar para mejorar el mezclado de aire hacia dentro de su flama. Su uso está limitado a las corrientes de gas que tienen un contenido bajo de calor y una proporción baja de carbón a hidrógeno y que, como resultado, arden fácilmente sin producir humo. Estas corrientes requieren de menos aire para su combustión completa, poseen temperaturas de combustión menores que minimizan las reacciones de craqueo, y son más resistentes al craqueo.

Los quemadores asistidos por presión utilizan la presión de la corriente de venteo para promover el mezclado en la boquilla del quemador. Varios

vendedores ya ofrecen en el mercado diseños de marca de boquillas de quemador con alta caída de presión.

Si se encuentra disponible una presión suficiente de la corriente de venteo, estos quemadores pueden ser aplicadas a corrientes que previamente requerían asistencia de vapor o aire para una operación sin humo. Los quemadores asistidos por presión generalmente (más no necesariamente) tienen el arreglo del quemador al nivel del suelo, y por consecuencia, deben ser colocadas en un área remota de la planta donde haya bastante espacio disponible.

Poseen cabezales de quemado múltiples que están dispuestos para operar basándose en la cantidad de gas siendo liberada. El tamaño, diseño, número, y ordenación del grupo de cabezales de quemado dependen de las características del gas de venteo.

Un quemador encerrado tiene sus cabezales situados dentro de un caparazón que está aislado internamente. El caparazón reduce el ruido, la luminosidad, y la radiación de calor y proporciona protección contra el viento. Los quemadores encerrados, o asentados en el suelo son usados por lo general en vez de los quemadores elevados por razones de estética o de seguridad. Un alta caída de presión en el inyector suele ser adecuada para proporcionar el mezclado necesario para una operación sin humo y no se requiere la asistencia de aire o vapor.

En este contexto, los quemadores encerrados pueden ser considerados como una clase especial de quemadores asistidos por presión o no asistidos. La altura debe ser adecuada para crear suficiente succión natural para suministrar el aire suficiente para una combustión sin humo y para la dispersión. Estos quemadores siempre están al nivel del suelo.

Los quemadores encerrados generalmente tienen menos capacidad que los quemadores abiertos y son utilizados para quemar corrientes continuas y de flujo constante, aunque una operación confiable y eficiente se puede lograr a través de un amplio rango de capacidad de diseño.

Una combustión estable puede ser obtenida con gases de venteo con un menor contenido de calor de lo que es posible con diseños para quemar de manera abierta (1.9 a 2.2 MJ/m³ (50 a 60 Btu/scf)), probablemente debido a su aislamiento de los efectos del viento. Los quemadores encerrados son utilizados típicamente en rellenos sanitarios para destruir los gases del relleno.

V.7 COMPARACIÓN TECNOLÓGICA.

A continuación se muestra la tabla 5.1 donde se compara las tecnologías comerciales.

QUEMADOR	INCINERADOR
Puede recibir una corriente de gas continua y de emergencia	Recibe una corriente de gas continua, con mínimas fluctuaciones.
La eficiencia de la combustión depende de la composición del gas y de las condiciones ambientales. La eficiencia máxima es del 98 a 99%.	Mantiene un 99.9% de eficiencia de combustión en todo momento.
Las temperaturas alcanzadas en la boquilla de quemado son hasta 1100 °C	Las temperaturas son mayores a 1100 °C.
Los materiales a emplear en la boquilla son de aleaciones especiales	El interior es de material cerámico.
Las velocidades altas del viento pueden ocasionar que algunos gases se escapen sin ser quemados, pero facilitan su dispersión.	La combustión se produce en un lugar cerrado que no es afectado por los vientos.
Presenta dificultad para quemar gases que contienen VOC's.	Las altas temperaturas queman de manera eficiente gases que contienen VOC's.
Las gotas de líquido arrastradas se queman y se pueden precipitar al mar.	El incinerador puede ser diseñado para quemar líquido, por medio de espreas.
Llama visible, problemas de humo.	Sin llama visible y sin problemas de olor.
Alta radiación de calor a nivel de piso.	Baja radiación de calor a nivel de piso por uso de una cámara de combustión cerrada. Los gases de escape presentan temperaturas altas.
Costos de operación y mantenimiento menores.	Altos costos de operación y mantenimiento
Su localización debe estar alejada de las instalaciones. En caso de falla o apagado de la flama, la concentración de la nube de contaminantes no afectaría al personal debido a la dispersión con los vientos.	Su localización puede ser más cercana a las instalaciones. En caso de falla o apagado de la flama, la concentración de la nube tóxica pone en riesgo al personal.
Requiere un trípode alejado de la plataforma para mantener niveles de radiación mínimos recomendados.	Requiere un trípode alejado de la plataforma para mantener niveles de concentración mínimos recomendados.
Requiere dos sistemas de encendido electrónico diferentes.	Es un equipo crítico en su operación y por esa situación se necesita un incinerador de relevo.

Tabla 5.1 Comparación de tecnologías. (Jose Fernando Carrasco Lugo).

Capítulo VI

EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA.

El quemado de gas es una operación común dirigida a la conversión de los gases inflamables, tóxicos, y corrosivos a descargas ambientalmente aceptables. El diseño apropiado y la operación del quemador para proteger el medio ambiente cuando se usa para disponer gases de desecho, depende de la composición del gas y las condiciones de operación. La temperatura depende de la localidad y la temporada del año.

Existen muchos medios para asistir la operación de un quemador dependiendo de las instalaciones disponibles. Consecuentemente el diseño debe tener un gran cuidado y la aplicación debe ser ingeniada para asegurar un óptimo funcionamiento.

El número Mach (M), conocido en el uso coloquial como Mach, es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto. Dicha relación puede expresarse según la ecuación:

$$M = \frac{V}{V_s}$$

V_s es un valor que depende del medio físico en el que se transmite el sonido.

La utilidad del número de mach reside en que permite expresar la velocidad de un objeto no de forma absoluta en km/h o m/s, sino tomando como referencia la velocidad del sonido, algo interesante desde el momento en que la velocidad del sonido cambia dependiendo de las condiciones de la atmósfera. Por ejemplo, cuanto mayor sea la altura sobre el nivel del mar o menor la temperatura de la atmósfera, menor es la velocidad del sonido. De esta manera, no es necesario saber la velocidad del sonido para saber si un avión que vuela a una velocidad dada la ha superado: basta con saber su número de mach.

