

4



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

OPTIMIZACION DE LOS SISTEMAS DE RELEVO
DE PRESION Y QUEMADORES

299600

T E S I S

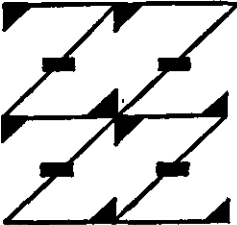
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO

PRESENTA

GERARDO JAVIER CARMONA FRANCO

DIRECTOR

I.Q.P. JOSE LUIS GOMEZ RODRIGUEZ



LO HUMANO
EJE
DE NUESTRA REFLEXION

MEXICO, D. F.

JULIO DE 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/509/01

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: CARMONA FRANCO GERARDO JAVIER

P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	I.Q. P. Salvador J. Gallegos Ramales
Vocal:	I.Q.P. José Luis Gómez Rodríguez
Secretario:	I.Q. José Bermúdez Mosqueda
Suplente:	I.Q. Cuauhtémoc Lagos Chávez
Suplente:	I.Q.I. Ada Meza Meza

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D. F., 2 de Abril del 2001.

EL JEFE DE LA CARRERA



I.Q. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ

SECRETARIA TECNICA

AGRADECIMIENTOS

Quiero hacer presente un meritorio reconocimiento a la experiencia y colaboración que, de una u otra forma, aportaron en la realización de esta obra y que con su valioso apoyo haya concluido una etapa más de mi vida profesional, y principalmente haber cubierto el objetivo planteado durante mi estancia dentro de las Instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo, a los Ingenieros del Area de Ingeniería de Sistemas y al personal que labora dentro del Centro de Investigación Petrolera. A todos ellos, muchas gracias.

Al Ingeniero José Luis Gómez Rodríguez

Quiero agradecerle de una manera muy especial el haberme brindado toda su confianza, su apoyo incondicional y la dedicación de su parte para la elaboración de la presente tesis. Además el haberme guiado con inteligencia, profesionalismo y ética. Por su dedicación y colaboración muchas gracias, ingeniero.

A Petróleos Mexicanos.

Deseo agradecer a las personas de PEMEX todas las facilidades que me fueron brindados por el personal de la Gerencia de Seguridad y Protección Ambiental, especialmente al Ingeniero Lucio Hernández Fuentes, para la culminación de esta tesis. Gracias

A Dios:

Por darme la oportunidad de existir

A mis padres y hermanos:

Por ser tan importantes e indispensables en mi vida...
por quererme y llenarme de cariño y atenciones
por saber entenderme y dejarme experimentar
en mis propios fracasos y triunfos...
es bueno saber que cuento con todos ellos para todo
y que son el mejor confidente y amigos que tengo
por eso hoy quiero darles gracias y decirles que son
lo más bello que tengo.

A mis amigos de la facultad:

Deseo agradecer a las personas que me aceptaron
como soy y me ayudaron a ser mejor. El haberme
levantado el ánimo, por tratar de comprenderme y
decir la verdad, aunque esta duela, pero seguimos
juntos pase lo que pase.
Gracias por caminar conmigo, por hacerme con tú
afecto muchos más fácil el camino.
Por el tiempo que me dieron y al escucharme, aligerar
el peso del dolor normal de mi existencia.
Por todo lo que sea, muchas gracias.

A los profesores de la facultad:

Por haberme transmitido los conocimientos y por
enseñarme que en la amistad no hay nada prendido
nada fingido; lo que hay en ella es tan genuino como
espontáneo.

INDICE

	Título	Pág.
I.	Resumen	vi
II.	Introducción	vii
1	Generalidades	
1.1	Sistemas de relevo de presión.	1
1.2	Clasificación de los sistemas de relevo de presión	2
1.3	Criterios de selección de la instalación final de los sistemas de relevo	3
1.4	Causas de la sobrepresión	5
2	Los sistemas de relevo	
2.1	Características de las válvulas de relevo de presión	12
2.2	Tipos de dispositivos de relevo de presión	12
2.3	Dispositivos de disco de ruptura	21
2.4	Determinación de los requerimientos de relevo	24
2.5	Dimensionamiento de los dispositivos de relevo	37
3	Análisis del software de diseño de los sistemas de relevo de presión	
3.1	Diseño de sistemas de relevo de presión (IMP)	50
3.2	INPLANT (Simsci)	56
3.3	Visual Flare (Simsci)	67
4	Quemadores de campo y sus elementos	
4.1	Recipientes de relevo de presión	75
4.2	Dimensionamiento de los recipientes de relevo de presión	76
4.3	Quemadores de campo	81
4.4	Clasificación de los quemadores de campo	85
4.5	Equipo auxiliar para el quemado	94
4.6	Dispersión de gases	96

Título	Pág.	
5	Diseño de los quemadores de campo	
5.1	Procedimiento de cálculo para el diseño de los quemadores de campo	105
5.2	Niveles de ruido permisible	116
6	Optimización de los sistemas de relevo de presión	
6.1	Fundamento básico	119
6.2	Consideraciones generales de códigos y normas vigentes	120
6.3	Criterios para el diseño del cabezal de relevo	121
6.4	Optimización de los sistemas de relevo	122
6.5	Simulación dinámica	125
6.6	Aplicabilidad de los criterios de reducción de relevo	128
6.7	Análisis económico	136
7	Observaciones y conclusiones	139
	Glosario	147
	Apéndice A. Cálculo del calor de combustión de un compuesto	153
	Apéndice B. Límites de flamabilidad para hidrocarburos	156
	Apéndice C. Concentraciones permisibles de contaminantes	163
	Apéndice D. Normatividad ecológica aplicada en la República Mexicana	167
	Bibliografía	173

INDICE DE TABLAS

No. Tabla	Título	Pág.
1.1.	Posibles fallas de servicios y equipos afectados	8
2.1.	Coefficiente de expansión cúbica para hidrocarburos líquidos y agua a 60°F	29
2.2.	Factores ambientales, F	33
2.3.	Presión de ajuste y límites de acumulación para las válvulas de relevo de presión	38
2.4.	Factores de corrección del vapor sobrecalentado, K_{SH}	43
2.5.	Orificios nominales y áreas efectivas de descarga para las válvulas de relevo de presión, según API STD 526 (1994)	49
3.1.	Métodos para calcular las propiedades del vapor	59
3.2.	Correlaciones para la constante de equilibrio, K	60
3.3.	Correlaciones para la entalpía para fluidos composicionales	62
3.4.	Métodos de cálculo para la caída de presión	63
3.5.	Accesorios modelados por INPLANT	65
4.1.	Longitudes recomendadas de los recipientes	81
4.2.	Tiempo de exposición necesario para llegar al umbral del dolor	83
4.3.	Niveles de radiación recomendada para el diseño	84
4.4.	Radiación a partir de la difusión de flama de los gases	86
4.5.	Relación de vapor inyectado sugerido	92
4.6.	Estimación de las clases de estabilidad de Pasquill	100
4.7.	Coefficiente de potencia, n	103
4.8.	Valores aproximados de σ_y y σ_z	103
4.9.	Modelos disponibles para el modelo de las emisiones	104
5.1.	Niveles de ruido disponible	117
6.1.	Tabla comparativa de resultados finales para el sistema de relevo por falla de agua de enfriamiento para el Sector II de Gasolinas en Tula, Hgo	134

INDICE DE FIGURAS

No. Figura	Título	Pág.
1.1.	Representativo de un sistema de relevo	2
2.1.	Dispositivos de relevo de presión. Válvulas de seguridad	13
2.2.	Efectos de la contrapresión sobre la presión de ajuste de las válvulas seguridad-relevo convencionales	16
2.3.	Efectos de la contrapresión sobre la presión de ajuste de las válvulas seguridad-relevo balanceadas	18
2.4.	Dispositivos de relevo de presión. Válvula operada por piloto	20
2.5.	Dispositivo de disco de ruptura	23
2.6.	Curva para evaluar el coeficiente C, asumiendo comportamiento no ideal	41
2.7.	Valores de F_2 para flujo subcrítico	42
2.8.	Factor de corrección en el dimensionamiento por contrapresión constante para válvulas convencionales	44
2.9.	Factor de corrección por contrapresión, K_b , para válvulas balanceadas con pistón	44
2.10.	Factor de corrección para la capacidad, K_v , debido a la viscosidad	46
2.11.	Factor de corrección para la capacidad, K_w , debido a la contrapresión en las válvulas balanceadas en servicio con líquido	46
2.12.	Factor de corrección de la capacidad debido a la sobrepresión para válvulas de relevo no certificadas en servicio con líquidos	47
3.1.	Numeración de los sistemas	55
4.1.	Determinación del coeficiente de arrastre, C	77
4.2.	Recipiente separador	80
4.3.	Tipos de quemadores elevados. Tipo torre, cableado y autosoportado	88
4.4.	Quemador de fosa. Tipo esparido de agua	89
4.5.	Boquilla con suministro de vapor	91
4.6.	Efecto Coanda	93
4.7.	Equipo auxiliar para el quemado	98
4.8.	Tipos de pluma	101

