



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE
MADRID**

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
MECÁNICA**

**ÁREA DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE
FLUIDOS**

PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO DE UNA ANTORCHA EN
INSTALACIONES DE
REGASIFICACIÓN DE GNL**

JULIO 2010

Autor:	David Gómez Fernández
Tutor:	Javier Villa Briongos

A mis Padres y Hermana.

Agradecimientos

Este proyecto, como otros de mi vida, hubiera sido mucho más difícil de llevar a cabo sin el apoyo y ayuda de mucha gente a la que quiero.

Deseo agradecer su apoyo y ayuda a todas esas personas, en primer lugar a mi familia, en especial a mis padres y hermana.

A Ignacio López, por su generosidad, pero sobre todo por su tenacidad y paciencia.

Por supuesto a Domingo Santana y a Javier Villa Briongos.

Y por último, pero no por ello menos importante, a mis amigos, y a toda la gente que considere que ha participado de algún modo, en la construcción de algún proyecto de mi vida.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1	INTRODUCCIÓN.....	9
1.2	OBJETIVOS DEL PROYECTO	9
1.3	ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	9

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1	APLICACIONES DE LAS ANTORCHAS EN EL ÁMBITO INDUSTRIAL	11
2.2	EL PORQUÉ DE LA ANTORCHA: CONTEXTO LEGAL	15
2.2.1	SISTEMAS DE ALIVIO DE PRESIÓN Y EVACUACIÓN DE FLUIDOS	15
2.2.2	ANTORCHAS	19
2.3	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	21

CAPÍTULO 3: EL SISTEMA ANTORCHA

3.1	DEFINICIÓN DE ANTORCHA.....	30
3.2	EL SISTEMA ANTORCHA	30
3.2.1	PROPÓSITOS DEL SISTEMA.....	30
3.2.2	TIPOS DE ANTORCHA	31
3.2.3	CONSIDERACIONES DE SELECCIÓN	39
3.2.4	COMPONENTES PRINCIPALES	40
3.2.5	DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO DE UNA ANTORCHA	41
3.2.6	BASE DEL DISEÑO MECÁNICO.....	63
3.2.7	CRITERIOS DE DISEÑO DEL SISTEMA.....	63
3.2.8	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ANTORCHA EN UNA PARADA DE PLANTA.	64

CAPÍTULO 4: CONSIDERACIONES SOBRE EL PROCESO

4.1	NOTAS SOBRE LOS DATOS COMUNES DEL PROCESO	67
4.1.1	CAUDAL	67
4.1.2	TEMPERATURA	67
4.1.3	PESO MOLECULAR.....	67
4.1.4	PODER CALORÍFICO INFERIOR	67
4.1.5	EMISIVIDAD	68
4.1.6	DIÁMETRO INTERIOR DEL QUEMADOR	70
4.1.7	VELOCIDAD DEL VIENTO	70
4.2	EFFECTOS DE LA RADIACIÓN TÉRMICA EN HUMANOS Y EQUIPOS.....	70
4.2.1	EFFECTOS EN HUMANOS.....	70
4.2.2	EXPOSICIÓN DEL EQUIPO	72

CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE LA ANTORCHA

5.1	BASES DE DISEÑO Y UBICACIÓN DE LA ANTORCHA DENTRO DE LA PLANTA DE REGASIFICACIÓN	73
5.1.1	BASES DE DISEÑO	73
5.1.2	UBICACIÓN DE LA ANTORCHA DENTRO DE LA PLANTA DE REGASIFICACIÓN ..	74
5.2	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE DIMENSIONES.....	76
5.3	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO ACÚSTICO	97
5.3.1	INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO DE RUIDO EN ANTORCHAS	97
5.3.2	APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO ACÚSTICO.....	101
5.4	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	103
5.4.1	ESTIMACIÓN DE LA ELEVACIÓN DEL PENACHO.....	104
5.4.2	MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES.....	109

CAPÍTULO 6: ESTUDIO ECONÓMICO

6.1	INTRODUCCIÓN.....	118
6.2	DESARROLLO DEL PRESUPUESTO.....	118

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1	CONCLUSIONES DEL PROYECTO	125
7.2	TRABAJOS FUTUROS	125

RESUMEN

El porqué de este proyecto fin de carrera, es la necesidad de trasegar y aliviar un caudal de gas natural en una instalación de regasificación en situaciones excepcionales o de emergencia, en las que el resto de sistemas del proceso, no han sido capaces de absorber dicho caudal de gas natural vaporizado.

La antorcha es por consiguiente el sistema de seguridad encargado de procesar todo ese excedente de gas natural, evitando además, su emisión directa a la atmósfera, ya que el venteo es sustituido por una combustión. Por lo tanto, este dispositivo, además de tener una función de seguridad, cumple también con una función medioambiental.

Con el objetivo de diseñar adecuadamente la antorcha, en base a las especificaciones del cliente, y cumpliendo con la legislación vigente, se ha procedido a calcular las dimensiones básicas del sistema basándose en la radiación térmica máxima de diseño a pie de antorcha, y la presión disponible a la entrada de la misma. Para ello, se han utilizado correlaciones de la fluidomecánica extraídas de la fuente bibliográfica *CRANE "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías"*, junto con el procedimiento y recomendaciones que define el estándar "*API Recommended Practice 521*".

También se ha hecho el cálculo para el nivel de presión acústica propio del funcionamiento de la antorcha, y con el objetivo de cumplir con la legislación de ruido. Para esta parte, se han empleado los fundamentos y ecuaciones de la acústica de la asignatura *Mecánica Industrial*, de la titulación cursada por el autor del proyecto, además de las correlaciones específicas provenientes del *know how* del sector específico del fabricante de antorchas.

De igual manera, se ha hecho uso de la aplicación del modelo de dispersión estadístico gaussiano ISC3 (*Industrial Source Complex Model*), para realizar la estimación de las concentraciones en el ambiente de contaminantes producidas por la antorcha, y con la finalidad de cumplir con las directrices medioambientales de la prestigiosa *U.S. Environmental Protection Agency*.

En el presente proyecto, también se han descrito las principales aplicaciones del sistema dentro de las diferentes instalaciones industriales o plantas de proceso, donde son instaladas las antorchas, y se ha hecho hincapié en el funcionamiento de una instalación de regasificación de GNL típica.

A continuación, se ha desarrollado una exposición exhaustiva de todo lo referente al sistema antorcha, concretamente sus funciones, los tipos de antorchas existentes en el mercado, sus componentes y diferentes dispositivos anejos, junto con una descripción de los mismos. Se ha incluido también un glosario de términos, para entender el argot del sector que se ha utilizado en el documento.

Además, se ha hecho un análisis descriptivo de la influencia de los diferentes parámetros involucrados en el proceso sobre la radiación a nivel de suelo, como son el caudal, la temperatura, el tipo de gas procesado, la geometría de la antorcha, etc.

Por último, se ha desarrollado un estudio económico detallado.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los terminales o instalaciones de regasificación de Gas Natural Licuado (GNL) cuentan con grandes tanques de almacenamiento de gas natural en condiciones criogénicas, que requieren de un dispositivo de inertización de gases como es una antorcha, que permita tratar de forma segura para el personal de planta y población aledaña, un determinado caudal de gas ante un fallo de dicha planta.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

La realización de este proyecto persigue los siguientes objetivos fundamentales:

- Familiarización con el sector del Gas y Petroquímico, argot, conceptos, pautas de actuación, etc.
- Familiarización con el flujo de fluidos en tuberías y accesorios, y la pérdida de carga asociada a esos elementos.
- Dimensionamiento de la Antorcha:
 - ✓ Altura de la antorcha.
 - ✓ Diámetro de la antorcha.
 - ✓ Nivel de presión acústica propia del funcionamiento de la antorcha.
 - ✓ Determinación de contaminantes.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Para llevar a cabo los objetivos del proyecto, éste se estructurará en 7 bloques o capítulos cuyo contenido se describe a continuación:

CAPÍTULO 2: Este capítulo está dedicado a hacer un estudio del ‘Estado del Arte’, donde se describen las principales aplicaciones de un sistema de antorcha o antorchas dentro de la industria. También se hace una descripción del marco legislativo de las instalaciones de alivio de sobrepresión dentro de las cuales se encuentran las antorchas. Por último se expone un práctico glosario con los términos oportunos del presente proyecto.

CAPÍTULO 3: En este bloque se hace una exposición exhaustiva de todo lo referente al sistema antorcha, concretamente sus funciones o propósitos, los tipos de antorchas existentes, sus componentes, descripción de los mismos, etc.

CAPÍTULO 4: Esta parte del proyecto se dedica explícitamente a lo relativo al proceso de funcionamiento de una antorcha, como la influencia de los diferentes parámetros involucrados y los efectos de la radiación en el entorno.

CAPÍTULO 5: Dentro de este capítulo se procede a la modelización y el cálculo de una antorcha soportada con *derrick* en una instalación de regasificación de GNL.

CAPÍTULO 6: Aquí se desarrolla la memoria económica para la realización íntegra del proyecto de una antorcha soportada con *derrick* en una instalación de regasificación de GNL.

CAPÍTULO 7: En este capítulo se exponen las conclusiones del proyecto y los trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 APLICACIONES DE LAS ANTORCHAS EN EL ÁMBITO INDUSTRIAL

La legislación actual, en atención a consideraciones medioambientales y de seguridad, obliga a la instalación de dispositivos de inertización de gases (antorchas) en aquellas plantas que generan, almacenan o manipulan gases. Ejemplo de ello pueden ser los **pozos petrolíferos** tanto en tierra como en el mar, **vertederos** de materia orgánica, **estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR)**, **refinerías**, **terminales de regasificación de GNL**, y plantas de producción de biocombustibles entre otros.

En el otro lado se encuentran los países con escasa o nula atención a consideraciones medioambientales, que por negligencia o falta de recursos, optan por la instalación de venteos (emisión de gases hidrocarburos sin combustión), con el evidente riesgo para la población del entorno.

- En la **explotación de yacimientos de petróleo**, era pauta habitual la combustión del gas acumulado en la bolsa de crudo para su inertización, y así garantizar la seguridad del personal de la plataforma o instalaciones de superficie (en el mar - off shore, o en tierra - on shore). Actualmente, de ser rentable, se busca el transporte de dicho gas hasta los puntos de consumo, aunque sigue siendo necesario entre el equipamiento de superficie, la instalación de una antorcha.
- En los **vertederos**, una vez se han clausurado secciones del mismo, la fermentación de la materia orgánica requiere de la inertización de los hidrocarburos generados (Biogás con alto contenido en H₂S y condensados) mediante antorchas de pequeño tamaño. También se recurre a su utilización como combustible por motores de cogeneración, previo tratamiento del gas que elimine componentes dañinos para el funcionamiento de los mismos.
- De igual manera, en las **estaciones de depuración de aguas residuales**, se genera biogás, que requerirá del uso de la antorcha o antorchas para su combustión y eliminación completa. Son de especial aplicación para estas instalaciones, las antorchas de llama oculta, que aportan un mayor período de residencia, y una alta temperatura que garantiza la oxidación completa de todos los hidrocarburos que se derivan a la antorcha.
- Las **refinerías** también requieren de estos dispositivos. Los procesos instalados generan corrientes de subproductos, que de no poder llevarse a hornos diseñados para su aprovechamiento térmico, habrán de ser conducidos a antorcha. En estos casos, suele tratarse de hidrocarburos de difícil tratamiento, y que hace necesaria la ayuda de sistemas de supresión de

humos, o la utilización en algunos casos de incineradores en lugar de antorchas, dada su peligrosidad.

- El uso de **terminales de regasificación de GNL** está experimentando un tremendo auge en ciertos países desarrollados, que se han inclinado por la utilización del gas natural en detrimento del carbón y la energía nuclear. Para que el mercado del gas natural alcance este grado de evolución, es necesario el desarrollo de nuevas infraestructuras gasistas, que aumenten los puntos de entrada de gas al sistema, disminuyendo así los recorridos medios de gas hasta los puntos de consumo, y reforzando a su vez, la capacidad de almacenamiento ante eventuales demandas punta, o incapacidad temporal de alguna de las entradas. Las plantas de regasificación, ofrecen múltiples entradas de esta fuente energética al sistema llamado Red General Básica. El proceso consiste en la recepción, almacenamiento y regasificación del gas natural licuado, en plantas ubicadas en zonas costeras adecuadas, para después realizar la inyección en dicha Red General Básica.



Figura 1: Transporte de GNL a través de barco metanero.

Los buques metaneros como el de la **figura 1** transportan el gas natural licuado desde los países productores hasta la planta de GNL, donde son descargados mediante brazos de descarga (yetis) situados en el atraque de la Planta.

A través de un sistema de tuberías, e impulsado por las bombas del propio buque, el GNL se envía a los tanques de almacenamiento. Durante este proceso parte del GNL se vaporiza (*boil off*) debido a la temperatura de los brazos de descarga y de las tuberías.

Este gas junto con el contenido en el tanque, se devuelve al buque tras pasar por un separador, para así evitar sobrepresiones y depresiones, tanto en el tanque como en los depósitos del buque.

Los tanques de almacenamiento son de tipo criogénico, están aislados del exterior, y en ellos se encuentra el GNL a unos $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a presión ligeramente superior a la atmosférica.

El GNL es impulsado con bombas primarias sumergidas en el propio tanque, acopladas directamente a sus motores de accionamiento, e instaladas en pozos cerca del fondo del depósito de GNL, y hacia las bombas secundarias ubicadas en la zona de proceso. Estas últimas son las que proporcionan al GNL la presión necesaria, para una vez vaporizado, ser emitido a la red. Ambos grupos de bombas son lubricadas y refrigeradas por el mismo GNL.

La vaporización del GNL se realiza en los vaporizadores de agua de mar, que son intercambiadores de calor verticales, abiertos, y en contracorriente, donde el gas circula por los tubos, y el agua de mar procedente de la piscina de captación, resbala por el exterior de dichos tubos. El agua de mar utilizada en el proceso de vaporización, es devuelta al mar experimentando únicamente una disminución de su temperatura en unos $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, debida a la transferencia de calor cedido al GNL.

Para evitar el crecimiento de microorganismos que pudieran alterar el funcionamiento de las instalaciones, se procede a un ligero clorado del agua de mar en la captación mediante hipoclorito sódico.

Existe otro tipo de vaporizadores denominados de combustión sumergida, donde el fluido caliente es un baño de agua calentada por los productos de la combustión del gas en un quemador especial sumergido en el propio baño. Este tipo de vaporizadores sólo funcionan en caso de fallo, o durante las operaciones de mantenimiento de los de agua de mar.

Para abastecer a los centros de consumo donde no ha llegado aún el gas natural canalizado, se dispone de un cargadero para camiones cisternas que transportan el GNL a dichos puntos.

Antes de su emisión a la red, el gas natural se contabiliza en la unidad de medida, y para facilitar su detección en caso de fuga, se le añade una pequeña cantidad de odorizante, concretamente Tetrahidrotiofeno (THT). Este producto es el que dota al gas natural de su olor característico.

Al estar almacenado el GNL en condiciones de equilibrio, tanto las aportaciones de energía (debidas a transferencias de calor del exterior al interior del depósito a través de las paredes, y a transferencias de calor del mismo bombeo), como las disminuciones de presión, dan lugar a la vaporización de un pequeño porcentaje de GNL. Este gas vaporizado (*boil off*) se comprime mediante compresores criogénicos y se envía al relicuador, donde se pone en contacto con GNL, y se condensa incorporándose nuevamente al proceso. De esta forma se evita su emisión a la atmósfera, y el consiguiente derroche.

En situaciones excepcionales o de emergencia, en las que el sistema de compresores y relicuador no son capaces de absorber todo el gas natural vaporizado, se dispone de una antorcha de seguridad diseñada para procesar todo el excedente de gas natural, evitando así su emisión directa a la atmósfera. Esta antorcha, es el objeto de estudio del presente proyecto.

Como última medida de seguridad, en caso de extrema emergencia, los equipos críticos disponen de válvulas de seguridad que ventean en condiciones seguras el gas a la atmósfera.

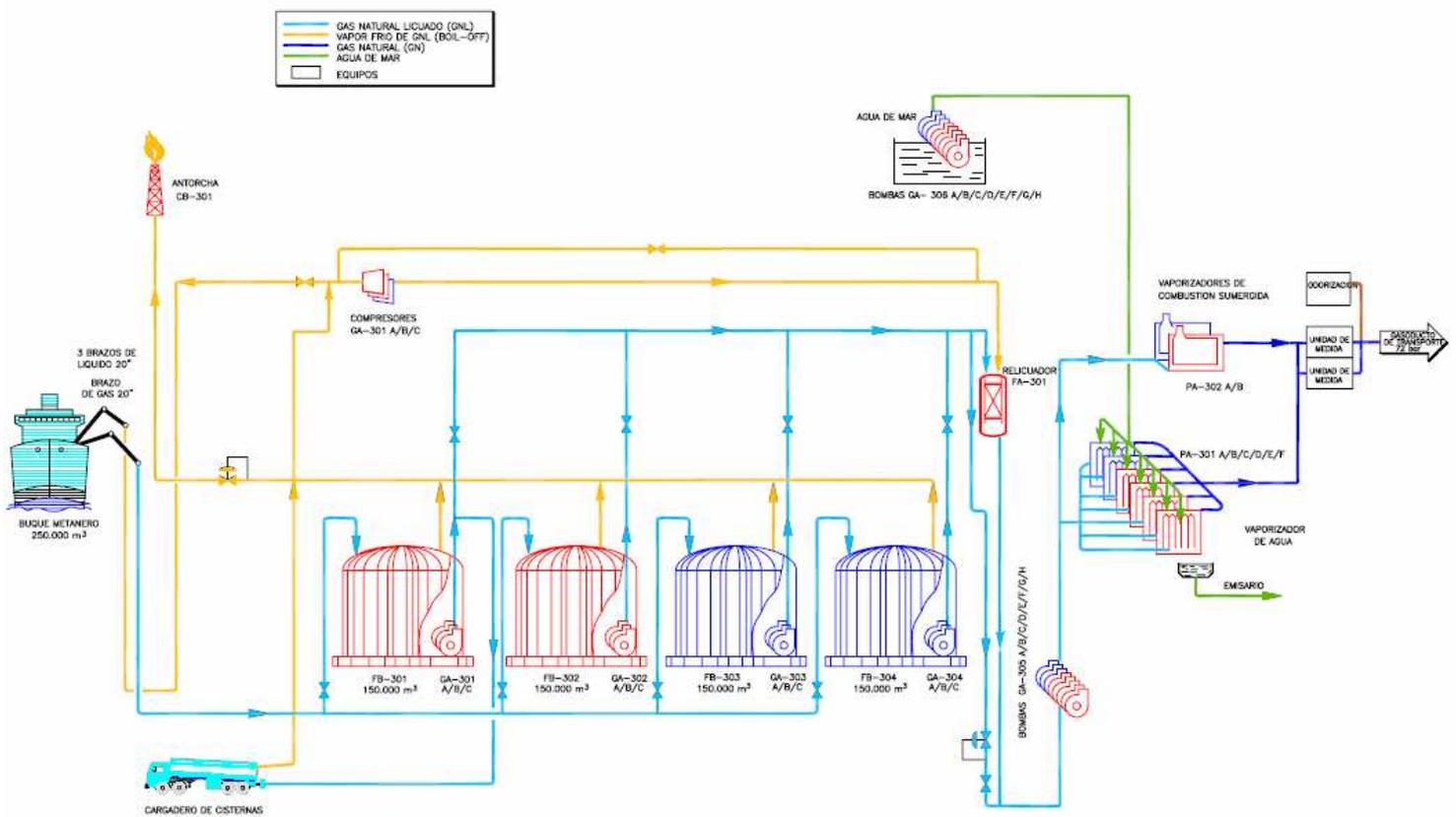


Figura 2: Diagrama de flujo de una planta de regasificación de GNL.

2.2 EL PORQUÉ DE LA ANTORCHA: CONTEXTO LEGAL

2.2.1 SISTEMAS DE ALIVIO DE PRESIÓN Y EVACUACIÓN DE FLUIDOS

Según el artículo 11 de la Instrucción Técnica Complementaria MI IP-01 del Reglamento de Instalaciones petrolíferas, las unidades de proceso de las refinerías deberán tener accesorios e instalaciones apropiadas para descargar los excesos de presión y efectuar las evacuaciones de emergencia de fluidos.

2.2.1.1 INSTALACIONES DE ALIVIO DE SOBREPRESIÓN

Para prevenir que las presiones en el equipo alcancen niveles que puedan producir roturas o fallos mecánicos se diseñarán sistemas de alivio de sobrepresión, normalmente llamados de seguridad, hasta que la presión, en el equipo o circuito que deban proteger, caiga de nuevo dentro de los límites normales de funcionamiento.

- Las instalaciones de alivio de sobrepresión y las de evacuación (ver **1.1.3**) pueden ser comunes en cuanto al trasiego y la retirada de los fluidos evacuados. Los destinos de estos fluidos pueden ser:
 1. Evacuación a la atmósfera (Venteo).
 2. Combustión en una Antorcha.
 3. Sistema especial de evacuación.
 4. Retorno al proceso.
 5. Colector de drenajes, según el carácter de los fluidos y las condiciones bajo las que se evacuan.

- Los sistemas que pueden utilizarse, según los casos son:
 1. Válvulas de seguridad para líquidos y para vapores.
 2. Discos de ruptura.
 3. Portezuelas de seguridad o de explosión.

- Las válvulas de seguridad se instalarán de acuerdo con los requisitos del Reglamento de aparatos a presión. Como norma general, se instalará una válvula de seguridad si hay alguna posibilidad de que se sobrepase la presión de diseño en algún punto de la planta.

Los tubos de descarga de las válvulas de seguridad que evacuen directamente a la atmósfera se prolongarán al menos 2 metros por encima de la plataforma de operación más alta dentro de un radio de 15 metros, con una altura mínima sobre el suelo de 6 metros si se trata de gases de proceso. Si se trata de vapor de agua el radio considerado será de 2 metros.

Cuando la tubería de descarga se extienda en una dirección vertical se le instalará un drenaje para extraer cualquier cantidad de líquidos condensados formados por los escapes de vapor o por agua de lluvia.

Cuando el fluido descargado sea vapor inflamable se instalará en la parte inferior de la tubería de descarga una inyección de fluido dispersante.

Las tuberías de descarga directa a la atmósfera que requieran un dispersante llevarán acoplado en su salida un anillo de distribución provisto de orificios para favorecer el arrastre ascendente de los vapores de proceso.

2.2.1.2 CAPACIDAD Y TIMBRE DE VÁLVULAS DE SEGURIDAD

En la selección de una válvula de seguridad, los principales factores determinantes del tamaño y la presión de timbre de la válvula son, la presión máxima de trabajo, y la presión de operación del equipo protegido, junto con la capacidad de descarga requerida.

Para el cálculo del caudal que será descargado por una válvula de seguridad, se considerarán todas las contingencias que puedan ocurrir en condiciones normales de operación, o alguna variación razonable de ellas, además de las condiciones anormales o de emergencia que puedan darse, tales como fallo de energía eléctrica o de refrigeración y fuego externo.

Las fórmulas apropiadas para el dimensionamiento de las válvulas de seguridad serán de códigos reconocidos, tales como API, ASME, NFPA, etc.

En los casos en que se quite de servicio una válvula de seguridad para su revisión, existirá un procedimiento operativo que garantice la vigilancia continua del equipo afectado, y que contemple las medidas operativas necesarias para mantener el equipo en las condiciones seguras de operación.

2.2.1.3 INSTALACIONES DE EVACUACIÓN

Se preverá poder efectuar la descarga intencionada de vapor o líquidos, por presión autogenerada en el equipo, con uno o varios de los siguientes propósitos:

1. Reducir o controlar la presión no usual, tal como la que pueda producir una reacción química.
2. Vaciar el sistema de su contenido en situaciones de emergencia.
3. Efectuar las purgas previas a los trabajos de mantenimiento.
4. Por otras razones.

Las instalaciones de evacuación complementarán, sin reemplazarlas, a las válvulas de seguridad, y consistirán especialmente en válvulas de evacuación de conexión entre la unidad y las líneas de evacuación a los recipientes receptores desde los que se dispondrá de manera segura de los productos recibidos.

2.2.1.3.1 VÁLVULAS DE EVACUACIÓN

Las válvulas de evacuación estarán instaladas de modo que les sea posible operar bajo condiciones de emergencia.

Los puntos de conexión del sistema a la unidad se estudiarán cuidadosamente, considerando:

- El nivel de emergencia.
- La velocidad de reducción de presión.
- La posibilidad de obstrucciones del fluido en los tubos por depósitos de herrumbre, carbón o similares.

2.2.1.3.2 LÍNEAS DE EVACUACIÓN

Puesto que uno de los requisitos más importantes de los sistemas de evacuación es la reducción rápida de la presión, las líneas del sistema no limitarán esta función.

Cuando varias fuentes de líquido o de vapores descarguen en una línea de evacuación común, ésta deberá estar prevista para la máxima circulación que pueda esperarse, y teniendo en cuenta las condiciones en que sea más urgente la reducción de la presión y la evacuación de los fluidos contenidos en recipientes, como por ejemplo, cuando una parte de la unidad esté envuelta en llamas. Al diseñar las secciones de las líneas de evacuación, deberá considerarse también la posibilidad de que la descarga pueda ser de productos líquidos viscosos o vapores condensables.

Las instalaciones de evacuación deben preverse para reducir la presión en los recipientes con la suficiente rapidez compatible con la seguridad del equipo, suponiendo que toda la presión se alivie por el propio sistema de evacuación.

2.2.1.3.3 CIRCUITO DE EVACUACIÓN

Los circuitos de evacuación para despresurizar los equipos que están sometidos a presión, estarán conformes con los requisitos del Reglamento de aparatos a presión.

Se tendrá en cuenta que los circuitos de evacuación de las distintas instalaciones no interfieran entre sí, para evitar que puedan surgir problemas en una parada de la planta, o que comprometan de algún modo su seguridad.

Si el producto a despresurizar es líquido, o mezcla de gas y líquido, deberá descargarse a través de un recipiente donde la fase líquida pueda separarse.

2.2.1.3.4 OTROS SISTEMAS DE EVACUACIÓN

- **Purgas**

Son conexiones para extraer pequeñas cantidades de líquido que pueda almacenarse en puntos bajos del equipo. Estas conexiones se envían al colector general de drenaje, y en otras ocasiones se conectan al sistema general de evacuación de la unidad.

- **Venteos**

Son conexiones con salida libre a la atmósfera para la descarga de gases o vapores, que operan asociados a trabajos de purga, puesta en marcha, mantenimiento y otros.

2.2.2 ANTORCHAS

Según el artículo 12 de la Instrucción Técnica Complementaria MI IP-01 del Reglamento de Instalaciones petrolíferas, cada refinería o planta de tratamiento de hidrocarburos, deberá disponer al menos de una antorcha como elemento de seguridad.

- La antorcha deberá tener estabilidad y anclaje suficiente y ser de altura conveniente para quemar los gases a distancia suficiente para no constituir peligro. En su base deberá tener un depósito de purga con cierre hidráulico para evitar arrastres de líquidos y retornos de llama, y en su extremo superior un mechero piloto de funcionamiento continuo. Asimismo, llevará un dispositivo de encendido eficaz de mantenimiento simple y construcción robusta, y de un sistema que asegure una presión positiva en el interior del tubo, u otro que impida la entrada de aire que diera lugar a posible atmósfera explosiva.
- Las antorchas recogerán la posible emisión de vapores y gases de proceso, evacuados por los sistemas de alivio de presión y evacuación, en especial los no condensables más pesados que el aire y los tóxicos que se descompongan por el calor. Para su diseño y proyecto, se supondrá una emergencia de los siguientes tipos: fallo de corriente eléctrica en toda la planta, fallo de aire de instrumentación, o una evacuación urgente por siniestro en una unidad. Su cálculo, en cuanto al caudal de gases y altura de la llama y el de la capacidad del depósito separador, se hará con estas suposiciones de emergencia, y debido a las limitaciones del tipo de antorcha elegido, se obtendrá así el número de antorchas a instalar.
- El sistema de antorcha deberá tener un separador de líquidos próximo a la unidad, con el objetivo de retener los arrastres que se produzcan. Las pendientes deberán ser como mínimo del 0,5 % hacia este depósito.
- Cuando la tubería hasta la antorcha requiera la existencia de puntos bajos, para la eliminación del condensado producido, deberán existir depósitos de purga, automática y vigilada, o de capacidad suficiente para retener el máximo condensado producido para la autonomía requerida.
- La altura de la antorcha será función de la cantidad máxima de gases a quemar, y de la altura máxima de llama para la que esté prevista, de modo que, en estas condiciones extremas, la intensidad calorífica de radiación percibida al pie de la antorcha, esté de acuerdo con los valores recomendados en la **tabla 3**. Cuando existan dos o más antorchas, la distancia entre ellas vendrá dada por la combustión normal, no de emergencia, y la intensidad calorífica máxima de radiación percibida a pie de antorcha.
- El diseño del quemador de la antorcha se hará de modo que la combustión de los gases sea total, y la emisión de humos la menor posible para el caso de quemar el tipo de gases más desfavorable. En el cálculo de la altura se tendrá en cuenta la emisión de contaminantes del aire, de modo que, en condiciones

de funcionamiento normal, cumpla con las normas vigentes sobre contaminación atmosférica.

- Las antorchas se instalarán preferentemente en un punto alto del terreno, también se tendrá en cuenta la dirección de los vientos dominantes, y la topografía de dicho terreno, con el fin de que en el caso accidental de apagado de la llama, evitar que los gases afluentes más densos que el aire, queden acumulados en las hondonadas, favoreciendo que se dispersen lo más rápidamente posible.
- Existirá un sistema automático de alarma para funcionar en estos casos de apagado accidental, de modo que una vez ocurrido, pueda procederse a su reencendido por el personal de servicio.
- Si hubiera un sistema de encendido automático, ello no será obstáculo para la existencia del sistema de alarma automático y del encendido manual.
- Los materiales que entren en la construcción de la antorcha serán de la resistencia requerida para soportar altas temperaturas, especialmente en los tramos superiores, y la zona de combustión se diseñará con este objeto específico. Periódicamente se comprobará el estado de esta zona de combustión, y se repondrá en caso necesario.

2.3 GLOSARIO DE TÉRMINOS

A continuación se definen por orden alfabético los términos utilizados en los procesos que intervienen en los Sistemas de Inertización de Gases.

- **AIRE DE ENCENDIDO:** aire a presión empleado únicamente durante la ignición de los pilotos por medio de una llama trepadora, procedente del generador de frente de llama.
- **ALUMEL:** marca registrada usada para denominar la aleación formada aproximadamente por un 95 % de Ni, un 2 % de Mn, un 2% de Al, y un 1 % de Si. Se utiliza en la fabricación de Termopares tipo K.
- **ANTORCHA CON VIENTOS:** una antorcha elevada cuyo fuste se soporta con cables, 3 unidades a 120° por nivel empleado. Este sistema genera un gran abaratamiento con respecto a la sustentación mediante derrick. En algunos emplazamientos no se admite su uso, debido a las fuertes condiciones de corrosión en el ambiente más inmediato, o bien por la escasa disponibilidad de espacio en planta.
- **ANTORCHA DE LLAMA OCULTA:** antorcha que se caracteriza por estar el quemador dispuesto de tal manera que la llama no sea visible, ya que dicho quemador, se encuentra alojado dentro de una cámara de combustión.
- **ANTORCHA DE SUELO:** cualquier antorcha que no sea elevada, como por ejemplo, una antorcha de llama oculta, una antorcha multipunto a nivel de suelo, o un hoyo de quemado.
- **ANTORCHA ELEVADA:** una antorcha cuyo quemador está elevado con respecto del nivel del suelo para así disminuir la radiación y mejorar la dispersión.
- **ANTORCHA ENDOTÉRMICA:** antorcha que utiliza un aporte de energía externa (normalmente asistida, o con gas enriquecido) para mantener la combustión.
- **ANTORCHA MULTIPUNTO:** grupo de quemadores diseñados para entrar en funcionamiento todos o una parte de los mismos, en función del caudal a inertizar con respecto a la capacidad de flujo de diseño. Estos quemadores están dispuestos a menudo en etapas, para facilitar una mejor combustión. Este tipo de antorchas son capaces de funcionar a altos caudales sin humo, y con menores niveles de radiación.
- **ANTORCHA MULTISALIDA:** quemador con varias salidas separadas.
- **ANTORCHA POR ETAPAS:** grupo de dos o más antorchas o quemadores, que se controlan de manera que el número de dichas antorchas o quemadores en funcionamiento, sea proporcional al flujo del gas que se esté aliviando.