Normalmente, las velocidades se clasifican según su número de Mach en:

- Subsónico $M < 0,7$
- Transónico $0,7 < M < 1,2$
- Supersónico $1,2 < M < 5$
- Hipersónico $M > 5$

VI.1 EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA.

Las instalaciones costa fuera (offshore) emplean sistemas de quema para disponer de los gases residuales de una manera segura y ambientalmente consciente, para proteger al personal y equipo. Para los quemadores que utilizan una presión alta han sido las más eficientes para controlar las emisiones. Estos quemadores utilizan la energía asociada con la alta presión del gas para el mezclado de grandes cantidades de aire de combustión dentro de las flamas. El aireado de las flamas es corto y altamente direccional con baja radiación. Los quemadores que utilizan en su diseño una alta presión caen en las siguientes tres categorías:

1. **Alta eficiencia.** Múltiples-boquillas sónicas (ver figura 6.1), tienen una variedad de pequeños diámetros ramificados, para separar el flujo del gas a quemar en boquillas individuales. Cada brazo está equipado con una boquilla de chorro convergente diseñada para descargar el gas a velocidad sónica. el flujo sónico y largas cantidades de aire mezclado dentro de la columna de gas crea un aireado, flama de baja radiación.

Quemador sónico múltiples boquillas

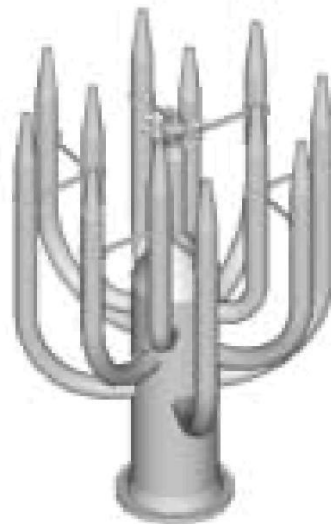


Figura 6.1 Quemador sónico múltiples boquillas [18] OIL & GAS JOURNAL MAY 6.

2. **Quemador Coanda.** Emplean el efecto Coanda (ver figura 6.2), para arrastrar y mezclar aire para la corriente de gas dentro del quemador. El quemador expulsa gas a alta presión radialmente desde una ranura anular en la base de un perfil Coanda. En lugar de continuar

horizontalmente, el gas se adhiere al perfil Coanda y se desvía 90°, entrando grandes volúmenes de aire en el proceso.

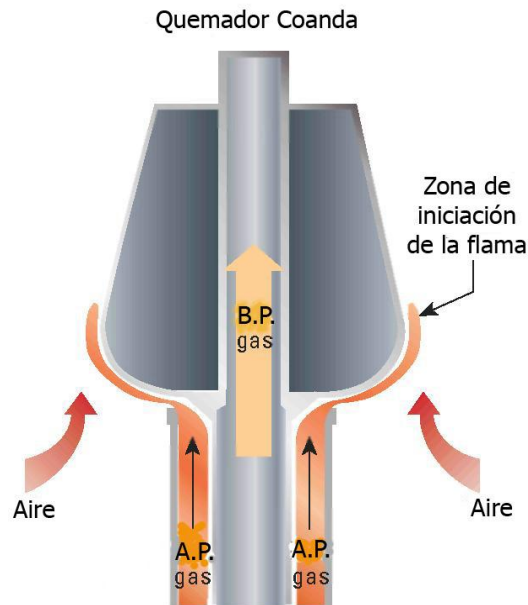


Figura 6.2 Quemador Coanda [18] OIL & GAS JOURNAL MAY 6.

3. Quemadores supersónicos alta presión de múltiples boquillas (ver figura 6.3), son relativamente nuevos en la industria. Sus boquillas convergentes- divergentes crean un flujo de gas supersónico que aumenta la aspiración de aire en comparación con las boquillas sónicas convencionales.

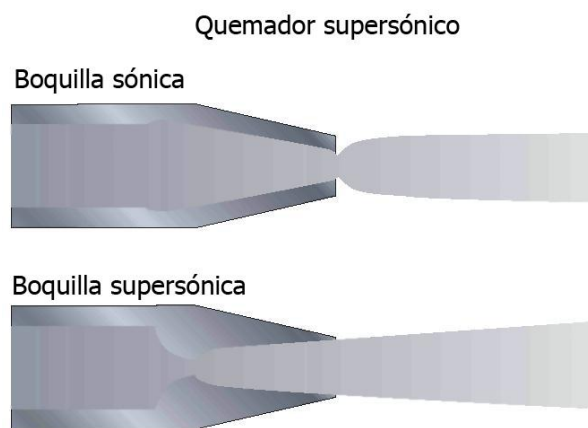


Figura 6.3 Quemadores supersónicos [18] OIL & GAS JOURNAL MAY 6.

Un sistema de quemado consiste en muchos componentes como puntas del quemador (flare tip), pilotos, tanques de sello, sistema de encendido para el

quemador, control automático etc. Un método general para el diseño de un quemador, por lo tanto el diseño se concentra en el diámetro de la punta del quemador (flare tip), la altura del quemador y el espaciamiento del quemador.

Para el diseño se consideran suposiciones básicas las cuales son:

- Velocidad de salida de la punta del quemador (flare tip) correspondiente a un número de Mach de 0.5.
- Forma de la flama puede describirse efectivamente como un cilindro delgado.
- Inclinação de la flama es la suma vectorial del gas de salida y la velocidad del viento.
- Un centro de radiación que tiene las mismas propiedades geométricas como la flama se encuentra localizada en un tercio de la longitud de la flama desde la punta del quemador (flare tip).

En primer lugar, la altura, H, del quemador que ha de ser diseñada debe ser considerada. Haciendo referencia a la figura. 6.4, la distancia, R, entre el centro del resplandor de la flama y un punto bajo esta consideración puede ser determinada por la siguiente ecuación:

$$R = \left(\frac{E * Q * HV * SF}{4 \pi K} \right)^{1/2} \dots\dots Ec. 6.1$$

R = Distancia desde el centro de radiación hasta un punto de referencia, en pies.

E = Emisividad aparente (0.12 para un quemador operando en espacio abierto).