No. Figura	Titulo	Pág.
5.1.	Referencias dimensionales del tamaño y diámetro del quemador	108
5.2.	Longitud de flama Vs calor liberado. Tamaños industriales	109
5.3.	Distorsión de la flama debido al viento	109
5.4.	Intensidad del ruido a 100 ft de la boquilla del quemador	118
6.1.	Diagrama de control lógico para el sistema de protección contra la falla de agua de enfriamiento	124
6.2.	Modelo de una columna fraccionadora. Vista en el simulador dinámico	128
6.3.	Diagrama de bloques de integración, "Sector de Gasolinas". Refinería de Tula, Hgo.	129
6.4.	Sistema de protección para la unidad Hidrodesulfuradora de Naftas No. 2	133
6.5.	Diagrama de flujo de proceso. Unidad Hidrodesulfuradora de Naftas No. 2. Con medida para la reducción de masas	133-a
6.6.	Diagrama de desfogue "Sector de Gasolinas II". Refinería de Tula, Hgo.	135

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

OPTIMIZACION DE LOS SISTEMAS DE RELEVO Y QUEMADORES

Resumen

El diseño de los sistemas de relevo de presión para una planta nueva es, con frecuencia, uno de los aspectos más rigurosos del paquete total de diseño. Sin embargo, existe una tendencia a usar métodos de cálculo cortos resultando con esto, en un sobrediseño por parte de los equipos que componen el sistema.

Desde la aparición de los primeros métodos de cálculo para los sistemas de relevo, se han desarrollado una gran variedad de algoritmos de cálculo encaminados a resolver problemas particulares de relevo o simplemente han aparecido algoritmos más rápidos y eficientes. De la mano con esto, la simulación ha evolucionado a pasos agigantados, proyectando en la actualidad paquetes de software cada vez más fáciles de entender, más fáciles de manejar y cada vez más caros, en cuanto a la tecnología que se usa para el diseño o análisis. En el presente trabajo, se analizó el soporte técnico de los software con los que cuenta el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) para el diseño de los sistemas de relevo de presión, visualizando las características de cada uno de ellos y las ventajas y desventajas de su uso. Entre los simuladores analizados se incluyeron los de la compañía SIMSCI, como el INPLANT™ y el Visual Flare™, y el elaborado dentro del mismo Instituto, denominado Diseño de Sistemas de Relevo de Presión.

Además de lo anterior, se llevo a cabo un estudio de los quemadores de campo con que cuenta la Industria del Petróleo, elevados y de fosa, mencionando las características de cada uno de ellos y los elementos que lo componen; se analizaron los métodos de diseño más comunes, entre los que se encuentran en las prácticas recomendadas del API (American Petroleum Institute) y un procedimiento establecido por parte de PEMEX (Petróleos Mexicanos), desde el punto de vista de los parámetros principales considerados en el diseño, tales como la radiación y el diámetro del quemador, para que estos sean seguros y eficientes. Terminando con un análisis de dispersión de contaminantes emitidos por el mismo quemador y mencionando algunos de los simuladores más comunes para este tipo de estudio.

Por último, se llevo a cabo un estudio acerca de los criterios de diseño de los sistemas de relevo de presión, los cuales se encuentran basados en normas, estándares y códigos internacionales, y la propuesta de una nueva alternativa de diseño de los sistemas basado en el establecimiento de criterios surgidos de la experiencia operacional de plantas existentes, con la finalidad de disminuir, por un lado, las pérdidas de material del proceso, que trae consigo un ahorro sustancial de energía, y, por otro lado, reducir el carga de relevo enviada al sistema, resultando en una disminución en tamaño de los cabezales de relevo y equipo asociado, logrando con esto reducir la cantidad y números de quemadores de campo, y, un ahorro, aproximadamente, del 50% en el gasto del sistema.

Introducción

En las pasadas tres décadas, el vasto crecimiento de las actividades industriales han resultado en serios problemas relacionados con la protección ambiental, la conservación de energía, recursos y la seguridad. La industria ha desarrollado, continuamente, sus métodos de diseño y técnicas de operación para vencer estos problemas. La industria de procesos, la cual opera plantas química y petroquímicas, almacenan, manejan, procesan y transportan químicos tóxicos e inflamables los cuales serán altamente peligrosos. Esta industria tiene un excelente registro de seguridad comparadas como un todo. No obstante, los pocos accidentes que han ocurrido han hecho consciencia en el personal de la industria sobre los riesgos potenciales que esto conlleva.

El hablar de seguridad en una planta de procesos es necesario hacer énfasis en los sistemas de seguridad de prevención, tales como los sistemas de relevo de presión, y los sistemas de seguridad contención, entre los que destacan los sistemas contra incendio. Los sistemas de relevo de presión son una parte esencial que componen al proceso, dado que manejan fluidos tóxicos o explosivos, debido a que evita que se acumule presiones excesivas generadas en los equipos debido a las situaciones de emergencia y, en consecuencia, reducen la posibilidad de explosión en la planta y la pérdida de la inversión hecha a la misma.

Si se tiene el caso de relevo de grandes cantidades de gases o vapores inflamables, el método más común de evacuarlos es mediante un sistema de eliminación, empleando el proceso de quemado llevado a cabo por un quemador, elevado o de fosa. El quemado es el proceso de combustión el cual tiene el método tradicional de disponer, con seguridad, de grandes cantidades de gases inflamables de deshecho y vapores en la industria del petróleo. Con el advenimiento de los estándares de calidad del aire, la operación de quemado es de considerable importancia como un método de control industrial al ambiente, dado que muchos de los gases, los cuales anteriormente eran enviados a la atmósfera, ahora serán enviados a un quemador para su disposición.

El diseño de un sistema de relevo de presión en una planta de proceso puede ser complicado y al mismo tiempo un consumidor de tiempo si no se cuenta con herramientas adecuadas. Independientemente de esto, existe la tendencia de emplear métodos cortos para el diseño ocasionando un sobrediseño y gastos excesivos para la construcción. Por ejemplo, antiguamente, los diseñadores del sistema de relevo simplemente adicionaban todas las cargas de relevo generadas en el proceso, debido a una falla de algún servicio o percance, para el diseño del cabezal y el quemador del sistema. Hoy en día, con la entrada y actualización de las normas internacionales, esto ya no se hace sino que se lleva a cabo un análisis de los posibles disturbios que generen la sobrepresión, visualizando aquellas más críticas, por ejemplo las que nos proporcionen la mayor carga a ser relevada, para que, a partir de estas, se lleve a cabo el diseño.

Hoy en día el uso de simuladores para el diseño de los sistemas de relevo de presión ha tomado un mayor auge en la industria de procesos, por tal motivo en el presente trabajo, se hace referencia a los simuladores con los que cuenta el Instituto Mexicano del Petróleo, entre los que destacan el desarrollado por personal del propio Instituto, y los de la compañía Simsci, INPLANT™ y Visual Flare™. Pero no todos los simuladores nos proporcionan los elementos necesarios para poder afirmar que los diseños obtenidos sean los más adecuados, por lo cual, se realizó un estudio de las herramientas de cálculo

con los que cuenta cada uno de estos simuladores y a partir de estos, hacer una comparación para hacer notar las ventajas y desventajas que tienen cada uno de ellos.

Por otro lado, se hace referencia a los métodos de diseño, comunes en la literatura, de los quemadores elevados llevando a cabo, al igual que métodos de cálculo de los sistemas de relevo, una comparación a partir de la realización de un ejemplo y visualizando los elementos que componen cada secuencia.

Además de lo ya mencionado, hoy en día han surgido estudios acerca de cómo poder disminuir, a partir de una secuencia de acciones humanas y de control, automático o manual, la carga de relevo, que son enviados al sistema de relevo de presión y, por consiguiente, al quemador, de tal manera de poder optimizar el sistema. La palabra optimización responde al hecho de aplicar, lo que en el Instituto Mexicano del Petróleo llaman, los "Criterios de Reducción de Masas" de tal manera que la carga a ser relevada, debido a una sobrepresión en algún equipo, sea menor a la obtenida debido al estudio realizado con los métodos tradicionales, obteniendo con esto una reducción, de 1 ó 2 diámetros comerciales en el tamaño del cabezal y del quemador sin alterar los principios básicos para los cuales son diseñados los sistemas de relevo de presión. Por otro lado, la aplicación de los nuevos criterios de reducción de masas puede ser aplicada a los sistemas de relevo ya existentes, desde el punto de vista, de que podría manejar carga de relevo adicionales y así poder disminuir el uso de los otros sistemas y los quemadores adicionales.

Es dentro de este panorama donde se enmarca la presente tesis, la cual está organizada en seis capítulos siendo los siguientes:

Capítulo 1, "Generalidades de los Sistemas de Relevo de Presión", donde se dan a conocer los conceptos básicos de los sistemas de relevo de presión, su clasificación, objetivos fundamentales para su diseño y los principales casos que pueden ocasionar una sobrepresión en los equipos de proceso de la planta.