- **BALIZAMIENTO:** juegos de lámparas que se colocan en el punto más elevado posible de la antorcha, visibles desde 360° alrededor del equipo, y que son de ayuda a la navegación aérea durante la noche o en días con baja visibilidad.
- **BLOWDOWN:** diferencia entre la presión de tarado y la presión de cierre de una válvula de sobrepresión, expresada como un porcentaje de la presión de tarado o en unidades de presión.
- **CAPACIDAD DE DISEÑO DE LA ANTORCHA:** máximo flujo de diseño de la antorcha, expresado normalmente en kilogramos por hora de una composición concreta a una temperatura y presión dadas.
- **CAPACIDAD LIBRE DE HUMOS:** máximo flujo que un sistema de antorcha puede quemar sin hacer humos. Expresada normalmente en kg / h para una presión y temperatura de un gas específico.
- **CERCADO ANTIVIENTOS:** estructura que rodea y cerca la llama de la antorcha a nivel de suelo, con el fin de modificar el efecto que tienen los vientos cruzados en el proceso de la combustión, además de prevenir accesos no autorizados.
- **CHROMEL:** marca registrada usada para denominar la aleación formada aproximadamente por un 90 % de Ni, y un 10 % de Cr. Se utiliza en la fabricación de Termopares tipo K.
- **COLECTOR:** mecanismo que reúne y/o distribuye un fluido desde y/o hacia varios caminos.
- **COLECTOR DE ANTORCHA:** sistema de tuberías que reúne y transporta los gases a la antorcha.
- **COMBURENTE:** sustancia que participa en la combustión oxidando al combustible, y por lo tanto siendo reducido por este último. El comburente por antonomasia es el oxígeno atmosférico, que se encuentra normalmente en el aire con una concentración porcentual en volumen aproximada del 21%. Para que se produzca la combustión es necesaria la presencia de una proporción mínima de oxígeno, que por regla general va de un 15% hasta en casos extremos de un 5%.
- **COMBUSTIBLE:** cualquier material capaz de liberar energía cuando se quema, y luego cambiar o transformar su estructura química.
- **COMBUSTIÓN:** reacción química en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de calor y luz.
- **CRIOGENIA:** conjunto de técnicas destinadas a la producción de bajas temperaturas.
- **DERRICK:** sistema de sustentación para los fustes de las antorchas elevadas, usados normalmente en antorchas muy altas o con espacio en planta disponible muy limitado. Hay varios sistemas de *derricks*:

- Sistema fijo, que mantiene permanentemente el fuste amarrado al *derrick*.
 - Sistema de *derrick* desmontable, que tiene el fuste en varios tramos para poder ser arriados y retirados permitiendo el descenso a nivel de suelo del quemador.
 - Sistema de *derrick* desmontable, pero con el fuste de un solo tramo, y que puede ser tumbado hasta el suelo para hacer el mantenimiento pertinente.
- **DESCARGA ATMOSFÉRICA:** liberación de vapor y gas desde los mecanismos de alivio y depresión a la atmósfera.
 - **DISCO DE RUPTURA:** elemento de alivio de sobrepresión situado entre bridas, y consistente en un disco de espesor definido por la presión límite en la línea, y a la que dicho disco está diseñado para romper. Esta presión se obtiene experimentalmente de tests destructivos realizados en los lotes de los discos en el momento de su fabricación.
 - **DISPERSIÓN:** difusión de los productos de combustión por encima de un área, para reducir las concentraciones a nivel de suelo de los productos de la combustión.
 - **EDAR:** Estación de depuración de aguas residuales.
 - **EFICIENCIA EN LA COMBUSTIÓN:** el porcentaje del combustible totalmente oxidado en el quemador. En el caso de los hidrocarburos, la eficiencia en la combustión es el porcentaje en peso del carbono del fluido original que se oxida completamente a CO₂.
 - **ENCENDIDO DIRECTO:** encendido de un piloto directamente por medio de chispas emitidas por un electrodo alojado en la corriente de gas a piloto.
 - **ENCENDIDO ELECTRÓNICO:** ver encendido directo.
 - **ENCENDIDO INDIRECTO:** encendido de piloto a través de la generación de un frente de llama desde el nivel del suelo, y que se propaga hasta el quemador para encender la corriente de gas a piloto.
 - **ENCENDIDO SECUENCIAL:** es el que se practica en quemadores de gran diámetro, de tres o más pilotos. El encendido de los mismos se realiza uno tras otro.
 - **ENCENDIDO SIMULTÁNEO:** es el que se practica en quemadores de pequeño diámetro, y de dos pilotos. En este tipo de quemadores, puede realizarse el encendido de ambos pilotos a la vez a través de una sola línea de frente de llama, que se bifurca en dos, para originar sendas llamas en cada piloto.
 - **ENRIQUECIMIENTO:** proceso en el que se añade gas de apoyo al gas de escape.
 - **FLASHBACK:** ver retorno de llama.
 - **FUEGO:** manifestación visual de la combustión.

- **FUSTE:** tubería o conducto que transporta los gases de liberación al quemador de una antorcha elevada, desde el nivel de suelo o nivel de rack de tuberías.
- **GAS CONDENSABLE:** vapor que puede condensar a la temperatura y presión esperadas en la antorcha, durante o después del funcionamiento de la misma.
- **GAS DE ANTORCHA:** gas o vapor, venteado o aliviado hacia un colector que ha de transportarlo hacia la antorcha para su inertización. También se le denomina gas de deshecho, gas venteado/quemado, o vapor de deshecho.
- **GAS DE APOYO:** combustible gaseoso que se añade al gas liberado antes de pasar por el quemador de la antorcha para así incrementar el poder calorífico, y con ello mejorar la eficiencia de la inertización de gases.
- **GAS DE ENCENDIDO:** gas combustible empleado sólo durante el encendido del piloto, vía llama trepadora procedente del generador de frente de llama a nivel de suelo.
- **GAS DE PURGA:** gas inflamable o inerte no condensable que se inyecta normalmente previo a la antorcha, para impedir la entrada de aire a la misma, evitando así que se produzcan mezclas susceptibles de combustión en la antorcha o aguas arriba de ésta.
- **GAS DE SUPLEMENTO:** gas combustible quemado fuera del quemador de la antorcha para facilitar la combustión de los gases de bajo poder calorífico.
- **GAS DE SUPRESIÓN DE HUMOS:** cualquier vapor o aire inyectado sobre la llama de la antorcha con el fin de disminuir los humos.
- **GENERADOR DE FRENTE DE LLAMA:** dispositivo para encendido de pilotos consistente en un conducto o línea, que conecta el generador de frente de llama con el piloto. En el interior de dicho conducto tiene lugar una mezcla de aire con gas combustible en proporciones estequiométricas, que con la generación de una chispa en dicha corriente, provoca la aparición de un frente de llama (en ocasiones denominada llama trepadora) que viaja hasta el piloto, encendiendo de este modo el gas a piloto.
- **GNL:** sigla empleada para referirse al gas natural licuado. Este gas ha sido procesado para ser transportado en forma líquida. Es la mejor alternativa para monetizar reservas en sitios apartados, donde no es económico llevar el gas al mercado directamente ya sea por gasoducto o por generación de electricidad. El gas natural es transportado como líquido a presión atmosférica y a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde la licuefacción reduce en 600 veces el volumen de gas transportado.
- **HOYO DE QUEMADO:** excavación a cielo abierto, que normalmente está equipada con un quemador horizontal, y que puede contener líquidos además de hidrocarburos en fase vapor.

- **INTENSIDAD DE RADIACIÓN:** tasa de calor transferido por radiación por la llama de una antorcha. Dicha tasa esta limitada normalmente a un cierto nivel definido por la ingeniería cliente, y se expresa en kW/m^2 .
- **KO DRUM:** recipiente situado previamente a la antorcha, y concretamente en el colector de la misma. Está diseñado para eliminar y almacenar los líquidos arrastrados y condensados de los gases de liberación.
- **LIBERACIÓN DE CALOR:** calor total emitido en la combustión de los gases de antorcha, basado en el poder calorífico inferior (PCI), expresado en kW.
- **MÁXIMA PRESIÓN NOMINAL ADMISIBLE:** máxima presión relativa admisible en un recipiente en funcionamiento para una temperatura dada. La presión se basa en cálculos para cada elemento del recipiente, empleando espesores nominales. En los sitios donde haya además de la presión del fluido, solicitudes adicionales, así como corrosión, se aumentará el espesor requerido. La presión nominal máxima admisible es la que pone en funcionamiento los mecanismos de alivio de presión que protegen el recipiente.
- **MECANISMO DE RETENCIÓN DE LLAMA:** dispositivo que se emplaza en la descarga del quemador, y que previene el volado o soplado de la llama del quemador, por su alejamiento excesivo del mismo.
- **MONITOR DE LLAMA:** ver sistema de detección de llama.
- **MUERTOS:** elementos de fijación o anclaje de los vientos al suelo del emplazamiento de la antorcha.
- **NÚMERO DE MACH:** cociente entre la velocidad del fluido (medida respecto de algún obstáculo o figura geométrica) y la velocidad de propagación de las ondas del sonido a través de dicho fluido.
- **NÚMERO DE RINGELMANN:** escala usada para definir niveles de gris, entre el blanco y el negro. Al blanco le corresponde el 0 y al negro el 5. Se usa a menudo para describir la intensidad del humo. Comúnmente denominado Índice de Opacidad de la llama, y que es indicativo de la eficiencia en la combustión por parte de la antorcha.
- **PANTALLA ANTIVIENTO:** se usa para proteger el exterior del quemador del contacto directo con la misma llama, evitándose así los frecuentes lametazos directos sobre el cuerpo del quemador por efecto del viento, aumentando por consiguiente la durabilidad del quemador.
- **PERÍODO O TIEMPO DE RESIDENCIA:** tiempo que están los gases en el quemador o cámara de combustión con el objeto de garantizar una eliminación completa de los hidrocarburos. Este parámetro cobra especial importancia en las antorchas encapsuladas o de llama oculta (*ground flares*), y en los incineradores (*thermal oxidizers*). Las primeras, empleadas típicamente para biogas (con posible presencia de dioxinas), y para hidrocarburos complejos los incineradores.

- **PESCANTE:** elemento adosado a la estructura o fuste de la antorcha, que permite el izado o arriado del quemador para su mantenimiento.
- **PILOTO:** quemador de pequeño tamaño (mechero) de funcionamiento continuo, y que provee de energía de ignición a los gases de forma permanente.
- **PODER CALORÍFICO:** cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente, y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión. La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión poder calorífico superior (abreviadamente, PCS) y poder calorífico inferior (abreviadamente, PCI).
- **PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI):** poder calorífico del combustible, descontado el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión del hidrógeno en el combustible. Es también denominado poder calorífico neto, expresado en kJ / kg o kJ / m^3 .
- **PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS):** calor total obtenido de la combustión de un combustible específico a 16°C expresado en kJ / kg o kJ / m^3 . Incluye el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión del hidrógeno en el combustible. El PCS es sinónimo del poder calorífico bruto.
- **PRESIÓN DE DISEÑO DE UN RECIPIENTE:** tiene que ser como mínimo la situación más desfavorable de temperatura y presión relativa que se pudiese dar durante el funcionamiento. Podría ser usada en lugar de la máxima presión nominal admisible en todos los casos donde dicha presión no haya sido establecida. La presión de diseño, es usada en el dimensionamiento de un recipiente, para determinar su espesor de pared mínimo, u otras características físicas de las diferentes partes del mismo.
- **PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO:** presión a la que el recipiente está sometido normalmente en servicio. Un recipiente a presión se diseña normalmente para una presión nominal máxima admisible, que proporcionará un margen conveniente por encima de la presión de funcionamiento, para prevenir cualquier imprevisto indeseable del mecanismo de liberación de gases.
- **PRESIÓN DE TARADO:** presión relativa a la que se calibra la válvula de alivio o de sobrepresión, para que abra en condiciones de servicio.
- **PRESIÓN DE TIMBRE:** ver presión de tarado.
- **QUEMADOR:** la parte de la antorcha donde el combustible y el aire son mezclados a las velocidades, turbulencia y concentraciones requeridas para iniciar y mantener una ignición adecuada y una combustión estable.

- **REFINERÍA:** planta industrial donde se efectúa la transformación del petróleo crudo en productos acabados como gasolinas, gasóleos, querosenos, parafinas, aceites, etc.
- **RETORNO DE LLAMA:** fenómeno que sucede en una mezcla inflamable de aire y gas, cuando la velocidad local de la mezcla llega a ser menor que la velocidad de la llama, causando que la llama retroceda al punto de mezcla.
- **RETROCESO DE LLAMA:** combustión que tiene lugar dentro del quemador, y que puede producirse por ingreso o retorno de aire hacia el interior del quemador durante la purga, o en operación normal, originado por un bajo nivel de caudal de combustible.
- **SELLO DINÁMICO:** mecanismo que reduce el caudal de gas de purga, y cuya finalidad es la de minimizar o eliminar por completo la reentrada inversa o inmisión de aire externo hacia el interior del fuste. Este dispositivo se aloja dentro del quemador.
- **SELLO HIDRÁULICO:** dispositivo al que se dirige el flujo de gases de alivio, en el cual se hacen pasar los gases de antorcha a través de una lámina de líquido (normalmente agua) en su camino hacia el quemador. Se puede emplear para proteger el colector de la antorcha de infiltraciones de aire, retrocesos de llama, para desviar el flujo, u originar contrapresión en dicho colector.
- **SELLO MOLECULAR:** dispositivo que evita la inmisión de aire al interior del fuste de la antorcha, mediante la generación de un sello de gas, para lo cual se requiere un gas de purga que podrá ser más ligero o más pesado que el aire. El principio de funcionamiento consiste en un vaso invertido, que genera un sello de un cierto volumen de gas de purga, y que hace que no entre aire en la antorcha en el sentido inverso a la corriente de gases, y cuya densidad impide el reemplazamiento de dicho gas de purga por aire. Su consumo de gas de purga es inferior al del sello dinámico.
- **SEÑALAMIENTO:** conjunto de bandas, normalmente en blanco y rojo, que se pintan sobre el equipo en el punto más elevado posible, y que son de ayuda a la navegación aérea durante los días con visibilidad normal.
- **SILENCIADOR:** artefacto para mitigar los ruidos.
- **SISTEMA DE DETECCIÓN DE LLAMA:** un sistema que por medio del calor, la luz, el gas ionizado, o el sonido generado por la llama, es capaz de verificar la presencia o no de la misma.
- **SISTEMA DE INERTIZACIÓN:** sistema que tiene por función la descomposición y oxidación completa de gases y líquidos en condiciones de seguridad, reduciendo su afectación a los seres vivos y medio ambiente.
- **SOBREPRESIÓN:** presión por encima de la presión de tarado del mecanismo de liberación de gases, y que se expresa en unidades de presión o como porcentaje. Se puede dar cuando el sistema está funcionando a la máxima presión nominal

admisibles, y hay una acumulación de gas, asumiendo que no hay pérdidas de gas a la entrada de la antorcha.

- **SOPLADO DE LLAMA:** pérdida de estabilidad de la llama como consecuencia de un levantamiento excesivo por encima del quemador, y que puede dar lugar a la desaparición de la misma. Típicamente tiene lugar cuando la velocidad del combustible supera a la de la llama.
- **TERMINAL DE REGASIFICACIÓN:** instalación industrial costera de recepción de Gas Natural Licuado, que permite su almacenamiento, regasificación e inyección en la red general básica.
- **TERMOPAR:** dispositivo formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje, que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o unión caliente o de medida, y el otro denominado "punto frío" o unión fría o de referencia. En instrumentación industrial, los termopares son ampliamente usados como sensores de temperatura, y concretamente en un sistema de antorcha, son usados para detectar la llama de los pilotos, o la llama principal.
- **TETRAEDRO DEL FUEGO:** son los 4 elementos necesarios para que tenga continuidad un fuego: combustible, comburente, energía de activación (calor) y reacción en cadena. Ante la ausencia de cualquiera de estos elementos el fuego se extingue.

Sin embargo, para que se produzca fuego, son suficientes los tres primeros elementos, y que forman el denominado triángulo del fuego.

- **TIP:** ver quemador.
- **TRANSMITIVIDAD:** característica correspondiente al medio circundante a la antorcha, y que corresponde a la fracción de radiación transmitida a través de la atmósfera.
- **VÁLVULA DE LIBERACIÓN DE PRESIÓN:** término genérico aplicado a las válvulas de liberación, válvulas de seguridad, y válvulas de liberación de seguridad. Una válvula de liberación de presión se diseña para volver a cerrar automáticamente y cortar el flujo de un fluido.
- **VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN:** velocidad a la que una llama viaja hacia una mezcla de combustible aún sin quemar. Más comúnmente definida como velocidad de llama.
- **VELOCIDAD DE LLAMA:** ver velocidad de combustión.
- **VELOCIDAD MÁXIMA DE SALIDA:** velocidad instantánea a la que la llama sale del quemador, expresada en m / s, o como un número de Mach.
- **VENT STACK:** dispositivo terminal, vertical y elevado, de un sistema que descarga vapores a la atmósfera sin combustión o conversión del fluido liberado.

- **VERTEDERO:** zona de vertido de basuras para su tratamiento y acondicionamiento.
- **ZONA ESTÉRIL:** área a nivel de suelo dentro de las instalaciones de una antorcha, en la que no puede estar ninguna persona por motivo de nivel de radiación térmica dañina para el ser humano, y que normalmente está vallada por razones de seguridad, para impedir el acceso de personal, salvo en labores de mantenimiento con la antorcha fuera de servicio.

CAPÍTULO 3

EL SISTEMA ANTORCHA

3.1 DEFINICIÓN DE ANTORCHA

Mecanismo o sistema usado para la eliminación de hidrocarburos gaseosos o líquidos mediante combustión, de manera segura y medioambientalmente satisfactoria. Con una antorcha elevada-*Elevated Flare*, la combustión es llevada a cabo a una determinada altura sobre el nivel del suelo, donde están localizados el quemador y el encendedor. Una antorcha de suelo-*Ground Flare* está equipada de manera similar, excepto que la combustión se lleva a cabo a nivel del suelo o cerca del mismo.

3.2 EL SISTEMA ANTORCHA

3.2.1 PROPÓSITOS DEL SISTEMA

Una planta de regasificación o refinería está provista de sistemas de antorcha para tener una segura y eficiente gestión de los gases o líquidos liberados. Los fluidos son reunidos en el colector de la antorcha y conducidos a la misma. Es fundamental en la vida de una planta, tener en cuenta una situación de emergencia como un incendio o un fallo energético. Una antorcha es el sistema crítico que puede evitar que una interrupción en la planta, acabe convirtiéndose en un desastre. Toda antorcha, en principio, está pensada para funcionar las 24 horas del día, y dar un servicio durante varios años sin tener la necesidad de hacer una parada. Estará siempre disponible para quemar los gases de alivio de una instalación industrial, aunque haya una parada o interrupción de la misma durante su normal funcionamiento.

El diseño, funcionamiento, y mantenimiento apropiados de los sistemas de emergencia de las antorchas, son extremadamente importantes, ya que son un elemento de seguridad para el personal de la planta y la comunidad circundante.

Cualquier sistema de antorcha debe ser diseñado para conseguir desempeñar las siguientes funciones:

- Reducir a nivel de suelo las concentraciones de sustancias peligrosas (Sistema de Inertización de Gases).
- Proporcionar seguridad en la gestión y el transporte de sustancias inflamables (Sistema de Seguridad).
- Reducir los compuestos volátiles orgánicos así como las emisiones de hidrocarburos (Medida Medioambiental).

3.2.2 TIPOS DE ANTORCHA

Las antorchas pueden ser divididas en las siguientes categorías principales.

3.2.2.1 ANTORCHAS VERTICALES

Las antorchas verticales, como su propio nombre indica, conducen verticalmente el gas hasta el punto de descarga, que se encuentra en una posición elevada en relación con el nivel del suelo circundante y/o próximo al equipo.

Hay varios tipos de sustentación para las antorchas verticales.

3.2.2.1.1 **AUTOPORTANTE:** básicamente un fuste diseñado mecánica y estructuralmente que soporta el quemador. Ver **figura 3**.

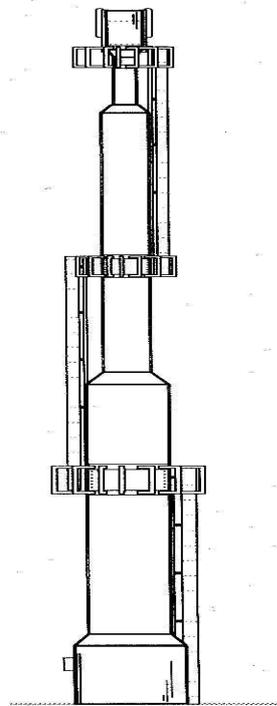


Figura 3: Estructura autoportante.

3.2.2.1.2 **CON VIENTOS:** una antorcha elevada con el fuste sustentado por cables, estos están sujetos al fuste de la antorcha en una o más altitudes (niveles de vientos) para limitar la desviación de la estructura. Los cables (vientos), están típicamente colocados en un plano triangular con un desfase de 120° para proporcionar una fuerte sustentación. Ver **figura 4**.

Los vientos cuentan con un anillo de fijación al fuste por nivel, tensores que facilitan el ajuste de tensiones, y con ello la correcta alineación y verticalidad de la antorcha, y los muertos de anclaje a nivel de suelo.

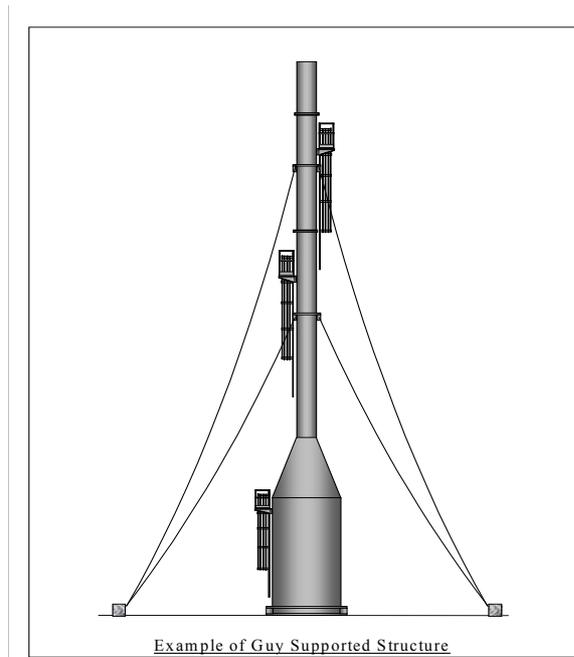


Figura 4: Estructura soportada con vientos.

3.2.2.1.3 CON *DERRICK* O ESTRUCTURA: estructura de acero acoplada que soporta uno o más fustes de antorcha. Normalmente fabricada en perfiles de acero estructural o tubo, y que puede ser de base cuadrangular o triangular.

a) *Derrick* fijo

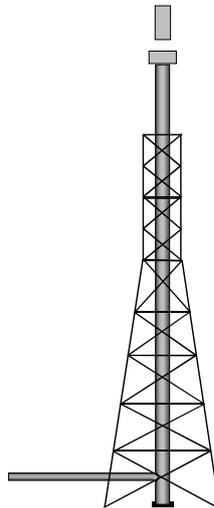


Figura 5: Estructura con *Derrick* fijo.

El fuste es permanentemente sustentado por el *derrick* (ver **figura 5**). Al quemador se le hace el mantenimiento bajándolo con una grúa o pescante (este último situado sobre la última plataforma, o plataforma de mantenimiento del quemador), para ello, tiene que estar la antorcha fuera de servicio.

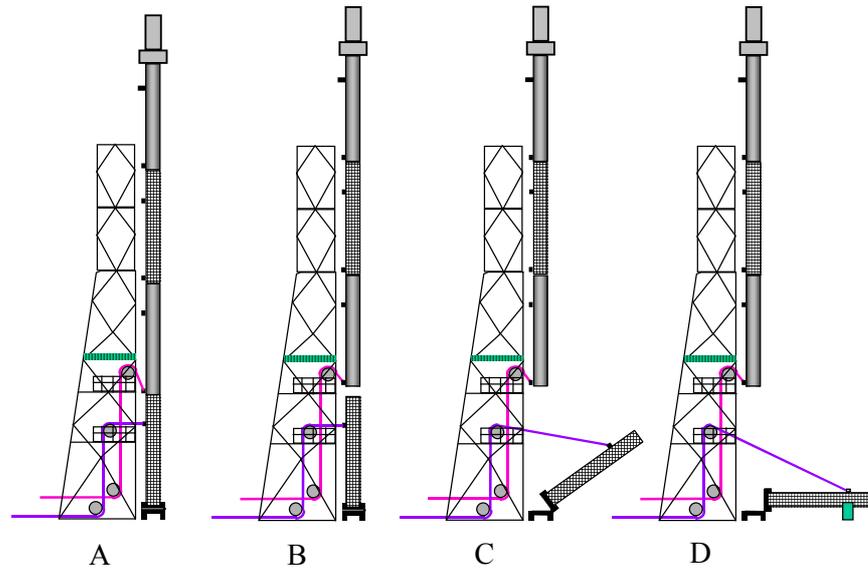
b) *Derrick* desmontable (fuste multisección)

Figura 6: *Derrick* desmontable con fuste multisección.

Un *derrick* con los tramos de fuste montados sobre brida, para permitir así desacoplar tramo a tramo y proceder a la bajada del quemador, pudiendo realizar su correspondiente mantenimiento. El fuste es típicamente ensamblado en partes que pueden ser izadas y bajadas usando un sistema de tracción y guía con poleas. Esto permite graduar el nivel de acceso al quemador. Muchos *derricks* desmontables son diseñados para soportar múltiples fustes con sus respectivos quemadores. Esa estructura será diseñada de tal manera que el resto de las antorchas, excepto la que se encuentra en mantenimiento, puedan seguir en operación.

La **figura 6** ilustra un *derrick* con un fuste multisección desmontable en la posición de funcionamiento u operación (A), con la parte superior ligeramente izada en el inicio de la operación de descenso del tramo desmontado (B), durante el proceso de bajada del tramo desmontado (C), y finalmente con éste a nivel de suelo (D).

c) *Derrick* desmontable (fuste integral)

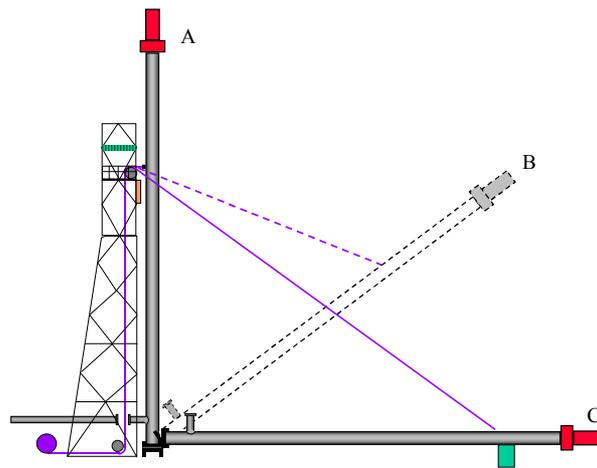


Figura 7: *Derrick* desmontable de fuste integral.

Un *derrick* con fuste de una única pieza utilizando un sistema de tracción y guía con poleas que permite que el fuste y el quemador de la antorcha sean bajados a nivel de suelo como una única pieza.

La **figura 7** ilustra un *derrick* con fuste integral desmontable en la posición normal de operación (A), durante el descenso (B), y completamente bajado a nivel de suelo para el acceso al quemador (C).

3.2.2.2 ANTORCHAS HORIZONTALES

Los líquidos y gases son transportados mediante una antorcha horizontal hacia su correspondiente quemador descargando a una excavación u hoyo (ver **figura 8**).

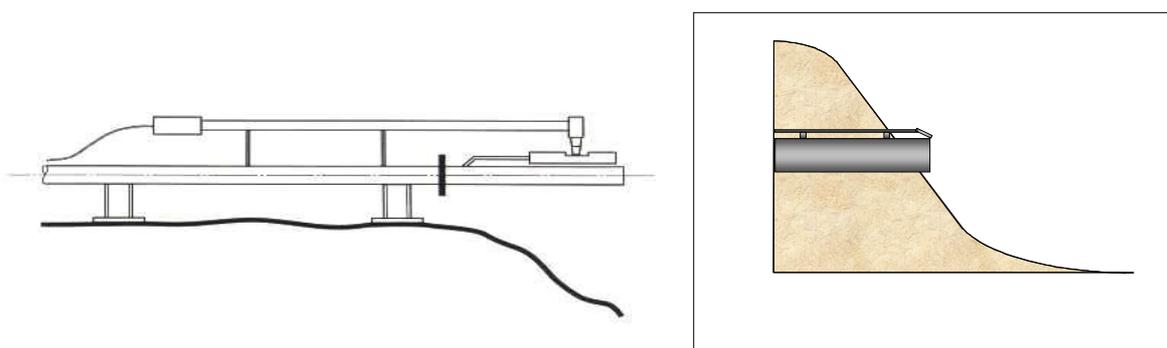


Figura 8: Antorcha horizontal.

3.2.2.3 ANTORCHAS DE LLAMA OCULTA

Las antorchas encapsuladas o de llama oculta, se construyen para que no se vea la llama de una manera directa (ver **figura 9**). Además, reducen el ruido y la radiación. Estas antorchas cuentan con una elevada disponibilidad ante

importantes variaciones de carga, durante las operaciones de arranque, parada y operación normal de la planta.

En la actualidad son ampliamente utilizadas en Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (E.D.A.R.) por múltiples razones, entre las cuales se pueden destacar:

- Alta T°C de combustión, que garantiza la inertización completa de los gases. Gas de antorcha típico, el biogás.
- Requiere pequeña zona estéril, en ocasiones nula.
- La ausencia de llama visible implica nulo impacto visual y por tanto baja alarma social.

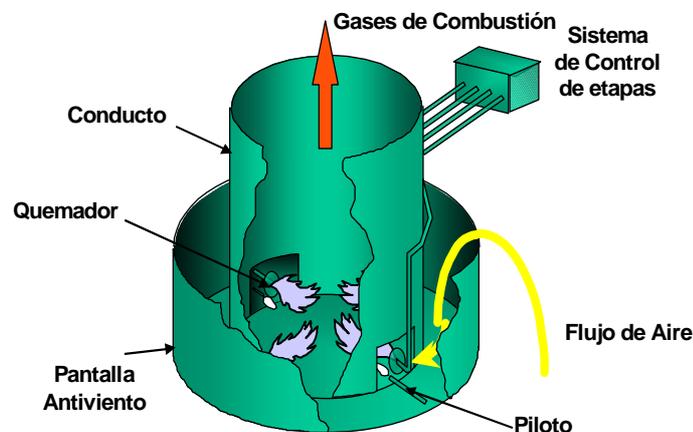


Figura 9: Antorcha de Llama Oculta.

3.2.2.4 ANTORCHAS MONOPUNTO O MULTIPUNTO

Todos los tipos de antorcha anteriormente comentados deben llevar instalados alguno de los siguientes sistemas: sistema monopunto, o sistema multipunto.

3.2.2.4.1 ANTORCHAS MONOPUNTO

Una antorcha monopunto es una tubería abierta en su extremo superior en un solo punto de salida. Este tipo de antorchas pueden ser sin humos o con humos. Normalmente son de tipo vertical, y suelen tener una pérdida de carga inferior que las antorchas multipunto.

3.2.2.4.2 ANTORCHAS DE ETAPAS MULTIPUNTO

Las antorchas multipunto están diseñadas normalmente para conseguir una combustión sin humos si se dan la presión y el espacio adecuados. Emplean

la presión disponible del gas para arrastrar más aire, lo cual mejora la combustión, ya que produce una mejor mezcla del gas con el aire circundante. Los múltiples puntos del quemador pueden ser ordenados en geometrías de matriz ubicados cerca del nivel del suelo, o en una posición elevada (ver **figuras 10 y 11**).

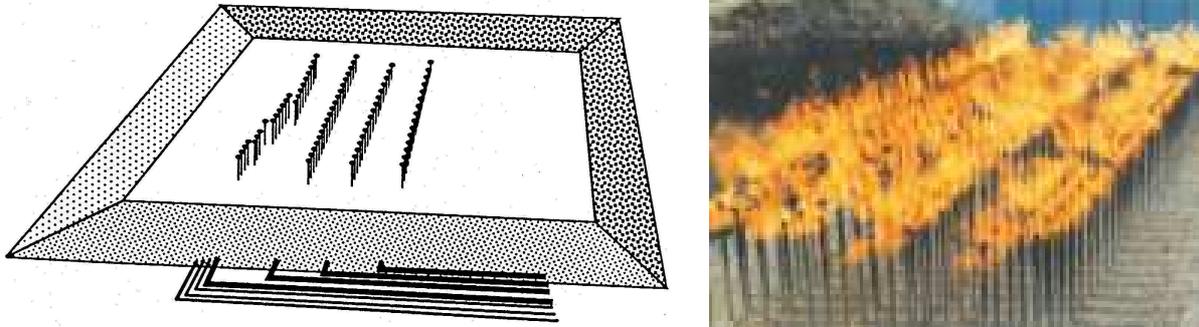


Figura 10: Antorchas Multipunto a nivel de suelo.



Figura 11: Antorcha Multipunto en posición elevada.

3.2.2.5 ANTORCHAS SIN HUMO Y CON HUMO

3.2.2.5.1 ANTORCHAS SIN HUMO

Los sistemas con antorchas sin humos eliminan cualquier humo evidente por encima de un rango estipulado de flujo. La combustión sin humo se consigue mediante la utilización de aire, vapor, presión o cualquier otro medio que pueda originar turbulencia y entrada de aire dentro de la corriente de gas de la antorcha.

Las regulaciones locales y los requerimientos específicos de la planta definen generalmente la combustión sin humo. La opacidad se define mediante la escala numérica de Ringelmann (Ringelmann 1 significa el 20% de opacidad, mientras que Ringelmann 0 se corresponde con totalmente claro).

La tendencia a producir humos está en función del poder calorífico del gas y del tipo de enlace de los hidrocarburos. Las series parafínicas de hidrocarburos tienen la tendencia más baja a producir humo, mientras que las olefinas, y las series de hidrocarburos aromáticos y diolefínicas, tienen una tendencia bastante mayor.