Q = Flujo del gas, en PCSH.

HV = Valor neto de calentamiento, en BTU/pie³.

K = Radiación permisible, en BTU/ pie²-hr. (140 BTU/ pie²-hr para humanos).

SF = Factor del diseño de la forma.

La flama se puede inclinar por el viento, haciendo que el centro de radiación se desplace en la dirección del viento. El ángulo entre la radiación de flama

entrante y una línea perpendicular a esa superficie es el ángulo de incidencia, α (ver figura 6.5). El ángulo de inclinación de la flama debido al efecto del viento es el ángulo de inclinación de la flama, θ . La suma de estos ángulos es el ángulo de visión, Φ . El factor de forma de radiación es entonces:

$$SF = \text{Sen } \Phi \dots\dots \text{Ec. 6.2}$$

Donde:

$$\Phi = \alpha + \theta \dots\dots \text{Ec. 6.2A}$$

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{V_w}{V_g} \right) \dots\dots \text{Ec. 6.2B}$$

V_w = Velocidad del viento.

V_g = Velocidad del gas desde la punta del quemador (flare tip).

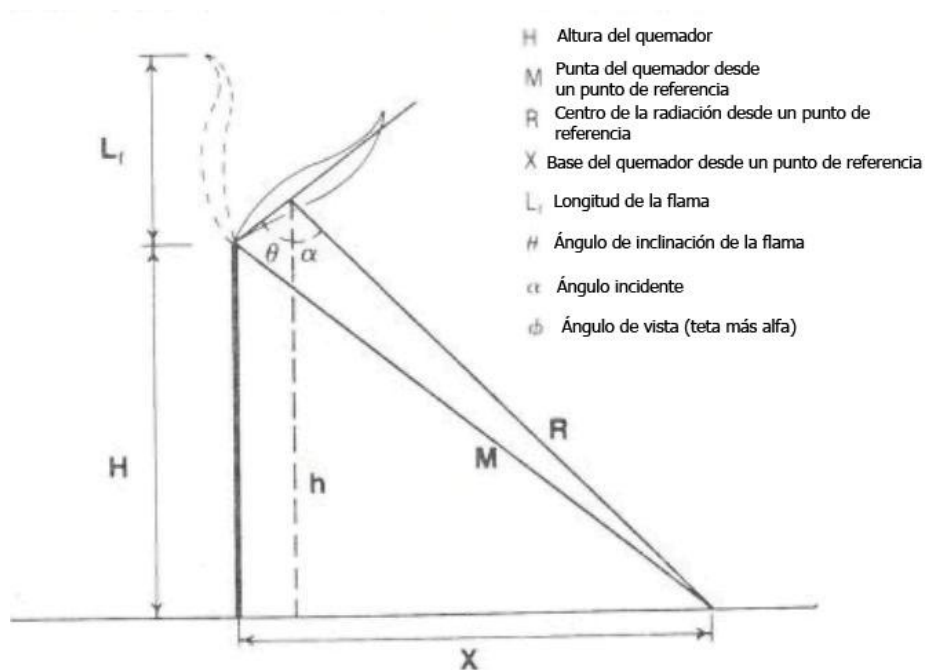


Figura 6.4 Quemador bajo los efectos del viento. [19] GAS FLARE STACK DESIGN FOR OFFSHORE PRODUCTION FACILITIES.

El ángulo de visión correspondiente al punto de máxima radiación en una línea (en lo sucesivo denominada la línea de referencia) a lo largo de la

dirección del viento perpendicular a la base del quemador es de suma importancia para el diseño de la chimenea del quemador. Este ángulo puede ser fácilmente encontrado en la figura. 6.5.

La relación presentada por la figura. 6.5 puede ser derivada teniendo en cuenta la intensidad relativa de radiación, I_r , como la relación del resplandor en cualquier punto de la chimenea a favor del viento directamente debajo del centro del resplandor, que es a la altura, h , por encima del suelo (ver figura 6.4).

$$I_r = \frac{h^2}{R^2} \text{Sen} (\theta + \alpha) \dots\dots \text{Ec. 6.3}$$

$$I_r = \text{Cos}^2 \alpha \text{ Sen} (\theta + \alpha) \dots\dots \text{Ec. 6.4}$$

O donde:

h = Distancia de base para el cálculo de intensidad relativa, en pies.

R = Distancia desde el centro de radiación hasta un punto de referencia (ver figura 6.4), en pies.

La intensidad máxima de radiación se encuentra por cálculo.

Permite:

$$\frac{dI_r}{d\alpha} = 0 \dots\dots \text{Ec. 6.5}$$

Por lo cual:

$$\frac{3 \text{Sen} 2\alpha}{3 \text{Cos} 2\alpha - 1} = \text{Cot} \theta \dots\dots \text{Ec. 6.6}$$

La ecuación 6.6 se ilustra gráficamente en la figura 6.5 que muestra el ángulo de visión del punto de máximo resplandor en la línea perpendicular a través de la base del quemador en la dirección del viento. El ángulo de vista,

entonces se utiliza en la ecuación 6.2 para calcular el factor de forma de diseño.

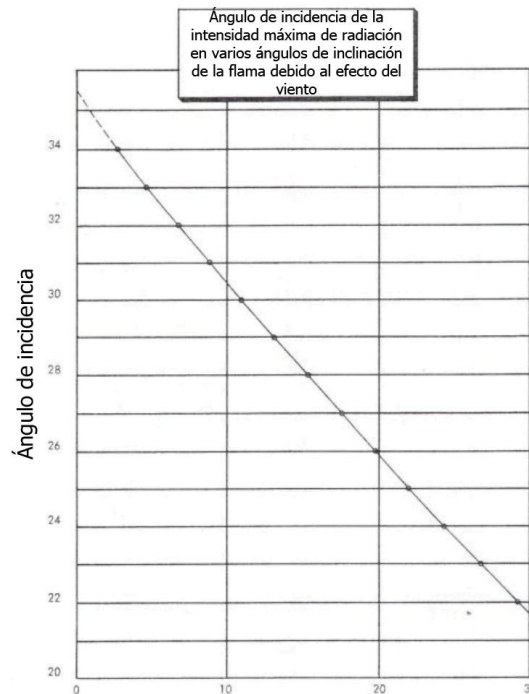


Figura 6.5 Ángulo de incidencia de la intensidad máxima de radiación en varios ángulos de inclinación de la flama debido al efecto de viento. [19] GAS FLARE STACK DESIGN FOR OFFSHORE PRODUCTION FACILITIES.