Capítulo 2, "Sistemas de Relevo de Presión", en este se dan a conocer las características, funcionamiento de los dispositivos de relevo de presión entre los cuales se mencionan las válvulas de seguridad y cómo se lleva a cabo su diseño. Además se revisa la manera de cómo obtener la capacidad de relevo en cada una de las causas de la sobrepresión.

Capítulo 3, "Análisis del Software para el Diseño de los Sistemas de Relevo de Presión", se analizan las características principales que conforman a los simuladores con que cuenta el departamento de Ingeniería de Sistemas, dentro del IMP, INPLANT™, Visual Flare™ y el simulador denominado Diseño de los Sistemas de Relevo de Presión, desde un punto de vista del soporte técnico, así como el de la determinación de la caída de presión para el cabezal, y la manera de cómo se encuentra estructurado.

Capítulo 4, "Quemadores de Campo", se da una reseña de los principales quemadores con los que cuenta la industria de procesos a partir de su funcionamiento y las características de operación, con humo y sin humo. Además se considera el recipiente separador de líquidos (knock-out drum) para, como su mismo nombre lo indica, separar el líquido que puede transportar el gas y que en un momento dado pueda ocasionar algún problema con la operación del quemador. Por último se lleva a cabo un análisis por parte de las emisiones que conlleva la incineración de los compuestos tóxicos e inflamables y las posibles consecuencias hacia las personas y las ciudades circundantes al quemador.

Capítulo 5, "Diseño de los Quemadores de Campo", se hace referencia a las distintas secuencias de cálculo, comúnmente encontradas en la literatura, para el diseño de los quemadores empleadas en la industria y se analizan los resultados obtenidos por cada uno de ellos a partir de un diseño como ejemplo.

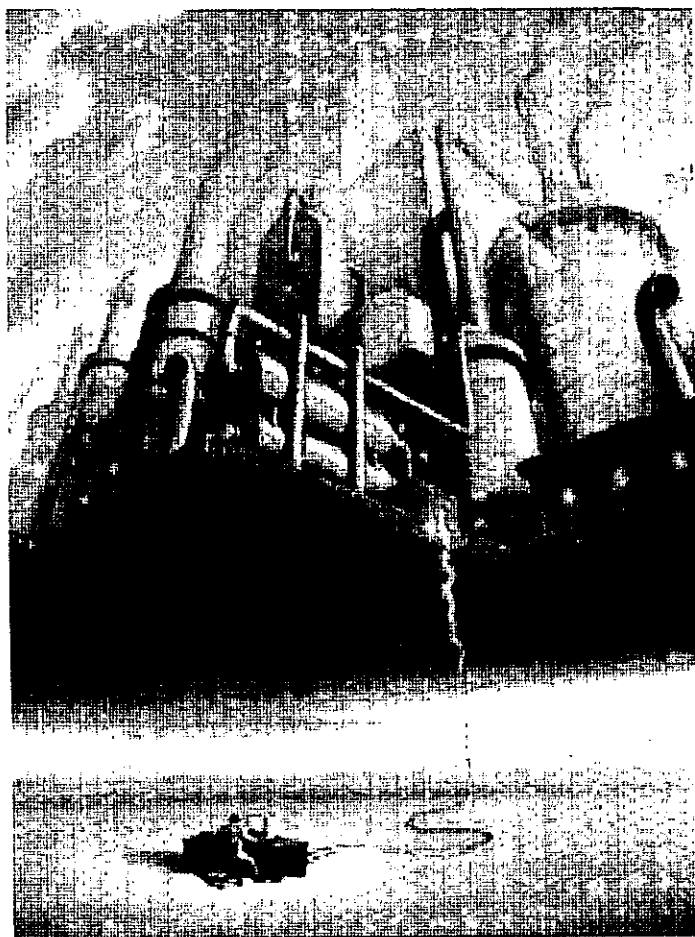
Capítulo 6, "Optimización del Sistema de Relevos de Presión", en este capítulo, se hace mención de los criterios de reducción de masa, en forma general, obtenidos después de haber realizado el estudio, y la manera en como fueron aplicados a un sistema de relevos ya existente, como fue el caso de la refinería de Tula en Hidalgo. Se hace la aclaración que estos criterios son, generalmente, considerados en plantas químicas, como las refinerías, que cuentan con torres de destilación y calentadores a fuego directo. Como resumen de esta aplicación, se visualizará los resultados obtenidos después de la aplicación desde el punto de vista económico, analizando los costos de algunos de los equipos que conforman el sistema.

Para concluir, se hacen observaciones finales acerca de las características analizadas a los simuladores empleados para el diseño y análisis de los sistemas de relevos de presión, nuevos y existentes, además de la importancia de considerar la estimación de todos los parámetros necesarios para el diseño de los quemadores elevados y la importancia que tiene la aplicación de los nuevos criterios de diseño para la reducción de masas a relevar en los sistemas nuevos y existentes además de la importancia económica que esto pudiera traer.

Cabe hacer mención que el presente trabajo representa el diseño actual con el que se lleva a cabo el diseño de los sistemas de relevos de presión y los quemadores a partir de las normas que lo rigen, tales como el API y ASME. Además se visualiza la manera correcta de cómo llevar a cabo dicha tarea y como, en cierta manera, poder reducir la carga que llega a estos sistemas. Por último, se hacen mención de algunas otras herramientas, que hoy en día, son utilizadas, tal como la simulación dinámica, para el diseño de los sistemas de relevos de presión sin hacer a un lado los objetivos con los que son diseñados estos sistemas, entre los que podemos destacar, la seguridad de personal, ambiental y la aportación económica invertida en la planta.

CAPITULO 1

GENERALIDADES



1 Sistemas de relevo de presión

1.1 Generales

Casi todos los equipos de proceso, los cuales son empleados para contener fluidos, haciendo caso omiso del tamaño o servicio, pueden estar sujetos a condiciones desfavorables, los cuales resultan en una presión excesiva que sobrepasen los niveles de presión normal de tal manera que la seguridad del mismo equipo se vea amenazada. Por otro lado, en la operación diaria de las plantas industriales, el control en la eliminación de los gases inflamables, tóxico y/o corrosivos desfogados por los mismos equipos que trabajan bajo presión, es de gran importancia, especialmente, por la necesidad de protección del medio ambiente, del personal de operación y del equipo que conforma el proceso. Por lo cual la manera más práctica de proteger estos equipos es por medio de un sistema de relevo de presión adecuado para el desfogue de grandes cantidades de gases y vapores inflamables.

Son llamados sistemas de relevo de presión (sistemas de desfogue), figura 1.1, a las instalaciones usadas para disponer de una forma segura de los fluidos provenientes de los dispositivos de relevo de presión o de los venteos de los equipos, que de otro modo, tendrían que ser lanzados a la atmósfera. Comprenden como partes constitutivas los dispositivos de relevo de presión, tales como las válvulas de seguridad, relevo, seguridad-relevo y los dispositivos de disco de ruptura; las redes de tubería, que comprenden tuberías individuales de alivio, cabezales de conexión de tuberías de alivio, tuberías de purga, y tuberías colectoras de drenaje automático con descarga a recipientes separadores, a quemadores de chimenea o algún punto en los límites de la planta; y las instalaciones finales, tales como los quemadores de campo o sistemas de recuperación de vapores.

Las bases que deben satisfacer un sistema de relevo de presión para su instalación son las siguientes (Jenett 1963):

1. Resguardar al personal contra los peligros de sobrepresión de los equipos de proceso.
2. Prevenir la destrucción del capital invertido debido a la sobrepresión.
3. Evitar daños a construcciones colindantes.
4. Obtener tratamiento aceptable para la inversión del capital de la planta.
5. Estar de acuerdo con las regulaciones local, nacional, estatal o enfocadas al poblado.
6. Conservar las perdidas de material durante y después de un paro que produce temporalmente la sobrepresión.
7. Minimizar el tiempo muerto de la unidad que puede resultar en una sobrepresión.
8. Prevenir daños a los equipos corriente abajo por la transmisión de la sobrepresión a través de la conexión de los equipos y la tubería.
9. Prevenir la contaminación del aire que pudiera ser causado por la descarga de vapores de los recipientes fracturados por la sobrepresión.