Las antorchas sin humos pueden contar con sistemas de supresión de humos, bien asistidas por Aire, o bien asistidas por Vapor para mejorar la combustión. Las antorchas asistidas con aire emplean ventiladores para mejorar la mezcla en el quemador (ver **figura 12**). Existen diseños en los que es el aire, el que se lleva interiormente al fuste de gas de antorcha.

En las antorchas sin humos asistidas con vapor, la inyección del mismo se hace a través de un anillo concéntrico al quemador con gran número de boquillas de inyección.

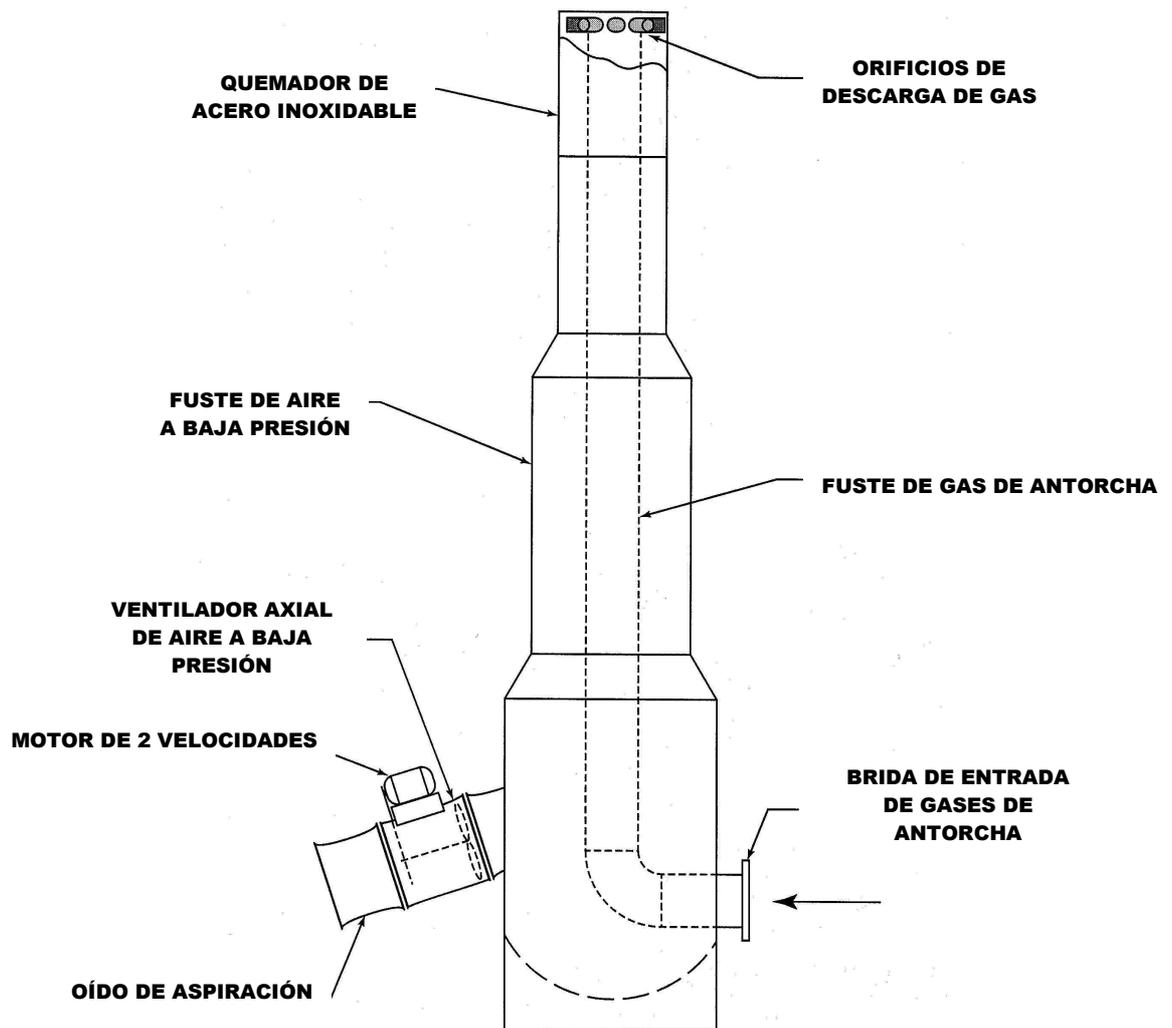


Figura 12: Antorcha asistida con Aire.

3.2.2.5.2 ANTORCHAS CON HUMO

Estas antorchas no están asistidas por sistemas que emplean aire o vapor, o cualquier otro método ajeno a ellas para mejorar la combustión. Esto a veces da lugar a la presencia de humos en determinadas condiciones de funcionamiento. Este tipo de antorchas suelen ser de tipo monopunto, pero no exclusivamente. Las antorchas con humo se utilizan también para suplir a las de sin humo, cuando la capacidad de estas últimas es excedida.

3.2.2.6 ANTORCHAS ENDOTÉRMICAS (ASISTIDAS CON GAS COMBUSTIBLE)

Estas antorchas requieren un aporte energético en forma de calor cuando están quemando flujos de residuos con bajo poder calorífico. Una antorcha

endotérmica de gran consumo de energía, asistida por gas o con pilotos de alto rendimiento, debería ser considerada cuando:

- El poder calorífico del flujo de residuos esté por debajo de los 5.589 a 7.452 kJ/m³ estándar (PCI).
- Cumplimiento con las normas ambientales.

3.2.3 CONSIDERACIONES DE SELECCIÓN

3.2.3.1 SELECCIÓN DE TIPO DE ANTORCHA

Consideraciones importantes al seleccionar el tipo de antorcha:

- Los requisitos de seguridad y las normativas medioambientales deben cumplirse en el diseño y selección de la antorcha.
- Costes (de capital y de funcionamiento). Coste de capital inicial y los gastos de operación y mantenimiento.
- Caudales del flujo característicos (composición, presión y temperatura) que están en función del diseño del proceso.
- Relaciones vecinales, alarma social, disponibilidad y coste de utilidades, disponibilidad de espacio.
- Función del diseño general de la planta y su ubicación. Esta información es generada normalmente durante el diseño del proceso, trazado o autorización de una instalación.

3.2.3.2 INTERRELACIONES

- La necesidad de la supresión de humos está influida por la composición del gas. Las antorchas sin humos se utilizan en corrientes de hidrocarburos que causen humos (es decir, gases parafínicos más pesados que el metano y todos los gases olefínicos y diolefínicos).
- La composición del gas influye en la hidráulica de la antorcha. Las pérdidas de línea serán inferiores para un gas de mayor peso molecular (en su equivalente a caudales máxicos) debido a su mayor densidad.
- Pérdida de carga en el sistema de gases (es decir, la caída de presión del gas disponible en el equipo antorcha) puede influir en la elección del método de supresión de humos. La presión (energía cinética) del gas puede ser usada para hacer que la antorcha funcione sin humos si dicha presión es lo suficientemente grande. El método de inhibición de humo depende de la utilidad, disponibilidad y costes en los que se incurra.

3.2.4 COMPONENTES PRINCIPALES

Los componentes principales y opcionales para una **antorcha elevada** son:

- Quemador con o sin capacidad de supresión de humos.
- Piloto(s).
- Fuste.
- Sello Hidráulico, basado en una contracolumna de líquido.
- Sello dinámico o de velocidad.
- Sello molecular o de densidad.
- Tuberías de servicio.
- Estructura portante o vientos.
- Panel de encendido de piloto(s) (Frente de llama o Alta Energía-Electrodo).
- Detectores de llama del piloto o llama principal (Termopares).
- *Knock-out drum* (opcional).
- Apagallamas. *Flame/Detonation Arrestor* (opcional).
- Sistema de Control y Supresión de humos o *Flarescan* (opcional).
- Sistema de Detección por Infrarrojos de llama principal y/o pilotos (opcional).
- Ventilador(es) (opcional).
- Tren de vapor (opcional).
- Monitorización por video del flujo, composición y cantidad de calor (opcional).
- Pescante para mantenimiento del quemador (opcional).
- Señalización pintada y luces de Balizamiento para ayuda a la navegación aérea (opcional).
- Pantallas contra la radiación de calor (opcional).

- Pantalla antilluvia (opcional).

Los componentes principales necesarios y opcionales para las **antorchas multipunto** son similares a los de las antorchas elevadas pero con las siguientes excepciones:

- Los ventiladores son sólo necesarios cuando hay caudales muy variables de hidrocarburos pesados.
- La instrumentación y equipo asociado para funcionamiento en etapas son opcionales.
- Protección térmica de *manifolds* de gas y colectores (opcional).
- Cercado (el tipo y propósito es específico del emplazamiento).

Los componentes principales necesarios y opcionales para una **antorcha de llama oculta** son los mismos o parecidos a los de las antorchas multipunto pero con las siguientes excepciones:

- El cercado (su estructura, dique o valla).
- Refractario opcional.
- Protección térmica de *manifolds* de gas y colectores (opcional).

3.2.5 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO DE UNA ANTORCHA

La Antorcha como Sistema de Inertización de Gases consta de los siguientes subsistemas:

3.2.5.1 SISTEMA MECÁNICO

Está formado por el Quemador, el Fuste, las Escaleras y Plataformas, la Estructura Portante y los Pilotos.

3.2.5.1.1 QUEMADOR

Finalidad

Su diseño debe proporcionar una caída de presión admisible en el sistema para una descarga de gases segura dentro del máximo caudal de diseño. El quemador debe mezclar combustible y aire a unas velocidades, turbulencias y concentraciones requeridas, que puedan establecer y mantener una ignición apropiada y una combustión estable. El quemador también tiene que ser capaz de encender y quemar los vapores descargados en el proceso de liberación de la planta, cuando haya unas condiciones de emergencia o contratiempo. Este dispositivo mecánico debe controlar el proceso de

combustión para las condiciones específicas de escape, y también debe garantizar la máxima eficiencia en la destrucción de los hidrocarburos a través de la combustión.

Detalles mecánicos de los quemadores

- Dimensiones de los quemadores y conexiones.

Los quemadores quedan definidos por el diámetro en pulgadas del mismo, y adicionalmente por el tipo, es decir, asistido por aire, por vapor, con recubrimiento refractario interior, etc.

La selección de un diámetro de quemador, responde fundamentalmente a criterios de pérdida de carga en la línea, y nivel de radiación en un punto de referencia a definir por el cliente.

Puede asociarse un quemador de inferior diámetro al del resto de elementos de la antorcha, si la presión disponible en la brida de entrada a la antorcha, y el nivel de radiación de referencia lo permiten.

La unión entre el fuste y quemador, o sello molecular y quemador, se realiza mediante bridas. El objeto de ello, es que en el momento de realizar el mantenimiento y sustitución del quemador, este trabajo puede realizarse con facilidad por los operarios, mediante la retirada de la tornillería, el arriado a través de grúa o pescante (propio de la antorcha), y su sustitución por un nuevo quemador.

Los suministros de gas a pilotos, de llama para el encendido de los mismos a través del frente de llama (FFG), y de vapor/aire del sistema de supresión de humos, se realizan mediante las tuberías de servicio del fuste, cuyo empalme en el quemador se realiza a través de brida.

- Manipulación del quemador y orejetas de izado.

Los quemadores están a menudo equipados con orejetas de izado, que permiten la manipulación del mismo. Estos elementos se fabrican en el mismo material que el quemador, y pueden ser eliminados del mismo tras el montaje, y antes de la puesta en servicio, a menos que estén situados allí donde no les vaya a afectar el calor. En caso de no retirarse, estos podrán verse sometidos a las condiciones de funcionamiento de la antorcha, incluyendo posibles lametazos de llama. No se recomienda su utilización durante la etapa de mantenimiento del quemador, puesto que pueden haberse dañado con el funcionamiento. Para esto se recomienda la utilización de pulpo y grilletes, fijando los mismos a los taladros de la brida.

- Materiales.

Los componentes del quemador necesitan tener una resistencia aceptable a la fatiga y a las temperaturas elevadas. Pueden requerirse

resistencia a ciclos térmicos, cracking por corrosión a alta temperatura (en atmósferas reductoras y oxidantes) o a temperatura ambiente. Los materiales típicos en los que se fabrica el quemador son aceros inoxidable austeníticos o altamente aleados con níquel en función del servicio, aleaciones Cr-Ni como Inconel, Incoloy o Hastelloy.

Se debe tener en cuenta que la mayoría de los fallos de material ocurridos en los quemadores se dan a bajos caudales de liberación de gas, esto es debido a que para bajos niveles de carga a antorcha, los quemadores están más sometidos a efectos como lametazos de llama o combustión en el interior del quemador, de hecho, a altos caudales de funcionamiento, el efecto de convección del flujo del gas enfría el cuerpo de la antorcha.

- Sujeciones en el quemador.

Cualquier carga de tuberías aplicada a las conexiones del quemador debe estar claramente definida. La carga térmica, dinámica y el peso muerto (incluyendo el peso del agua en las líneas de vapor), deben ser consideradas. Sólo las tuberías auxiliares asociadas al quemador deberían ser soportadas por el mismo. Las sujeciones de los pilotos, el equipo de inyección de vapor, la pantalla antiviento y similares, deben tener en cuenta las dilataciones térmicas que puedan ocurrir durante el período de servicio.

- Pantalla Antiviento en los quemadores.

Los quemadores disponen de dos tipos de pantalla antiviento, la propia del quemador, y la correspondiente a cada piloto. La función principal de la misma, es la de evitar los lametazos de llama sobre el cuerpo del quemador y los pilotos, y con ello, su debilitamiento estructural, por tanto es un elemento de sacrificio para aumentar la vida de servicio del quemador.

Los diseños de pantalla antiviento situados por encima de la salida de gases del quemador, pueden requerir consideraciones especiales.

- Refractario para quemadores.

Este elemento no está siempre disponible en los quemadores, sin embargo, se usa a veces en quemadores de antorchas de gran diámetro para mitigar los efectos de la combustión interna.

Este equipo en ocasiones ha de ser resistente a choques térmicos, así como a temperaturas elevadas. Los quemadores experimentan súbitos cambios de temperatura. El refractario interno debe estar bien anclado, y se recomienda que el interior del quemador cuente con clips de sujeción, que confieran mayor fijación a dicho cemento refractario.

Con cualquier instalación de refractario, es necesario tener en cuenta las consecuencias de un fallo del mismo. En materiales refractarios densos, esta consideración implica que en caso de fractura y caída del mismo dentro de la antorcha, éste obstruirá el flujo de liberación de gases, con el evidente perjuicio en el funcionamiento de la antorcha.

Este elemento igualmente permite aumentar la vida de servicio del quemador.

3.2.5.1.2 FUSTE

Es la tubería u otro conducto que transporta los gases de liberación o alivio hacia el quemador de una antorcha elevada, partiendo del sello hidráulico, o rack de gas de antorcha en ausencia de este último. Actúa como elemento de soporte de las tuberías que dan servicio al quemador, es decir, frente de llama, gas a pilotos, aire o vapor de supresión de humos, drenaje de sello molecular, etc.

3.2.5.1.3 PLATAFORMAS Y ESCALERAS

Se recomienda que, como mínimo, se instale una plataforma de 360° cerca de la parte superior de las antorchas de 15 metros o mayores. Esta plataforma debería estar ubicada por debajo de la brida de montaje del quemador, y se colocará de manera que se pueda utilizar durante las inspecciones, el mantenimiento, y la sustitución del quemador, facilitando dichas labores.

Se prefiere para el acceso a la plataforma, una escalera de gato con quitamiedos, pero no es obligatorio, se podría acceder de manera alternativa por medio de una grúa con cesta, o con un helicóptero. La plataforma también permitirá el acceso al sello dinámico para su mantenimiento si lo hubiera. Igualmente se requiere, en caso de emplear sello molecular, una plataforma de mantenimiento, no superior a 90°, para acceder a la boca de inspección del mismo.

3.2.5.1.4 ESTRUCTURA PORTANTE

Las antorchas elevadas o verticales tienen diferentes métodos de sustentación (ver 3.2.2.1).

3.2.5.1.5 PILOTOS

Finalidad

El piloto es el elemento encargado del encendido de la antorcha de una manera fiable. El piloto o pilotos, están adosados al cuerpo del quemador y deben permanecer continuamente encendidos. Si el piloto falla, los hidrocarburos no quemados y/o los gases tóxicos podrían ser liberados a la atmósfera, lo que potencialmente podría resultar en una nube de vapores explosiva, problemas de olor, o efectos negativos para la salud. En la mayoría de las aplicaciones elevadas, el piloto no está accesible para su

recambio o servicio mientras la antorcha esté en funcionamiento, por lo tanto, el sistema de pilotos debe ser lo suficientemente fiable como para estar en operación durante años sin mantenimiento.

Descripción general

Existen una multitud de diseños de pilotos. La mayoría son de liberación constante de calor, auto-aspirantes y quemadores premezcla.

En los pilotos auto-aspirantes, la fiabilidad del piloto depende únicamente del fuel-gas combustible, ya que el aire es auto-aspirado por efecto venturi. En el caso de los quemadores de premezcla, su fiabilidad depende de dos servicios, fuel-gas y aire.

En algunos casos, los pilotos premezcla de aire comprimido han sido utilizados en lugar de los tipo aspirante. Además del suministro del gas combustible, los pilotos de aire comprimido dependen de la fiabilidad del sistema de aire comprimido. Para hacer un uso seguro de los pilotos de aire comprimido, las instalaciones deberán hacerse bajo alguna de las siguientes condiciones:

- El sistema de aire comprimido es suficientemente fiable. La probabilidad de fallo del piloto debido a una falta en el suministro de aire es lo suficientemente baja como para ser aceptable.
- La antorcha puede ser puesta inmediatamente fuera de servicio si el sistema de aire comprimido falla.
- Se pasará inmediatamente a funcionamiento con piloto autoaspirante si falla el suministro de aire.
- Existencia de un conjunto independiente de pilotos aspirantes como elemento de seguridad.

En algunos casos se emplea la ignición directa de la antorcha, mediante chispas, en lugar de un piloto continuo. Tal diseño no se considera alternativa válida para piloto por sí solo, ya que, sin un suministro independiente de combustible, es imposible asegurar que exista siempre una mezcla inflamable en lugar de la chispa. Es por ello que suele instalarse al menos 1 piloto con un sistema de encendido por frente de llama como salvaguarda.

Con el fin de garantizar el funcionamiento estable y el encendido de la antorcha, el piloto recomendable debe ser capaz de liberar como mínimo 47.478 kJ/h (PCI) cuando se estén aliviando hidrocarburos con un PCI de 11.178 kJ/m³ (estándar) o superior. La liberación de calor de un piloto en la práctica común va desde el mínimo ya dicho, hasta los 369.270 kJ/h. El piloto debe ser capaz de permanecer encendido, y continuar por lo tanto

encendiendo la llama principal de la antorcha con unas condiciones de velocidad de viento de hasta 161 Km/h sin lluvia y de hasta 137 Km/h con lluvia.

El número de pilotos requerido en cada aplicación está en función del diámetro del quemador. Para antorchas muy pequeñas, un único piloto de 47.478 kJ/h encenderá de manera fiable los gases de la antorcha. Obviamente, en este tipo de aplicaciones, un fallo en el piloto significaría un fallo completo en el sistema de encendido.

Según aumenta el diámetro del quemador, aumenta también el número de pilotos necesarios para un encendido fiable de la antorcha, independientemente de la dirección del viento. En la **tabla 1**, se dan el número de pilotos recomendados para la mayoría de los quemadores en función de sus diámetros (referidos al tamaño real de la conexión y no al diámetro hidráulico), y para la combustión de hidrocarburos con un PCI de 11.178 kJ/m³ (estándar) o superior.

Número mínimo de pilotos recomendados	Diámetro del quemador	
1	Hasta 20,32 cm	Hasta 8"
2	Hasta 60,96 cm	Hasta 24"
3	Hasta 106,68 cm	Hasta 42"
4	Hasta 152,4 cm	Hasta 60"

Tabla 1: Número mínimo de pilotos recomendados en función del diámetro del quemador.

Si bien el número mínimo recomendado de pilotos para los quemadores de 20,32 cm o menores es de sólo uno, se puede lograr una mayor fiabilidad si al menos son instalados dos pilotos en cada antorcha. A menudo se añaden más pilotos de los arriba recomendados para así reducir aún más el riesgo de liberación de hidrocarburos no quemados.

Para el resto de los gases que no son hidrocarburos, o las mezclas inertes, o hidrocarburos con un poder calorífico inferior a 11.178 kJ/m³ (estándar), serán necesarios además una mayor cantidad de pilotos, o pilotos con mayor poder de liberación de calor, o algún otro combustible de apoyo.

Detalles mecánicos

Los pilotos pueden dividirse en dos grandes grupos dependiendo de la manera en la que se consiga la premezcla entre el combustible y el aire: auto-aspirantes, y de aire comprimido. Ambos tipos generalmente se componen de un orificio para dosificar el combustible, un mezclador en el que se mezclan el aire y el combustible, la tubería que conecta el mezclador con el quemador del piloto, y dicho quemador, que es donde se estabiliza la llama.

La diferencia más significativa entre los pilotos auto-aspirantes y los pilotos de aire comprimido es el diseño de mezclador. En un piloto auto-aspirante el mezclador es un venturi, y el orificio del combustible no sólo se usa de dosificador, sino también como medio por el que se crea un chorro de combustible que aspira aire hacia el venturi. Los componentes de un típico piloto auto-aspirante se muestran en la **figura 13**.

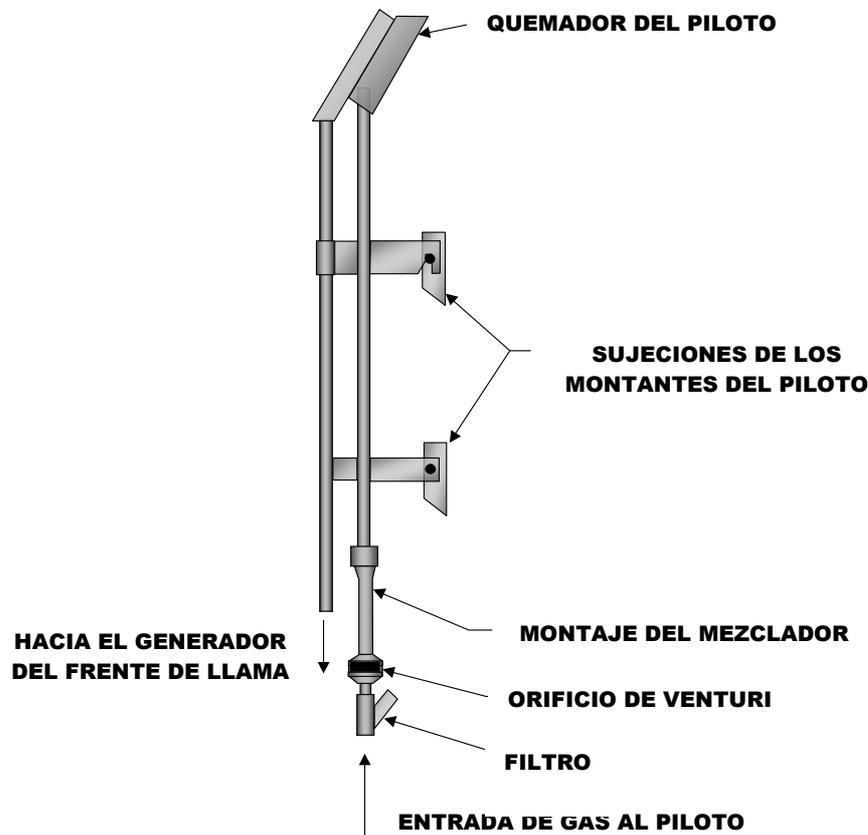


Figura 13: Montaje del piloto de una antorcha.

En un piloto de aire comprimido, el mezclador está diseñado para dosificar y mezclar dos corrientes de gas presurizadas, para este caso se requieren entonces dos orificios, uno para el gas combustible y otro para el aire.

3.2.5.2 SISTEMA DE SEGURIDAD

Los sistemas de seguridad en una antorcha, tienen por función evitar la inmición de oxígeno hacia el interior de la antorcha y aguas arriba de la misma, e impedir así fenómenos de retroceso de llama, y riesgos de explosión por presencia de dos de los elementos del triángulo de fuego, combustible y comburente.

3.2.5.2.1 GAS DE PURGA Y SELLOS ECONOMIZADORES

Todos los sistemas de antorcha o antorchas, son susceptibles de sufrir fenómenos de retroceso de llama si no están apropiadamente purgados, de manera que se evite la infiltración de aire (oxígeno) aguas arriba de la antorcha a través del quemador. Para evitar esto último, el sistema en su operación normal debe estar continuamente purgado. Se puede instalar dentro, o inmediatamente debajo del quemador, un dispositivo de conservación de la purga, con el fin de reducir la cantidad de consumo de gas de purga.

Este tipo de dispositivos mecánicos reducen el uso de gas de purga, mientras también protegen parcialmente a la antorcha de la entrada de aire a la misma. Hay 2 estrategias para reducir el consumo de gas de purga: por desviación y aceleración del aire, y por diferenciación de densidades entre el aire y el gas de purga, y que dan lugar a 2 tipos de dispositivos, el Sello Dinámico, y el Sello Molecular respectivamente.

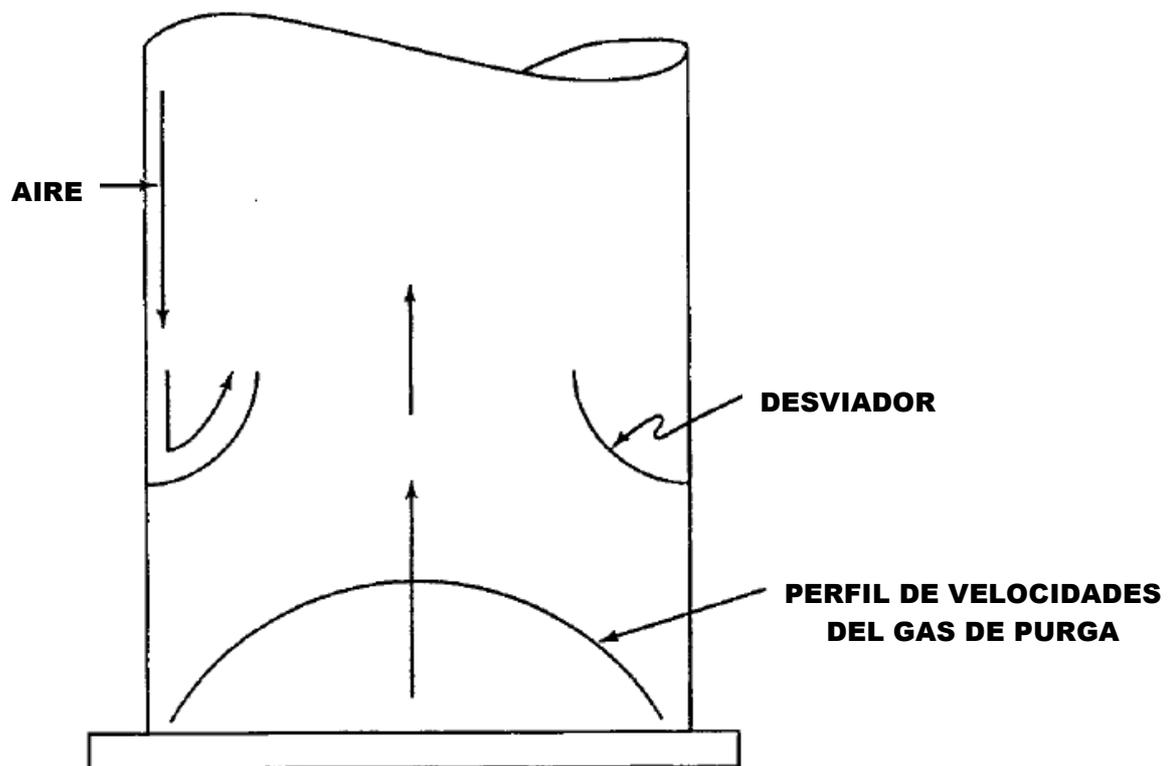


Figura 14: Sello dinámico (*VELOCITY SEAL*).

El sello dinámico (ver **figura 14**), por medio del desviador, torna el sentido del aire de infiltración. Además, la forma del desviador, origina una aceleración del gas de purga, que consigue arrastrar el aire hacia fuera del quemador.

El sello molecular (ver **figura 15**), gracias a su vaso invertido incorporado, provoca a través de 2 cambios de sentido de flujo del gas de purga, un sello que impide el paso de aire. Dicho sello es el tapón creado con el gas de purga, más ligero o más pesado que el aire, de tal manera que el mismo no pueda ser desplazado por el aire.

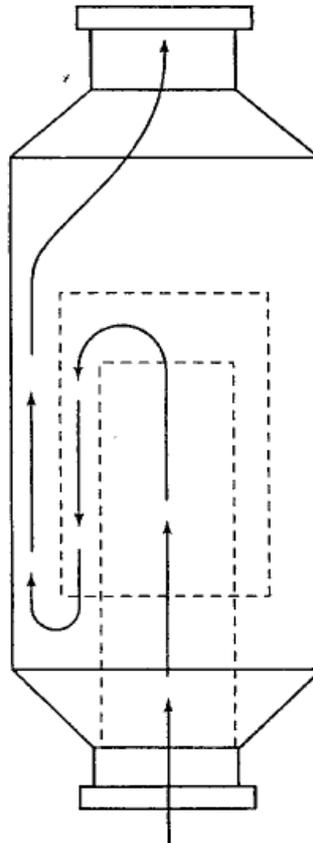


Figura 15: Sello molecular (*DENSITY SEAL*).

3.2.5.2.2 *KNOCK-OUT DRUM*

Equipo consistente fundamentalmente en un gran recipiente donde se depositan los condensados, y que acondiciona los gases previamente a la entrada de la antorcha. El *knock-out drum*, tiene por función separar el líquido del gas en la antorcha, y mantiene una cantidad específica de líquido que puede ser aliviada durante una situación de emergencia (ver **figura 16**).

Los *Knock-out drums* se sitúan típicamente en la línea de gas principal, aguas arriba de la antorcha, y antes de cualquier sello hidráulico. Cuando hay partes particulares del equipo, o unidades del proceso dentro de una planta que proporciona las fuentes principales de líquido a la antorcha, es conveniente contar con *KO drums*, dentro del límite de baterías de dichas fuentes. Esto reducirá el dimensionamiento del *KO drum* de antorcha, y también facilitará la recuperación del producto.

Hay tres tipos básicos de diseños de *KO drum* que pueden ser incorporados a una antorcha: la instalación en depósito horizontal, en vertical, y en vertical con separación centrífuga.

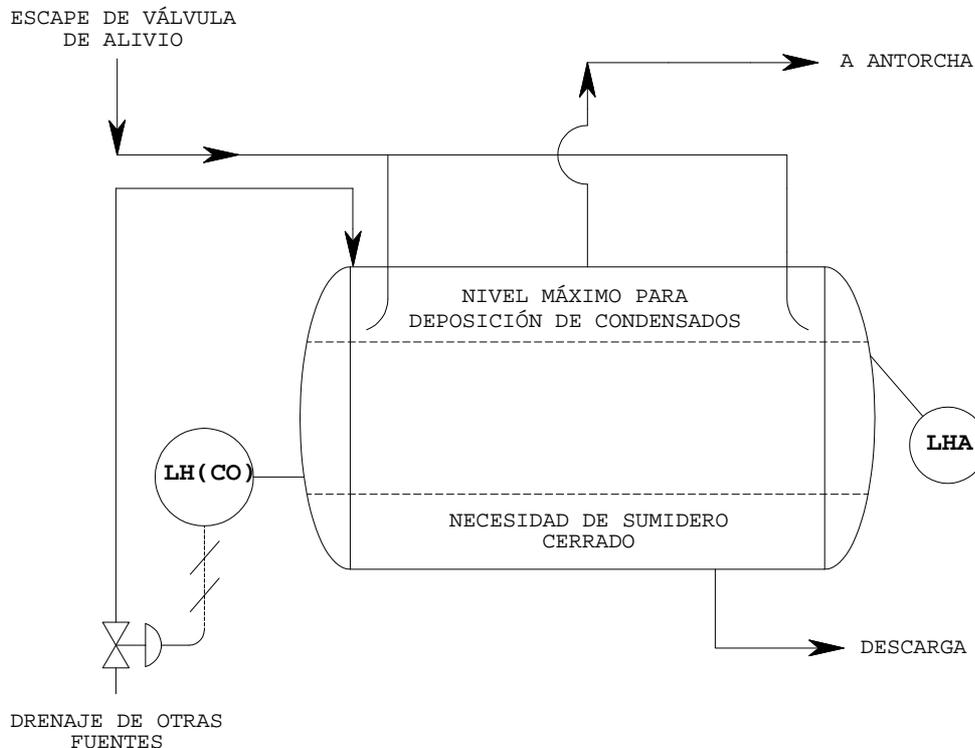


Figura 16: *KO drum* de la antorcha.

3.2.5.2.3 SELLO HIDRÁULICO (*WATER SEAL*)

A grandes rasgos, un sello hidráulico es una contra-columna de agua situada en la parte inferior de la antorcha (después del *KO drum* si lo hubiera, y antes de la entrada a la antorcha), que evita la entrada de aire aguas arriba de dicho sistema antorcha.