Determinación de la altura.

Desde el concepto anterior con la ayuda de la figura 6.4, puede verse que la altura del quemador se puede determinar por la siguiente relación:

$$H = R \cos \alpha - \frac{L_f}{3} (\cos \theta) \dots\dots Ec. 6.7$$

Esta expresión asume que el centro del resplandor se produce a una distancia $L_f / 3$ por encima de la punto del quemador (flare tip). L_f es la longitud de la flama.

Espaciamiento del quemador.

Algunos quemadores necesitan ser situados a cierta distancia lejos de la zona de la instalación cuando la tasa de flujo de gas es en exceso de 25 millones PCSD. La determinación de este espacio se ve fácilmente en la figura 6.4, que tiene la siguiente relación:

$$M^2 = R^2 + (L_f)^2 / 3 - (2/3) L_f R \cos(\theta + \alpha) \dots\dots Ec. 6.8$$

$$X = \sqrt{M^2 - H^2} \dots\dots Ec. 6.9$$

Donde X es el espacio del quemador, L_f , es la longitud de la flama.

Longitud de la flama.

Es de interés señalar que la longitud de la flama aumenta cuando el flujo de gas se reduce lo suficiente para causar un cambio en la zona laminar. Después de alcanzar una longitud máxima, la flama vuelve a disminuir a medida que disminuye flujo. Las características de este fenómeno se ilustran en la figura 6.6.

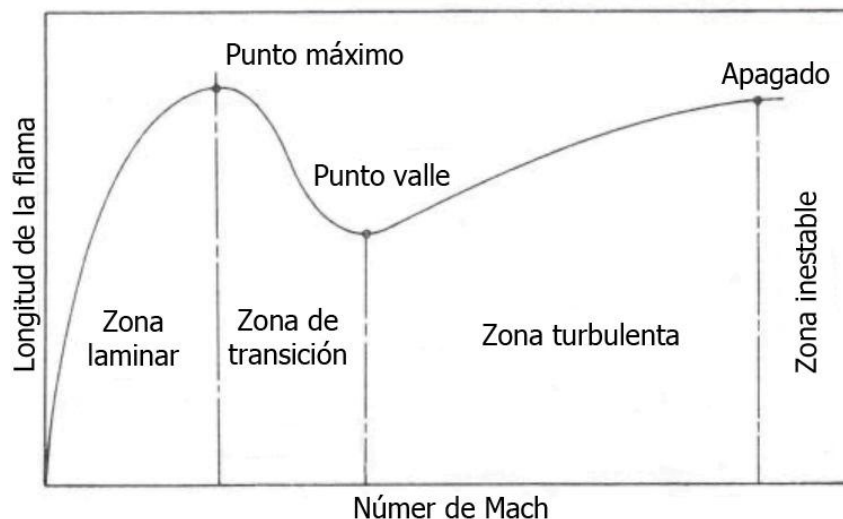


Figura 6.6 Características de combustión de las flamas, de descarga de una tubería circular con un aire quieto y sin mezcla previa. [19] GAS FLARE STACK DESIGN FOR OFFSHORE PRODUCTION FACILITIES.

El número de Mach es un grupo adimensional expresado como (V/V_a) que es la relación de la velocidad del gas a la velocidad acústica del gas. Con un aumento en el número de Mach, la longitud de la flama se incrementará a un determinado pico dentro de la zona laminar. Generalmente, el número de Reynolds es menor a 3,000.

Cuando el número de Mach continúa aumentando a un mismo diámetro de la punta de descarga del quemador, la flama se reducirá a un cierto punto de valle dentro de la zona de transición. El número de Reynolds en esta zona de transición está en el intervalo de 3,000 a 5,000. Si se continúa incrementando el número de Mach a un punto de apagado dentro de la zona turbulenta dará lugar a una muy corta flama, o de tipo jet. Cuando el número de Mach es lo suficientemente grande como para definir la zona inestable, la flama se apagará y continuamente se extinguirá. Dependiendo del tipo de quemador empleado, la máxima velocidad permisible de salida del gas puede variar desde 0.2 a 0.5 Mach. Aunque un apagado de la flama puede esperarse a velocidades superiores de 0.2 Mach, quemadores piloto, diseñados adecuadamente, permiten la quema continua a velocidades de salida de 0.5 Mach.

La relación entre el número de Mach y velocidad del gas es:

$$\text{Mach number} = \frac{\text{Velocidad del gas}}{\text{Velocidad sónica en ese gas}} \dots\dots \text{Ec. 6.10}$$

La velocidad sónica en un gas ideal se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$V_s = 223 \sqrt{\frac{n(T_g + 460)}{MW}} \dots\dots \text{Ec. 6.11}$$

Donde:

V_s = Velocidad sónica, en pie/seg.

n = Relación de calores específicos (C_p/C_v).

T_g = Temperatura del gas, en °F.

MW = Peso molecular del gas.

Para el tipo de punta de quemador (flare tip) que permiten una velocidad de salida con un número de Mach de 0.5:

$$V_g = 111.5 \sqrt{\frac{n(T_g + 460)}{MW}} \dots\dots Ec. 6.12$$

Donde:

V_g = Velocidad de salida del gas, en pie/seg.

La relación del flujo volumétrico entre la temperatura y presión se expresa en pie³/seg bajo la siguiente condición:

$$Q_a = \frac{Q(T_g + 460)}{127347 p} \dots\dots Ec. 6.13$$

Donde:

Q_a = Flujo actual del gas, en pie³/seg.

p = Presión del fluido en la punta del quemador (flare tip), en PSIA.

Q = Flujo, en PCSH.

La ecuación 6.13 dividida por la ecuación 6.12 da la sección transversal requerida para la punta del quemador (flare tip), en pies².

$$A = \frac{Q_a}{V_g} = \frac{Q}{1.42 \times 10^7} p \sqrt{\frac{MW(T_g + 460)}{n}} \dots\dots Ec. 6.14$$

Por lo tanto, el diseño del diámetro del quemador se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$d = 0.00359 \left[\frac{MW(T_g + 460)}{n} \right]^{0.25} \sqrt{\frac{Q}{P}} \dots\dots Ec. 6.15$$

Donde:

d = diámetro del quemador, en pulgadas.