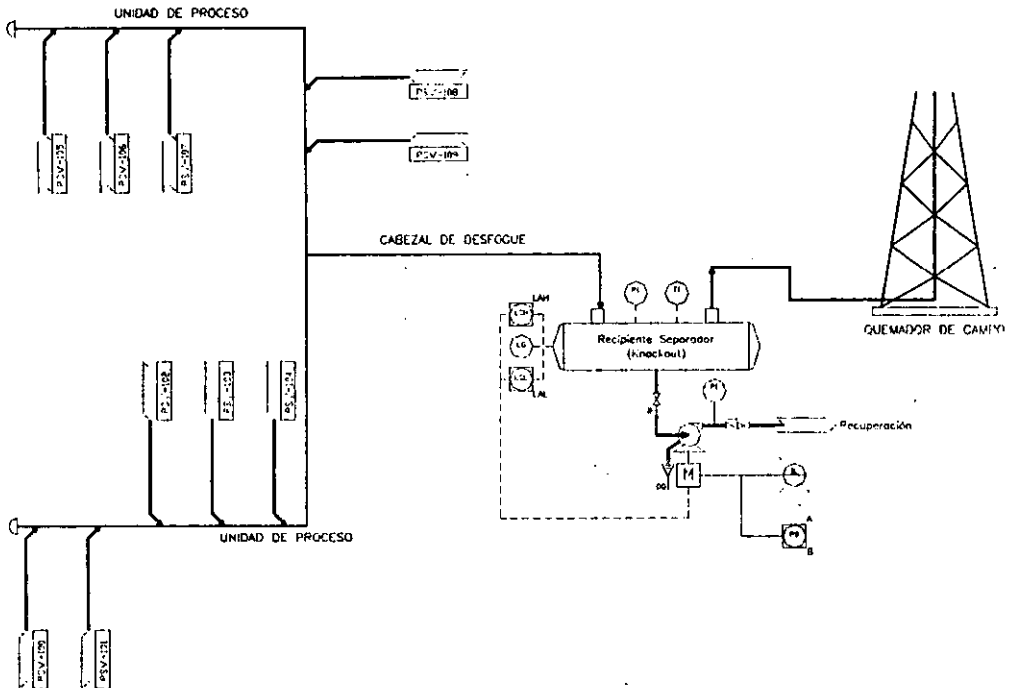


Figura 1.1. Representativo de un sistema de relevo

1.2 Clasificación de los sistemas de relevo

Tomando en cuenta las instalaciones finales empleadas para tratar, quemar o eliminar de alguna u otra forma los fluidos relevados de los diversos dispositivos de relevo, los sistemas de relevo de presión se clasifican como: (a) sistema abierto, (b) sistema cerrado, y (c) sistema de recuperación.

1.2.1 Sistema abierto. Descarga a la atmósfera (Loudon, 1963)

En algunas situaciones, las corrientes de vapor relevado podrán ser descargados directamente a la atmósfera si las regulaciones ambientales permiten dicha acción. Ha sido demostrado, por muchos años, la operación segura del escape del vapor hacia la atmósfera a partir de las válvulas de relevo de presión instaladas. Trabajos técnicos han mostrado que dentro del rango de operación normal de los dispositivos seguridad-relevo convencionales, las zonas de flammabilidad pueden ser bien definidas para muchos escapes de vapor. Con un reconocimiento propio de los parámetros de diseño, el desfogue del vapor a la atmósfera puede suministrar un alto grado de seguridad. Las descargas atmosféricas eliminan los problemas significantes asociados con un análisis del sistema de cargas, diseño apropiado de la tubería, criterio del diseño mecánico, y consideraciones de la contrapresión sobre las válvulas de seguridad-relevo cuando el cierre del sistema de escape sea usado. Cuando es factible, este arreglo ofrece ventajas significantes sobre los métodos alternos de descarga debido a su simplicidad inherente, dependencia y economía. La decisión de descargar los hidrocarburos o de algunos otros gases inflamables o peligrosos, a la atmósfera requiere una atención cuidadosa para

asegurar que la evacuación pueda ser completada sin la creación de un peligro potencial o sea causante de algún otro problema, tales como la formación de mezclas inflamables hasta un cierto nivel o sobre una estructura elevada, exposición del personal a vapores tóxicos o químicos corrosivos, ignición de corrientes de relevo hasta el punto de emisión, niveles de ruido en exceso y contaminación del aire.

1.2.2 Sistema cerrado

Consiste de un cabezal y ramales que recolectan el fluido relevado de los distintos dispositivos, y lo conducen hacia el lugar donde se dispondrá adecuadamente de él. Entre los sistemas cerrados se encuentran: (a) los quemadores de campo, fosa o multijet; (b) los quemadores elevados, autosoportado, tipo torre y el tipo cableado; (c) los quemadores sin humo, piso.

La función principal de un quemador es la de usar la combustión para la transformación de los vapores inflamables, tóxicos o corrosivos a compuestos menos peligrosos y ser enviados a la atmósfera. La selección del tipo de quemador y las características de diseño requeridos estarán influenciados por la disponibilidad de espacio; las características del gas de quemado, es decir, la composición, cantidad y nivel de presión; economía, incluyendo la inversión inicial y los costos de operación; y relaciones públicas.

1.2.3 Sistema de recuperación

Es un sistema cerrado que tiene como finalidad recolectar el fluido desfogado y proporcionarle el tratamiento adecuado, tanto para recuperar sustancias de alto valor económico como para neutralizarlo y convertirlo en productos de menor riesgo que puedan ser liberados a la atmósfera o enviados a un quemador.

1.3 Criterios de selección de la instalación final de los sistemas de relevo (PEMEX 1990)

El método de selección de la instalación final esta sujeta a muchos factores que pueden estar especificado sobre una localización en particular o sobre una unidad individual. El propósito de las instalaciones finales es el de conducir el fluido relevado a una localización donde pueda ser descargado con seguridad. Las instalaciones consisten de recipientes y tuberías. Todos los componentes deberán estar adecuados en tamaño, rango de presión y material para las condiciones de servicio adecuado.

La selección de las instalaciones finales depende de las siguientes características de los fluidos a ser desfogados:

1. Las propiedades físicas, tales como el punto flash, los límites de flamabilidad y la temperatura de ignición de ciertos gases, líquidos y sólidos.
2. Las propiedades químicas, composición de las mezclas que pueden reaccionar en el cabezal del quemador.
3. Las propiedades fisiológicas y que ocasionan molestia a las personas, tales como el ruido y el humo que emite el quemador.
4. El valor de recuperación de los compuestos más valiosos, tales como los solventes.

1.3.1 Sistemas abierto y cerrado.

Para la selección antes mencionada se tendrá en cuenta lo siguiente:

- a) Las descargas de las válvulas de relevo de vapores y gases inflamables no tóxicos, podrán enviarse a la atmósfera considerando lo siguiente:

Áreas de almacenamiento

- ❖ La descarga de la válvula de alivio deberá quedar cuando menos a una altura de 3 metros más alta que la parte superior del equipo o estructura más elevada, localizado en un radio horizontal de 17 metros de dicha descarga.
- ❖ La descarga de la válvula de alivio, estará a una distancia horizontal no menor de 75 metros, de zonas habitacionales o flamas abiertas.
- ❖ En una válvula de desfogue, la tubería de descarga tendrá una conexión de vapor de agua, apropiada, para usarse con fines de dilución y/o sofocamiento en caso necesario.

Áreas de proceso

- a) Para definir la descarga de gases y vapores inflamables no tóxicos a la atmósfera dentro de las áreas de proceso, se deberá hacer un estudio de los riesgos potenciales, analizando fuentes de ignición, niveles de ruido, contaminación ambiental, cantidad de fluido a ser relevado, condiciones meteorológicas, dispersión, etc.
- b) Los vapores y gases inflamables, no tóxicos, que no cumplan con las consideraciones del punto anterior, se enviarán a quemadores.
- c) Los vapores y gases inflamables no tóxicos que se encuentren a una temperatura de autoignición, los cuales se inflamarían al contacto con el aire, deberán ser descargados a quemadores.
- d) Para desfogar gases tóxicos inflamables sólo se podrán enviar directamente al quemador cuando sus productos de combustión no sean tóxicos o bien que estos últimos en todo momento estén en concentraciones inferiores a las concentraciones permisibles. En caso contrario los desfogues pasaran antes por un sistema de neutralización, absorción o cualquier otro necesario para mantener las concentraciones en la atmósfera en niveles permisibles para jornadas de 8 horas, así como a las leyes y reglamentos vigentes en materia de contaminación ambiental.
- e) Para el desfogue de gases o vapores tóxicos no inflamables, se enviarán a un sistema de tratamiento (neutralización, absorción, etc.), y los efluentes de dichos tratamientos a la atmósfera, de tal modo que las concentraciones resultantes de contaminantes en la atmósfera, sean las permisibles para jornadas de 8 horas, de acuerdo al Reglamento de Seguridad e Higiene de la Secretaría de Trabajo, o en su defecto de acuerdo a la toxicología más reciente, así como a las leyes y reglamentos vigentes en materia de contaminación ambiental.
- f) Los vapores y gases no inflamables ni tóxicos podrán enviarse a la atmósfera.
- g) Los desfogues de líquidos inflamables no deberán enviarse a los quemadores. En estos casos, se contará con tanques de vaciado que cubran esta contingencia.