Las finalidades del depósito del sello hidráulico en un sistema de antorcha son las siguientes:

- Operar como un mecanismo de retención para evitar la comunicación del colector de antorcha y la atmósfera durante el modo *stand-by*.
- Operar como una válvula de seguridad de presión, evitando el flujo de gas desde la entrada a antorcha a la descarga en sello hidráulico, hasta alcanzar cierta presión aguas arriba, frecuentemente predeterminada, evitando así flujos pulsatorios.

Parte de la línea de suministro del gas, va sumergida bajo una reserva de agua contenida en el depósito. La profundidad a la que este tubo va cubierto de líquido, controla la presión de gas requerida para causar el paso de dicho gas. La presión del gas entrante desplaza líquido del paso de fluido. El gas fluye a través del líquido, mientras que la presión disponible mantiene el flujo y el desplazamiento del líquido. Cuando el flujo o la presión descienden, el líquido recupera su nivel original, cesando el paso del gas.

El sello hidráulico elimina las pulsaciones, que son favorecedoras de la formación de no quemados, a la vez que asegura una retención suficiente de agua para sellar la antorcha tan pronto como ésta se apague.

3.2.5.2.4 SISTEMA *SNUFFING* O DE ENFRIAMIENTO

El Sistema *Snuffing* o de enfriamiento, se encarga de disminuir la temperatura de los llamados puntos calientes de la antorcha y del quemador. Consiste básicamente en una inyección de N₂ en la antorcha, que apaga la llama principal (si existe) y la llama de pilotos, a través de varias corrientes que se hacen llegar a los mismos, individualmente a cada piloto y también a través del cuerpo del quemador para la llama principal. En caso de emergencia por escape y acumulación de una nube de gas en la zona de planta, se activa la señal de emergencia, que a su vez actuará sobre la válvula de control de la inyección de N₂.

3.2.5.2.5 SISTEMA ANTIRRETORNO DE LLAMA

El Sistema Antirretorno de Llama es un sistema de prevención del retorno de llama hacia el interior del quemador, mediante la inyección de una corriente de vapor hacia el interior del mismo, que desplaza así la llama hacia el exterior del cuerpo de dicho quemador.

Es frecuente en el caso de combustibles con posible presencia de Hidrógeno.

La detección del retroceso de llama, puede lograrse alojando un sensor de temperatura adecuado en el interior del quemador.

3.2.5.3 SISTEMA DE ENCENDIDO (PANEL DE ENCENDIDO)

Este sistema debe encender de una manera fiable el piloto o los pilotos. Hay cuatro tipos comunes de sistemas de encendido empleados para prender los pilotos de una antorcha.

3.2.5.3.1 ENCENDIDO POR CHISPAS EN EL QUEMADOR DEL PILOTO (ELECTRODO)

El encendido por chispa del piloto de una antorcha directamente en el quemador del piloto es sencillo y fácil de automatizar. En este sistema la

generación de la chispa debería estar situada en un lugar cercano al quemador, de tal manera que quede expuesta al contacto de la mezcla inflamable que sale de dicho quemador. En algunos casos, la vida del dispositivo que genera la chispa (electrodo de alta energía), puede acortarse debido a la continua exposición al piloto, o a la llama de la antorcha una vez está establecida la ignición. A diferencia de los pilotos utilizados en calderas o en calentadores de proceso, el piloto de una antorcha, o su generador de chispa, no pueden ser sustituidos mientras esté en funcionamiento dicho sistema de antorcha. Como consecuencia, este tipo de sistema de encendido no se recomienda generalmente como única medida de ignición del piloto.

3.2.5.3.2 ENCENDIDO POR CHISPA DE UNA PORCIÓN DE LA MEZCLA AIRE/COMBUSTIBLE DEL PILOTO PREVIO AL QUEMADOR DEL MISMO

A fin de limitar la exposición a la llama del dispositivo generador de chispas, éste puede encender una parte de la mezcla combustible/aire del piloto previa a la salida de la llama. Aguas abajo del generador de chispas, la porción de mezcla comburente/combustible se reintroduce al quemador del piloto. Este sistema tiene que ser diseñado cuidadosamente para prevenir el retroceso de llama, o la combustión estable entre la fuente de ignición y el quemador del piloto. Al igual que con el primer tipo de sistema de encendido, éste es relativamente fácil de automatizar, sin embargo, el dispositivo generador de la chispa aún está situado en el piloto, y por lo tanto no se le puede hacer mantenimiento mientras la antorcha esté en marcha. Como consecuencia, y como con el primer tipo de sistema de encendido, éste tampoco se recomienda como único medio de encendido del piloto.

3.2.5.3.3 GENERADOR DE FRENTE DE LLAMA DE AIRE COMPRIMIDO

El sistema de encendido del piloto más frecuente es el de frente de llama de aire comprimido. Con este sistema el aire comprimido y el combustible son introducidos a través de unos orificios hacia una cámara de mezcla situada a nivel de suelo. Aguas abajo de esta cámara, hay un generador de chispas y una tubería que une la cámara y el electrodo al quemador del piloto. Ver **figuras 17 y 18** (detalle del panel de encendido). Durante el funcionamiento, el flujo del gas combustible se establece, y después se enciende, enviando un frente de llama que viaja a través de la tubería hasta el quemador del piloto, encendiendo por consiguiente dicho piloto. La principal ventaja de este tipo de sistema de encendido es que los controles de flujo y el generador de la chispa están a nivel de suelo y pueden ser atendidos mientras la antorcha esté en funcionamiento. La principal desventaja del generador de frente de llama es su tendencia a formar humedades dentro de la tubería que llega hasta el piloto. La humedad puede causar corrosión, y de no drenarse antes de su uso, podría hacer extinguirse el frente de llama. En ambientes fríos, la humedad se traduce en tener que aislar térmicamente la tubería para evitar la congelación.

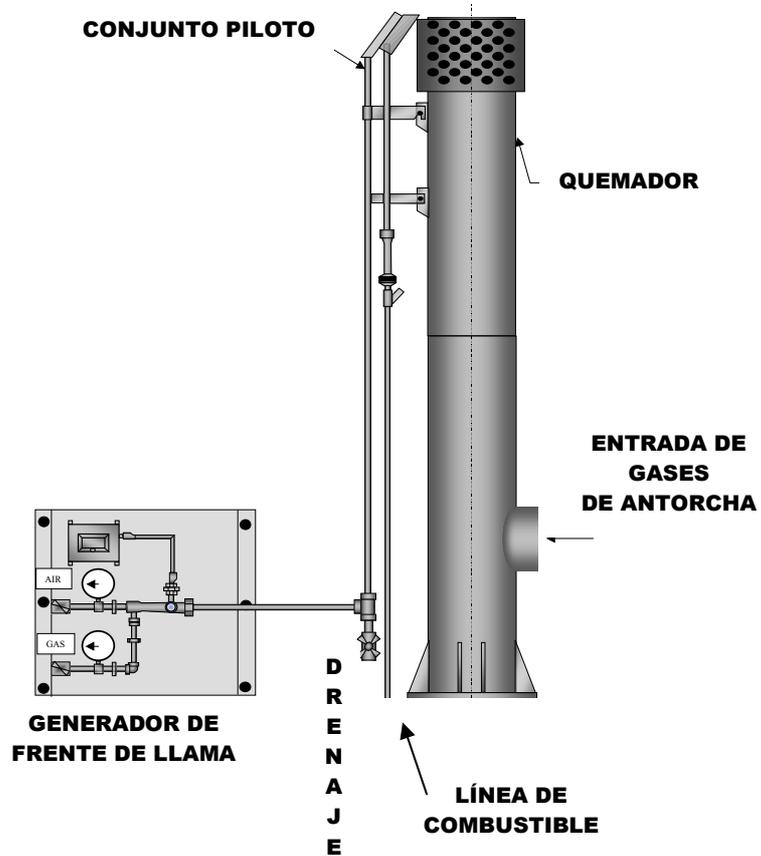


Figura 17: Antorcha / Piloto / Panel de generación de frente de llama.

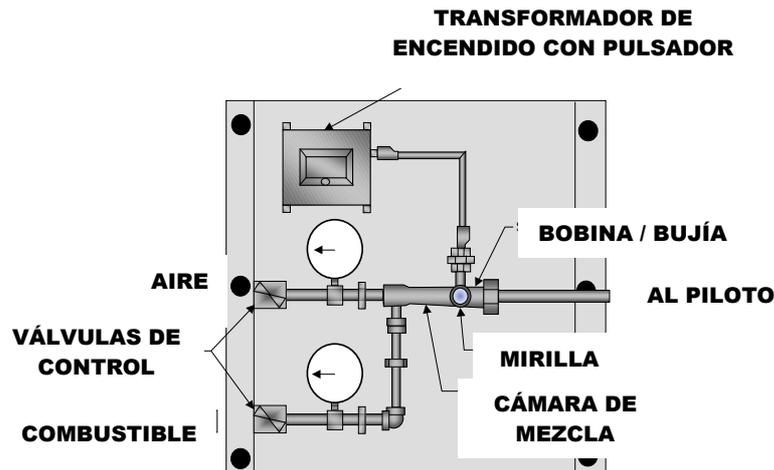


Figura 18: Panel de generación de frente de llama o panel de encendido.

3.2.5.3.4 GENERADOR DE FRENTE DE LLAMA AUTOASPIRANTE

Este enfoque es similar al del generador de frente de llama con aire comprimido, pero en lugar de aire comprimido, es la misma presión del combustible la que se utiliza para aspirar el aire. La ventaja obviamente es que no se requiere aire comprimido, la desventaja, que los equipos autoaspirantes sólo pueden generar una presión limitada, con lo cual, sólo puede emplearse a distancias limitadas y por ciertos trazados de tubería.

3.2.5.4 SISTEMA DE CONTROL (PANEL DE CONTROL)

Sistema cuya función principal es la de detectar la presencia de la llama principal y la de la llama piloto.

El sistema de control confirma que los pilotos están encendidos, esto es a menudo confundido con la simple confirmación de que la llama está presente. Normalmente estas dos afirmaciones son sinónimas pero hay una diferencia importante. Si los pilotos están encendidos y se libera un volumen de gases inertes, la llama de la antorcha se extinguirá sólo mientras el gas inerte esté siendo descargado. Si los pilotos no están encendidos, pero la antorcha sí, y un volumen de gases inertes se libera, la llama de la antorcha permanecerá extinguida después de la descarga de gases inertes y hasta el reencendido de los pilotos. Si los pilotos no están prendidos porque han fallado, la antorcha puede permanecer apagada durante un extenso período de tiempo. Por consiguiente, es importante confirmar la presencia de ambas llamas:

- Antorcha o llama principal.
- Piloto(s).

Entre otras funciones, el panel de control también realiza en casos de encendido automático de pilotos, el reencendido de los mismos, para lo cual, cuenta con una lógica de controladores de T°C, relés instantáneos y temporizados.

Adicionalmente puede aportar alarmas al sistema de control distribuido de planta. Son típicas las siguientes:

- Llama principal On/Off.
- Llama piloto(s) On/Off.
- Fallo reencendido.
- Gas a pilotos On.

El panel de control también dispone a nivel local de indicación de estatus para llama piloto, llama principal, etc.

3.2.5.4.1 TERMOPARES

Es un elemento primario de medida que permite detectar la presencia de la llama del piloto por medio del calor. La ventaja de los termopares es que sólo detectan la llama del piloto, y no están directamente expuestos a la llama de la antorcha, salvo aquellos que monitorizan la llama principal. En comparación con otros tipos de detectores, los termopares tienen la desventaja de tener un tiempo de respuesta relativamente bajo, y un período de vida a menudo limitado, esto último es un problema importante, ya que en la mayoría de los casos los termopares no pueden ser sustituidos mientras la antorcha esté en marcha. Esto lleva en ocasiones a duplicar el número de termopares por piloto, o contemplar la posibilidad de instalar termopares duales (2 sensores por vaina).

Habitualmente se emplean termopares tipo K, con un rango de temperatura de -200 a +1200 °C, fabricados en chromel-alumel, y que generan una diferencia de potencial en mV proporcional a la temperatura. Esta señal se lleva al panel de control para su conversión a °C por medio de controladores de temperatura, permitiendo así el control del estatus de la antorcha a través de las consignas de temperatura fijadas.

3.2.5.4.2 CABLE DE EXTENSIÓN DE LA SEÑAL DE TERMOPARES

Es el cable por el cual se transmite la señal de mV que origina el termopar hasta unos controladores situados en el interior del panel de control. Esos controladores permiten la visualización de la señal en °C en local, la indicación del estatus del piloto o de la llama principal, la generación de alarmas, o el envío de una señal en mA al sistema de control distribuido de planta para su monitorización en remoto.

3.2.5.4.3 PANEL DE CONTROL

Por medio de este panel se conoce el estatus de los pilotos en local y en remoto. Se encuentra dentro del panel de encendido (o panel de generación de frente de llama).

Mediante unas lámparas se indica si el piloto está apagado (termopar frío, lámpara roja), si el piloto está encendido (termopar caliente, lámpara verde) o si está roto o desconectado (indicación fondo de escala, lámpara roja).

Mediante el establecimiento de unas temperaturas concretas (controlador de T°C) se fijan unas consignas de piloto encendido y termopar roto. Para la primera temperatura de consigna, se tiene que, si no llega el termopar a dicha temperatura, quiere decir que el piloto está apagado, y si la sobrepasa, que está encendido. La segunda temperatura de consigna (termopar o lazo roto), está fijada próxima al fondo de escala, a cuya temperatura el termopar no llegará aunque el piloto esté encendido, salvo en caso de que se abra el lazo (termopar roto = circuito abierto).

Cuando el termopar está caliente se excita un relé y se enciende la lámpara verde, indicando que el piloto está encendido. Si el piloto se apaga, el termopar se enfría, y al situarse por debajo de la temperatura de consigna, se desexcita dicho relé, y se enciende la lámpara roja.

3.2.5.5 SISTEMA DE SUPRESIÓN DE HUMOS

Sistema que inyecta aire (en ubicaciones como desiertos) o vapor (donde haya disponibilidad de agua y vapor en planta) en el quemador con el fin de inhibir la producción de humo por parte de la combustión de la antorcha.

Hay situaciones en las que se requiere que las antorchas sean sin humo, es decir, se espera que en el día a día en el proceso de liberación de gases por parte del sistema no se liberen humos, normalmente esto sucede como máximo para el 20% del total de los gases liberados, pero en algunas zonas medioambientalmente sensibles, se requiere una supresión de humos del 100%, o incluso una antorcha de llama oculta. Hay varias técnicas disponibles para producir un funcionamiento libre de humos, la mayoría de las cuales están basadas en la premisa de que el humo es el resultado de un exceso de combustible (mezcla muy rica), y que es eliminado favoreciendo la distribución uniforme de aire por toda la llama.

Para promover dicha distribución de aire por toda la llama, se requiere energía para crear turbulencia y mezclado de aire dentro del gas de la antorcha, mientras está siendo encendida. Esta energía puede estar presente en los propios gases en forma de presión, o se puede forzar hacia dichos gases mientras salen del quemador a través de otros medios como la inyección de vapor a alta presión, el uso de aire comprimido, o aire procedente de ventiladores. Para crear las condiciones favorables para una combustión libre de humos, hay una diversidad de diseños, que van desde el más simple, que sería a grandes rasgos una tubería

abierta con una fuente de encendido, hasta los sistemas integrados de antorcha por etapas con complejos equipos de control.

3.2.5.5.1 SISTEMA DE SUPRESIÓN DE HUMOS POR MEDIO DE INYECCIÓN DE VAPOR

Los quemadores que usan vapor para controlar el humo son los más comunes dentro de los quemadores libres de humos. El vapor puede ser introducido a través de un inyector situado en el centro de la antorcha, o a través de una serie de inyectores vapor/aire en la antorcha, empleando un colector situado alrededor del quemador en su periferia, o a través de una combinación de las dos maneras anteriores, en función de la aplicación particular. Ver **figura 19**. El vapor se inyecta hacia la zona de la llama para originar turbulencia y/o aspirar aire hacia la llama por medio de los chorros de vapor. Esta mejora en la distribución de aire combinado con el empuje del vapor facilita y promueve la eliminación de humos en mezclas ricas de gas.

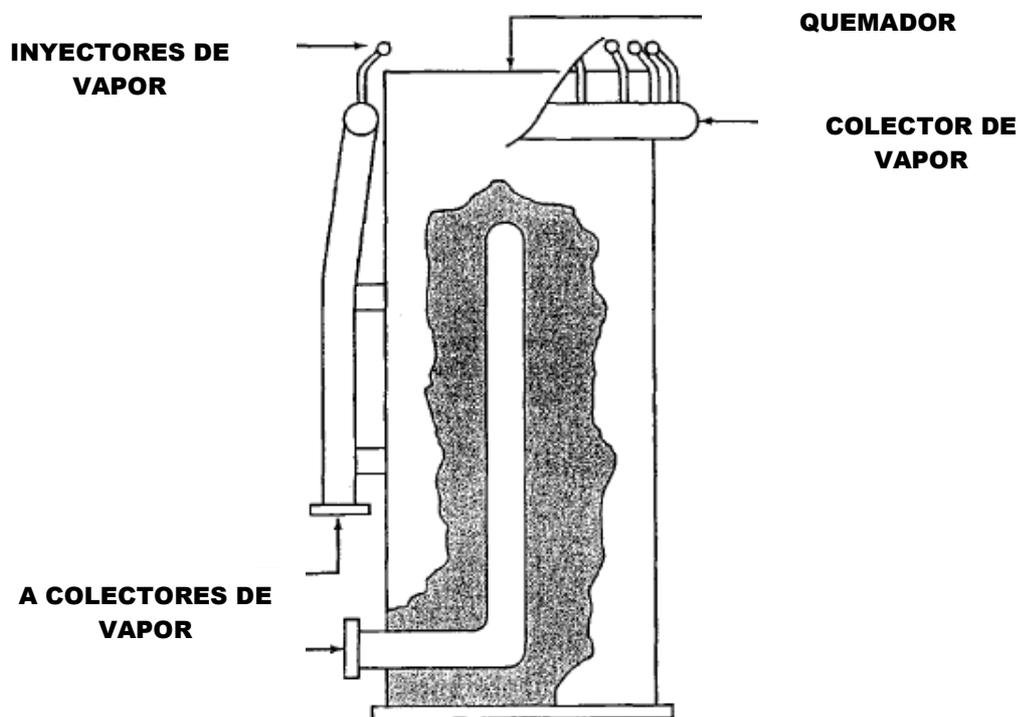


Figura 19: Quemador libre de humos mediante inyección de vapor.

3.2.5.5.2 SISTEMA DE SUPRESIÓN DE HUMOS POR MEDIO DE AIRE COMPRIMIDO A ALTA PRESIÓN

El aire a alta presión también se usa para prevenir la formación de humos. Este enfoque es menos común porque el aire comprimido es normalmente más caro que el vapor, sin embargo, puede ser preferible en situaciones con bajas capacidades de inhibición de humos, como por ejemplo, en el ártico, o en aplicaciones a bajas temperaturas donde el vapor pudiera congelarse, y por lo tanto atascar los conductos del sistema. Otras aplicaciones en las que este tipo de sistema de supresión de humos es preferible, son las

instalaciones en desiertos o en islas donde hay escasez de agua para producir vapor, o en situaciones donde el gas liberado por la antorcha pudiera reaccionar con el agua. Los mismos métodos de inyección descritos para el vapor (3.2.5.5.1) son usados con el aire comprimido.

3.2.5.5.3 SISTEMA DE SUPRESIÓN DE HUMOS POR MEDIO DE VENTILADORES

Un sistema de aire forzado a baja presión, es normalmente la primera alternativa evaluada si no hay servicios disponibles para la operación libre de humo. El sistema crea turbulencia en la zona de llama mediante la inyección de aire a baja presión, que favorece una distribución uniforme por toda la llama, suministrado por un ventilador localizado a pie de antorcha. Ver **figura 12**.

La configuración de la ubicación de los ventiladores puede ser variada, a saber: dos en paralelo con uno de ellos en *standby*, 2 en paralelo y en tándem, y múltiples que añadan mayor capacidad a medida que el caudal del gas de la antorcha lo requiera.

También existen motores de una, de dos velocidades, y de velocidad variable. Pueden llevar o no, otros dispositivos de control de flujo, como los *dampers*.

Para mover el aire en este tipo de sistemas hay tres tipos de ventiladores:

- **Centrífugo**

Son ventiladores con los álabes inclinados hacia atrás y comúnmente movidos por motores eléctricos. En circunstancias especiales se emplean en este tipo de ventiladores motores de combustión interna o turbinas de vapor. Ver **figura 20**.

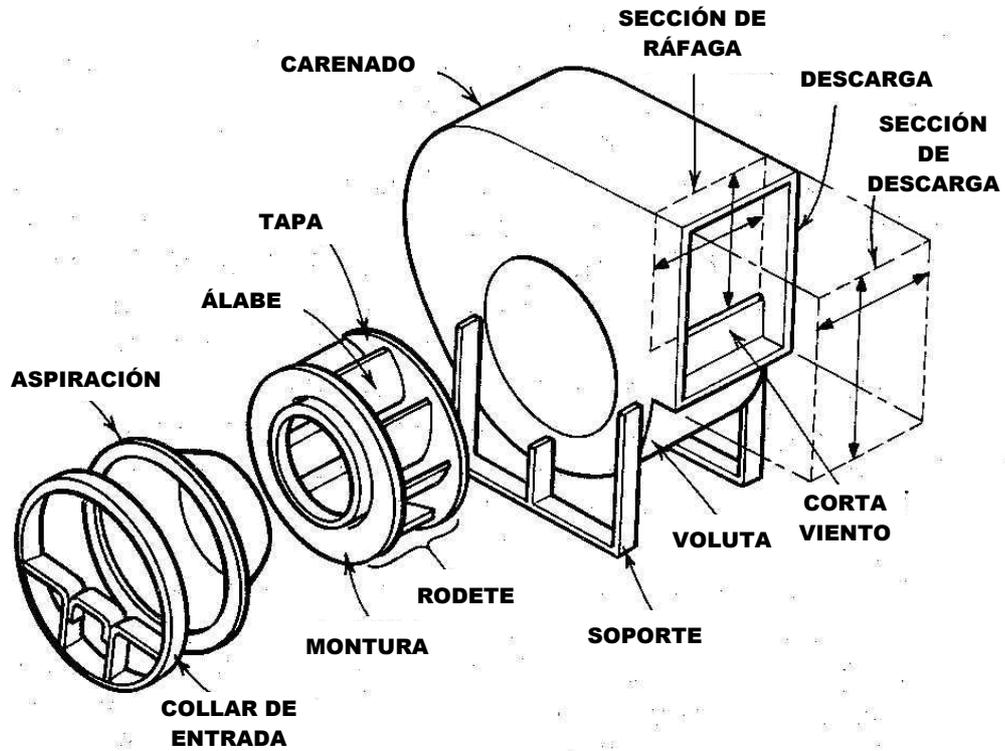


Figura 20: Ventilador centrífugo.

- **Ventilador Axial de paso fijo o ajustable**

Estos ventiladores están movidos por motores eléctricos acoplados con una potencia de hasta 261 kW (ver **figura 21**).

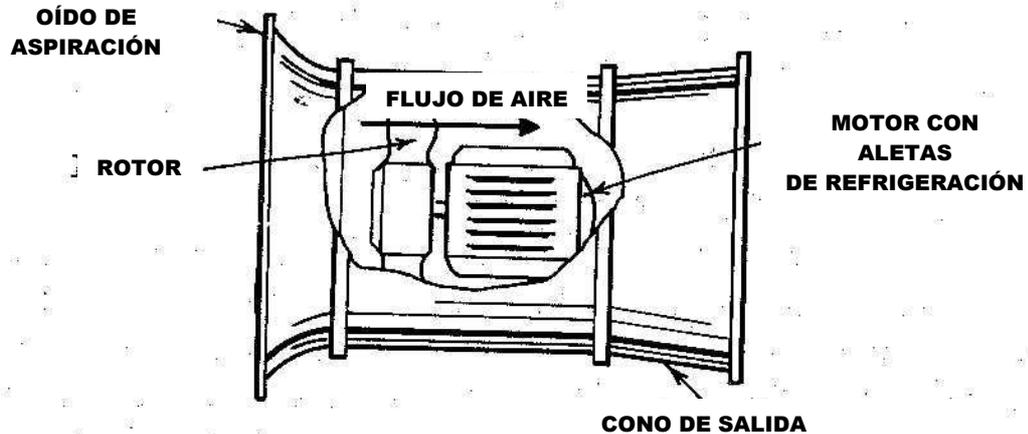


Figura 21: Ventilador axial.

- **Ventiladores de alta presión**

Se tratan de ventiladores centrífugos multietapa con una amplia variedad de configuraciones de rotor, que descargan normalmente a una presión de hasta 1 bar o más.

3.2.5.6 SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN Y/O BALIZAMIENTO

Deben estar señalizados todos los obstáculos que una instalación de antorcha pueda representar a la navegación aérea, para ello se dispone de un balizamiento con luces intermitentes o continuas, sólo por la noche, o todo el día. A veces, se acompaña de una señalización consistente en el franjeado blanquirrojo de la zona más alta del obstáculo. El balizamiento ha de ser visible desde cualquier posición 360° alrededor de la antorcha, para lo cual cuenta con 3 juegos de balizas a 120°, de 2 lámparas cada uno. Mientras una lámpara esta en operación, la otra se encuentra en *standby*.

El balizamiento aéreo y señalización de la antorcha mediante luces y/o franjas de colores respectivamente, estará conforme con la última edición de la normativa aplicable de aviación civil y normas de ámbito local, o en su defecto, por el documento general Anexo sobre aeródromos del ICAO, publicado en Montreal (Canadá).

El balizamiento soportado por la estructura de la antorcha es fijo y requiere de una adecuada protección contra la radiación, por su proximidad a la zona de alta

temperatura. El encendido de los juegos de balizas se gobierna a través del armario de alumbrado, emplazado normalmente sobre el bastidor del panel de encendido o a pie de antorcha, por medio de un sensor de crepúsculo, para encender automáticamente las balizas cuando anochezca. También se pueden encender manualmente, cambiando el selector del armario de alumbrado de automático a manual. Cuando una lámpara de las balizas se funde, el panel de control lo detecta y enciende automáticamente la otra, además de enviar una señal remota para avisar sobre ello. Esto permitirá realizar su sustitución durante la parada de planta.

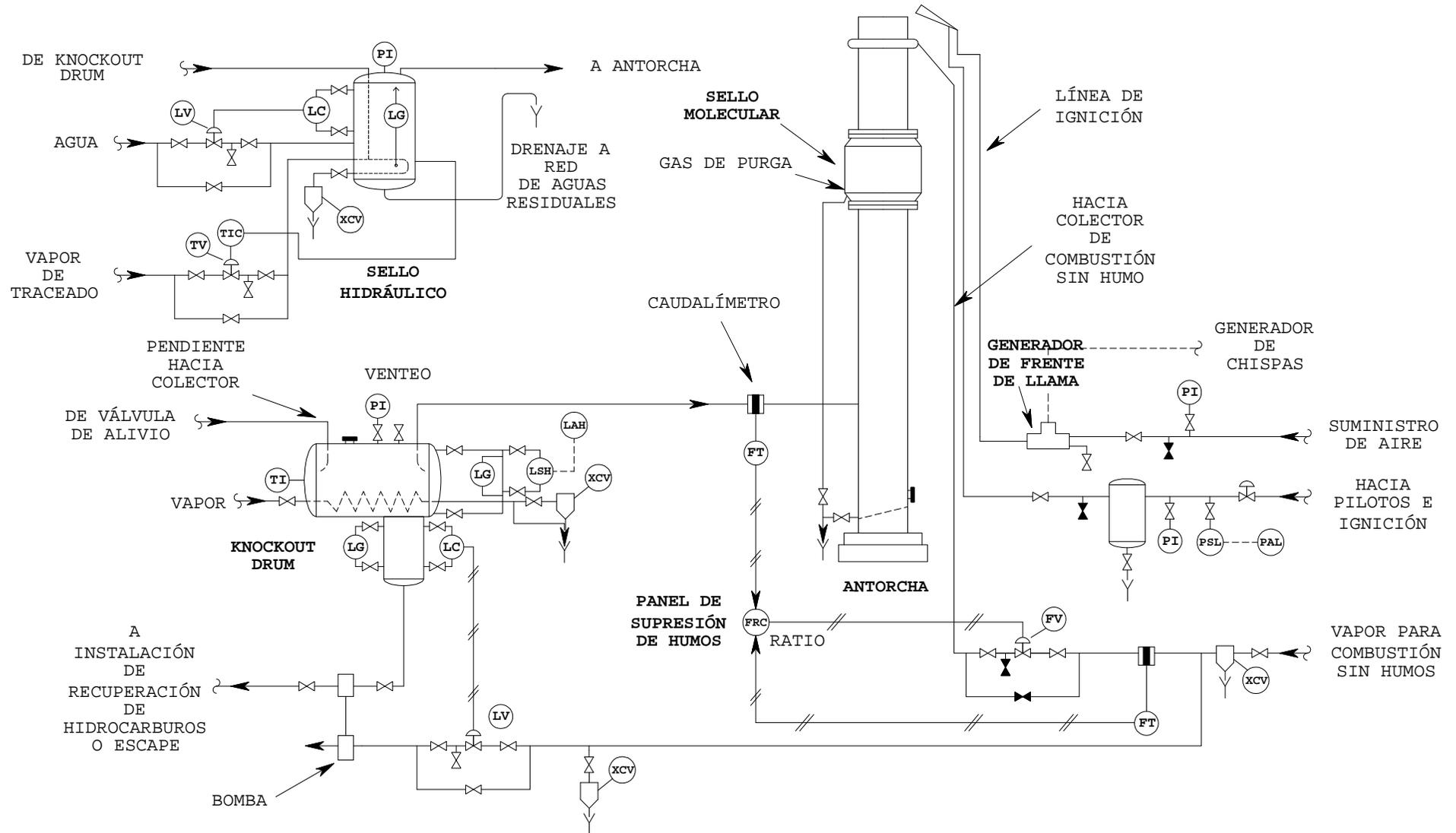


Figura 22: Esquema general del Sistema de Inertización de Gases.

3.2.6 BASE DEL DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico debe considerar lo siguiente:

- Temperatura, presión y composición del gas de la antorcha (las consideraciones criogénicas deben ser tenidas en cuenta).
- La naturaleza corrosiva del gas de la antorcha.
- Condiciones ambientales (máxima y mínima).
- Las cargas del viento, la nieve y el hielo.
- Carga sísmica.
- Condiciones del emplazamiento.
- La proximidad al equipo de las estructuras, pasos y lindes del lugar.
- Criterios de inspección y mantenimiento.
- Dilataciones y contracciones debidas a los cambios térmicos medioambientales, u originados por el mismo proceso de la antorcha.
- Presión de diseño en caso de *flashback* o retorno de llama.

3.2.7 CRITERIOS DE DISEÑO DEL SISTEMA

El diseño del sistema antorcha, debe abordarse desde el punto de vista de los diferentes subsistemas que lo integran. Cada uno de los criterios de diseño debe ser evaluado por su impacto en otros criterios, y de conformidad con las funciones más básicas que ha de cumplir una antorcha (ver 3.2.1). Los principales criterios de diseño para un sistema de antorcha se enumeran a continuación:

- **Combustión Eficiente y Fiable**

Es necesaria una combustión eficaz para reducir las emisiones dentro de los niveles permitidos.

- **Pérdida de Carga**

La pérdida de carga deberá ser suficiente como para lanzar la totalidad de los gases residuales y combustibles auxiliares, además del aire y el vapor al quemador con la suficiente velocidad de salida.

- **Eliminación de líquidos**

Los líquidos serán eliminados para prevenir una combustión pobre, la combustión de gotas de líquido, y la saturación de los quemadores.

- **Infiltración de aire**

La infiltración de aire dentro del sistema puede ocasionar una combustión en el interior del mismo fuste. También podría causar retorno de llama o *flashback*.

- **Radiación de la llama**

La radiación de la llama puede producir daños al equipamiento, a las estructuras, y al personal colindante.

- **Eliminación de humos**

Puede ser requerida una supresión de humos en ciertos ambientes, o para garantizar ciertas condiciones de seguridad.

- **Recuperación de los gases de la antorcha**

Una parte de los gases de la antorcha pueden ser recuperados a la planta después de haber vuelto a ser comprimidos.

- **Ruidos y luz visible**

Los ruidos y la luz deben ser reducidos a los niveles permitidos, para así evitar molestias al vecindario.

3.2.8 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ANTORCHA EN UNA PARADA DE PLANTA.

Las instalaciones de regasificación, refinerías, y resto de plantas de proceso, consideran la descarga a antorcha como un mecanismo de seguridad, con el objetivo de eliminar el exceso de gas, y con ello evitar una sobrepresión excesiva e incontrolada que genere finalmente una explosión.

El sistema de antorcha permite la recogida y eliminación de forma segura de los vapores de los hidrocarburos procedentes de las válvulas de control, venteos, y mecanismos de alivio de seguridad.

Además, las plantas de regasificación, se diseñan de acuerdo con la filosofía de mínimo venteo. El único exceso de vapores producido durante la operación normal de la planta, es un caudal pequeño de purga con nitrógeno para prevenir el ingreso de aire dentro del sistema de venteo, previniendo así la posibilidad de *flashback*.

El sistema de antorcha se dimensiona para la eliminación de los vapores de los hidrocarburos originados en condiciones de operación anormales y de emergencia. Este sistema no se diseña para emergencias coincidentes sin relación.