Determinación de la longitud de la flama.

La longitud de la flama, en pies, puede ser estimada utilizando la siguiente ecuación:

$$L_f = 10d \sqrt{\frac{\Delta H}{55}} \dots\dots Ec. 6.16$$

Donde:

ΔH = Carga de la velocidad de salida del gas, en pulgadas de agua,

O:

$$L_f = \frac{V_g^2 * MW * P}{3593(T_g + 460)} \dots\dots Ec. 6.16A$$

VI.2 CRITERIOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA.

Entre los criterios de diseño básicos más relevantes de quemadores elevados se tienen los siguientes:

El diámetro del quemador se debe dimensionar con base a la velocidad de salida de los gases y la caída de presión a través de la boquilla, para la condición de flujo máximo.

Se deberá estimar una velocidad adecuada de salida de los gases a quemado para mantener una flama estable.

Para seleccionar la boquilla de quemado se debe determinar la presión máxima, temperatura máxima y la composición de los gases a quemar, así como el tipo de operación, considerando que en las descargas se deberá operar sin emisión de humo y solo en caso de descargas de emergencia por periodos de tiempo muy cortos, puede permitirse la emisión de humo.

La velocidad de salida de los gases a quemar puede ser hasta 0.5 Mach, para los flujos máximos no frecuentes, manteniendo una velocidad de 0.2 Mach para condiciones de operación normal y más frecuentes, en sistemas de baja presión. Sin embargo, la operación a velocidad sónica puede ser apropiada para quemadores de alta presión. Se recomiendan caídas de presión de 2 psig a través de la boquilla de quemado. La altura del quemador se debe determinar con base a la intensidad de calor radiante generado por la flama y al punto en el cual se requiera tener la intensidad de radiación máxima permisible, considerando que a partir del centro de la flama en línea vertical descendente hacia el nivel de piso, se obtienen los valores máximos de radiación.

La estructura que soporta al quemador, deberán soportar un valor de intensidad de radiación de 15.77 kW/m² (5,000 BTU/hr ft²), como mínimo.

A continuación se presenta la tabla 6.3, donde se indican niveles de radiación recomendados para diseño.

No.	Condiciones.	Nivel de radiación permisible. KW/m ² (BTU/hr ft ²)
1	Cualquier localización donde personal está continuamente expuesto.	1.58 (500)
2	Exposición del personal en área de trabajo con ropa apropiada por un corto intervalo de tiempo	4.73 (1,500)
3	Exposición del personal efectuando acciones de emergencia que no dure más de 1 minuto, con ropa apropiada.	6.31 (2,000)
4	Diseño del quemador a cualquier localización a la cual la gente tienen acceso (por ejemplo, al nivel abajo del quemador o una plataforma de servicio cercana a una torre); la exposición será limitada a pocos segundos, suficientes para escape solamente.	9.46 (3,000)
5	Exposición sobre estructuras y áreas donde no haya personal operando, y donde cubiertas para calor radiante estén disponibles (por ejemplo atrás de equipo).	15.77 (5,000)
6	Falla estructural, madera encendida después de aproximadamente 1 minuto.	31.53 (10,000)

Tabla 6.3 Niveles de radiación recomendados para diseño. (Excluyendo la radiación solar).

Debido a que el nivel de radiación permisible está en función del periodo de exposición del personal, se debe considerar el tiempo en que reaccionan las personas en percatarse de una situación de emergencia y el tiempo que se requiere para movilizarse.

En la siguiente tabla 6.4 se muestran los tiempos necesarios para alcanzar el umbral del dolor.

Intensidad de radiación		
BTU/hr ft ²	KW/m ²	Umbral del dolor (seg)
550	1.74	60
740	2.33	40
920	2.90	30
1500	4.73	16
2200	6.94	9
3000	9.46	6
3700	11.67	4
6300	19.87	2

Tabla 6.4 Tiempos de exposición necesarios para alcanzar el umbral del dolor.

En los relevos de emergencia se considera que las personas reaccionan en un tiempo de 3 a 5 segundos y se requieren 5 segundos más, para que el personal se retire del área, por lo que resulta un periodo total de exposición de 8 a 10 segundos.

Cuando se manejan gases tóxicos debe considerarse también que el quemador tenga la altura suficiente para que la concentración de los mismos a nivel de piso, no exceda el límite aceptable de toxicidad en caso de que se extinga la flama del quemador.

El nivel de ruido para los quemadores elevados en la etapa de quemado normal no deberá rebasar los 90 decibeles, considerando que de acuerdo a OSHA este nivel de ruido permisible puede ser tolerado durante 8 horas por día, en un área cercana donde se llevan a cabo trabajos de mantenimiento.

La operación libre de humo del quemador puede llevarse a cabo por varios métodos, incluyendo inyección de vapor de agua, inyección de gases de desecho a alta presión, corriente de aire forzada, esparcido con agua, operación del quemador con un premezclador de quemado o distribución del flujo a través de muchos quemadores pequeños.

Los quemadores elevados con emisión de humo básicamente utilizan una boquilla convencional o también llamada utilitaria, constituida principalmente por un tubo, rompevientos, anillo de retención de flama, brida de montaje, pilotos y conexión de gas a piloto, así como el sistema de encendido de pilotos.

También es recomendable realizar análisis complementarios, dispersión de gases tóxicos, verificando que el quemador tenga la altura suficiente para que la concentración de los mismos a nivel de piso terminado NPT, no exceda el límite permisible de toxicidad.

QUEMADORES DE TIPO SÓNICO.