- h) Los desfogues de los líquidos fríos no tóxicos cuya temperatura de inflamación (punto flash) sea de 38°C o mayor se enviarán de retomo directamente al sistema de proceso o a tanques de recuperación.
- i) Para poder enviar líquidos tóxicos inflamables a la línea de desfogue, deberá cumplirse con lo establecido para gases y vapores.
- j) Para disponer de líquidos tóxicos no inflamables, se deberá cumplir con lo establecido para gases y vapores y, además los efluentes líquidos de los tratamientos deberán cumplir con lo establecido en las disposiciones legales de protección ambiental.
- k) Los desfogues de agua podrán ir al drenaje o al piso.
- l) Los desfogues de vapor de agua, aire y gases inertes no tóxicos y no inflamables – (CO₂, N₂, etc.), irán a la atmósfera.
- m) Los gases tóxicos inflamables como en el caso del H₂S y del HCN, se deberán enviar a quemadores elevados.

1.3.2 Sistema de recuperación

- a) Determinar si el valor del material recuperado justifica la instalación de un sistema de recuperación.
- b) Al sistema de recuperación se envían los vapores que no se pueden enviar directamente a la atmósfera o al quemador.
- c) Cuando los fluidos desfogados se encuentren a una temperatura cercana o superior a su punto de autoignición deben enfriarse antes de enviarse al sistema de recuperación.
- d) Los efluentes líquidos de los tratamientos de vapores y líquidos tóxicos o corrosivos deben cumplir con lo establecido en las disposiciones legales de protección ambiental.

1.4 Causas de la sobrepresión

La sobrepresión es el resultado de un desbalance o rompimiento de flujos normales de materia y energía lo que causa que la materia y la energía, o ambas, se generen en alguna parte del sistema. El análisis de las causas y magnitudes de la sobrepresión, por lo tanto, es un estudio especial y complejo de los balances de materia y energía en un sistema de proceso.

La aplicación de los principios son únicos para cada uno de los sistemas que componen el proceso. No se deberán considerar como únicas las condiciones que serán tomadas, sino que se tendrá que llevar a cabo un análisis para verificar todas las circunstancias que afecten al proceso. Los dispositivos de relevo serán instalados para asegurar que un sistema de proceso o algunos de sus componentes no se encuentren sujetos a la presión que exceda la máxima presión acumulada permisible.

1.4.1 Criterios de la sobrepresión

Las causas de la sobrepresión, incluyendo el fuego externo, serán consideradas sin relación alguna si no existe relación con el proceso, mecánico o eléctrico, o si la longitud

de tiempo que transcurre entre los posibles sucesos es suficiente para formar una clasificación propia sin relación. La simultaneidad de causas entre dos o más condiciones que pudieran resultar en sobrepresión no será verificada si las causas no tienen relación.

Los errores de operación son considerados como una fuente potencial de la sobrepresión, las prácticas evaluadas deberán ser utilizadas en conjunto con el buen juicio ingenieril y con las consideraciones, en su totalidad, de regulación, federal, estatal y reglas locales.

En resumen, algunos escenarios de relevo requieren la instalación de sistemas de instrumentación de protección de alta confiabilidad para prevenir la sobrepresión y/o la sobretemperatura. En este estudio, el sistema de instrumentación de protección será de menor precisión, tal como un sistema de dispositivo de relevo de presión, y deberá ser usado únicamente cuando el uso de los dispositivos de relevo de presión sea impráctico.

Los dispositivos falla-seguridad, equipo de arranque-paro automático y algún otra instrumentación de control convencional no serán reemplazados por dispositivos de relevo de presión como protección a los equipos de proceso individuales. Sin embargo, en el diseño de algunos componentes del sistema de relevo, tales como el cabezal de relevo, quemador, y boquilla del quemador, la respuesta favorable de un porcentaje de instrumentos del sistema de instrumentación puede ser considerado. El porcentaje de respuesta favorable de los instrumentos es, generalmente, determinada basada en la cantidad de redundancia, cédula de mantenimiento y otros factores que afectan la calidad del instrumento.

1.4.2 Potenciales de la sobrepresión

Los equipos que se encuentran en operación tales como los recipientes a presión, cambiadores de calor, bombas, etc. y la tubería estarán diseñados para soportar la presión del sistema. El diseño está basado sobre: (a) la presión de operación normal a las temperaturas de operación, (b) el efecto combinado de cargas mecánicas, las cuales, comúnmente, ocurren, y la diferencia de operación, y (c) la presión de ajuste del dispositivo de relevo de presión. El diseñador del sistema de proceso deberá definir el mínimo relevo requerido para prevenir la presión en alguna pieza de equipo a partir de la máxima presión de acumulación permisible. Las principales causas de la sobrepresión listadas a continuación sirven como guía, generalmente, como práctica de seguridad aceptada.

1.4.2.1 Descarga bloqueada de los recipientes

El cierre inadvertido de una válvula de bloqueo a la salida de un recipiente de presión puede exponer al recipiente a una presión que exceda la máxima presión de trabajo permisible. Si el cierre de una válvula de bloqueo resulta en una sobrepresión, un dispositivo de relevo de presión es requerido a menos que los dispositivos de control para el cierre de la válvula de bloqueo, tales como sellos o cerraduras, se encuentren en su lugar. En general, la omisión de las válvulas de bloqueo, colocadas en serie en los recipientes, puede simplificar los requerimientos de relevo de presión.

Para el diseño del sistema, puede suponerse que las válvulas de control, las cuales estarán abiertas y funcionando al mismo tiempo en que ocurra la falla y no sea, normalmente, afectada por la causa principal de la falla, permanecerán en operación durante su posición de operación normal.

1.4.2.2 Abertura inadvertida de la válvula.

La apertura inadvertida de alguna válvula debido a una fuente de alta presión, tales como el vapor de alta presión o fluidos de proceso, deberá ser considerada. Esta acción puede requerir capacidad de relevo de presión a menos que la acción sea llevada a cabo cerrando o sellando la válvula.

1.4.2.3 Mal funcionamiento de la válvula de retención (válvula check)

El mal cierre de una válvula de retención (check) debe ser considerado. Por ejemplo, cuando un fluido es bombeado dentro de un sistema que contiene gas o vapor a una presión alta, comparada con el rango de presión de diseño del recipiente a contracorriente de la bomba, el paso del flujo, acompañada por la falla de una válvula de retención (check) en la línea de descarga, ocasionará un flujo inverso por parte del fluido. Cuando el líquido ha sido desplazado dentro del sistema de succión y un fluido de alta presión entra, una sobrepresión sería puede ocasionar. Una sola válvula check es considerada aceptable a menos que exista un potencial para el contraflujo del fluido a alta presión, hasta crear una presión que exceda la presión de prueba del equipo. En estos casos, se deberá considerar el suministro de un dispositivo secundario para minimizar el potencial de un flujo inverso. El dispositivo puede ser una válvula de no retorno, una válvula de resistencia asistido de energía, una segunda válvula de resistencia convencional, o equipo similar. La facilidad de diseño del relevo de presión en el lado de la succión, siguiendo la falla de una válvula de resistencia, no es recomendada, dado que el flujo inverso a través de la maquinaria rotativa puede resultar en fuerza centrífuga que será suficiente para destruir el equipo mecánico.

1.4.2.4 Falla parcial

Una evaluación del efecto de sobrepresión que es atribuido a las pérdidas de un servicio, en particular, deberá incluir la cadena de desarrollos que pudieran ocurrir y el tiempo de reacción que envuelve. En situaciones en las cuales la falla de equipo opera en paralelo con los equipos que tengan una fuente de energía distinta, operando activamente, pueden ser tomadas para el funcionamiento natural del equipo manteniendo la extensión del servicio. Un ejemplo sería, un sistema de circulación de agua de enfriamiento que consista de 2 bombas en paralelo y operación continua cuyos dispositivos tengan fuentes de energía distintas. Si una de las dos fuentes de energía falla, la activación parcial podrá ser tomada para la otra fuente de energía que continúa funcionando. La cantidad de vapor en exceso generado, debido a la falla de energía, dependerá solamente de la cantidad de agua de enfriamiento perdida. Otro ejemplo sería, 2 bombas de agua de enfriamiento en paralelo; con una bomba abastecería el flujo total de agua de enfriamiento y la segunda estará en apoyo del servicio. La segunda bomba tendrá una fuente de energía separada y estará equipada con controles para el arranque automático si la primera bomba falla. La capacidad de protección no es tomada para el apoyo de la bomba debido a que el dispositivo de apoyo no será considerado, totalmente, fiable.

Después de un estudio detallado, la capacidad parcial o total podrá ser tomada para la operación, normalmente, en paralelo con los instrumentos del compresor de aire y generadores eléctricos que tengan 2 fuentes de energía distintas para el motor. El corte manual de auxiliares es operado, y a la vez dependiente, y deberá ser cuidadosamente analizado antes de su uso como aseguradora de un incremento en la sobrepresión.

1.4.2.5 Falla del servicio

Las consecuencias que pueden desarrollarse a partir de las pérdidas de algún servicio, ya sean por lo amplio de la planta o local, deberá ser cuidadosamente evaluado. Los servicios normales que pudieran fallar y los equipos afectados que pueden causar sobrepresión serán dados en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Posibles fallas de servicios y equipos afectados.