En el caso de un fallo total de energía, la planta se lleva a situación de paro, y cualquier operación de descarga se detiene, de modo que sólo el mínimo vapor de *boil-off* de los tanques de almacenamiento y de los sistemas de tuberías de GNL, es dirigido al venteo para su eliminación.

En el caso de un fallo parcial de energía que afecte sólo a los compresores de *boil-off*, el gas de *boil-off* nuevamente se dirige al colector de venteo, y cualquier operación de descarga deberá realizarse con un caudal reducido.

Muchas situaciones de descarga a antorcha, tienen que ver con fallos en el suministro de energía eléctrica a planta, es por ello que plantas de regasificación y demás plantas de proceso, deben buscar fuentes de suministro alternativas, o sistemas de seguridad que garanticen la no interrupción del suministro de energía eléctrica a planta.

Las situaciones de emergencia en planta pueden ser debidas a:

- cambio de materia prima (hidrocarburos)
- fallo de los equipos
- infraestructura vieja
- mantenimiento deficiente
- error humano
- desviación de los procedimientos operacionales
- fallos en el suministro eléctrico
- operación por encima de la capacidad de diseño

Estudios de la *Environmental Protection Agency* indican que desafortunadamente, las descargas a antorcha, ocurren de forma rutinaria fuera de toda situación de emergencia, o con el objetivo de burlar los equipos de control de polución. Esto lleva a la emisión de contaminantes nocivos, que van en contra del objetivo de minimizar las emisiones.

El objeto de la combustión en antorcha, es conseguir un proceso de combustión controlado de compuestos orgánicos que son transportados hasta un quemador, donde mediante una llama al aire, se produce una inertización o destrucción completa de dichos hidrocarburos.

Una vez tienen lugar las condiciones que llevan a una descarga a antorcha, dicho gas será transportado desde el punto de sobrepresión, y a través del mecanismo de alivio, hasta el colector de antorcha. Una vez accede a ella, viajará a través del fuste

hasta el sello molecular o dinámico, en la parte alta de la antorcha y previo al quemador, que imposibilita el acceso de oxígeno aguas arriba del quemador a través de un sello o tapón de gas (generalmente nitrógeno de purga). Finalmente, el gas accede al quemador, donde la llama de los pilotos aporta la energía de activación que da lugar a la inflamación del gas natural.

La eliminación vía combustión de dicho gas está garantizada, puesto que los pilotos se encuentran encendidos en todo momento. La monitorización vía termopares de llama piloto y principal, permiten tener confirmación siempre de ello.

La descarga a antorcha no cesará hasta que las causas origen de la sobrepresión sean eliminadas, produciéndose el cierre de los mecanismos de alivio de presión, y con ello la extinción de la llama principal poco tiempo después, no así la llama de los pilotos, que debe permanecer encendida en todo momento.

El caudal a antorcha, siendo máximo en los primeros instantes debido a una mínima contrapresión ligeramente por encima de la presión atmosférica, irá disminuyendo a medida que la sobrepresión del equipo o línea, comience a reducirse. Una vez sea alcanzada una presión inferior a la de tarado de la válvula de seguridad, esta se cerrará, y posteriormente la llama principal de la antorcha se apagará.

CAPÍTULO 4

CONSIDERACIONES SOBRE EL PROCESO

4.1 NOTAS SOBRE LOS DATOS COMUNES DEL PROCESO

A continuación se expone cómo influyen ciertas propiedades físicas y geométricas en la radiación a nivel de suelo.

4.1.1 CAUDAL

Al aumentar el caudal del gas de la antorcha, generalmente incrementa la radiación recibida a nivel de suelo, debido al resultado de la elevación de calor liberado.

Sin embargo, incrementando el caudal también:

- Incrementa la velocidad de salida en el quemador, lo que origina que la llama se ponga más vertical, incrementando así la distancia entre el punto medio de la llama y el nivel del suelo.
- Incrementa la longitud de la llama, que además hace aumentar la distancia entre el punto medio de la llama y el nivel del suelo.

En ocasiones, el incremento entre la distancia entre el punto medio y el nivel de tierra, predomina sobre el incremento en la liberación de calor, causando que un aumento del caudal origine una reducción en la radiación.

4.1.2 TEMPERATURA

Aumentando la temperatura del gas de la antorcha, disminuye la radiación a nivel del suelo. Esto es debido a que al elevar la temperatura, se incrementa el caudal instantáneo, que hace que aumente la velocidad de salida en el quemador, que a su vez hace a la llama más vertical, que es lo que directamente provoca un incremento en la distancia entre el punto medio de la llama y el nivel del suelo, y que trae consigo una disminución en la radiación.

4.1.3 PESO MOLECULAR

En la práctica, un cambio en el peso molecular, probablemente también alterará el poder calorífico y la emisividad.

4.1.4 PODER CALORÍFICO INFERIOR

Aumentando el poder calorífico del gas, se incrementa la radiación a nivel del suelo, debido al aumento del calor liberado.

4.1.5 EMISIVIDAD

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. En lo que respecta a la transferencia de calor, es de interés la radiación térmica o forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. La radiación térmica suele corresponder a la banda de frecuencias del infrarrojo.

Todos los cuerpos a una temperatura por encima del 0 absoluto, emiten radiación térmica. La radiación es un fenómeno volumétrico, y todos los sólidos, líquidos y gases, emiten, absorben, o reflejan radiación en diversos grados.

A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no necesita un medio de transmisión, y puede ocurrir en el vacío. La transferencia de calor por radiación es la más rápida, se da a la velocidad de la luz, y además, no sufre atenuación en el vacío.

La potencia máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura T_s , se modela mediante la Ley de Stefan-Boltzmann, cuya expresión es:

$$\dot{Q}_{\text{EMITIDA,MÁX}} = \sigma \times A_s \times T_s^4 \text{ (W)}$$

Donde $\sigma = 5.67 \text{ E}^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

A_s es el área de la superficie emisora.

T_s es la temperatura de la superficie emisora.

La superficie idealizada que emite radiación a la potencia máxima, se llama cuerpo negro, y la radiación emitida por éste, radiación del cuerpo negro. La radiación del cuerpo negro, representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica.

La radiación emitida por las superficies reales, es siempre menor que la que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura. Para cuantificar la radiación emitida por una superficie real respecto de la que emitiría el cuerpo negro, se utiliza la emisividad F , es decir, la emisividad representa la radiación emitida por una superficie respecto a la que emitiría el cuerpo negro:

$$F = \frac{\text{Radiación emitida por una superficie a una } T^\circ \text{C}}{\text{Radiación emitida por la misma superficie a esa } T^\circ \text{C como cuerpo negro}}$$

La radiación emitida por una superficie real, se expresa como una porción de la que emitiría el cuerpo negro. Esa porción viene dada por la emisividad. La radiación emitida por una superficie real se expresa como:

$$\dot{Q}_{\text{EMITIDA}} = F \times \sigma \times A_S \times T_S^4 \text{ (W)}$$

El rango de valores de la emisividad está comprendido en el intervalo: $0 < F < 1$. Para el cuerpo negro $F = 1$.

La emisividad pretende explicar el hecho de que no toda la energía liberada por la llama puede ser transferida por radiación. Aumentando la emisividad de la llama aumenta la radiación recibida a nivel de suelo.

El valor usado de la emisividad debería ser cuidadosamente evaluado para cada aplicación. Es esencial por seguridad que la emisividad no se estime a la baja, pero para asegurar que se hacen las presunciones precisas, también es importante que la emisividad no se sobreestime.

Habrà que tener cuidado en particular para aquellas antorchas que estèn destinadas a funcionar durante largos períodos a caudales cercanos al máximo de diseño, y/o donde el personal pueda estar ubicado relativamente cerca de la llama.

Los factores más importantes que hacen disminuir la emisividad son:

- Alta velocidad de salida, especialmente cuando se emplean diseños especiales de quemadores.
- Inyección de vapor. Si se proporciona suficiente vapor, se reducirá la luminosidad de la llama.
- La presencia de un gran porcentaje de gases inertes (por ejemplo, la presencia de gases inertes en el biogás, reduce significativamente la luminosidad y la emisividad de la llama).

4.1.6 DIÁMETRO INTERIOR DEL QUEMADOR

Aumentando el diámetro interior del quemador, aumenta la radiación a nivel de suelo. Esto se debe a que al aumentar el diámetro interior, disminuye la velocidad de salida en el quemador, lo que provoca que la llama arda más cerca de la horizontal, disminuyéndose así la distancia entre el punto medio de la llama y el nivel del suelo.

4.1.7 VELOCIDAD DEL VIENTO

El incremento de la velocidad del viento, tiende a aumentar los niveles de radiación a nivel de suelo, porque la llama tiende a tumbarse buscando la horizontalidad. En contrapartida, un aumento de la velocidad del viento, también trae consigo un aumento del enfriamiento por convección, y que normalmente, y por ser una circunstancia favorable, no es tenido en cuenta para así poder estar más del lado de la seguridad.

4.2 EFECTOS DE LA RADIACIÓN TÉRMICA EN HUMANOS Y EQUIPOS

4.2.1 EFECTOS EN HUMANOS

Múltiples investigaciones han sido emprendidas para determinar el efecto de la radiación térmica sobre la piel humana. A partir del efecto de la radiación sobre humanos, Stoll y Green averiguaron que con una intensidad de $6,3 \text{ kW/m}^2$, el umbral de dolor era alcanzado en 8 segundos, y el abrasamiento ocurría en 20 segundos. En la piel desnuda de ratas blancas, una intensidad de $6,3 \text{ kW/m}^2$ producía quemaduras en menos de 20 segundos. El mismo informe indicaba que una intensidad de $23,7 \text{ kW/m}^2$ causaba quemaduras en la piel desnuda de las ratas blancas en aproximadamente 6 segundos.

En la **tabla 2**, se dan los tiempos de exposición necesarios de Buettner para alcanzar el umbral de dolor en función de la intensidad de la radiación. Estos datos experimentales fueron obtenidos en pruebas hechas en personas, a las que se les exponía su antebrazo a una intensidad de radiación controlada. La quemadura aparece a continuación del umbral de dolor muy rápidamente. Los datos obtenidos por Buettner concuerdan con los de Stoll y Green.

Ya que el nivel de radiación admisible está en función del tiempo de exposición, factores como el tiempo de reacción y la movilidad humana, deben ser considerados. En liberaciones de emergencia a antorcha, un tiempo de reacción de 3 a 5 segundos es asumible. Además, podrían transcurrir otros 5 segundos más, antes de que la media de los individuos pudieran buscar resguardo o alejarse del área, lo que nos daría un periodo total de exposición de entre 8 y 10 segundos.

La intensidad de la radiación solar está dentro del rango $0,79-1,04 \text{ kW}/\text{m}^2$, y puede ser un factor para algunos emplazamientos, pero su efecto añadido a la radiación de la antorcha tendrá sólo un impacto menor en el tiempo de exposición aceptable. A pesar de ello, el impacto de la radiación solar debería ser considerado en el cómputo global de la radiación.

Otro factor a ser considerado con respecto de los niveles de radiación térmica, es la garantía de que la ropa proporciona un escudo efectivo, permitiendo que sólo una parte del cuerpo sea expuesta a la totalidad de la intensidad. En el caso de que la radiación provenga de un punto elevado, el casco típico de los empleados de refinerías, es una buena protección para la cara y el cuello. La ropa reglamentaria en planta, es un medio eficaz para la prevención de quemaduras dentro de determinados niveles de radiación.

Hay ciertas diferencias prácticas entre las pruebas de laboratorio y la exposición real. La radiación térmica es frecuentemente el factor de control que determina la distancia de exposición al foco caliente en antorchas elevadas. La **tabla 3** expone los niveles de radiación de diseño de la antorcha recomendados para el personal a nivel de suelo, o en plataformas adyacentes, al valorar la exposición en las condiciones de liberación de calor en la planta. La difusión y uso del equipo de protección personal, se puede considerar una manera práctica de alargar los tiempos de exposición.

En la evaluación de los efectos de la radiación de las llamas, deberían ser considerados también las personas ajenas a las instalaciones, que podrían estar expuestas dentro o fuera de los límites de la planta.

Intensidad de la radiación, en kW/m^2	Tiempo hasta alcanzar el umbral de dolor, en segundos
1,74	60
2,33	40
2,90	30
4,73	16
6,94	9
9,46	6
11,67	4
19,87	2

Tabla 2: Tiempos de exposición necesarios para alcanzar el umbral de dolor.

Nivel de diseño Admisible (K), en $\frac{kW}{m^2}$	Condiciones
15,77	Estructuras y zonas donde no es probable que estén los operarios realizando ningún servicio, y donde haya disponible un refugio o protección del calor, por ejemplo, detrás de un equipo.
9,46	Zonas a las que tengan acceso las personas, por ejemplo, en el suelo debajo de la antorcha, o en una plataforma de servicio de una torre cercana. La exposición debe estar limitada a unos cuantos segundos, suficientes únicamente para escapar.
6,31	Zonas donde puede requerirse una acción de emergencia de duración inferior a 1 minuto, por parte de personal sin protección pero con ropa adecuada.
4,73	Zonas donde puede requerirse una acción de emergencia de varios minutos de duración, por parte de personal sin protección pero con ropa adecuada.
1,58	Situaciones donde el personal con ropa adecuada puede estar expuesto de manera continuada.

Tabla 3: Niveles de radiación de diseño recomendados para una antorcha (incluyendo la radiación solar).

NOTA: En torres u otras estructuras elevadas donde la evacuación rápida no sea posible, las escaleras de mano deben ponerse en el lado alejado de la antorcha, de tal modo que la estructura pueda servir de cierto escudo cuando K esté por encima de $6,31 \frac{kW}{m^2}$.

4.2.2 EXPOSICIÓN DEL EQUIPO

En la mayoría de los casos, el equipo puede tolerar con seguridad mayores niveles de intensidad de calor que aquellos definidos para las personas. Sin embargo, si hubiera algo vulnerable a sobrecalentamientos, como por ejemplo, materiales de construcción con bajo punto de fusión (tal como aluminio o plástico), corrientes de fluidos sensibles al calor, sitios con vapores inflamables, o instalaciones eléctricas, en esos casos, habría que evaluar el efecto de la radiación térmica. Cuando esta evaluación se requiera, habrá de realizarse el balance de calor necesario para determinar la temperatura resultante de la superficie, por comparación con las temperaturas aceptables para el equipo.

CAPÍTULO 5

CÁLCULO DE LA ANTORCHA

5.1 BASES DE DISEÑO Y UBICACIÓN DE LA ANTORCHA DENTRO DE LA PLANTA DE REGASIFICACIÓN

5.1.1 BASES DE DISEÑO

La definición de una Antorcha como terminal de un Sistema de Alivio e Inertización de gases, viene dada por la determinación de 2 parámetros fundamentales:

·Altura	H
·Diámetro	d

Para ello se parte de una serie de datos de inicio, a aportar por la Ingeniería representativa del cliente, o por el cliente final dueño de la planta. A saber:

- Propiedades del Gas de Antorcha

·Tipo de gas		GAS NATURAL
·Peso Molecular del gas	M_W	16,3 g/Mol
·Poder Calorífico Inferior	q	11.052 kcal/kg
·Temperatura del gas de antorcha	T	167 K (-106 °C)
·Presión de alimentación de gas a antorcha	P_o	25 kPa
·Densidad (C.N.)	ρ	0,776 kg/m ³
·Viscosidad Dinámica	μ	0,008 cP
·Caudal Másico de diseño para radiación	\dot{m}	241.000 kg/h
·Coeficiente Isentrópico	$\gamma (C_P/C_V)$	1,4
·Factor de Compresibilidad	z	1

- Condiciones del emplazamiento

·Presión en el Quemador (Atmosférica)	P_2	101,3 kPa
·Velocidad del viento (medida a 10 m de altura)	U_∞	14 m/s
·Radiación Admisible a nivel de suelo	K	6 kW/m ²
·Altura de Rack de Tuberías (Colector de Antorcha)	h_{RACK}	5,8 m

Por otro lado, se disponen de una serie de datos originarios de la experiencia de la empresa en el funcionamiento de las antorchas, con diferentes gases de antorcha, condiciones del entorno, etc.

- Propiedades de la llama y del medio

·Emisividad	F	0,19
·Transmitividad del medio	τ	1

5.1.2 UBICACIÓN DE LA ANTORCHA DENTRO DE LA PLANTA DE REGASIFICACIÓN

La implantación en una planta sigue siendo más un arte que una ciencia. Todo ello con el objeto de que la disposición de los equipos permita minimizar:

- a) los costes de construcción
- b) el daño a las personas y equipos en caso de escape o explosión
- c) los costes operacionales
- d) los costes de mantenimiento
- e) el nº de operadores de planta
- f) la posible modificación o expansión de la planta

Todos estos objetivos no pueden ser alcanzados de manera óptima y simultáneamente. Por ejemplo, para reducir potenciales pérdidas en caso de fuego, la planta debería extenderse ampliamente, sin embargo, esto traería consigo mayores costes de bombeo, e incrementaría los operadores de planta necesarios. Por lo tanto, se deberá determinar cuáles son los condicionantes más importantes a considerar, y llegar al mejor compromiso entre ellos.

El primero de los factores a considerar es la dirección predominante del viento. La dirección del viento definirá cuál es, por lo general, el emplazamiento de muchos equipos e instalaciones. Todos aquellos equipos que puedan derramar sustancias inflamables deberían localizarse a sotavento (viento abajo). De este modo, si un derrame o descarga tiene lugar, los vientos no serán capaces de llevar vapores sobre la planta, donde estos podrían ser encendidos por una superficie caliente, o alguna llama presente, en el caso del presente proyecto, la antorcha.

Por esta misma razón, los generadores, calderas, bombas de agua, y el suministro de aire comprimido, deberían localizarse a 75 m del resto de la planta, y a barlovento.

Otras instalaciones que son generalmente emplazadas a barlovento (viento arriba), son las oficinas, talleres, y laboratorios, dado que la presencia de personal de planta será permanente, y por lo tanto, su protección será necesaria en todo momento.

El área de tanques y almacenes que puedan contener productos no peligrosos, no inflamables, o materiales no explosivos, deberían localizarse igualmente a barlovento. Aquellos elementos que estén fuera de esta categoría, deberían

localizarse a sotavento, para evitar daños y la posibilidad de una destrucción mucho mayor debido a un vertido sobre el área de proceso.

Según la *Oil Insurance Association*, se recomienda una distancia a otros edificios y unidades de proceso de 92 m, para antorchas de altura menor a 23 m, y para antorchas de altura superior, la distancia recomendada es de 61 m.

Otros criterios a tener en cuenta para la implantación de la antorcha son:

- Caudal de descarga a la antorcha. Simultaneidad de descargas a las antorchas, que en situación de emergencia pudieran darse. API recomienda que 2 descargas no relacionadas no serán coincidentes.
- Límite de contrapresión del sistema de colectores y antorcha.
- Radiación admisible a nivel de suelo.
- Vientos predominantes.

En un primer análisis, sería necesario identificar las posibles descargas a antorcha relacionadas que podrían darse, para posteriormente, mediante un análisis probabilístico, determinar la posibilidad de que se den simultáneamente una o varias descargas a la antorcha. Hay que tener en cuenta que, de tener lugar esta simultaneidad, la contrapresión que se generaría en la descarga de las válvulas de seguridad sería mayor, y en caso de no estar prevista por diseño, podría implicar la oscilación en el comportamiento de la válvula (una apertura y cierre rápidos). Esto obviamente dará lugar a una inestabilidad en la llama, y la consiguiente reducción en la eficiencia de la antorcha.

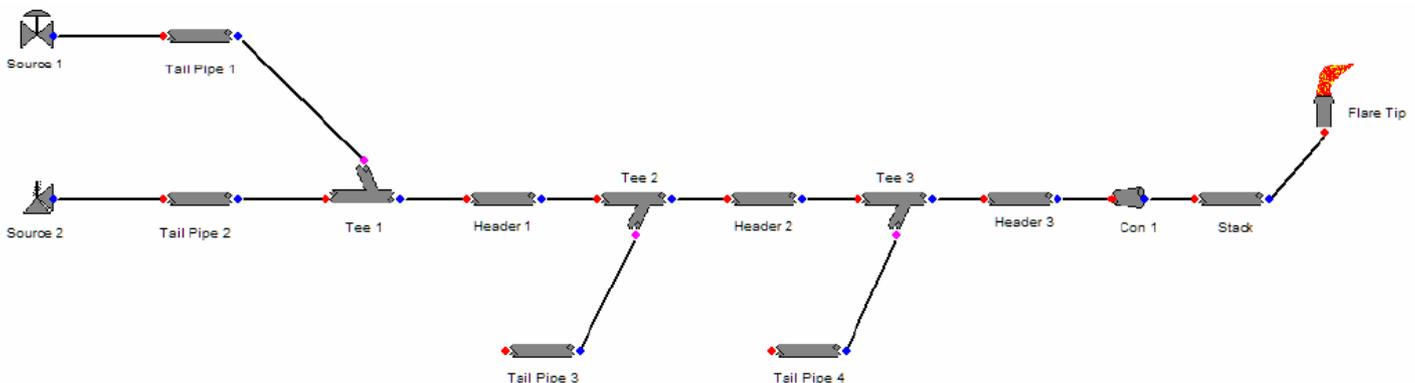


Figura 23: Simulación de sistema de descarga a antorcha.

Otro de los criterios que se tienen en cuenta para dimensionar el sistema de colectores, es el relativo a la contrapresión en la línea de descarga a antorcha. La norma *API STANDARD 520, Part 1—Sizing and Selection*, en su apartado 5.3.3.1.3, indica que las válvulas de seguridad (PRV's) en una aplicación convencional, no sufrirán una contrapresión por encima del 10% de la presión de tarado de la válvula (presión de diseño de la línea).

Se debe tener en cuenta por otro lado, que existe una limitación adicional en la velocidad del gas en la descarga por parte de la antorcha, con el objeto de evitar

ruido y vibraciones que puedan originar el fallo del equipo. Según la *API Standard 521* 7.3.3.2.2, el diámetro de la antorcha se basa en un criterio de velocidades versus pérdida de carga. Es admisible una velocidad de hasta 0,5 Mach, para caso pico o transitorio, y 0,2 Mach para operación normal y frecuente. Todo ello depende de:

- Máxima descarga a la antorcha que permita anticipar el caudal correspondiente a una descarga media.
- Temporizado, frecuencias y duración de las descargas.
- Criterios de diseño en favor de una llama estable. No conviene olvidar que la eficiencia en la combustión, y por lo tanto que no se emitan inquemados a la atmósfera, depende en gran medida de esta.

Por último, el nivel de radiación de referencia también define la implantación de la antorcha. La proximidad a equipos de proceso, o la mera presencia de personal de forma habitual marcará en gran medida este límite de radiación. La proximidad de equipos de proceso cercanos, determinará un nivel de temperatura (radiación) en su entorno. Si por otro lado, los operarios trabajasen a nivel de suelo de forma continuada, esto a su vez también determinará un nivel de radiación. Por tanto se trataría de analizar qué caso es el más restrictivo a nivel de radiación, siendo ese el limitante.

5.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE DIMENSIONES

Aunque las empresas especializadas en esta gama de productos disponen de avanzados software de diseño, que permiten una determinación de acuerdo con la *API RP 521* y su *know how*, en el caso del presente proyecto, se ha procedido a la determinación del Diámetro y Altura de la Antorcha, a través de un proceso iterativo en 2 fases.

Es necesario partir de 2 premisas básicas. Una de ellas está relacionada con la presión de alimentación, dado que el diámetro y la altura deberán ser tales, que permitan llevar el caudal de diseño al punto terminal de la antorcha para su combustión, es decir, al quemador. El otro condicionante es el nivel de radiación en el punto de referencia seleccionado, habitualmente a pie de antorcha, y que ha sido la opción seleccionada para el diseño.

De haber seleccionado un punto a nivel de suelo, pero alejado del fuste, implicaría definir un área estéril, que debería ser vallado para evitar el acceso del personal de planta, salvo para mantenimiento, y obviamente con la antorcha fuera de servicio. Hay que tener en cuenta, que dentro de dicho perímetro, tendríamos un nivel de radiación superior a lo admisible para una persona de forma continuada. Puede comprenderse con facilidad a partir de la **figura 24**.

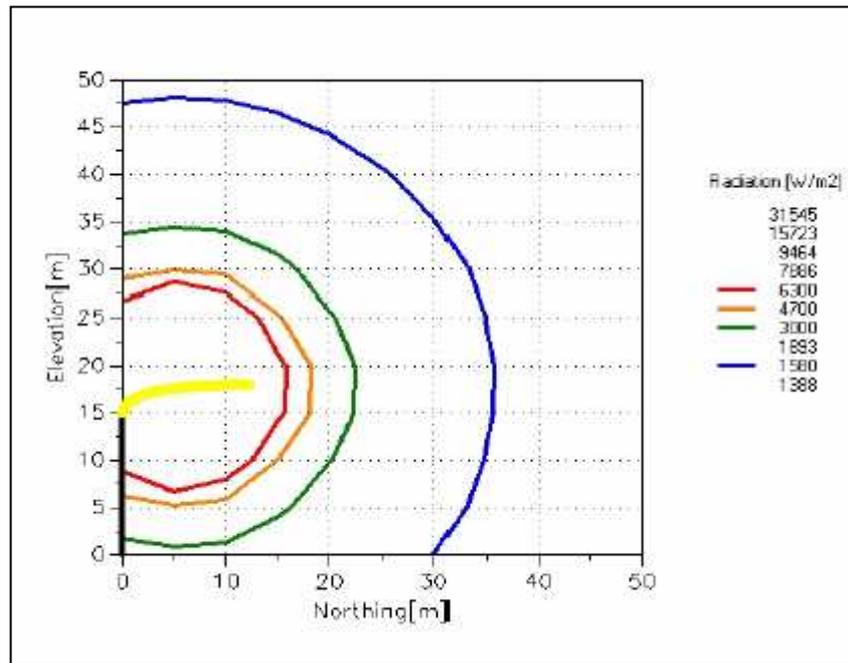


Figura 24: Esferas con el mismo nivel de radiación.

La curva correspondiente a $1,58 \text{ kW/m}^2$ y en su corte con el suelo, define el área segura a 30 m, fuera de dicha zona, un operario podría trabajar con ropas de protección adecuadas continuamente expuesto (ver **tabla 3**). De realizar trabajos dentro del área estéril, con la ropa adecuada y continuamente expuesto, sólo podría permanecer unos minutos.

El condicionante de la presión de alimentación afecta a efectos de diseño en que se ha de determinar un diámetro que implique unas pérdidas de carga a lo largo de la línea, incluidas singularidades, no superiores a la presión disponible a la entrada de antorcha.

Sin embargo, la altura de la antorcha es una incógnita, y es aquí donde se emplea el cálculo de radiación, que supuesto dicho diámetro, permite obtener una altura de antorcha. Dado que se conocen, la longitud del resto de singularidades, por diferencia se puede estimar la longitud del fuste, y comprobar que la pérdida de carga final es inferior al límite ya definido.

De no ser válido el diámetro seleccionado, habría que seleccionar otro y proceder a una nueva iteración. Mediante este proceso en varias iteraciones, se consigue ajustar un diámetro y altura de antorcha que permite conducir dicha corriente de gases hasta el quemador, y por otro lado, conseguir un nivel de radiación a nivel de suelo, de acuerdo con la limitación marcada por la especificación técnica del cliente.

Por tanto, es una conjunción del cálculo de pérdida de carga, para lo cual se han tomado las correlaciones dadas por bibliografía de uso muy extendido como la fuente *CRANE "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías"*. Y por otro lado, el proceso de dimensionamiento de antorchas que define el estándar "*API Recommended Practice 521, 4TH Edition, March 1997*".

En este punto, es necesario señalar los elementos que constituyen este tipo de antorchas de tipo criogénico, constituidas por fuste, sello molecular y quemador. No por obvio es necesario precisar en este punto, el porqué de la ausencia de sello hidráulico, dispositivo de seguridad de uso común en las antorchas, y que en el presente proyecto, debido a las temperaturas extremadamente bajas, se produciría congelación de la columna de agua que hace de sello.

Cada uno de estos elementos se traduce en una restricción al paso del gas de la antorcha, y por tanto, es cuantificable su pérdida de carga. De entre las variables empleadas cabe señalar:

K_i	Coefficiente de pérdida de carga propio de cada accesorio o restricción. (<i>Ver Apéndice A-49 CRANE</i>)
ϵ	Rugosidad absoluta de tubería de Acero Inoxidable comercial. Se ha tomado un valor típico de 0,05 mm.
$\frac{\epsilon}{d}$	Rugosidad relativa.
f_T	Factor de fricción. Es función de la rugosidad.

Para su estimación, se ha recurrido a las siguientes correlaciones:

- TÉ

$$\Delta p_{TE} = K_{TE} \times \rho \times \frac{U_J^2}{2}$$

donde para flujo desviado a 90°

$$K_{TE} = 60 \times f_T$$

- FUSTE

$$\Delta p_{FUSTE} = K_{FUSTE} \times \rho \times \frac{U_J^2}{2}$$

$$K_{FUSTE} = f_T \times \frac{L_{FUSTE}}{d}$$

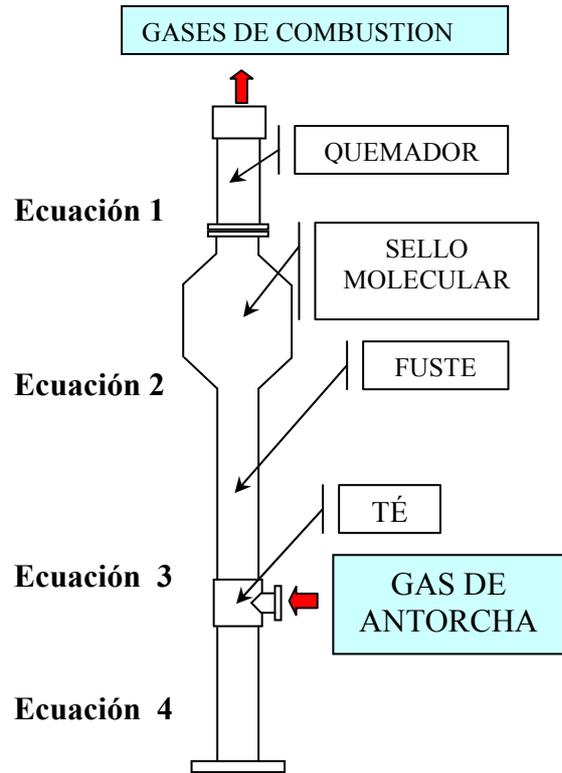


Figura 25: Modelización de la antorcha en partes para cálculo de pérdida de carga.

- SELLO MOLECULAR

Para la determinación de la pérdida de carga en el Sello Molecular, se parte del N° de Reynolds y del diámetro seleccionado, y a través del ábaco de la **figura 27**, se obtiene la pérdida de carga correspondiente a este elemento.

- QUEMADOR

El quemador, es un elemento constituido por una tubería de 3 metros de longitud, embridada al sello molecular, con el objeto de facilitar así el mantenimiento del mismo. La pérdida de carga en él, se define mediante las siguientes correlaciones:

$$\Delta p_{QUEMADOR} = K_{QUEMADOR} \times \rho \times \frac{U_J^2}{2} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$K_{QUEMADOR} = f_T \times \frac{L_{QUEMADOR}}{d} \quad \text{Ecuación 6}$$

- DESCARGA

El quemador es un elemento constituido por dos restricciones, por un lado una tubería de 3 metros de longitud, y por otro una descarga a la atmósfera, cuya pérdida de carga se define mediante las siguientes correlaciones:

$$\Delta p_{\text{DESCARGA}} = K_{\text{DESCARGA}} \times \rho \times \frac{U_J^2}{2} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$K_{\text{DESCARGA}} = 1 \quad \text{Ecuación 8}$$

El proceso iterativo comienza definiendo el rango de diámetros a estudio, a través de la determinación del N° de Mach en la descarga. Es pauta habitual en el sector, tomar un valor límite inferior de 0,2 para el cual la experiencia demuestra que el flujo de gas en la descarga del quemador es estable y permanente, y ello garantiza una combustión eficiente. En el otro extremo, se toma un valor límite superior de 0,5; para el cual, se generan vibraciones en el equipo, niveles de ruido excesivos, y se empeora la combustión. El valor del N° de Mach se determina como sigue:

$$N^{\circ} \text{ Mach} = 3,23 \times 10^{-5} \times \left(\frac{\dot{m}}{P_2 \times d^2} \right) \times \left(\frac{z \times T}{\gamma \times M_W} \right)^{0,5} \quad \text{Ecuación 9}$$

Si se toma como inicio un N° de Mach de 0,25, conocidas todas las variables de la expresión anterior, se procede a determinar el diámetro correspondiente:

$$d = \sqrt{\frac{3,23 \times 10^{-5}}{0,25} \times \left(\frac{241.000 \text{ kg/h}}{101,3 \text{ kPa}} \right) \times \left(\frac{1 \times 167 \text{ K}}{1,4 \times 16,3 \text{ g/mol}} \right)^{0,5}}$$

$$d = 0,912 \text{ m} \rightarrow 36 \text{ in}$$

Igualmente para un N° Mach de 0,5:

$$d = \sqrt{\frac{3,23 \times 10^{-5}}{0,5} \times \left(\frac{241.000 \text{ kg/h}}{101,3 \text{ kPa}} \right) \times \left(\frac{1 \times 167 \text{ K}}{1,4 \times 16,3 \text{ g/mol}} \right)^{0,5}}$$

$$d = 0,645 \text{ m} \rightarrow 25 \text{ in}$$

Se ha seleccionado como diámetro de inicio del proceso iterativo un diámetro comercial de 24 in, dado que el calculado no existe a nivel comercial para tuberías, bridas y demás accesorios, como puede observarse según la norma *ANSI B36.10*. “*Welded and Seamless Wrought Steel Pipe*”.