La boquilla del quemador tipo sónico, fue desarrollada para proporcionar ciertas características de mejora en el quemado, como son: flama corta y direccional con bajos niveles de radiación y combustión sin humo, para reducir la chimenea del quemador y los requerimientos estructurales de soporte. Los quemadores de alta velocidad también llamados sónicos como su nombre lo indica utiliza altas velocidades de salida y momentum para inducir entrada de aire hacia la flama y mejorar el funcionamiento sin el uso de algún otro equipo, tal como sopladores de aire. Para desarrollar esta alta velocidad de salida, el quemador requiere presiones mayores a las usadas en los quemadores convencionales. Adicionalmente, este tipo de quemador es sin humo a la capacidad máxima y puede manejar entradas de líquido hasta de un 20% en peso de la proporción de gas, suministrando una mezcla homogénea de gas y no como tapones de líquido. Algunos diseños tienen brazos múltiples con sus boquillas respectivas de acero inoxidable. Actualmente, el API-RP-521 reconoce ahora que las velocidades sónicas (1.0 Mach) son apropiadas para diseño de quemadores para alta presión. El límite de 0.5 Mach es solo para quemadores de baja presión. También describe las ventajas o bondades del quemado a alta presión y velocidades sónicas. Es importante indicar, que el diseño del quemador de alta velocidad varía significativamente con el tipo de gas y flujo manejado, así como la presión de operación disponible del sistema, además de que actualmente los diseños comerciales son patentes exclusivas de los fabricantes reconocidos en el medio.

CONCLUSIONES.

La velocidad de salida permitida en el quemador es función de la composición del gas a quemar, el diseño del quemador y la presión disponible del gas, estos parámetros están inter – relacionados, es evidente que la estabilidad de la flama puede mantenerse a velocidades relativamente altas dependiendo de las propiedades de la descarga y el tipo de punta del quemador (flare tip) utilizado. Se recomienda que la velocidad en la punta del quemador (flare tip) este limitada por un número de Mach de 0.5, a velocidades bajas puede resultar un quemado lento provocando daños por calor en el quemador (flare tip), la velocidad de salida de la punta del quemador (flare tip) esta en función del valor calorífico del gas.

No es muy habitual contar con incineradores en instalaciones costa fuera. Los incineradores necesitan mantenimiento preventivo por lo menos cada tres meses con una inspección física de sus partes, sin parar la unidad, y de seis meses, donde se realiza cambio de empaques, reparación de refractario, limpieza de mallas de admisión de aire, re calibración de instrumentos, etc., realizando una libranza de la unidad.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] HANDBOOK "CONTROL TECHNOLOGIES FOR HAZARDOUS AIR POLLUTANTS" EP A/625/6-91/0 14 JUNE 1991.
- [2] HANDBOOK OF COMBUSTION VOL.1: FUNDAMENTALS AND SAFETY EDITED BY MAXIMILIAN LACKNER, FRANZ WINTER, AND AVINASH K. AGARWAL.
- [3] BURKE, S.P. AND SCHUMANN, T.E.W., DIFFUSION FLAMES, IND. ENG. CHEM., 20, 998, 1928.
- [4] HOJA DE DATOS - TECNOLOGÍA DE CONTROL DE CONTAMINANTES DEL AIRE EPA-452/F-03-039.
- [5] HOJA DE DATOS - TECNOLOGÍA DE CONTROL DE CONTAMINANTES DEL AIRE EPA-452/F-03-018
- [6] CHARLES E. BAUKAL JR. "THE JOHN ZINK COMBUSTION".
- [7] EPA, 1991.U.S. EPA, OFFICE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT,"CONTROL TECHNOLOGIES FOR HAZARDOUS AIR POLLUTANTS," EPA/625/6-91/014, WASHINGTON, D.C., JUNE.
- [8] "FLARE SYSTEM STUDY", KLETT, M.G. AND J.B. GALESKI. U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, IERL, EPA-600-2-76-079.
- [9] JAVIER ARELLANO DÍAZ "INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA AMBIENTAL", PRIMERA EDICIÓN 2002.
- [10] J.H. POHL AND N.R. SOELBERG "EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL FLARES H₂S GAS MIXTURES AND PILOT ASSISTED FLARES" EPA-600-S2-86-080 DEC. 1986.
- [11] K. BANERJEE, N.P. CHEREMISINOFF, "FLARE GAS SYSTEMS POCKET HANDBOOK"
- [12] NOM-085-SEMARNAT-2011 "CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA FUENTES FIJAS"
- [13] NRF-031-PEMEX-2011 "SISTEMAS DE DESFOGUES Y QUEMADORES EN INSTALACIONES DE PEMEX".
- [14] RICHARD J. REED "NORTH AMERICAN COMBUSTION HANDBOOK VOLUMEN I" THIRD EDITION CLEVELAND 1986.

[15] RICHARD J. REED "NORTH AMERICAN COMBUSTION HANDBOOK VOLUMEN II" THIRD EDITION CLEVELAND 1997.

[16] RISK ASSESSMENT FOR THE WASTE TECHNOLOGIES INDUSTRIES (WTI) HAZARDOUS WASTE INCINERATION FACILITY (EAST LIVERPOLL, OHIO), EPA-905-R97-002G, MAY 1997.

[17] R.J. JOHNSON, F. E. FLYNN, AND P. J. WELLER "OFFSHORE PLATFORM HAZARDOUS WASTE INCINERATION FACILITY: FEASIBILITY STUDY SUMMARY, EPA-600-S2-81-044^a JUNE 1981.

[18] OIL & GAS JOURNAL MAY 6, 2002 EDITION.

[19] LLOYD E. OWEN AND JINN- HUIE HUANG PETROLEUM ENGINEER "GAS FLARE STACK DESIGN FOR OFFSHORE PRODUCTION FACILITIES".

[20] API STANDARD 537 FIRST EDITION, FLARE DETAILS FOR GENERAL REFINERY AND PETROCHEMICAL SERVICE, SEPTEMBER 2003.

[21] ANSI/API STANDARD 521 FIFTH EDITION, PRESSURE-RELIEVING AND DEPRESSURING SYSTEMS, JANUARY 2007.

[22] IRVIN GLASSMAN RICHARD A. YETTER "COMBUSTION" FOURTH EDITION.

[23] DR. ING. E. BRIZUELA – DRA. ING. S. D. ROMANO DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y NAVAL FACULTAD DE INGENIERÍA, COMBUSTIÓN 1^{RA} PARTE AÑO 2003.

[24] CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS (VOL 44, NO 6) FLARE SYSTEM EXPLOSIONS.

ANEXOS.

GLOSARIO

Aireación: Adición y mezcla de aire, el porcentaje de aireación compara la aireación real con la cantidad estequiometrica correcta, por ejemplo, el 60% de aireación primaria en una boquilla de premezcla significa que el 60% del requerimiento estequiometrico de aire se suministra a través del mezclador y de la boquilla y 40% de aire secundario que rodea la boquilla.