Falla del servicio	Equipo afectado
Eléctrico.	Bombas para el circulamiento del agua de enfriamiento, alimentación del calentador, extinguidores o reflujo
	Ventiladores para cambiadores de aire frío, torre enfriadora o aire de combustión.
	Compresores para vapor de proceso, aire de instrumentos, vacío o refrigeración.
	Instrumentación. Válvulas operadas por motor.
Agua de enfriamiento.	Condensadores para procesos o servicio.
	Enfriadores para fluidos de proceso, aceite lubricante o sello de aceite. Equipo rotatorio encaquetado o reciprocante.
Aire de instrumentos.	Transmisores y controladores.
	Válvulas reguladoras de proceso.
	Alarmas y sistemas de paro.
Vapor.	Dispositivos de turbina para bomba, compresores, sopladores, ventiladores de aire para combustión o generadores eléctricos.
	Recalentadores.
	Equipo que usa inyección de vapor directo.
	Eductores.
Combustible (aceite, gas, etc.)	Accionadores de bombas o generadores eléctricos
	Calentadores.
	Compresores.
	Turbinas de gas.
Gas inerte.	Sellos.
	Reactores catalíticos.
	Purga para instrumentos y equipo.

1.4.2.6 Falla mecánica o eléctrica

La falla del equipo eléctrico o mecánico que suministran el enfriamiento o condensado en las corrientes del proceso pueden causar sobrepresión en recipientes del mismo proceso.

1.4.2.7 Perdida del aire por parte de los ventiladores

Los ventiladores, de los cambiadores de calor enfriado por aire o torres de enfriamiento, ocasionalmente llegan a ser inoperantes debido a las pérdidas de energía o a un colapso mecánico. Tomando en cuenta las torres de enfriamiento y los cambiadores de calor enfriado por aire, donde la operación es independiente de las rejillas de ventilación, estos podrán seguir manteniendo el efecto de enfriamiento obteniéndolo por medio de la convección y radiación en condiciones ambientales de aire quieto.

1.4.2.8 Perdida de calor en los sistemas de fraccionamiento en serie

En fraccionamiento en serie (es decir, donde los fondos de la primera columna alimentan a la segunda columna, y los fondos de la segunda columna alimenta a la tercera), las pérdidas de calor a la entrada de una columna pueden ocasionar una sobrepresión a la columna siguiente. Las pérdidas de calor serán resultado de la mezcla de algunas terminales ligeras con los fondos, los cuales serán transferidos a la siguiente columna. Bajo estas circunstancias, la carga en la cabeza de la segunda columna puede consistir de su carga de vapor normal más las terminales ligeras de la primera columna. Si la segunda columna no tiene capacidad de condensado para la carga de vapor adicional, la presión excesiva podrá ocurrir.

1.4.2.9 Perdida del aire de instrumentos o energía eléctrica

La complejidad de los instrumentos automáticos en las unidades de proceso requiere el suministro de fuentes de aire o energía eléctrica confiables y continuas, o ambas, para una operación segura. En donde un solo instrumento de aire principales sea instalado, un receptor de aire, de tamaño generoso, deberá ser suficiente si esta suplementado por una estación reductora de presión de emergencia a partir del sistema de aire de la planta.

Los instrumentos electrónicos o eléctricos claves deberán estar interconectados con una fuente eléctrica, de voltaje AC o DC, de emergencia. La condición falla-seguridad de cada válvula de control deberá ser evaluada. La falla-seguridad esta referenciada a la acción de la válvula de control (apertura del resorte, cierre del resorte o posición fija) sobre la pérdida de aire de operación o energía eléctrica. Para minimizar la probabilidad de sobrepresión, cada válvula de control tendrá su propia característica falla-seguridad establecida como una parte integral del diseño de la planta. La posición de falla de una válvula de control, en sí misma, no se considera adecuada para la protección del relevo como otras fallas, en un sistema de instrumentación, que puede causar que una válvula de control ser mueva en dirección opuesta a la posición de falla de diseño.

1.4.2.10 Falla del reflujo

Las pérdidas de reflujo como un resultado del bombeo o falla de instrumentos puede causar sobrepresión en una columna debido al inundamiento del condensador o pérdidas de refrigerante en un proceso fraccionador.

1.4.2.11 Entrada de calor anormal a partir del calentador

Los calentadores están diseñados con una entrada de calor bien especificada. Cuando los equipo son nuevos o fueron, recientemente, limpiados, el calor a la entrada adicional por encima del diseño normal podría ocurrir. En el caso de una falla del control de temperatura, la generación de vapor podrá exceder la capacidad de los sistemas del proceso hasta el condensador u de otro modo absorberá la presión generada, la cual puede incluir no condensables causado por el sobrecalentamiento.

1.4.2.12 Falla de los tubos del cambiador de calor

En cambiadores de calor de tubos y coraza, los tubos están sujetos a la falla debido a un gran número de causas, incluyendo el choque térmico, vibración o corrosión. No importando la causa, el resultado es la posibilidad que el vapor de alta presión ocasione una sobrepresión sobre el lado de baja presión del cambiador. La capacidad del sistema de baja presión para absorber este escape deberá ser determinado. El posible ascenso en la presión deberá ser indagado para determinar cuando el relevo de presión deba ser requerido, si el flujo del tubo fracturado esta descargado dentro de una corriente de baja presión.

1.4.2.13 Disturbios transitorios de la presión

1.4.2.13.1 Golpe de ariete (agua)

La probabilidad de que un choque hidráulico, conocido como golpe de ariete (agua), ocurra en sistemas totalmente llenos de líquido, deberá ser evaluado cuidadosamente. El golpe de ariete es un tipo de sobrepresión que no puede ser controlado, razonablemente, por válvulas de relevo de presión, debido a que el tiempo de respuesta de las válvulas es, normalmente, baja. El pico de las oscilaciones de las presiones, medidas en milisegundos, pueden elevarse más allá de la presión de operación normal. Esta presión de onda perjudicará al recipiente y a la tubería en donde la seguridad apropiada no haya sido incorporada. El golpe de ariete es, con frecuencia, causado por la acción del cierre rápido de las válvulas. Donde el golpe de ariete pueda ocurrir, el uso de amortiguadores de pulsación deberá ser considerado.

1.4.2.13.2 Golpe de ariete (vapor)

Un disturbio de la presión pico oscilante, llamada golpe de ariete (vapor), puede ocurrir en tubería que contiene fluidos compresibles. El caso más común es, generalmente, iniciado por el cierre rápido de la válvula. Este disturbio de presión oscilante ocurre en milisegundos, con un aumento posible de la presión hasta la presión de operación normal, resultando en una vibración y movimiento violento de la tubería y ruptura, posible, del equipo. Las válvulas de relevo de presión no podrán ser empleadas como un dispositivo de presión debido a su tiempo bajo de respuesta. Evitando el uso del cierre rápido de las válvulas se puede evitar el fenómeno de golpe de ariete.

1.4.2.14 Fuego en planta

La instalación inicial de un controlador de paro o instalación de un sistema de desfogue para las unidades, podría minimizar la sobrepresión que resulta, a partir, de la exposición al fuego externo.

Para limitar la generación de vapor y la posible propagación del fuego, ciertas facilidades deberán ser permitidas para la eliminación de líquidos del sistema. Normalmente la operación de retiro del producto del sistema está considerada y más efectiva para la eliminación de líquidos de las unidades, comparado con el sistema de separación de líquido bajo. El holdup de líquido requerido para las operaciones normales de la planta, incluyendo refrigerantes o solventes, puede ser efectivo manteniendo las paredes del recipiente frías y, no necesariamente, requerir un sistema para su eliminación. Diversas consideraciones suelen ser hechas para aislar el espacio de vapor en el recipiente y la aplicación de agua externa para enfriar o para desfogar el recipiente usando un sistema de desfogue de vapor.

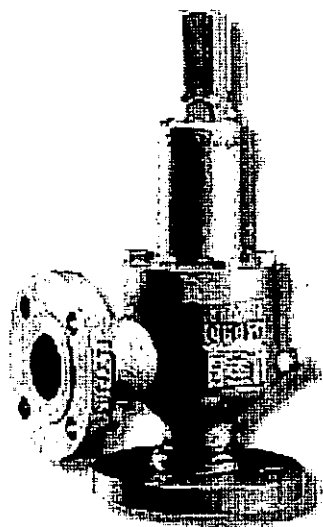
Las áreas de diseño deberían incluir una superficie adecuada para drenaje y un medio para prevenir la propagación de líquidos inflamables de una área de operación a otra. El fácil acceso a cada área y a los equipos de proceso deberá ser delimitado para el personal del cuerpo de bomberos y su equipo. Los hidrantes de fuego, equipos de bombero y monitores de fuego deberán estar colocados en lugares de fácil acceso.