Dentro de la industria de bienes de equipo, es práctica habitual, la estandarización de tamaños, acudiendo a dimensiones comerciales, ya que ello implica un abaratamiento en horas de diseño, reducción de stocks, horas de fabricación, control de calidad, etc.

Teniendo en cuenta que el dato de la presión disponible en la brida de alimentación a antorcha es conocido, y considerando un diámetro exterior de 24 in (600 mm, diámetro interior), se puede comprobar si éste es a priori adecuado, para permitir trasegar el caudal de diseño a través de la antorcha hasta su punto de descarga, el quemador. Tanto la conexión de alimentación, como el fuste, el sello molecular y el quemador, se han considerado del mismo diámetro.

$$d = 24 \text{ in}$$

Previamente a la determinación de la altura del equipo, se requiere la determinación del coeficiente de fricción. Se procede a estimar en un primer paso, el N° de Reynolds, para lo cual utilizamos la siguiente correlación:

$$Re = \frac{\rho \times v \times d}{\mu} \quad \text{Ecuación 10}$$

Es necesario primero, evaluar la densidad del gas de antorcha a la temperatura de diseño, mediante la expresión:

$$\rho = \frac{P_{\text{DISEÑO}} \times M_w}{(z \times 0,08205 \times (T_{\text{DISEÑO}} [^\circ\text{C}] + 273,15))} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\rho = \frac{\frac{(101.300 + 25.000)}{101300} \text{ Atm} \times 16,3 \text{ g / Mol}}{\left(1 \times 0,08205 \frac{\text{Atm} \cdot l}{\text{Mol} \cdot K} \times (-106^\circ \text{C} + 273,15)\right)} = 1,482 \text{ kg / m}^3$$

Conocidas todas las propiedades del gas de antorcha, queda pendiente la determinación de la velocidad del fluido, que podrá estimarse una vez conocidos el caudal volumétrico y la sección interior de la antorcha:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\dot{V} = \frac{241.000 \text{ kg/h}}{1,482 \text{ kg/m}^3} = 162.618 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Con la sección interior de la antorcha:

$$A = \pi \times \frac{d^2}{4} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$A = \pi \times \frac{0,6^2}{4} = 0,28 \text{ m}^2$$

De ello resulta la velocidad de propagación del fluido:

$$U_J = \frac{\dot{V}}{A} \quad \text{Ecuación 14} \quad \text{donde } v = U_J$$

$$U_J = \frac{162.618 \text{ m}^3 / \text{h}}{3.600 \text{ s} / \text{h} \times 0,28 \text{ m}^2} = 161 \text{ m} / \text{s}$$

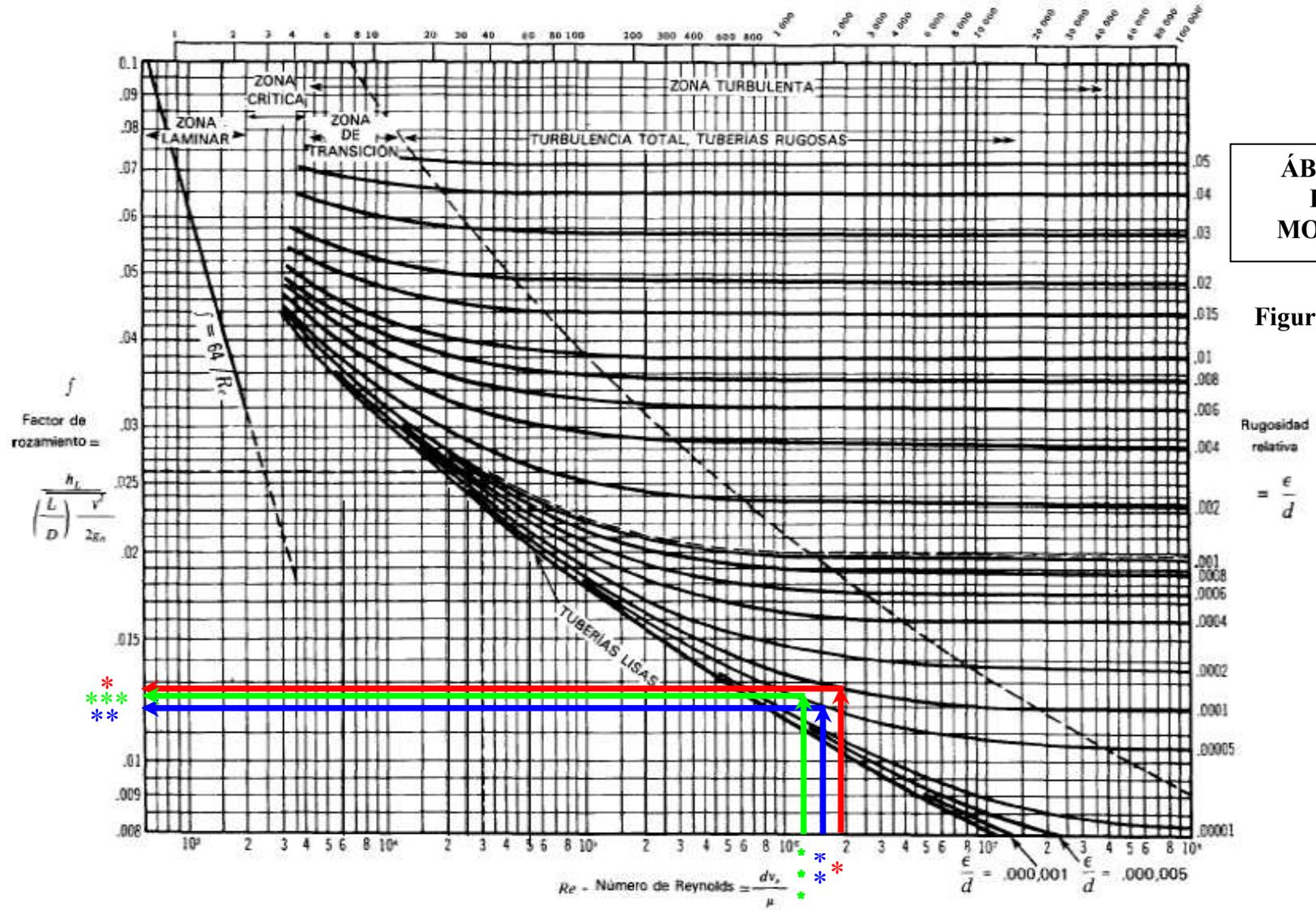
Podemos a partir de estos datos conocer el N° de Reynolds, únicamente nos queda determinar la viscosidad en $Pa \cdot s$, teniendo en cuenta la equivalencia $1cP \rightarrow 1000 Pa \cdot s$:

$$Re = \frac{1,482 \text{ kg} / \text{m}^3 \times 161 \text{ m} / \text{s} \times 0,6 \text{ m}}{0,000008 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 17.895.150 \approx 1,8 \times 10^7$$

Con este dato, entrando en el ábaco de Moody (ver **figura 26**, coordenadas *****) con el N° de Reynolds en abscisas y tomando la curva correspondiente de Rugosidad relativa de la tubería, se obtiene el valor del coeficiente de fricción, necesario para la evaluación de la pérdida de carga:

$$\text{Rugosidad Relativa} = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,05 \text{ mm}}{600 \text{ mm}} = 0,0001$$

$$f_T = 0,0125$$



ÁBACO DE MOODY

Figura 26

Determinado el coeficiente de fricción, es posible evaluar la pérdida de carga en cada uno de los elementos ya mencionados.

Para ello se parte de correlaciones suficientemente conocidas, que permiten determinar la pérdida de carga que se produce en cada uno de los elementos (restricciones) al paso del gas, y que se han detallado ya con anterioridad:

TE

A partir de las **ecuaciones 1 y 2**:

$$\Delta p_{TE} = 60 \times 0,0125 \times 1,482 \text{ kg/m}^3 \times \frac{(161\text{m/s})^2}{2} = 14,4 \text{ kPa}$$

Como se puede observar a partir de este primer resultado, la presión disponible para el resto de la antorcha, se ha reducido en un 57%.

A continuación se desarrolla qué pérdida de carga se produce en el sello molecular, el quemador y la descarga. A partir de las **ecuaciones 5, 6, 7, 8** y el ábaco del sello molecular (ver **figura 27**):

SELLO MOLECULAR

Conocido el N° de Reynolds correspondiente a $1,8 \cdot 10^7$ y el diámetro de la antorcha en consideración, DN600, y entrando sobre el eje de abscisas (↑) en la **figura 27**:

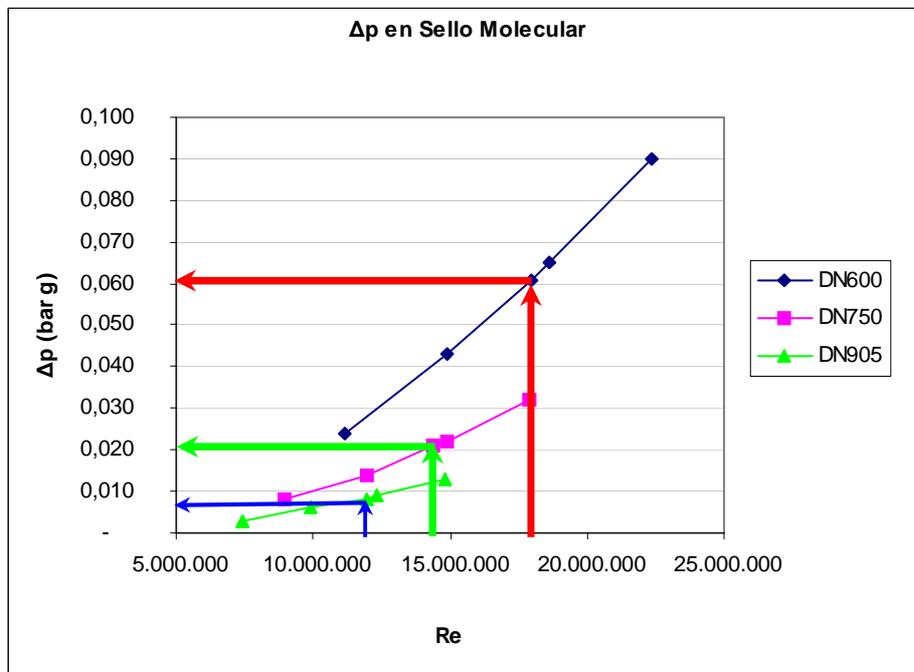


Figura 27: Ábaco del sello molecular.

resulta una pérdida de carga de 6,1 kPa, que supone el 25% de la presión disponible en la entrada de la antorcha.

QUEMADOR

Es necesario evaluar previamente la velocidad del gas de antorcha en la descarga del quemador, para lo cual se procede según las **ecuaciones 11, 12, 13 y 14** ya empleadas con anterioridad. En este caso la presión corresponde a la atmosférica, 1 atm.

$$\rho = \frac{1 \text{ Atm} \times 16,3 \text{ g / Mol}}{\left(1 \times 0,08205 \frac{\text{Atm} \cdot \text{l}}{\text{Mol} \cdot \text{K}} \times (-106^\circ \text{C} + 273,15)\right)} = 1,189 \text{ kg / m}^3$$

$$\dot{V} = \frac{241.000 \text{ kg/h}}{1,189 \text{ kg/m}^3} = 202.691 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$U_J = \frac{202.691 \text{ m}^3 / \text{h}}{3.600 \text{ s / h} \times 0,28 \text{ m}^2} = 201 \text{ m / s}$$

$$\Delta p_{\text{QUEMADOR}} = 0,0125 \times \frac{3 \text{ m}}{0,6 \text{ m}} \times 1,189 \text{ kg / m}^3 \times \frac{(201 \text{ m / s})^2}{2} = 1,5 \text{ kPa}$$

Correspondiente al 6% de la presión disponible en la entrada de la antorcha.

DESCARGA

De igual manera que la pérdida de carga evaluada en el cálculo anterior, conocidas la densidad y la velocidad del gas de la antorcha en la descarga:

$$\Delta p_{\text{DESCARGA}} = 1 \times 1,189 \text{ kg / m}^3 \times \frac{(201 \text{ m / s})^2}{2} = 24 \text{ kPa}$$

Con este resultado podemos observar, que se supera la presión disponible en el inicio de la línea, eso sin tener en cuenta la pérdida de carga que tendría lugar en el fuste. Por tanto se deduce, que dicho diámetro es insuficiente para trasegar el caudal de diseño, será necesario por tanto considerar un diámetro de antorcha mayor.

A partir de aquí, se va a proceder a una iteración más, y evaluar la idoneidad de 36 in, como diámetro de antorcha.

d =36 in

Se calcula en primer lugar el N° de Reynolds, para lo cual se requiere determinar la velocidad del fluido.

Con la **ecuación 13**, se obtiene la sección interior del equipo:

$$A = \pi \times \frac{0,905^2}{4} = 0,64 \text{ m}^2$$

A través de la **ecuación 14** la velocidad de propagación del fluido:

$$U_j = \frac{162.618 \text{ m}^3 / \text{h}}{3.600 \text{ s} / \text{h} \times 0,64 \text{ m}^2} = 71 \text{ m} / \text{s}$$

Según la **ecuación 10**:

$$Re = \frac{1,482 \text{ kg} / \text{m}^3 \times 71 \text{ m} / \text{s} \times 0,905 \text{ m}}{0,000008 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 11.903.239 \approx 1,2 \times 10^7$$

Entrando de nuevo en el ábaco de Moody (ver **figura 26**, coordenadas **) con el N° de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería:

$$\text{Rugosidad Relativa} = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,05 \text{ mm}}{905 \text{ mm}} = 0,000055$$

se obtiene el valor del coeficiente de fricción:

$$f_T = 0,012$$

Conocido este dato, veamos qué pérdida de carga se produce en el entronque con la antorcha, el sello molecular, el quemador y la descarga. A partir de las **ecuaciones 1, 2, 5, 6, 7, 8** y el ábaco sello molecular (ver **figura 27**):

TE

A partir de las **ecuaciones 1 y 2**:

$$\Delta p_{TE} = 60 \times 0,012 \times 1,482 \text{ kg} / \text{m}^3 \times \frac{(71 \text{ m} / \text{s})^2}{2} = 2,7 \text{ kPa}$$

Lo cual supone una pérdida de presión del 10%.

SELLO MOLECULAR

De nuevo entrando sobre el eje de abscisas (↑) en la **figura 27**, con el N° de Reynolds hasta la curva relativa a DN905, se obtiene la pérdida de carga en esta restricción, correspondiente a 0,8 kPa, que representa un 3,2% de la presión en la brida de entrada a antorcha.

QUEMADOR

Como ya se indicó en la iteración previa, estimada la densidad y el caudal volumétrico en la descarga del quemador:

$$\rho = 1,189 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad \dot{V} = 202.691 \text{ m}^3 / \text{h}$$

la sección interior de la antorcha, permite determinar la velocidad de descarga y con ello la pérdida de carga en el quemador:

$$U_j = \frac{202.691 \text{ m}^3 / \text{h}}{3.600 \text{ s} / \text{h} \times 0,64 \text{ m}^2} = 88 \text{ m} / \text{s}$$

$$\Delta p_{\text{QUEMADOR}} = 0,012 \times \frac{3 \text{ m}}{0,905 \text{ m}} \times 1,189 \text{ kg} / \text{m}^3 \times \frac{(88 \text{ m} / \text{s})^2}{2} = 0,2 \text{ kPa}$$

Correspondiente al 1% de la presión disponible en la entrada de la antorcha

DESCARGA

De igual manera, con la singularidad correspondiente a la descarga a la atmósfera:

$$\Delta p_{\text{DESCARGA}} = 1 \times 1,189 \text{ kg} / \text{m}^3 \times \frac{(88 \text{ m} / \text{s})^2}{2} = 4,6 \text{ kPa}$$

Que supone el 18%.

Llegado a este punto, conviene mencionar algunos datos conocidos para el dimensionamiento del equipo, para un diámetro de 36 in:

✓ Altura del rack	h_{RACK}	5,8 m
✓ Longitud del quemador	L_{TIP}	3 m
✓ Longitud del sello molecular	L_{SM}	4,8 m

El rack es una estructura elevada que soporta tuberías (vapor y gases, agua, aire de instrumentación, aire de servicios, líneas de inertes, bandejas de cables de señales y de potencia, etc.), y que permite llevarlas de una zona a otra en la planta. Es por ello que se parte de dicha cota sobre el total de la antorcha, dado que el gas accede a la misma a esa elevación, empezando así su recorrido a través de la antorcha.

Retomando el cálculo de pérdida de carga, con las restricciones detalladas por el momento, quedaría disponible:

$$\Delta p_{\text{FUSTE}} = \underbrace{25 \text{ kPa}}_{\Delta p_{\text{ANTORCHA}}} - \underbrace{2,7 \text{ kPa}}_{\Delta p_{\text{TE}}} - \underbrace{0,8 \text{ kPa}}_{\Delta p_{\text{S. MOLECULAR}}} - \underbrace{0,2 \text{ kPa}}_{\Delta p_{\text{QUEMADOR}}} - \underbrace{4,6 \text{ kPa}}_{\Delta p_{\text{DESCARGA}}}$$

$$\Delta p_{\text{FUSTE}} \approx 17 \text{ kPa}$$

para el trasiego del caudal de diseño a lo largo del fuste.

A continuación se procederá a determinar la altura de antorcha global, que junto con ese diámetro de antorcha, cumple con la radiación requerida por diseño a nivel de suelo de 6 kW/m^2 .

Este valor incluye la radiación solar, habiéndose considerado 1 kW/m^2 para diseño. Cabe precisar que no toda la radiación solar interceptada por La Tierra, llega a su superficie, debido a que la capa atmosférica supone un obstáculo libre al paso de la radiación, fundamentalmente por reflexión en las nubes y absorción por el aire atmosférico, de tal manera que aún en días despejados y con atmósfera limpia, rara vez se miden valores superiores al ya indicado.

Para la determinación de la altura de la antorcha, se emplea el procedimiento y recomendaciones del estándar de la *American Petroleum Institute, API Recommended Practise 521, 4TH edition (1997)*.

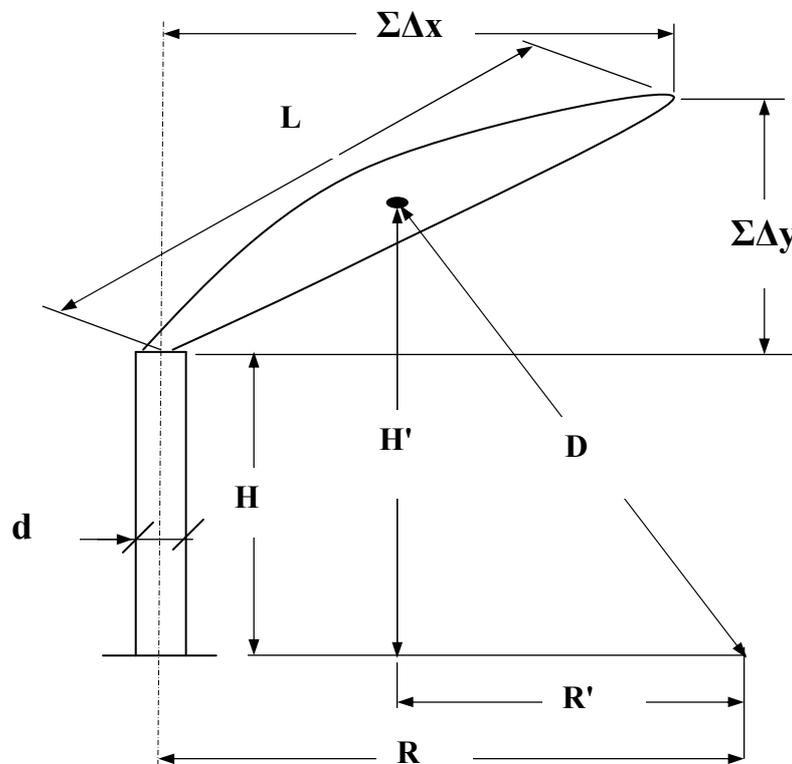


Figura 28: Referencias geométricas para el dimensionamiento de una antorcha.

Se inicia el proceso con la determinación de la liberación de calor, debido a la combustión del caudal de diseño del Gas Natural con su correspondiente poder calorífico inferior:

$$Q = q \times \dot{m} \times 0,001163 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$Q = 11.052 \text{ Kcal / kg} \times 241.000 \text{ kg / h} \times 0,001163 = 3.097.688 \text{ kW}$$

Esta liberación de calor, permite evaluar la longitud de la llama a partir de la correlación:

$$L = 0,00636 \times (Q \times 1000)^{0,444} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$L = 0,00636 \times (3.097.688 \times 1000)^{0,444} = 104,1 \text{ m}$$

Se evalúa el N° de Mach con la **ecuación 9**:

$$\text{N}^\circ \text{ Mach} = 3,23 \times 10^{-5} \times \left(\frac{241.000 \text{ kg/h}}{101,3 \text{ kPa} \times 0,905^2} \right) \times \left(\frac{1 \times 167 \text{ K}}{1,4 \times 16,3 \text{ g/mol}} \right)^{0,5} = 0,254$$

Siendo la velocidad del sonido la que se obtiene de la siguiente expresión:

$$U_s = 91,2 \times \sqrt{\frac{\left(z \times \left(\frac{C_p}{C_v} \right) \times (273,15 + T^\circ \text{C}) \right)}{M_w}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$U_s = 91,2 \times \sqrt{\frac{(1 \times 1,4 \times (273,15 - 106^\circ \text{C}))}{16,3}} = 345,6 \text{ m / s}$$

La velocidad de salida del quemador por tanto queda:

$$U_j = \text{N}^\circ \text{ Mach} \times U_s \quad \text{Ecuación 18}$$

$$U_j = 0,254 \times 345,6 \text{ m / s} = 87,8 \text{ m / s}$$

Con ello, se procede a evaluar la distorsión de la llama por efecto del viento conocida la velocidad del mismo como dato de diseño:

$$\frac{U_\infty}{U_j} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\frac{U_\infty}{U_j} = \frac{14 \text{ m / s}}{87,8 \text{ m / s}} = 0,16$$

Llegado a este punto, las componentes vertical y horizontal de la llama, en relación a la longitud de la misma, resultan de las siguientes expresiones, dependiendo de la distorsión de la llama evaluada:

$$\text{Si } \frac{U_{\infty}}{U_J} < 0,05 \rightarrow \frac{\sum \Delta_x}{L} = 13 \times \frac{U_{\infty}}{U_J} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\text{Si } \frac{U_{\infty}}{U_J} > 0,05 \rightarrow \frac{\sum \Delta_x}{L} = 0,1671 \times \ln \left(20 \times \frac{U_{\infty}}{U_J} \right) + 0,6535 \quad \text{Ecuación 21}$$

Dado que la distorsión de la llama, es superior a 0,05, aplicando la **ecuación 21**, se obtiene:

$$\frac{\sum \Delta_x}{L} = 0,1671 \times \ln (20 \times 0,16) + 0,6535 = 0,85$$

Siendo la componente vertical de la llama en relación a la longitud de la llama:

$$\frac{\sum \Delta_y}{L} = 0,9699 \times \left(20 \times \frac{U_{\infty}}{U_J} + 1 \right)^{(-0,705)} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\frac{\sum \Delta_y}{L} = 0,9699 \times (20 \times 0,16 + 1)^{(-0,705)} = 0,35$$

Conocida la longitud de la llama, es directa la determinación de las componentes horizontal y vertical de la misma:

$$\sum \Delta_x = \frac{\sum \Delta_x}{L} \times L = 0,85 \times 104,1 \text{ m} = 88,5 \text{ m}$$

$$\sum \Delta_y = \frac{\sum \Delta_y}{L} \times L = 0,35 \times 104,1 \text{ m} = 36,4 \text{ m}$$

Se procede a continuación a determinar la distancia en horizontal del centro geométrico de la llama al punto de referencia. Dado que dicho punto de referencia se encuentra en la base de la antorcha, con una radiación límite de 6 kW/m^2 , y teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$R' = R + \frac{\sum \Delta_x}{2} \quad \text{Ecuación 23}$$

puesto que R, distancia del eje de antorcha al punto de referencia es igual a 0, resulta

$$R' = 0 + \frac{88,5}{2} = 44,25 \text{ m}$$

Siendo la mínima distancia del centro de llama al punto de referencia la dada por:

$$D = \sqrt{\frac{(\tau \times F \times Q)}{4 \times \pi \times K}} \quad \text{Ecuación 24}$$

donde cabe señalar la introducción de 2 parámetros, la emisividad y la transmitividad del medio.

$$D = \sqrt{\frac{(1 \times 0,19 \times 3.097.688 \text{ kcal / h})}{4 \times \pi \times 6 \text{ kW / m}^2}} = 88,4 \text{ m}$$

Con ello puede determinarse, la distancia vertical del centro de la llama al punto de referencia,

$$H' = \sqrt{(D^2 - R'^2)} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$H' = \sqrt{((88,4 \text{ m})^2 - (44,25 \text{ m})^2)} = 76,5 \text{ m}$$

De este modo resulta una altura de la antorcha, conocida la distancia vertical del centro de la llama al punto de referencia y la componente vertical de la llama:

$$H = H' - \frac{\sum \Delta_y}{2} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$H = 76,5 - \frac{36,4}{2} = 58,3 \text{ m}$$

Con este resultado, se puede comprobar la idoneidad del diámetro de la antorcha seleccionada, desde el punto de vista del proceso y del aprovechamiento de la presión disponible en el final de línea, dado que se busca trasegar el caudal de diseño hasta su descarga a la atmósfera, con una presión disponible de 25 kPa. También se busca la combustión con un nivel de radiación seguro al menor coste altura x diámetro de la antorcha.

Para ello, se va a evaluar la pérdida de carga en la antorcha, teniendo en cuenta esa altura global. Se conoce, como ya se mencionó con anterioridad, la altura del rack,

la longitud del sello molecular y del quemador, por tanto la longitud del fuste que resulta:

$$L_{\text{FUSTE}} = \underbrace{58,3 \text{ m}}_{L_{\text{ANTORCHA}}} - \underbrace{5,8 \text{ m}}_{L_{\text{RACK}}} - \underbrace{3 \text{ m}}_{L_{\text{QUEMADOR}}} - \underbrace{4,8 \text{ m}}_{L_{\text{S. MOLECULAR}}}$$

Por tanto $L_{\text{FUSTE}} = 44,7 \text{ m}$

Con las **ecuaciones 3 y 4**, se calcula la pérdida de carga en dicho elemento:

$$\Delta p_{\text{FUSTE}} = 0,012 \times \frac{44,7 \text{ m}}{0,905 \text{ m}} \times 1,482 \text{ kg/m}^3 \times \frac{(71 \text{ m/s})^2}{2} = 2 \text{ kPa}$$

De acuerdo con el cálculo de radiación y la pérdida de carga resultante en el fuste, la pérdida de carga global en la antorcha corresponde a:

$$\Delta p_{\text{ANTORCHA}} = \underbrace{2,7 \text{ kPa}}_{\text{TE}} + \underbrace{0,8 \text{ kPa}}_{\text{SELLO MOLECULAR}} + \underbrace{2 \text{ kPa}}_{\text{FUSTE}} + \underbrace{0,2 \text{ kPa}}_{\text{QUEMADOR}} + \underbrace{4,6 \text{ kPa}}_{\text{DESCARGA}}$$

$$\Delta p_{\text{ANTORCHA}} = 10,3 \text{ kPa}$$

Se observa que la presión disponible al final de la línea supone un 41% de la presión en la brida de alimentación, lo cual implica un sobredimensionamiento del equipo excesivo, es decir, sobra diámetro de equipo, el diámetro seleccionado es superior al requerido.

A partir de aquí, se va a proceder a una iteración más y evaluar la idoneidad de 30 in como diámetro de antorcha.

d =30 in

De nuevo, se calcula en primer lugar el N° de Reynolds, para lo cual se requiere determinar la velocidad del fluido.

Con la **ecuación 13**, se obtiene la sección interior del equipo:

$$A = \pi \times \frac{0,750^2}{4} = 0,44 \text{ m}^2$$

A través de la **ecuación 14** la velocidad de propagación del fluido es:

$$U_j = \frac{162.618 \text{ m}^3 / \text{h}}{3.600 \text{ s} / \text{h} \times 0,44 \text{ m}^2} = 103 \text{ m/s}$$

Según la **ecuación 10**:

$$Re = \frac{1,482 \text{ kg} / \text{m}^3 \times 103 \text{ m} / \text{s} \times 0,750 \text{ m}}{0,000008 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 14.310.563 \approx 1,4 \times 10^7$$

Entrando de nuevo en el ábaco de Moody (ver **figura 26**, coordenadas *******) con el N° de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería:

$$\text{Rugosidad Relativa} = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,05 \text{ mm}}{750 \text{ mm}} = 0,000067 \quad \text{se obtiene el valor del}$$

coeficiente de fricción.

$$f_T = 0,0122$$

Con ello se procede por tanto, a la determinación de la altura de la antorcha, conocidas, como ya se indicó con anterioridad, la altura del rack, la longitud del quemador, y por último la longitud de un sello molecular de 30 in:

$$\checkmark \text{ Longitud del sello molecular} \quad L_{SM} \quad 4,3 \text{ m}$$

TE

A partir de las **ecuaciones 1 y 2**:

$$\Delta p_{TE} = 60 \times 0,0122 \times 1,482 \text{ kg} / \text{m}^3 \times \frac{(103 \text{ m} / \text{s})^2}{2} = 5,8 \text{ kPa}$$

Lo cual supone una pérdida de presión del 22%.

A continuación se ve qué pérdida de carga se produce en el sello molecular, el quemador y la descarga. A partir de las **ecuaciones 5, 6, 7, 8** y el ábaco del sello molecular (ver **figura 27**):

SELLO MOLECULAR

De nuevo entrando sobre el eje de abscisas (**↑**) en la **figura 27**, con el N° de Reynolds hasta la curva relativa a DN750, se obtiene la pérdida de carga en esta restricción, correspondiente a 2,1 kPa, que representa un 8,4% de la presión en la brida de entrada a la antorcha.

QUEMADOR

De nuevo, como ya se indicó en la iteración previa, estimada la densidad y el caudal volumétrico en el quemador y descarga:

$$\rho = 1,189 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad \dot{V} = 202.691 \text{ m}^3 / \text{h}$$

la sección interior de la antorcha, permite determinar la velocidad de descarga y con ello la pérdida de carga en el quemador:

$$U_J = \frac{202.691 \text{ m}^3 / \text{h}}{3.600 \text{ s} / \text{h} \times 0,44 \text{ m}^2} = 128 \text{ m} / \text{s}$$

$$\Delta p_{\text{QUEMADOR}} = 0,0122 \times \frac{3 \text{ m}}{0,750 \text{ m}} \times 1,189 \text{ kg} / \text{m}^3 \times \frac{(128 \text{ m} / \text{s})^2}{2} = 0,5 \text{ kPa}$$

Correspondiente al 2% de la presión disponible en la entrada de la antorcha.

DESCARGA

De igual manera, con la singularidad correspondiente a la descarga a la atmósfera:

$$\Delta p_{\text{DESCARGA}} = 1 \times 1,189 \text{ kg} / \text{m}^3 \times \frac{(128 \text{ m} / \text{s})^2}{2} = 9,7 \text{ kPa}$$

Que supone el 39%.

Por lo tanto la pérdida de carga disponible en el fuste, teniendo en cuenta la presión disponible en el inicio de la línea es de:

$$\Delta p_{\text{ANTORCHA}} = 25 \text{ kPa} = \underbrace{5,8 \text{ kPa}}_{\text{TE}} + \underbrace{2,1 \text{ kPa}}_{\text{SELLO MOLECULAR}} + \Delta p_{\text{FUSTE}} + \underbrace{0,5 \text{ kPa}}_{\text{QUEMADOR}} + \underbrace{9,7 \text{ kPa}}_{\text{DESCARGA}}$$

$$\Delta p_{\text{FUSTE}} = 6,9 \text{ kPa}$$

Dadas las **ecuaciones 3 y 4**, es posible determinar la longitud del fuste que da lugar a esa pérdida de carga:

$$\Delta p_{\text{FUSTE}} = 0,0122 \times \frac{L_{\text{FUSTE}}}{0,750 \text{ m}} \times 1,482 \text{ kg} / \text{m}^3 \times \frac{(103 \text{ m} / \text{s})^2}{2} = 6,9 \text{ kPa}$$

$$L_{\text{FUSTE}} = 54 \text{ m}$$

Según esto la altura de la antorcha resultante correspondería:

$$H_{\text{ANTORCHA}} = h_{\text{RACK}} + L_{\text{FUSTE}} + L_{\text{SM}} + L_{\text{QUEMADOR}}$$

$$H_{\text{ANTORCHA}} = 5,8 \text{ m} + 54 \text{ m} + 4,3 \text{ m} + 3 \text{ m} = 67,1 \text{ m}$$

Esto significa que el diámetro seleccionado será el correcto, si determinada la altura de la antorcha mediante el cálculo por radiación, con dicho diámetro como

partida, el cálculo determina una altura igual o inferior a la obtenida por el cálculo de pérdida de carga. Lo cual implicará:

- ✓ Para el diámetro y altura calculados, la presión en el inicio de la línea es suficiente para conducir el caudal de diseño al extremo de la antorcha.
- ✓ Para dicho diámetro y altura calculados, se cumple la limitación de radiación máxima admisible a nivel de suelo.