Atomización: El proceso de romper un líquido en una multitud de pequeñas gotas.

Apagado de la flama: El fenómeno que se produce cuando una llama se aleja de un quemador. Esto a menudo da lugar a que la llama se extinga. Una flama se apaga cuando la mezcla de combustible-aire que sale del quemador a una velocidad mayor que la velocidad con la que avanza el frente de la flama en la mezcla.

Aire de combustión: Aire requerido para la combustión de los gases en el quemador.

Boquilla del quemador: Accesorio localizado en el extremo de la tubería ascendente o de distribución, donde el combustible y el aire se mezclan a velocidades, turbulencias y concentraciones requeridas para mantener un encendido y una combustión estable.

BBL: Barriles (unidad de volumen).

Contra quemado (burnback): Quemado interno dentro de la punta (tip). Esto es un fuerte resultado de aire en el quemador a bajos flujos de quemado.

Capacidad de diseño del quemador: El flujo máximo de diseño del quemador normalmente expresado en kilogramos por hora o (libras por hora) de una composición específica, temperatura y presión.

Combustión sin humo: Combustión cuya flama está 100 por ciento libre de humo, que corresponde al número cero (0) de la carta de Ringelmann.

Chimenea: Tubería vertical ascendente para descargar los gases producto de la combustión a una altura tal, que se logre la dispersión de contaminantes y se abata la radiación de calor.

Calor disponible: La cantidad bruta de calor liberado en una cámara de combustión.

Cuerpo negro: Un concepto físico teórico de un cuerpo que absorbe toda la energía radiante incidente sobre ella, y que emiten la radiación máxima posible a una temperatura dada.

Combustibles: Materiales que se pueden quemar.

Combustión: Fuego u oxidación rápida.

Dispersión: Una dispersión de los productos de la combustión en una amplia zona para reducir las concentraciones a nivel del suelo de los productos de la combustión.

Dispositivo de retención de la flama: Un medio para prevenir la distorsión de la flama de un quemador.

Difusividad: Una medida de la velocidad con la que el calor se difunde a través de un material, evaluada como k/cp , dividido por la conductividad de calor específico de volumen.

Deflagración: Una reacción química acompañada de un vigoroso desprendimiento de calor.

Detonación: Una reacción química exotérmica que se propaga con tal rapidez que la velocidad de avance de la zona de reacción en el material sin reaccionar, supera la velocidad del sonido (número de Mach > 1.0) en el material que no ha reaccionado, es decir, la zona de reacción es precedida por una onda de choque.

Difusión de la flama: Una flama larga luminosa creada por la difusión lenta de mezcla (mezcla con retraso) de combustible paralelamente y corrientes de aire en flujo laminar, o, en un sentido amplio, cualquier llama de combustión en la que se desprende de la mezcla gradual de aire y gas combustible después de que estos se han introducido por separado en la región de combustión.

Estabilidad de la flama (blow off): La pérdida de una flama estable donde la flama se eleva por encima del quemador. Esto ocurre si la velocidad del combustible excede la velocidad de la flama.

Eficiencia de combustión: El porcentaje de fluido combustible totalmente oxidado en el quemador. En el caso de los hidrocarburos, Eficiencia de combustión es el porcentaje en peso de carbono en el fluido original que se oxida completamente a CO_2 .

Eficiencia de destrucción: El porcentaje en peso del vapor de fluido que puede ser oxidado que es al menos parcialmente oxidado. En el caso de un hidrocarburo, la eficiencia de destrucción es el porcentaje en peso de carbono en el vapor de fluido que se oxida a CO o CO₂.

Encendido directo: La ignición de un piloto por una chispa en el piloto más que por un generador de frente de llama.

Exceso de aire: Aire proporcionado a la flama en exceso para los requerimientos estequiométricos.

Emisividad: Una medida de la capacidad de un material para irradiar energía, la relación (expresada como una fracción decimal) de la capacidad de radiación de un material dado a la de un cuerpo negro. (Un "cuerpo negro" emite radiación a la velocidad máxima posible en cualquier temperatura dada, y tiene una emisividad de 1.0). Suponiendo que la emisividad hemisférica total (todas las longitudes de onda, todas las direcciones) a menos que se especifique lo contrario.

EPA: Agencia de Protección Ambiental.

Flama estable independiente: Una flama que no está en contacto con el propio quemador, pero quema con un frente de flama estable en la proximidad del quemador.

Flama: Masa gaseosa en combustión, que se eleva de los cuerpos que arden y despiden luz de varios colores, acompañada de desprendimiento de energía.

Flama estable: Permanencia de la flama en la punta del quemador, sin cambio o riesgo de caer o desaparecer.

Frente de flama: El plano a lo largo de la cual se inicia la combustión, o la raíz de una flama.

Flotabilidad de sello: Un sello de vapor seco que minimiza el requerimiento de gas de purga necesario para proteger la infiltración de aire. Funciona atrapando un volumen de gas en un compartimiento interno. Esto evita que el aire desplace al gas en el quemador.

Gas auxiliar: Gas combustible que se añade al gas de relevo con el fin de aumentar el valor de calentamiento.

Gas condensable: Un vapor que puede condensarse a la temperatura y presión prevista en el cabezal del quemador durante o después de un evento de quemado.

Gas de purga: Gas (gas combustible o gas inerte) suministrado al sistema de desfuegos para evitar la entrada de aire en el mismo.

Humo: Mezcla visible de gases producida por la combustión incompleta de una sustancia, generalmente compuesta de carbono, y que arrastra partículas en suspensión.

Incineración: Una tecnología de tratamiento en la cual desperdicios son destruidos por medio de incendios controlados a temperaturas altas.

Incinerador: Un horno usado para quemar desperdicios bajo condiciones controladas.

Inflamable: Cualquier material que se enciende fácilmente y quema rápidamente.

Intensidad de combustión: Caudal volumétrico de combustión, la relación de la entrada de energía del combustible en el volumen de flama.

Ignición: El acto de iniciar la combustión.

Lluvia ácida: Una condición resultante de los fenómenos atmosféricos y químicos complejos, a menudo muy lejos de las fuentes originales, en los que las emisiones de compuestos de azufre, nitrógeno y otras sustancias se depositan en la tierra en forma de lluvia, nieve, o niebla.