1.4.2.15 Cambios en el proceso / reacciones químicas

En algunas reacciones y procesos, las pérdidas del control del proceso pueden resultar en un cambio significativo en temperatura y/o presión. El resultado puede exceder los límites propuestos de los materiales seleccionados. Así, donde los fluidos criogénicos están procesados, una reducción en la presión podría disminuir la temperatura del equipo, con el riesgo acompañante de una falla frágil a baja temperatura. Para reacciones exotérmicas (por ejemplo, descomposición, dilución de ácidos, polimerización) la temperatura y/o presión excesiva asociado con las reacciones rápidas puede reducir los niveles de esfuerzo permisibles por debajo del punto de diseño, o incrementar la presión por encima de la máxima presión de trabajo permisible. Cuando los dispositivos normales de relevo de presión no pueden proteger por encima de estas condiciones, los controladores serán necesarios para advertir de los cambios exteriores que atentan contra los límites de presión/temperatura para proveer una acción correctiva.

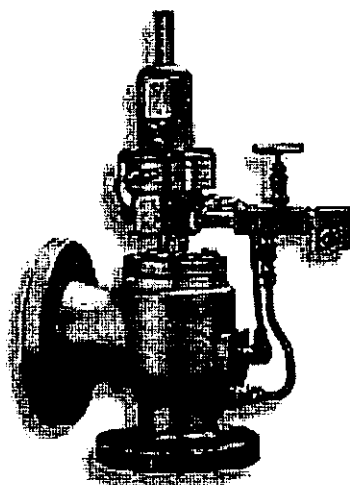
CAPITULO 2

SISTEMAS DE RELEVO DE PRESION



Válvula de seguridad

Válvula tipo piloto



2 Dispositivos de relevo de presión

Los dispositivos de relevo de presión son aquellos destinados a proteger al equipo y al personal de la industria química, abriendo automáticamente a una presión predeterminada y evitar las consecuencias destructivas, de la presión en exceso, en los sistemas de proceso y recipientes de almacenamiento. Los tipos básicos incluyen las válvulas de relevo de presión con regulador de resorte, válvulas operadas por piloto, disco de ruptura, dispositivo con carga de peso, dispositivos con carga de presión y válvulas con venteo de presión y/o vacío.

2.1 Características de las válvulas de relevo

Una válvula de relevo de presión es un dispositivo automático de relevo que, bajo la aplicación de una presión estática excesiva abre y permite que el fluido fluya hasta que la presión normal sea restaurada. Una vez que la presión del sistema haya disminuido, por debajo de la presión de ajuste, las condiciones normales habrán sido restauradas y la válvula, automáticamente, cerrará previniendo una fuerte pérdida del producto. La presión de ajuste (presión de apertura) y la presión de cierre dependerá del tipo y ajuste de la válvula.

El diseño de las válvulas de relevo es dependiente de la cantidad de fluido a ser relevado por unidad de tiempo y la presión diferencial a través de la válvula.

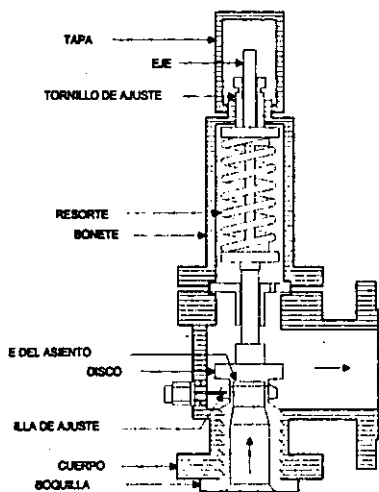
La selección del tipo de válvula, convencional o balanceada o tipo piloto, esta determinada por la máxima contrapresión generada, o sobrepuesta, en el cabezal de relevo comparado con la contrapresión permisible.

Cuando trabajamos con gas, vapor de agua o vapores, se seleccionarán las válvulas de relevo que comiencen a relevar a la presión de diseño del recipiente y alcanzar su capacidad total de un 3% a un 10% por encima de la presión de diseño.

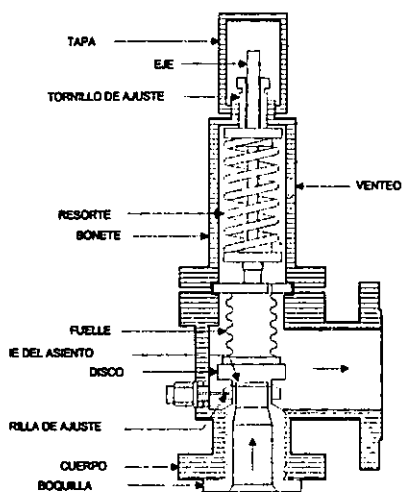
Si la guía es tapada y el bonete desfoga, la presión de relevo de la válvula disminuirá con el aumento de la contrapresión, este arreglo causa que la válvula releve en todos los casos por debajo de la presión de ajuste inicial. Muchos procesos industriales usan este tipo de válvula cuando, en un tubo de escape común, se encuentren conectadas más de una válvula debido a que si la contrapresión se eleva, por encima de la presión atmosférica, la pérdida de algunos productos fuera del desfogue sea preferible a arriesgar el equipo.

2.2 Tipos de dispositivos de relevo de presión

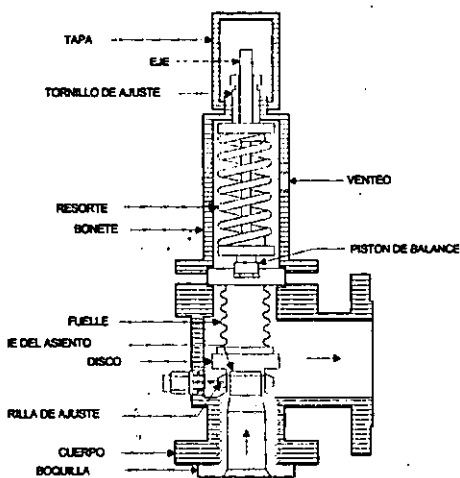
Las válvulas de relevo de presión están clasificadas, tomando en cuenta su funcionamiento, como de acción directa y las operadas por piloto. Los tipos de acción directa pueden emplear un peso o un resorte para mantener el cierre de la válvula hasta la presión de ajuste. Las válvulas operadas por piloto usan un pistón desbalanceador ensamblado (o diafragma/asiento ensamblado) en la válvula principal, con su posicionador y operador para el control del piloto. Entre las válvulas de acción directa tenemos: la válvula de seguridad, la de relevo y la de seguridad-relevo, entre las cuales se encuentra la convencional o la balanceada. Entre las válvulas operadas por piloto tenemos los de tipo pistón y los de diafragma.



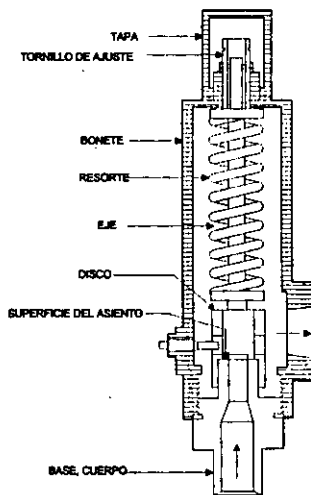
Válvula seguridad-relevo convencional con tornillo ajustador para el control del desfogue



Válvula seguridad-relevo con fuelle balanceada



Válvula seguridad-relevo balanceada de fuelle con pistón auxiliar



Válvula térmica (válvula de relevo para líquidos)

Figura 2.1. Dispositivos de relevo de presión.
Válvulas de seguridad

2.2.1 Válvulas de acción directa

2.2.1.1 Válvulas de seguridad

Una válvula de seguridad es un dispositivo de relevo de presión que se abre, repentinamente, debido a la presión estática y la energía cinética del gas o vapor, venciendo la fuerza del resorte del disco, el cual ascenderá, para proveer una abertura completa y conceder una sobrepresión mínima. La presión de cierre será menor a la presión de ajuste y será alcanzada después que la fase de desfogue sea completada.

Un requisito de las válvulas de relevo de presión en servicio con vapor es el de proteger el resorte del calor excesivo. Una elevación en la temperatura del resorte, como resultado de la descarga, reducirá el esfuerzo del resorte y, por lo tanto, disminuirá la presión de ajuste de la válvula hasta que el resorte haya regresado a su temperatura normal de operación. Por esta razón, el bonete de las válvulas estará, normalmente, abastecida con ventanas grandes lo cual permitirá que el resorte se enfríe debido al aire circundante. Sin embargo, el bonete no retiene el fluido en el espacio que se encuentra por debajo del mismo, por lo cual algo del vapor descargado escapará a través de la abertura del bonete. Para el servicio con vapor a alta temperatura (sobrecalentado), el bonete es, con frecuencia, separado del cuerpo de la válvula por una pieza de carrete tipo linterna, la cual estará diseñada para proteger el resorte de un contacto directo con el vapor de descarga.