Se procede, como ya se hizo en la iteración previa para 36 in, a la determinación de la altura de la antorcha que cumple con la radiación admisible a nivel de suelo, punto de referencia considerado.

En primer término se procede a la evaluación de la liberación de calor según la **ecuación 15**:

$$Q = 11.052 \text{ Kcal / kg} \times 241.000 \text{ kg / h} \times 0,001163 = 3.097.688 \text{ kW}$$

Siguiendo con la longitud de la llama a partir de la **ecuación 16**:

$$L = 0,00636 \times (3.097.688 \times 1000)^{0,444} = 104,1 \text{ m}$$

A partir de la **ecuación 9** anteriormente detallada se obtiene el N° de Mach:

$$\text{N}^\circ \text{ Mach} = 3,23 \times 10^{-5} \times \left(\frac{241.000 \text{ kg/h}}{101,3 \text{ kPa} \times 0,750^2} \right) \times \left(\frac{1 \times 167 \text{ K}}{1,4 \times 16,3 \text{ g/mol}} \right)^{0,5} = 0,37$$

Siendo la velocidad del sonido según la **ecuación 17**:

$$U_s = 91,2 \times \sqrt{\frac{(1 \times 1,4 \times (273,15 - 106^\circ \text{C}))}{16,3}} = 345,6 \text{ m / s}$$

Y por tanto la velocidad de salida del quemador, según la **ecuación 18**:

$$U_j = 0,37 \times 345,6 \text{ m / s} = 127,9 \text{ m / s}$$

La distorsión de la llama por efecto del viento, dada por la **ecuación 19**:

$$\frac{U_\infty}{U_j} = \frac{14 \text{ m / s}}{127,9 \text{ m / s}} = 0,11$$

Para un valor de distorsión superior a 0,05, según la **ecuación 21**, resulta una componente horizontal de la llama en relación a la longitud de la misma:

$$\frac{\sum \Delta_x}{L} = 0,1671 \times \ln(20 \times 0,11) + 0,6535 = 0,79$$

Siendo la componente vertical de la llama en relación a la longitud de la misma, según la **ecuación 22**:

$$\frac{\sum \Delta_y}{L} = 0,9699 \times (20 \times 0,11 + 1)^{(-0,705)} = 0,43$$

Conocida la longitud de la llama, es directa la determinación de las componentes horizontal y vertical de llama:

$$\sum \Delta_x = \frac{\sum \Delta_x}{L} \times L = 0,79 \times 104,1 \text{ m} = 82,2 \text{ m}$$

$$\sum \Delta_y = \frac{\sum \Delta_y}{L} \times L = 0,43 \times 104,1 \text{ m} = 44,8 \text{ m}$$

Como ya se explicó con anterioridad, dado que $R = 0$, para un punto de referencia correspondiente a la base de la antorcha, según la **ecuación 23**:

$$R' = 0 + \frac{82,2 \text{ m}}{2} = 41,1 \text{ m}$$

La distancia mínima del centro de la llama al punto de referencia, se deduce de la **ecuación 24**:

$$D = \sqrt{\frac{(1 \times 0,19 \times 3.097.688 \text{ kcal/h})}{4 \times \pi \times 6 \text{ kW/m}^2}} = 88,4 \text{ m}$$

Con ello puede determinarse la distancia vertical del centro de llama al punto de referencia, sustituyendo en la **ecuación 25**:

$$H' = \sqrt{((88,4 \text{ m})^2 - (41,1 \text{ m})^2)} = 78,3 \text{ m}$$

De este modo, la altura de la antorcha resultante, reemplazando los valores estimados en la **ecuación 26**:

$$H = 78,3 \text{ m} - \frac{44,8}{2} = 56 \text{ m} < 70 \text{ m}$$

Como puede observarse, la hipótesis de partida es correcta, la altura requerida para el cumplimiento de la radiación máxima admisible a nivel de suelo de 6 kW/m^2 , es inferior a la limitación por presión en el inicio de línea, correspondiente a 70 m.

A partir de esta longitud, podemos finalmente estimar la longitud necesaria de fuste, conocida ya la altura de antorcha:

$$H_{\text{ANTORCHA}} = h_{\text{RACK}} + L_{\text{FUSTE}} + L_{\text{SM}} + L_{\text{QUEMADOR}}$$

$$56 \text{ m} = 5,8 \text{ m} + L_{\text{FUSTE}} + 4,3 \text{ m} + 3 \text{ m}$$

$$L_{\text{FUSTE}} = 42,9 \text{ m}$$

5.3 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO ACÚSTICO

5.3.1 INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO DE RUIDO EN ANTORCHAS

5.3.1.1 ORÍGENES DEL RUIDO DE UNA ANTORCHA

El ruido de la antorcha tiene su origen exactamente en el ruido provocado por una onda turbulenta dentro del fenómeno de combustión y en el ruido de chorro. Ambos son de banda ancha, aleatorios y capaces de hacer entrar en resonancia a las estructuras próximas en la frecuencia natural. El ruido en la combustión predomina en los sistemas de baja presión. El ruido aerodinámico es de igual o mayor importancia cuando se utilizan gas, vapor o aire a alta presión en la cabeza de la antorcha.

5.3.1.2 MEDIDA Y CÁLCULO DEL RUIDO

La generación de ruido por una fuente se expresa normalmente mediante el Nivel de Potencia Acústica (L_W) en decibelios (dB) y está basado en un nivel de referencia de 10^{-12} W. El L_W se define como:

$$L_W [\text{dB}] = 10 \times \log_{10} \frac{\text{Potencia Acústica}}{\text{Nivel de Referencia}} = 10 \times \log_{10} \frac{W}{W_0} = 10 \times \log_{10} \frac{W}{10^{-12}}$$

Ecuación 27

La medición del ruido se hace gracias a las ondas de presión provocadas por la energía acústica. Los instrumentos de medida del ruido y del sonido están diseñados para medir las ondas de presión a una distancia L de la fuente que genera el ruido y relacionar ese nivel de presión con el mínimo audible promedio ($P_0 = 2.10^{-5} \text{ N/m}^2$). Este nivel de presión se expresa también en dB y se denomina Nivel de Presión Sonora (L_p). Considerando una propagación del sonido unidireccional y hemiesférica, el Nivel de Potencia Acústica y el Nivel de Presión Sonora se relacionan mediante la siguiente expresión, donde L va en metros:

$$L_P = L_W - 10 \times \log_{10}(2 \times \pi \times L^2) \quad \text{Ecuación 28}$$

Utilizando las reglas logarítmicas la expresión queda de la siguiente forma:

$$L_P = L_W - 20 \times \log_{10}(L) - 16 \quad \text{Ecuación 29}$$

Las **ecuaciones 28** y **29** se modifican para distancias respecto de la fuente mayores de 50 m a altas frecuencias debido a la absorción atmosférica (ver **figura 28**).

En la **tabla 5** se presentan los diferentes niveles de presión sonora que se dan en contextos típicos.

5.3.1.3 CÁLCULO DE RUIDO DE QUEMADORES

El siguiente apartado está dirigido hacia la obtención de una rápida valoración del ruido generado por quemadores.

Los métodos descritos asumen una propagación del sonido unidireccional y hemiesférica. Esta asunción es correcta a condición de que los cálculos sean llevados a cabo por el método descrito, es decir, se calcula primero el L_W (nivel de potencia acústica) usando la fórmula dada, y después se obtiene el L_P (nivel de presión acústica) desde el L_W , la naturaleza de la propagación del sonido debería ser analizada.

Una fórmula general para hallar el L_W debido a la combustión de un gas con una prevalencia en su composición de hidrocarburos en un quemador sería la siguiente:

$$L_W [\text{dB}] = 10 \times \log_{10} \left(35 \times 10^9 \times \Delta P \times \dot{m} \right) \quad \text{Ecuación 30}$$

donde:

L_W = nivel de potencia acústica

ΔP = pérdida de carga en la descarga del quemador (mbar)

\dot{m} = gasto másico de la antorcha (kg/s)

Para gases con un poder calorífico bajo, la **ecuación 30** pasa a ser la siguiente:

$$L_W [dB] = 10 \times \log_{10} \left(0,78 \times 10^6 \times H \times \Delta P \times \dot{m} \right) \quad \text{Ecuación 31}$$

donde:

H = poder calorífico inferior del gas (kJ/kg)

Para gases con alto contenido en hidrógeno se aplica la siguiente ecuación:

$$L_W [dB] = 10 \times \log_{10} \left(1,43 \times 10^6 \times H \times \Delta P \times \dot{m} \right) \quad \text{Ecuación 32}$$

En el cálculo acústico del presente proyecto se utiliza la **ecuación 30**, por ser la que mejor representa el comportamiento acústico del quemador, ya que el gas de proceso en este caso es gas natural, que ni tiene alto contenido en hidrógeno ni posee un PCI bajo.

Se ha averiguado empíricamente que el L_W total ponderado con la escala de ponderación A en la fuente es 16 dB más bajo que el L_W . De este modo:

$$L_W [dB(A)] = L_W - 16 \quad \text{Ecuación 33}$$

La típica ponderación frecuencial A es la de la **tabla 4**.

Frecuencia (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Corrección con ponderación frecuencial A, $L_W [dB(A)]$	-26	-14	-11	-13	-10	-5	-6	-11	-20

Tabla 4: Ponderación frecuencial A para quemadores.

L_p [dB]	Entorno
140	A 30 m de distancia del despegue de una aeronave militar
130	Remachadora neumática (posición del operario)
120	Taller de calderería (niveles máximos)
110	Prensa automática punzonadora (posición del operario)
100	Taller de torno automático
90	Martillo neumático abriendo una zanja
80	Calle atestada de gente
70	Radio con el volumen alto
60	Restaurante
50	Conversación a 1 m de distancia
40	Susurro a 2 m de distancia
20	Estudios de grabación
0	Umbral normal de audición

Tabla 5: Ejemplos de niveles de presión sonora en diferentes entornos.

Una simple medida del L_p por encima del rango de frecuencia audible no es suficiente para describir la sensación acústica experimentada por el oído humano. Por lo tanto el L_w se mide en bandas de frecuencia, que normalmente son las 8 bandas audibles de octava. Los instrumentos de medida están diseñados para representar fielmente la sensación acústica en el uso de las correcciones con ponderación A, B o C en el total del L_p . De esta manera la descripción de un ruido típico vendría dada por el L_p total (con la apropiada ponderación) y los L_p 's (con las apropiadas ponderaciones) en las frecuencias centrales de octava desde 63 hasta 8000 Hz. Los L_p 's ponderados en las frecuencias centrales de octava de 31,5 y 16.000 Hz son también incluidos algunas veces.

5.3.2 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO ACÚSTICO

A continuación se aplicará lo anteriormente descrito al cálculo acústico de la fundamental fuente de ruido del proyecto presente, y que es el quemador de la antorcha.

De la **ecuación 30** se obtiene:

$$L_W [dB] = 10 \times \log_{10} \left(35 \times 10^9 \times \Delta P \times \dot{m} \right) = 10 \times \log_{10} \left(35 \times 10^9 \times 97 \times \frac{241.000}{3.600} \right) = 143,6 \text{ dB}$$

ΔP = pérdida de carga en la descarga del *tip* en mbar = 9,7 kPa = 97 mbar

\dot{m} = gasto másico de la antorcha en kg/s = 241.000 kg/h = 241.000/3.600 kg/s

Si se utiliza el resultado de la fórmula general junto con la **ecuación 33** se obtiene el siguiente nivel de potencia acústica:

$$L_W [dB(A)] = 143,6 - 16 = 127,6 \text{ dB (A)}$$

A continuación se aplica la corrección con ponderación frecuencial A para quemadores, para ello se recurre a la **tabla 4**, el proceso se detalla a continuación en la siguiente matriz.

Frecuencia [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	127,6	127,6	127,6	127,6	127,6	127,6	127,6	127,6	127,6
Corrección con ponderación frecuencial A	-26	-14	-11	-13	-10	-5	-6	-11	-20
L_W [dB (A)] Espectro de nivel de potencia acústica corregido con ponderación frecuencial A	101,6	113,6	116,6	114,6	117,6	122,6	121,6	116,6	107,6
Atenuación según figura 29 para un L_p a 55 m de la fuente	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-45
L_p [dB (A)] a 55 m	58,6	70,6	73,6	71,6	74,6	79,6	78,6	73,6	62,6

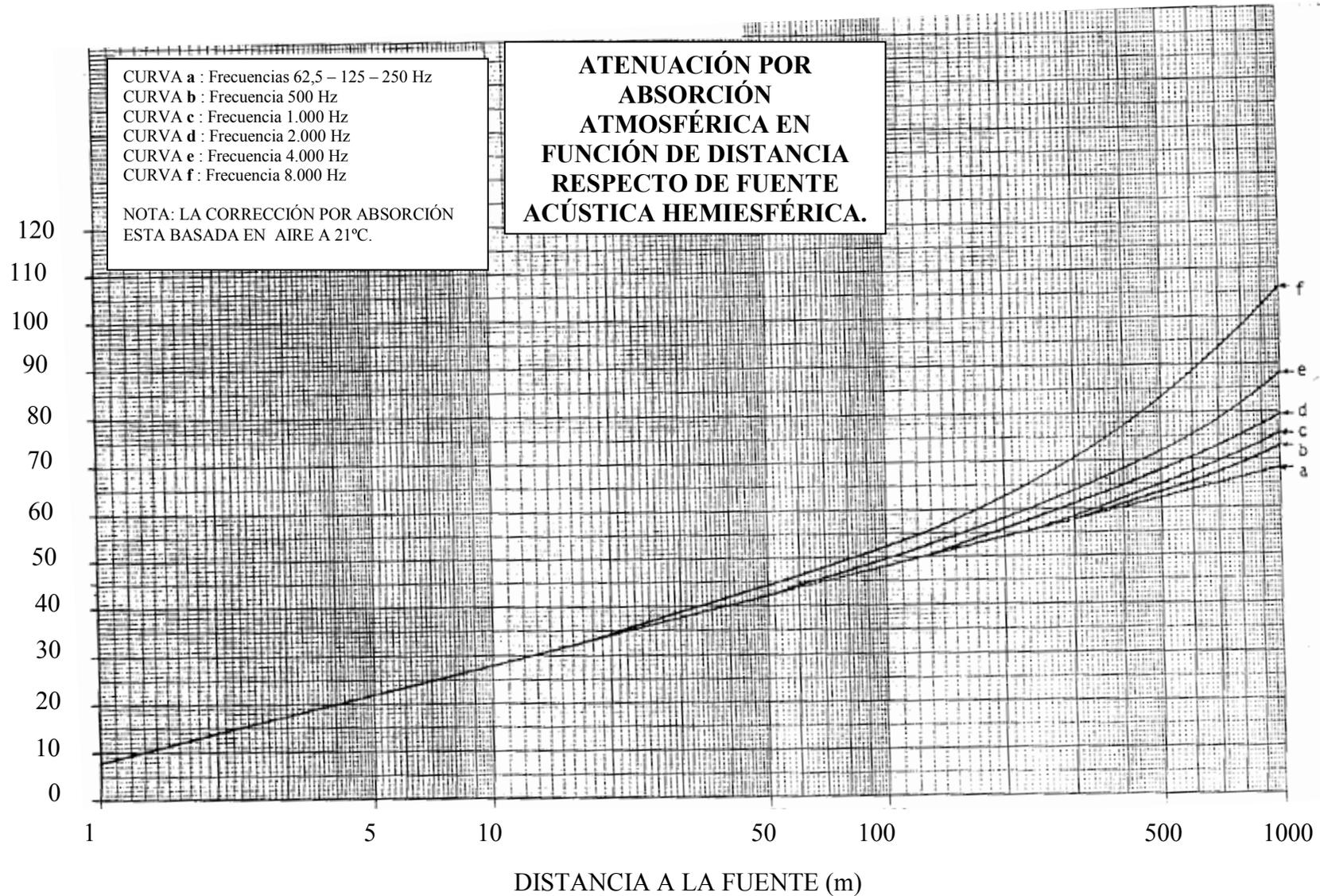


Figura 29: Atenuación por absorción atmosférica en función de la distancia con respecto de la fuente acústica hemiesférica.

Finalmente y mediante suma logarítmica de los L_p a 55 m de la fuente de todas las bandas de octava se obtiene el L_p total:

$$L_p [\text{dB(A)}] \text{ a 55 m de la fuente} = 10 \times \log_{10} \sum_{f_i} 10^{\frac{L_p f_i}{10}} = 84,3 \text{ dB (A)} = 84 \text{ dB (A)}$$

pues diferencias inferiores a 1 dB no son percibidas por el oído humano, y efectivamente es un nivel inferior a los 85 dB que obliga la legislación para este tipo de equipos.

5.4 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Las antorchas son consideradas por la legislación medioambiental, como una técnica efectiva en la destrucción de hidrocarburos. Concretamente, el documento de referencia *U.S. EPA AP-42*, indica que una antorcha en operación estacionaria, y que tenga una eficiencia en la combustión del 98 % o superior, emitirá por debajo de las siguientes tasas máximas de contaminantes:

- Hidrocarburos No Quemados (UHC) = 0,0602 g/MJ
- Monóxido de Carbono (CO) = 0,1592 g/MJ
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x) = 0,0293 g/MJ

Nota: g/MJ = gramos de contaminante emitidos a la atmósfera por cada MJ de gas quemado de antorcha.

La antorcha sometida a estudio en el presente proyecto tiene una eficiencia en la combustión del 98 %. Esto es debido a que el gas natural se trata de un hidrocarburo de estructura molecular sencilla y fácilmente miscible con el aire, y que no requiere para su combustión en antorcha apoyos para supresión de humos vía aire o vapor. Todos los estudios realizados por compañías del sector, avalan esta consideración.

El código de la *EPA 40 CFR 60.8c*, dictamina además, que las emisiones de contaminantes por encima de las tasas máximas indicadas más arriba durante los períodos de funcionamiento transitorios de antorcha, como podrían ser una puesta en marcha, una parada de emergencia, o un funcionamiento anómalo, no son consideradas una violación de la normativa.

Durante el funcionamiento de una antorcha, se liberan en la dirección y sentido a favor del viento dichas sustancias contaminantes, que podrían ser un peligro para la salud del personal de planta, y de la posible vecindad residente en los alrededores. Por este motivo, es importante hacer un análisis de la dispersión de los gases liberados por la antorcha.

La liberación de los gases, y por lo tanto de contaminantes de una antorcha, se trata de un tipo de emisión continua sin depender del tiempo, y formando un penacho.

Los contaminantes liberados a suficiente altura desde la superficie terrestre pueden dispersarse bien en la atmósfera antes de llegar al suelo. Las antorchas más altas dispersan mejor los contaminantes que las más bajas, debido a que el penacho tiene que viajar a través de una capa atmosférica más profunda antes de llegar al nivel del suelo. A medida que el penacho viaja, se extiende y se dispersa.

5.4.1 ESTIMACIÓN DE LA ELEVACIÓN DEL PENACHO

Las fórmulas de la elevación del penacho se usan para determinar la línea imaginaria de este. Si bien la concentración máxima del penacho existe en esta línea central, las fórmulas mencionadas no permiten obtener información sobre cómo varían las concentraciones de contaminantes fuera de esta línea central. Se deberán efectuar entonces, estimados de dispersión estadísticos para determinar las concentraciones de contaminantes en un punto de interés en función de (x, y, z) y según el sistema de coordenadas de la **figura 30**, y que serán abordados después del cálculo de la elevación del penacho.

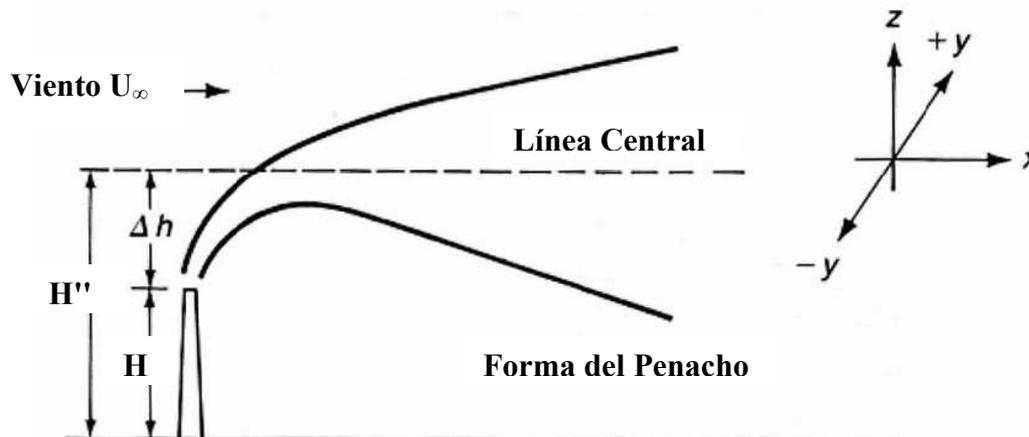


Figura 30: Elevación de la línea central del penacho de contaminantes.

La elevación del penacho (Δh) se define como la diferencia entre la altura de la línea central final del penacho y la altura inicial de la fuente. Esta elevación está originada por la fuerza ascensional y el impulso vertical del efluente.

La elevación del penacho depende de la diferencia de temperatura entre los gases de salida y la temperatura ambiente, además de la velocidad de salida de gases. Otros parámetros que también influyen en el ascenso vertical son, el diámetro de la antorcha, y la estabilidad atmosférica.

Una de las fórmulas más empleadas para el cálculo de esta elevación es la de Holland:

$$\Delta h = \frac{V_s \times d}{U} \times \left(1,5 + 2,68 \times 10^{-3} \times P \times \frac{T_s - T_A}{T_s} \times d \right) \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

Δh = Elevación del penacho por encima de la fuente emisora (m).

V_s = Velocidad de salida del contaminante (m/s).

Este dato se calculó en el apartado del dimensionamiento geométrico de la antorcha como velocidad de salida del quemador, $V_s = 127,9 \text{ m/s}$.

d = Diámetro interior del conducto de emisión (m).

Este dato se calculó en el apartado del dimensionamiento geométrico de la antorcha como diámetro interno de la misma, $d = 30'' = 750\text{mm}$.

U = Velocidad del viento a la altura de la antorcha (m/s).

Se calculará por medio de la **ecuación 35**.

P = Presión atmosférica (mbar)

Este dato es una condición del emplazamiento, $P = 1.013 \text{ mbar}$.

T_s = Temperatura del contaminante (K)

$$T_s = 461,5 \text{ K}$$

T_A = Temperatura ambiente atmosférica (K)

$$T_A = 293,15 \text{ K}$$

$2,68 \times 10^{-3}$ es una constante expresada en $\text{mbar}^{-1} \times \text{m}^{-1}$

Los valores de Δh obtenidos con esta fórmula deben corregirse (**tabla 6**) multiplicando por un factor, establecido por Pasquill-Gifford-Turner, que es función de las condiciones meteorológicas, y que se describen más adelante.

Categorías de Estabilidad (Clases)	Factor de Corrección aplicado al Δh , calculado por la fórmula de Holland
A,B	1,15
C	1,10
D	1,00
E,F	0,85

Tabla 6: Corrección de la elevación del penacho en función de la estabilidad atmosférica.

Los datos de velocidad del viento y estabilidad atmosférica, siempre que sea posible, deben obtenerse de estaciones meteorológicas locales. Dado que no siempre es posible disponer de esta información, a través de una tabla establecida por Pasquill (**tabla 7**) puede obtenerse la categoría de estabilidad atmosférica estimada según las condiciones de insolación y velocidad del viento, esta se representa por un código alfabético que va desde la A (más inestable) hasta la F (más estable):

- A = extremadamente inestable
- B = inestabilidad moderada
- C = ligeramente inestable
- D = neutra
- E = ligeramente estable
- F = moderadamente estable

Velocidad del viento (m/s) (a)	Insolación solar durante el día			Condiciones nocturnas. Índice de nubosidad (e)	
	Intensa (b)	Moderada (c)	Baja (d)	Nublado $\geq 4/8$	Claro $\leq 3/8$
< 2	A	A-B (f)	B	E	F
2 a 3	A-B (f)	B	C	E	F
3 a 5	B	B-C (f)	C	D	E
5 a 6	C	C-D (f)	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Tabla 7: Categorías de estabilidad atmosférica de Pasquill.

Notas sobre la tabla de Pasquill:

- (a) La velocidad del viento se acostumbra a medir a 10 metros de altura. Esta velocidad, a niveles más bajos de 10 metros, se ve reducida notablemente debido a los efectos de rozamiento (ver **figura 31**). Para niveles distintos de este valor, la velocidad del viento debe corregirse según la relación:

$$U_z = U_\infty \times \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

U_z = velocidad del viento a la altura de la fuente emisora, en este caso, la altura de la antorcha (m/s).

U_∞ = velocidad del viento a la altura de 10 m (m/s).

Es un dato de partida dado por las condiciones del emplazamiento del proyecto, $U_\infty = 14$ m/s.

z = altura de la fuente emisora (m).

$$z = H_{ANTORCHA} = 56m$$

p = coeficiente exponencial.

Los valores de p son función de la estabilidad atmosférica y la rugosidad del suelo. En la **tabla 8** se presentan tales valores. El emplazamiento de la antorcha en medio rural, junto con las condiciones atmosféricas consideradas en el proyecto, establecen una categoría D para la estabilidad atmosférica según Pasquill, se tiene entonces que $p = 0,15$.

Estabilidad	Coeficiente exponencial atmosférico (p)	
	Urbano	Rural
A	0,15	0,07
B	0,15	0,07
C	0,20	0,10
D	0,25	0,15
E	0,40	0,35
F	0,60	0,55

Tabla 8: Coeficientes de corrección de la velocidad del viento.

- (b) Corresponde a día de verano despejado con sol alto (60° sobre el horizonte).
- (c) Corresponde a un día de verano nublado, con el sol 35-60 ° sobre el horizonte.
- (d) Corresponde a un día de verano nublado, o en la caída de la tarde, con el sol 15-35° sobre el horizonte.
- (e) Este índice de nubosidad es definido como la fracción del cielo cubierta por nubes.
- (f) Para las condiciones A-B, B-C o C-D, promedio de valores obtenidos para cada uno.

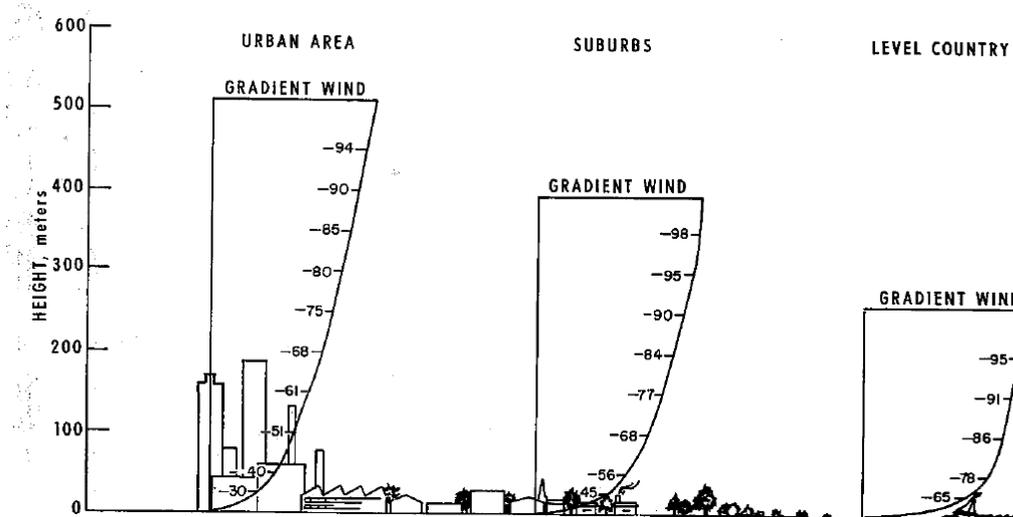


Figura 31: Efectos de la rugosidad del suelo en el perfil del viento.

Se está ahora en disposición de calcular por medio de la **ecuación 34**, la elevación del penacho Δh . Para ello, primero se debe conocer gracias a la **ecuación 35**, la velocidad del viento a la altura de la salida del contaminante:

$$U_z = U_\infty \times \left(\frac{z}{10}\right)^p = 14 \text{ m/s} \times \left(\frac{56 \text{ m}}{10}\right)^{0,15} = 18 \text{ m/s},$$

Por lo tanto la elevación del penacho es:

$$\Delta h = \frac{127,9 \text{ m/s} \times 0,75 \text{ m}}{18 \text{ m/s}} \times \left(1,5 \text{ m} + 2,68 \times 10^{-3} \text{ mbar}^{-1} \times \text{m}^{-1} \times 1.013 \text{ mbar} \times \frac{461,5 - 293,15}{461,5} \times 0,75 \text{ m}\right) = 11,95 \text{ m}$$

Como la categoría de estabilidad atmosférica es D, no se necesita corregir el resultado obtenido con ningún factor, que es lo mismo que decir que hay que multiplicar por el factor de corrección 1 (ver **tabla 6**).

5.4.2 MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES.

Conocida la línea central del penacho, donde la contaminación es máxima, se puede calcular cómo varían las concentraciones de contaminantes fuera de dicha línea mediante estimaciones de dispersión estadísticas, el modelo más usado es la distribución normal o Gaussiana.

El modelo Gaussiano de fuente puntual continua emitiendo en terreno llano, supone como hipótesis de partida que las concentraciones de contaminantes en cualquier punto considerado viento abajo están estabilizadas y no dependen del tiempo. Este modelo describe el comportamiento de los gases, dispersados en la dirección del viento y arrastrados a la misma velocidad.

La dispersión ocurre cuando un flujo continuo de contaminantes es soltado a la atmósfera abierta, el cual inicialmente asciende verticalmente, y luego el flujo cambia de dirección por efecto de un viento en altura que disuelve los contaminantes y los lleva lejos de la fuente, dispersándolo en dirección horizontal y vertical de la línea central imaginaria. Esta dispersión es provocada por la turbulencia atmosférica, y en menor medida por la difusión molecular de los gases.

Se supone que el efluente de la fuente continua tiene una distribución Gaussiana con relación a la línea central, tanto de la dirección vertical, z (medida desde el suelo), como de la dirección perpendicular al viento, y .

El perfil de concentración varía a lo largo del eje x , declinando continuamente el máximo de la concentración y aumentando el esparcimiento lateral tanto en la dirección y (como se muestra en la **figura 32**), como en la dirección z .

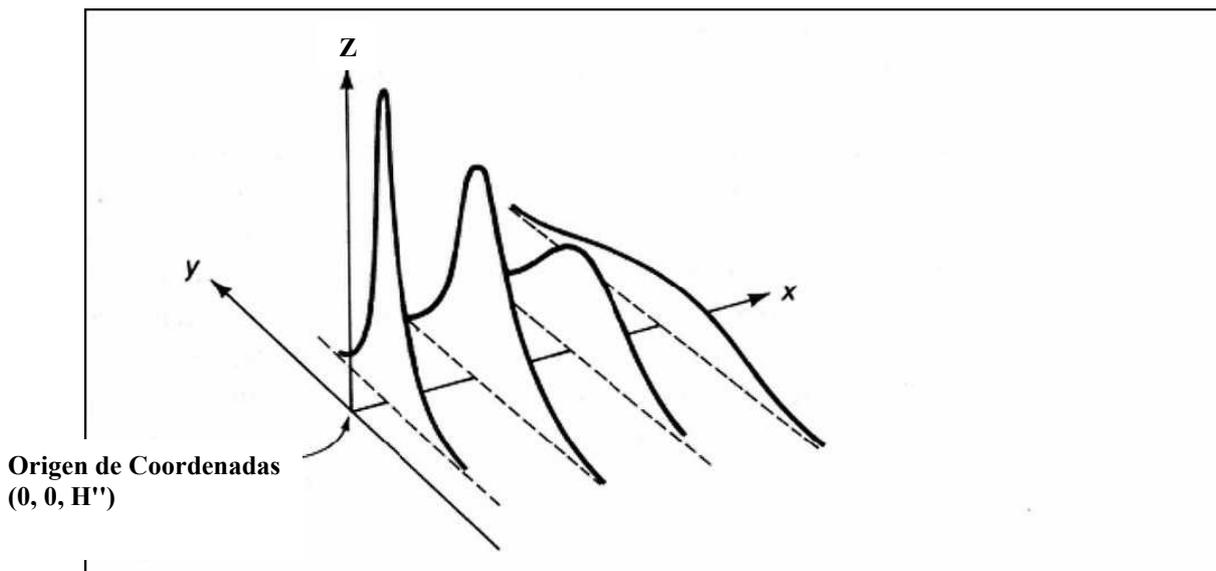


Figura 32: Variación del perfil de concentración de contaminantes en función de la distancia a la fuente (coordenada x).

La concentración de contaminantes como una función de las coordenadas (x, y, z), está definida entonces por la siguiente ecuación basada en el modelo de dispersión estadístico gaussiano ISC3 (*Industrial Source Complex Model*).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 \times \pi \times U_z \times \sigma_y \times \sigma_z} \times e^{\left(\frac{-y^2}{2 \times \sigma_y^2}\right)} \times \left\{ e^{\left(\frac{-(z-H'')^2}{2 \times \sigma_z^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(z+H'')^2}{2 \times \sigma_z^2}\right)} \right\}$$

Ecuación 36

Donde:

$C(x, y, z)$ = concentración lateral. Es una función de las coordenadas x, y, z, ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Q = coeficiente de emisiones, ($\mu\text{g}/\text{s}$).