Liberación de calor: El calor total liberado por la combustión de los gases relevados con basado en el valor de calentamiento bajo, expresada en kilowatts o en unidades térmicas británicas por hora (BTU).

Número de Mach: Es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto.

Opacidad: Cualidad de opaco y se asocia con el número de la carta de Ringelmann, para Ringelmann 1 es el 20 por ciento de opacidad y para Ringelmann 0 es claro.

Peso específico: Densidad, el peso por unidad de volumen de una sustancia.

Piloto: Una pequeña flama utiliza para encender un quemador. Un piloto interrumpido (a veces llamado piloto de ignición) es automáticamente encendido por una chispa cada vez que el quemador principal es encendido. Se quema durante el periodo de la flama-establecida y/o por un periodo de prueba para la ignición y es automáticamente interrumpido al final del quemador principal, periodo establecido de la flama, mientras que el quemado principal permanece encendido.

Purga: Extracción de fluidos indeseables de un equipo, tubería o accesorio.

Presión de operación: Presión manométrica del recipiente a que opera normalmente, la que no debe exceder la presión máxima permisible de trabajo (PMPT) del metal y se mantiene usualmente a un nivel apropiado por debajo del punto de disparo de su dispositivo de relevo o alivio de presión, de tal forma que prevenga frecuentes aperturas.

Presión de ajuste (calibración): Presión de entrada a la cual se ajusta la válvula de relevo para que abra en condiciones de servicio.

Presión de diseño: Es el valor más severo de presión manométrica para un recipiente o componente en condiciones normales de operación a su respectiva temperatura de diseño de metal, usada para el cálculo y diseño del recipiente o componente a presión.

Productos de la combustión: Materia resultante de la combustión, tales como gases de combustión, vapor de agua, y ceniza.

Quemador enclaustrado: Un quemador con uno o más quemadores dispuestos de tal manera que la flama no es directamente visible.

Quemador endotérmico: Un quemador que utiliza energía externa generalmente asistido o enriquecido por gas para mantener la reacción de combustión.

Quemador elevado: Un quemador elevado muy por encima del nivel del suelo. Se eleva para reducir la intensidad de la radiación y para ayudar en la dispersión.

Quemador (flare burner): Parte del quemador donde el combustible y el aire son mezclados a velocidades, turbulentas y concentraciones requeridas para establecer, mantener una ignición apropiada y una combustión estable. Esto también se refiere al quemador (flare tip).

Quemador enclaustrado: Sistema cuyas boquillas de quemado se encuentran en un espacio confinado, ocultando la flama de la visión directa, reduciendo el ruido y radiación de calor.

Quemador elevado: Sistema para disponer en forma segura gases o mezclas de hidrocarburos desfogados, por medio de combustión. Está integrado por la chimenea o tubería ascendente, sellos, boquilla, estructura soporte, principalmente.

Radiación: Transferencia de calor, caracterizado por la transmisión de energía radiante desde una fuente de elevada temperatura hacia un receptor de menor temperatura.

Retroceso de flama: Fenómeno producido cuando la presión de los gases a quemar es menor a la presión atmosférica, permitiendo el ingreso de aire dentro de la boquilla, formando una mezcla combustible o explosiva, que al contacto con la fuente de calor se inflama hacia el interior del sistema.

Reacción exotérmica: Una reacción química que libera calor, tales como la quema de un combustible.

Radiación del cuerpo negro: La tasa teórica de la radiación de un cuerpo negro a una temperatura dada.

Radiación: De un modo de transferencia de calor en la que el calor se desplaza muy rápidamente en línea recta sin calentar el espacio intermedio. El calor puede ser irradiado a través de un vacío, a través de muchos gases, y a través de unos líquidos y sólidos.

Retroceso (flashback): El fenómeno que ocurre cuando un frente de flama se mueve hacia atrás a través de una boquilla de quemado (y posiblemente de vuelta al punto de mezcla). El retroceso (flashback) se produce porque la velocidad de la flama excede la velocidad de la mezcla de combustible-aire a través de la boquilla del quemador.

SCFH: Pies cúbicos estándar por hora.

Sello de aire: Un dispositivo que se utiliza para reducir al mínimo o eliminar la intrusión de aire de vuelta hacia el tubo ascendente de la salida.

Soporte Derrick: Un sistema de apoyo para el quemador elevado que normalmente se utiliza para los quemadores muy altas o cuando el espacio es limitado.

Sobrepresión: Incremento de presión por arriba de la presión de ajuste del dispositivo de relevo. La sobrepresión es llamada acumulación, cuando el dispositivo de relevo se ajusta a la presión máxima permisible de trabajo.

SO_x: Óxidos de azufre.

Temperatura de la flama: Temperatura de flama teórica se calcula de la misma manera como la temperatura de mezcla en caliente, pero por lo general para el aire estequiométrico/combustible. Puede o no puede ser corregida para la disociación.

Temperatura de ignición: La temperatura más baja a la que una mezcla de combustible-aire puede proceder de la flama con una velocidad de oxidación que libera calor más rápido, que se pierde a los alrededores.

Temperatura adiabática de la flama: Una temperatura de la flama teórica calculada, para una condición sin la pérdida de calor.

Temperatura de autoignición: La temperatura más baja requerida para iniciar la combustión de auto-sostenido en la ausencia de una chispa o flama. Se varía considerablemente con la naturaleza, el tamaño, y la forma de la superficie caliente, y otros factores. Algunos vapores pueden encenderse por las superficies a temperaturas tan bajas como 500 °F.

Unidad térmica británica (BTU): La cantidad de energía necesaria para calentar una libra de agua de 59 °F a 60 °F en la presión barométrica estándar = 0.252 kcal = 0.000293 kWh

Velocidad de quemado: La velocidad a la cual el frente de flama viaja dentro de una mezcla combustible sin quemar.

Valor de calentamiento, alto: El calor total obtenido desde la combustión de un combustible especificado a 16 °C (60°F), Incluye el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión de hidrógeno en el combustible. El poder calorífico superior es sinónimo del valor bruto de calentamiento.

Valor de calentamiento bajo: El valor de calentamiento más alto menos el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión del hidrógeno en el combustible. También se conoce como el valor neto de calentamiento.