$\sigma_y(x)$ y $\sigma_z(x)$ = parámetros de dispersión horizontal y vertical, (m). Son funciones de la distancia x, y de la estabilidad de la atmósfera. Representan una medida de la dispersión del penacho en las direcciones y y z respectivamente (ver **figura 33**).

U_z = velocidad del viento en la altura de la antorcha, (m/s).

y = distancia horizontal desde la línea central del flujo, (m).

z = distancia vertical desde el nivel del terreno, (m).

H'' = altura efectiva, (m). $H'' = H + \Delta h$, donde H = altura física de la fuente emisora (la antorcha), y Δh = elevación del penacho.

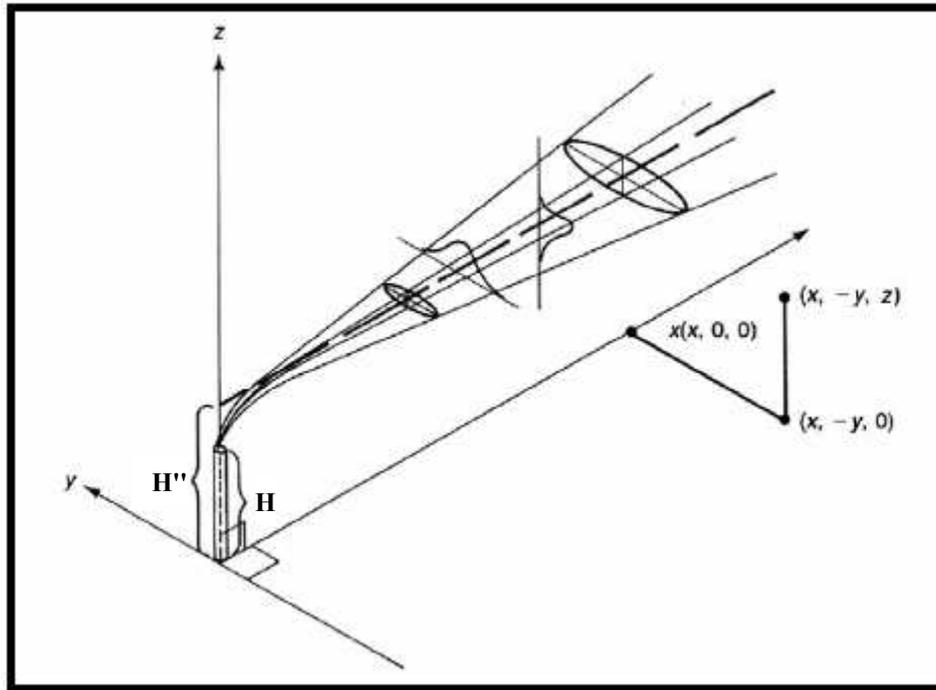


Figura 33: Esquema del sistema de coordenadas de la distribución Gaussiana en la horizontal y vertical.

El método de Pasquill-Gifford, permite determinar σ_y y σ_z como funciones de x con gráficas empíricas (ver **figuras 34** y **35**). Nótese que la dependencia de las desviaciones normales con respecto a x , varía con la categoría de estabilidad atmosférica (de A a F). Estos gráficos indican que para una determinada distancia viento abajo de la fuente de emisión, la amplitud del penacho es máxima cuando la inestabilidad atmosférica es también máxima, y es mínima cuando la atmósfera es muy estable.

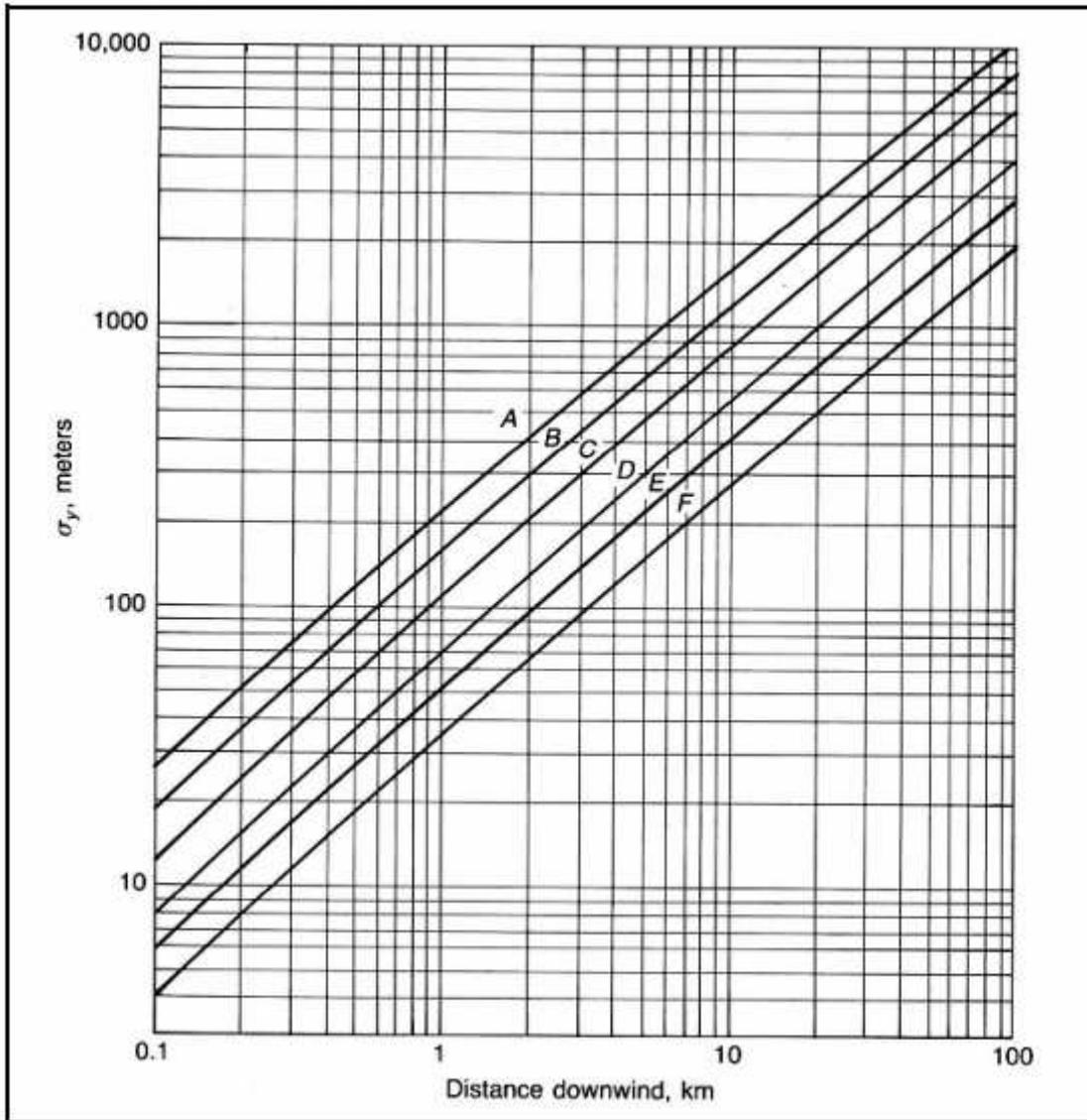


Figura 34: Ábaco para la estimación de la dispersión horizontal en función de la distancia corriente abajo y la categoría de estabilidad atmosférica de Pasquill.

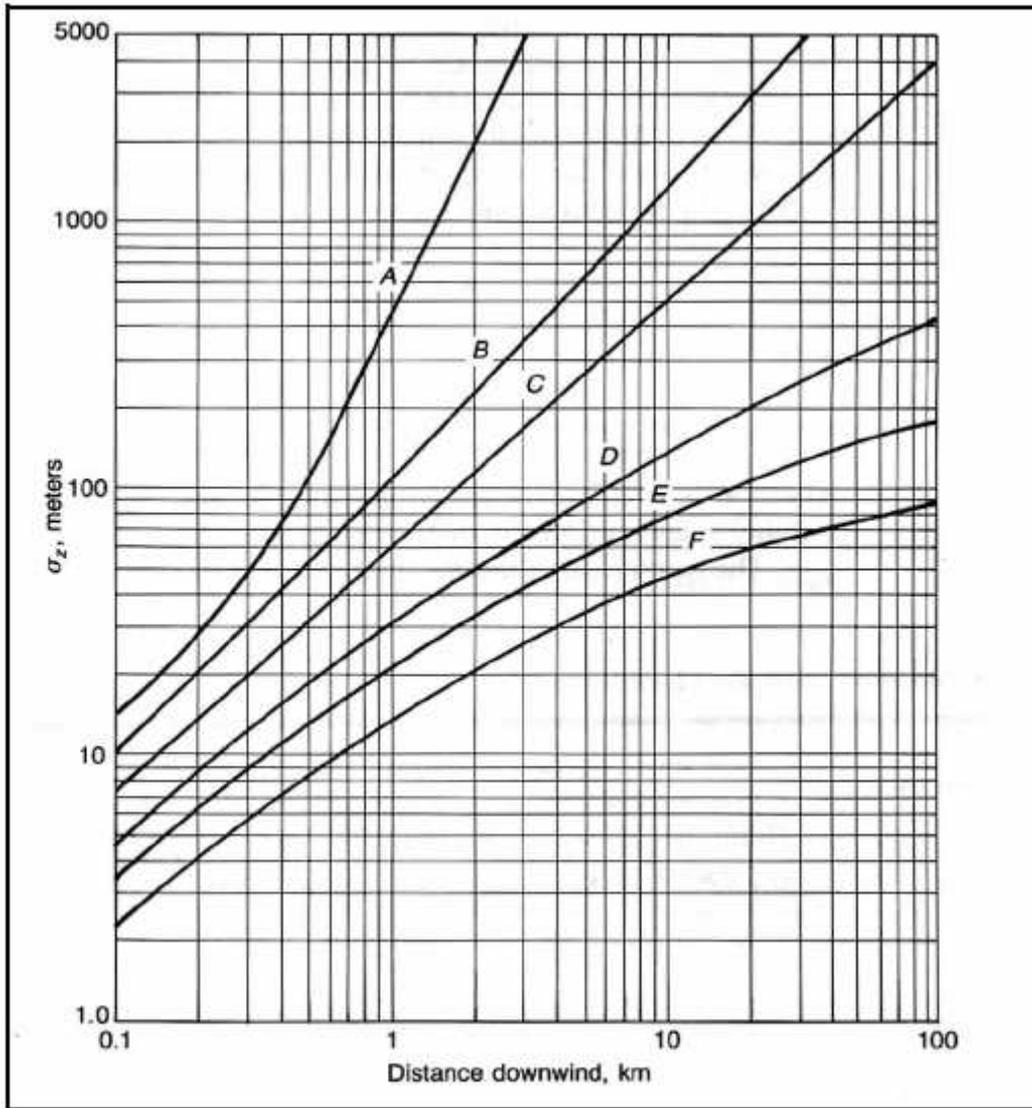


Figura 35: Ábaco para la estimación de la dispersión vertical en función de la distancia corriente abajo y la categoría de estabilidad atmosférica de Pasquill.

Se calcula la concentración de contaminantes a nivel de suelo, concretamente en los puntos (3.000, 0, 0); (5.000, 0, 0) y (10.000, 0, 0) (m), para ver su evolución con la distancia respecto de la antorcha.

Como se explicó con anterioridad, la emisión siempre permanecerá por debajo de las siguientes tasas máximas de contaminantes, debido a la tecnología propia de la antorcha del proyecto:

- Hidrocarburos No Quemados (UHC) = 0,0602 g/MJ
- Monóxido de Carbono (CO) = 0,1592 g/MJ
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x) = 0,0293 g/MJ

Nota: g/MJ = gramos de contaminante emitidos a la atmósfera por cada MJ de gas quemado de antorcha.

Las propiedades principales del gas de antorcha y del proceso del proyecto son:

·Tipo de gas		GAS NATURAL
·Poder Calorífico Inferior del gas	q	46.197 kJ/kg
·Caudal Másico de diseño para dispersión. Es el caudal máximo esperado para emisiones prolongadas en el tiempo. Es muy inferior al de diseño para radiación.	\dot{m}	56.500 kg/h

A continuación se obtienen los coeficiente de emisiones máximos en (g/s) para cada uno de los principales contaminantes emitidos por la antorcha.

$$Q_{UHC} = 0,0602 \frac{g}{1.000 \text{ kJ}} \times 46.197 \frac{kJ}{kg} \times 56.500 \frac{kg}{3.600 \text{ s}} = 43,65 \frac{g}{s}$$

$$Q_{CO} = 0,1592 \frac{g}{1.000 \text{ kJ}} \times 46.197 \frac{kJ}{kg} \times 56.500 \frac{kg}{3.600 \text{ s}} = 115,43 \frac{g}{s}$$

$$Q_{NOX} = 0,0293 \frac{g}{1.000 \text{ kJ}} \times 46.197 \frac{kJ}{kg} \times 56.500 \frac{kg}{3.600 \text{ s}} = 21,24 \frac{g}{s}$$

Con $x = 3, 5$ y 10 km, junto con una estabilidad atmosférica D para este proyecto, se entra en los ábacos de las **figuras 34 y 35**, y se obtiene:

- $x = 3$ km:

$$\sigma_y = 186 \text{ m}$$

$$\sigma_z = 62 \text{ m}$$

- $x = 5$ km:

$$\sigma_y = 292 \text{ m}$$

$$\sigma_z = 83 \text{ m}$$

- $x = 10 \text{ km}$:

$$\sigma_y = 536 \text{ m}$$

$$\sigma_z = 124 \text{ m}$$

También se necesita conocer el término H'' , que se halla a continuación mediante la siguiente relación ya mencionada con anterioridad:

$$H'' = H + \Delta h = 56 \text{ m} + 11,95 \text{ m} = 67,95 \text{ m}$$

Por medio de la **ecuación 36** se calculan finalmente las concentraciones de contaminantes a nivel del suelo de UHC, de CO, y de NO_x en los puntos (3.000, 0, 0); (5.000, 0, 0) y (10.000, 0, 0) (m).

$$C_{UHC}(x, y, z) = \frac{Q_{UHC}}{2 \times \pi \times U_z \times \sigma_y \times \sigma_z} \times e^{\left(\frac{-y^2}{2 \times \sigma_y^2}\right)} \times \left\{ e^{\left(\frac{-(z-H'')^2}{2 \times \sigma_z^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(z+H'')^2}{2 \times \sigma_z^2}\right)} \right\}$$

En el punto (3.000, 0, 0) (m):

$$C_{UHC}(x, y, z) = \frac{43,65 \times 1 \times 10^6 \frac{\mu\text{g}}{\text{s}}}{2 \times \pi \times 18 \text{ m/s} \times 186 \text{ m} \times 62 \text{ m}} \times e^{\left(\frac{-(0 \text{ m})^2}{2 \times (186 \text{ m})^2}\right)} \times \left\{ e^{\left(\frac{-(0-67,95 \text{ m})^2}{2 \times (62 \text{ m})^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(0+67,95 \text{ m})^2}{2 \times (62 \text{ m})^2}\right)} \right\} =$$

$$= C_{UHC}(3.000, 0, 0) \text{ (m)} = 37 \mu\text{g/m}^3$$

En el punto (5.000, 0, 0) (m):

$$C_{UHC}(5.000, 0, 0) \text{ (m)} = 23 \mu\text{g/m}^3$$

En el punto (10.000, 0, 0) (m):

$$C_{UHC}(10.000, 0, 0) \text{ (m)} = 10 \mu\text{g/m}^3$$

$$C_{CO}(x, y, z) = \frac{Q_{CO}}{2 \times \pi \times U_z \times \sigma_y \times \sigma_z} \times e^{\left(\frac{-y^2}{2 \times \sigma_y^2}\right)} \times \left\{ e^{\left(\frac{-(z-H'')^2}{2 \times \sigma_z^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(z+H'')^2}{2 \times \sigma_z^2}\right)} \right\}$$

En el punto (3.000, 0, 0) (m):

$$C_{CO}(x, y, z) = \frac{115,43 \times 10^6 \frac{\mu g}{s}}{2 \times \pi \times 18 \text{ m/s} \times 186 \text{ m} \times 62 \text{ m}} \times e^{\left(\frac{-(0 \text{ m})^2}{2 \times (186 \text{ m})^2}\right)} \times \left\{ e^{\left(\frac{-(0-67,95 \text{ m})^2}{2 \times (62 \text{ m})^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(0+67,95 \text{ m})^2}{2 \times (62 \text{ m})^2}\right)} \right\} =$$

$$= C_{CO}(3.000, 0, 0) \text{ (m)} = 97 \mu\text{g/m}^3$$

En el punto (5.000, 0, 0) (m):

$$C_{CO}(5.000, 0, 0) \text{ (m)} = 60 \mu\text{g/m}^3$$

En el punto (10.000, 0, 0) (m):

$$C_{CO}(10.000, 0, 0) \text{ (m)} = 26 \mu\text{g/m}^3$$

$$C_{NOx}(x, y, z) = \frac{Q_{NOx}}{2 \times \pi \times U_z \times \sigma_y \times \sigma_z} \times e^{\left(\frac{-y^2}{2 \times \sigma_y^2}\right)} \times \left\{ e^{\left(\frac{-(z-H'')^2}{2 \times \sigma_z^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(z+H'')^2}{2 \times \sigma_z^2}\right)} \right\}$$

En el punto (3.000, 0, 0) (m):

$$C_{NOx}(x, y, z) = \frac{21,24 \times 10^6 \frac{\mu g}{s}}{2 \times \pi \times 18 \text{ m/s} \times 186 \text{ m} \times 62 \text{ m}} \times e^{\left(\frac{-(0 \text{ m})^2}{2 \times (186 \text{ m})^2}\right)} \times \left\{ e^{\left(\frac{-(0-67,95 \text{ m})^2}{2 \times (62 \text{ m})^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(0+67,95 \text{ m})^2}{2 \times (62 \text{ m})^2}\right)} \right\} =$$

$$= C_{NOx}(3.000, 0, 0) \text{ (m)} = 18 \mu\text{g/m}^3$$

En el punto (5.000, 0, 0) (m):

$$C_{\text{NOx}}(5.000, 0, 0) \text{ (m)} = 11 \mu\text{g/m}^3$$

En el punto (10.000, 0, 0) (m):

$$C_{\text{NOx}}(10.000, 0, 0) \text{ (m)} = 5 \mu\text{g/m}^3$$

Todos estos valores de concentración de contaminantes, se encuentran por debajo de los límites establecidos por la *EPA* en su *National Ambient Air Quality Standards (40 CFR part 50)*.

CAPÍTULO 6

ESTUDIO ECONÓMICO

6.1 INTRODUCCIÓN

En esta parte se va a proceder a realizar el desglose de las diferentes partidas que constituyen el proyecto de diseño, fabricación, montaje y puesta en marcha de una antorcha en una planta de regasificación de Gas Natural Licuado (GNL) de características:

GAS NATURAL	P = 250 mbar	ALTURA 56 m
	T = -106°C	
	Q = 241.000 Kg/h	

A continuación se describe el alcance de cada uno de los conceptos que se han tomado en cuenta para la elaboración del presupuesto.

6.2 DESARROLLO DEL PRESUPUESTO

6.2.1 Sistema mecánico

- Quemador de 30" en material INCONEL 625 con inyección de N₂, donde se incluyen:
 - Fabricación del quemador y tratamiento superficial.
 - Accesorios:
 - Boquillas de piloto
 - Venturi
 - Mecanización de piezas
- Sello Molecular tipo AFS-30 en material AISI-304L
 - Fabricación y tratamiento superficial (pintura)
- Fuste 30" y drenaje 2" en material AISI-304L, tuberías de servicio en A-106 Gr B.
 - Fabricación
 - Tratamiento superficial (pintura)
 - Fabricación de plantilla que permitirá el posicionamiento correcto de los pernos de anclaje de la antorcha previamente a su montaje e izado

- Snuffing system con N₂ ⁽¹⁾
 - Tubería de servicio en material A-106 Gr B
 - Tratamiento superficial

- Derrick, escaleras y plataformas.
 - Fabricación
 - Tratamiento superficial
 - Estructura: pintura
 - Escaleras y plataformas: galvanizado

6.2.2 Sistema de control: Panel de control

- Caja para Panel de Control antideflagrante
- Controladores de Temperatura
- Relés instantáneos
- Termopares tipo K
- Cable de extensión de termopares
- Tubo conduit para cable de termopares
- Cajas de conexiones antideflagrantes
- Cortafuegos
- Prensaestopas
- Montaje

(1)El Sistema Snuffing o de enfriamiento, se encarga de disminuir la temperatura de los llamados puntos calientes de la antorcha y del quemador. Consiste básicamente en una inyección de N₂ en la antorcha que apaga la llama principal (si existe) y la llama de pilotos, a través de varias corrientes que se hacen llegar a los mismos, individualmente a cada piloto y también a través del cuerpo del quemador para la llama principal. En caso de emergencia en la planta por escape y acumulación de una nube de gas en la zona de planta, se activa la señal de emergencia que a su vez actuará sobre la válvula de control de la inyección de N₂.

6.2.3 Sistema de encendido: Panel de encendido

Se incluyen en este punto:

- Fabricación
- Generador de Frente de Llama
- Bobina
- Cámara de mezcla
- Reguladores de presión
- Manómetros y manifolds
- Válvulas antirretorno
- Válvulas manuales de bola
- Válvulas manuales de globo
- Filtros en Y
- Electroválvulas

6.2.4 Sistema de balizamiento

Se incluyen en este apartado:

- Lámpara doble con caja de conexiones y relé de intensidad
- Panel de alimentación de balizas antideflagrante
- Célula fotoeléctrica
- Cable de balizas
- Tubo conduit para cable de balizas

6.2.5 Pescante

Se incluyen en este apartado:

- Fabricación
- Torno
- Cable antigiratorio
- Grilletes

6.2.6 Analizador de O₂ paramagnético

Se incluyen en este apartado:

- Analizador antideflagrante
- Display de indicación remota en caja antideflagrante

6.2.7 Costes de personal

En este apartado se detallan el número de horas estimadas para el desarrollo y ejecución del proyecto, así como sus respectivos costes. Para su desglose véase **tabla 9**.

CONCEPTO	Nº horas estimadas	Precio/hora
Gestión del proyecto	480 horas	52 €/h
Ingeniería Básica y de Detalle	450 horas	52 €/h
Delineación	640 horas	32 €/h
Control de calidad	150 horas	52 €/h
Gestión de compras	480 horas	25 €/h

Tabla 9: Costes de personal.

6.2.8 Puesta en marcha

Es en este punto es donde se incluyen los gastos correspondientes a:

- Desplazamiento, alojamiento y dietas
- Inspección visual
- Ajustes del sistema de control y encendido del equipo
- Puesta en marcha del equipo
- Chequeo del funcionamiento del sistema de control

6.2.9 Repuestos

Comprende los repuestos necesarios para la puesta en marcha de la antorcha y los recomendados para los 2 primeros años de funcionamiento.

6.2.10 Costes financieros

Se derivan de los flujos de caja negativos que se presentan en la fase inicial del proyecto, emisión de avales y otras operaciones bancarias, además de seguros durante la fase de montaje.

6.2.11 Costes de transporte

Se incluyen en esta partida los costes que resultan del transporte a planta de la antorcha sin olvidar las partidas correspondientes a los seguros, aranceles, carga del material y estibado del mismo en contenedor, descarga y etc.

6.2.12 Comunicación y reprografía

Corresponde a los costes referentes a la comunicación entre las distintas partes, así como los suministradores, servicios de mensajería, reprografía, etc.

6.2.13 Varios

- Placa de características
- Embalaje terrestre
- Certificaciones

6.2.14 Contingencias

Costes que no se han contemplado durante la fase de estimación de costes, y en los que se puede incurrir.

6.2.15 Beneficio

Se considera un beneficio esperado del 18% del precio de venta de la antorcha.

6.2.16 Importe total

Se obtiene como resultado de sumar todas las partidas detalladas en la parte superior. Véase **tabla 10**.

CONCEPTO	IMPORTE
SISTEMA MECÁNICO	
QUEMADOR.	23 000 €
SELLO MOLECULAR AFS-30, FUSTE, DRENAJE Y SNUFFING SYSTEM CON N ₂ .	60 000 €
DERRICK, ESCALERAS, PLATAFORMA Y MONTAJE DE LA INSTALACIÓN DE LA ANTORCHA.	230 000, 00 €
TOTAL: 313 000 €	
SISTEMA DE CONTROL	
CAJA PARA PANEL DE CONTROL	2 800 €
FABRICACIÓN	1 800 €
CONTROLADORES DE TEMPERATURA	1 500 €
TERMOPARES	2 000 €
CABLE DE EXTENSIÓN DE TERMOPARES	1 500 €
TUBO CONDUIT PARA CABLE DE TERMOPARES	200 €

CAJAS DE CONEXIONES	1 900 €
CORTAFUEGOS	50 €
NIPPLE	100 €
TOTAL:	11 850 €
SISTEMA DE ENCENDIDO	
FABRICACIÓN	2 500 €
IPG, BOBINA Y CÁMARA DE MEZCLA	1 500 €
REGULADORES	1 000 €
MANÓMETRO Y CONEXIÓN	200 €
VÁLVULA ANTIRRETORNO	50 €
VÁLVULA MANUAL DE BOLA	600 €
VÁLVULA MANUAL DE GLOBO	50 €
FILTRO	100 €
ELECTROVÁLVULA	2 400 €
TOTAL:	8 400 €
SISTEMA DE BALIZAMIENTO	
LÁMPARAS CON CAJAS Y RELÉS DE INTENSIDAD	2 300 €
PANEL DE ALIMENTACIÓN DE BALIZAS	1 000 €
CÉLULA FOTOELÉCTRICA	100 €
CABLE DE BALIZAS CON TUBO CONDUIT	6 000 €
TOTAL:	9 400 €
PESCANTE	
FABRICACIÓN	5 200 €
TORNO, CABLE ANTIGIRATORIO Y GRILLETES	4 300 €
TOTAL:	9 500 €
ANALIZADOR DE O₂ PARAMAGNÉTICO	
ANALIZADOR E INDICACIÓN REMOTA EN CAJA EEXD	15 500 €
VÁLVULAS DE AGUJA DE AISLAMIENTO DEL PANEL	150 €
TOTAL:	15 650 €
COSTES DE PERSONAL	88 640 €
PUESTA EN MARCHA	1 200 €
REPUESTOS DE LA FASE DE PUESTA EN MARCHA	4 500 €
COSTES FINANCIEROS	24 032 €
COSTES POR DESPLAZAMIENTO	6 000 €
COSTES DE TRANSPORTE	9 000 €
COMUNICACIÓN Y REPROGRAFÍA	6 000 €
VARIOS	2 500 €
CONTINGENCIAS	10 420 €
BENEFICIO	93 436 €

Tabla 10: Desglose de costes.

Con este desglose de costes puede deducirse finalmente el precio de venta:

PRECIO DE VENTA: 612.528 €

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Una vez finalizado el proyecto se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Conocidas las bases de diseño de la Antorcha, es decir, características del Gas de Antorcha, las condiciones del emplazamiento, y las propiedades de la llama, se han definido las características fundamentales del equipo, diámetro y altura. Todo ello en estricto cumplimiento con la presión disponible para trasegar dicho combustible al punto terminal de la antorcha, el quemador, y de acuerdo con una radiación a nivel de suelo admisible por diseño.
- Adicionalmente se cumple con limitación de ruido a pie de antorcha, correspondiente a un nivel de presión sonora inferior a 85 dB(A).
- Los valores de las concentraciones en la atmósfera de contaminantes originados por el funcionamiento normal de la antorcha, se encuentran por debajo de los límites establecidos por la legislación vigente.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

El proyecto abordado ha permitido un dimensionamiento a nivel básico del equipo a estudio. Sin embargo, ofrece más posibilidades de análisis. A continuación se plasman algunas de ellas:

- El equipo del proyecto es una antorcha de tipo elevado, de sustentación mediante estructura o *derrick*. Esto repercute en el espesor de chapa o tubería a considerar, ya que la estructura limita los esfuerzos que esta misma ha de soportar, por viento o sismo. Dicho cálculo estructural (sismo-viento) de la antorcha puede ser objeto de estudio posterior.
- En caso de fallo de planta, y posible formación de una nube de gas natural en el entorno, puede ser objeto de estudio el comportamiento térmico del equipo ante una inyección de una corriente de enfriamiento en el quemador, dada la peligrosidad que deriva de ser punto caliente permanente en la instalación de regasificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

P. D. EICHAMER. Flare Details for General Refinery and Petrochemical Service. API RECOMMENDED PRACTICE 537.

Guide for Pressure-Relieving and Depressuring System. API RECOMMENDED PRACTICE 521 (FOURTH EDITION, MARCH 1997). Manufacturing, Distribution and Marketing Department.

REGAMENTO DE INSTALACIONES PETROLÍFERAS. INSTRUCCIÓN TÉCNICA COMPLEMENTARIA MI-IP 01. REFINERÍAS.

CRANE: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Editorial McGraw Hill. 1992.

ANSI B36.10. "Welded and Seamless Wrought Steel Pipe".

MARÍA RAMÍREZ BERASATEGUI, JESÚS MENESES ALONSO Y JOSÉ A. CALVO: Material didáctico de Mecánica Industrial. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2004.

UNE-EN 1473 Mayo 1998 INSTALACIONES Y EQUIPOS PARA GAS NATURAL LICUADO. DISEÑO DE LAS INSTALACIONES TERRESTRES.

CHARLES E. BAUKAL, JR. The John Zink Combustion Handbook.

B. TURNER: Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, U.S. Environmental Protection Agency, 1970.

U.S. EPA, Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, Vol. 1, Stationary Point and Area Sources, AP-42, 4th ed., 1985, Supplement F: Section 11.5, 9/91, Industrial Flares.

U.S. EPA, Code of Federal Regulations, Title 40, Part 60, Standards of Performance for New Stationary Sources.

U.S. EPA, Code of Federal Regulations, Title 40, Part 50, National Ambient Air Quality Standards.

OIL INSURANCE ASSOCIATION, General Recommendations for Spacing in Refineries.

Índice de Figuras

Figura 1: Transporte de GNL a través de barco metanero.	12
Figura 2: Diagrama de flujo de una planta de regasificación de GNL.....	14
Figura 3: Estructura autoportante.....	31
Figura 4: Estructura soportada con vientos.....	32
Figura 5: Estructura con <i>Derrick</i> fijo.....	32
Figura 6: <i>Derrick</i> desmontable con fuste multisección.....	33
Figura 7: <i>Derrick</i> desmontable de fuste integral.....	34
Figura 8: Antorcha horizontal.....	34
Figura 9: Antorcha de Llama Oculta.....	35
Figura 10: Antorchas Multipunto a nivel de suelo.....	36
Figura 11: Antorcha Multipunto en posición elevada.....	36
Figura 12: Antorcha asistida con Aire.....	38
Figura 13: Montaje del piloto de una antorcha.....	47
Figura 14: Sello dinámico (<i>VELOCITY SEAL</i>).....	48
Figura 15: Sello molecular (<i>DENSITY SEAL</i>).....	49
Figura 16: <i>KO drum</i> de la antorcha.....	50
Figura 17: Antorcha / Piloto / Panel de generación de frente de llama.....	53
Figura 18: Panel de generación de frente de llama o panel de encendido.....	54
Figura 19: Quemador libre de humos mediante inyección de vapor.....	57
Figura 20: Ventilador centrífugo.....	59
Figura 21: Ventilador axial.....	60
Figura 22: Esquema general del Sistema de Inertización de Gases.....	62
Figura 23: Simulación de sistema de descarga a antorcha.....	75
Figura 24: Esferas con el mismo nivel de radiación.....	77
Figura 25: Modelización de la antorcha en partes para cálculo de pérdida de carga....	79
Figura 27: Ábaco del sello molecular.....	84
Figura 28: Referencias geométricas para el dimensionamiento de una antorcha.....	88
Figura 29: Atenuación por absorción atmosférica en función de la distancia con respecto de la fuente acústica hemiesférica.....	102
Figura 30: Elevación de la línea central del penacho de contaminantes.....	104
Figura 31: Efectos de la rugosidad del suelo en el perfil del viento.....	108
Figura 32: Variación del perfil de concentración de contaminantes en función de la distancia a la fuente (coordenada x).....	109
Figura 33: Esquema del sistema de coordenadas de la distribución Gaussiana en la horizontal y vertical.....	111
Figura 34: Ábaco para la estimación de la dispersión horizontal.....	112
Figura 35: Ábaco para la estimación de la dispersión vertical.....	113

Índice de Tablas

Tabla 1: Número mínimo de pilotos recomendados en función del diámetro del quemador.	46
Tabla 2: Tiempos de exposición necesarios para alcanzar el umbral de dolor.	71
Tabla 3: Niveles de radiación de diseño recomendados para una antorcha (incluyendo la radiación solar).	72
Tabla 4: Ponderación frecuencial A para quemadores.	99
Tabla 5: Ejemplos de niveles de presión sonora en diferentes entornos.	100
Tabla 6: Corrección de la elevación del penacho en función de la estabilidad atmosférica.	106
Tabla 7: Categorías de estabilidad atmosférica de Pasquill.	106
Tabla 8: Coeficientes de corrección de la velocidad del viento.	107
Tabla 9: Costes de personal.	121
Tabla 10: Desglose de costes.	124