2.2.1.1.1 Aplicaciones.

Las válvulas de seguridad serán usadas en recipientes de vapor para calderas y reboilers. Pueden, también, ser usadas para servicio con aire y vapor en refinerías. La tubería de descarga de la válvula de seguridad podrá tener un codo contenedor de gotas de venteo o una tubería corta, en pila, para el venteo a la atmósfera.

2.2.1.1.2 Limitaciones.

Las válvulas de seguridad no serán usadas como siguen:

- a) En servicios de corrosión en la refinería.
- b) En un servicio a contrapresión.
- c) Donde la descarga deba ser conducida a localizaciones remotas.
- d) Donde el escape de la carga de fluido alrededor de la válvula sea no deseable.
- e) En servicio con líquidos.
- f) Como un controlador de presión o válvula bypass.

2.2.1.2 Válvulas seguridad-relevo

Una válvula seguridad-relevo es un dispositivo de relevo de presión con regulador de resorte que actúa como una válvula de seguridad cuando es usada en servicio con gas o vapor y como una válvula de relevo cuando es usada en servicio con líquidos. La válvula seguridad-relevo, provista de un bonete que encierra al resorte y forma un alojamiento de ajuste de presión, es llamada convencional, y una válvula seguridad-relevo que minimiza los efectos de la contrapresión sobre las características operacionales, es llamada balanceada. Una válvula seguridad-relevo abrirá totalmente antes que la sobrepresión

alcance un valor del 10% mayor a su presión de ajuste en un medio compresible, o un 25% mayor a su presión de ajuste en un medio incompresible.

El propósito de una válvula seguridad-relevo es el de descargar una cantidad dada de vapor, gas-líquido, evitando que el aumento de la presión exceda un nivel predeterminado. La válvula cerrará con una disminución mínima de presión, y se mantendrá cerrada hasta el momento de responder a la siguiente situación de peligro. Una válvula seguridad-relevo deberá ser utilizada en todo aquel recipiente o sistema cerrado en la cual la presión sea distinta a la atmosférica; y en donde, bajo cualquier circunstancia, la presión de diseño del recipiente pudiera ser sobrepasada.

En la mayoría de los casos, la descarga del fluido se hace directamente a la atmósfera; sin embargo, cuando el fluido es tóxico, inflamable o muy valioso, se utiliza un sistema complejo de tuberías para la descarga y, generalmente, más de una válvula tomara parte, dando como resultado una contrapresión variable sobre la válvula. Cuando tales sistemas de descargan son utilizados, las válvulas seguridad-relevo serán diseñadas de tal manera que minimice los efectos de la contrapresión sobre la presión de ajuste de la válvula.

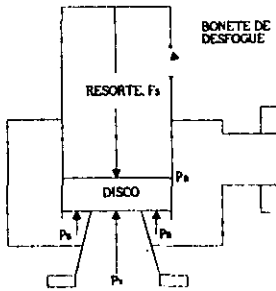
2.2.1.2.1 Válvulas seguridad-relevo convencionales

Las válvulas, seguridad-relevo, convencionales son usadas cuando la descarga sea llevada a través de una tubería, con extremo corto, que releva a la atmósfera, o, a través de un sistema múltiple de baja presión, que transporta el fluido descargado, de una o más válvulas, a una localización remota para su disposición. Normalmente, la fuerza del resorte será la diferencia entre la presión de ajuste y la atmosférica. La presión de ajuste, por lo tanto, se verá incrementada por la contrapresión sobrepuesta, a menos que la fuerza del resorte sea ajustada. La contrapresión generada puede afectar, de la misma manera, el funcionamiento de la válvula, por lo cual, el impacto de la presión a la entrada, cuando una o más válvulas descargan dentro de un sistema múltiple común, deberá ser determinado tomando como referencia el catálogo de construcción adecuado.

Las válvulas convencionales, como normalmente son instaladas, muestran un desempeño insatisfactorio cuando la contrapresión generada se desarrolla a partir del flujo que pasa a través de la válvula y la tubería como resultado del desbalance de la misma fuerza, que afecta la presión de ajuste. A medida que la contrapresión generada sea menor a la sobrepresión, después que la válvula haya abierto, la válvula permanecerá abierta y funcionará satisfactoriamente bajo condiciones de flujo, y tendrá características de flujo similares a las del funcionamiento de una boquilla, teóricamente. Sin embargo, si la contrapresión generada es mayor a la sobrepresión, el balance de fuerzas tenderá a cerrar la válvula, la cual podrá llegar a ser inestable y causará que el cierre sea completo. Esta inestabilidad es causada por el desbalance de la presión dinámica ocasionando que la válvula vibre o traqueteo.

El efecto combinado de la contrapresión, generada y la sobrepuesta, sobre las características de operación de las válvulas, deberá ser considerado cuando más de una válvula de relevo descargue dentro de un sistema múltiple común.

El flujo teórico a través de la boquilla depende de la presión a la salida y es independiente de la presión a la entrada, cuando la contrapresión sea menor a la presión de flujo crítico; sin embargo, cuando la contrapresión aumenta más allá de la presión de flujo crítico, el flujo se reducirá.



La contrapresión disminuye la presión de ajuste

$$P_V A_N = F_S - P_B (A_D - A_N)$$

$$A_D > A_N$$

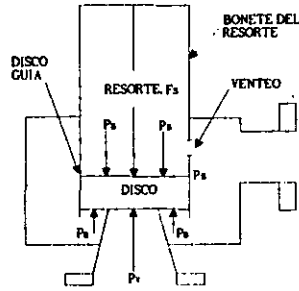
A_D = área del disco.

A_N = área del asiento de la boquilla.

F_S = fuerza del resorte.

P_V = presión del recipiente, lb/in² man.

P_B = contrapresión sobrepuesta, lb/in² man.



La contrapresión incrementa la presión de ajuste.

$$P_V A_N = F_S + P_B A_N$$

Figura 2.2. Efectos de la contrapresión sobrepuesta sobre la presión de ajuste de las válvulas seguridad-relevo convencionales

2.2.1.2.1.1 Aplicaciones.

Las válvulas convencionales serán usadas en procesos industriales de refinerías que manejen materiales inflamables, calientes o tóxicos, los cuales pasan a través del sistema de descarga y son liberados a puntos alejados y seguros. Estas válvulas serán usadas como sigue:

- En servicios para gas, vapor de agua, aire o líquidos en general.
- En servicios corrosivos.
- Cuando la descarga de las válvulas sea entubada a puntos remotos.

2.2.1.2.1.2 Limitaciones.

Las válvulas convencionales no deberán ser utilizadas en servicios listados anteriormente cuando la contrapresión sobrepuesta sea constante y cuando la contrapresión generada exceda el 10% de la presión de ajuste. Además, no serán usadas en:

- En recipientes de vapor, de los calentadores o reboilers.
- En caso de una contrapresión variable.
- Como control de presión o válvulas bypass.

2.2.1.2.2 Válvula seguridad-relevo balanceada

En el diseño de las válvulas de relevo de presión balanceadas se incorpora un medio para reducir el efecto de la contrapresión sobre la presión de ajuste y minimizar el efecto sobre las características de operación, tales como la presión de apertura y de cierre, ascenso y capacidad de relevo. Las válvulas balanceadas serán de 2 tipos: de pistón y de fuelle.

Distintas variaciones del tipo pistón son construidas; la guía del pistón es venteadado de tal manera que la contrapresión, sobre la cara opuesta del disco de la válvula, se anula. El gas relevado del bonete, generalmente aire de las válvulas tipo pistón, deberá ser manejado con seguridad y con un mínimo de restricciones.

El área de fuelle efectiva, A_B , de las válvulas tipo fuelle, es la misma que el área del asiento de la boquilla, A_N . El arreglo del fuelle en la válvula previene la acción de la contrapresión sobre la tapa del disco dentro del área efectiva del fuelle, A_B . El área del disco, A_D , se extenderá más allá del fuelle y el área del asiento de la boquilla opuesta anula el efecto de la contrapresión sobre el disco de la válvula de tal manera que no existan fuerzas desbalanceadas sobre las variaciones de presión del desfogue. El fuelle, adicionalmente, servirá para aislar el guía del disco, el resorte, y otras partes superiores de trabajo, de la carga del fluido. Esta característica podrá ser importante si la carga del fluido es corrosiva y puede ensuciar la válvula. Debido a las limitaciones del tamaño físico, el fuelle balanceado no estará disponible en ciertos diseños y tamaños de las válvulas.

2.2.1.2.2.1 Aplicaciones.

Las válvulas balanceadas son, comúnmente, usadas en procesos industriales de refinerías que manejen materiales inflamables, calientes o tóxicos, los cuales pasan a un sistema de descarga cerrado y son enviados a puntos alejados y seguros. Estas válvulas serán usadas en:

- a) En servicios para gas, vapores, vapor de agua, aire o líquidos en refinerías en general.
- b) En servicios corrosivos de la refinería.
- c) Cuando la descarga de las válvulas deba ser entubada a puntos remotos.

2.2.1.2.2.2 Limitaciones.

Las válvulas balanceadas no deberán ser usadas en:

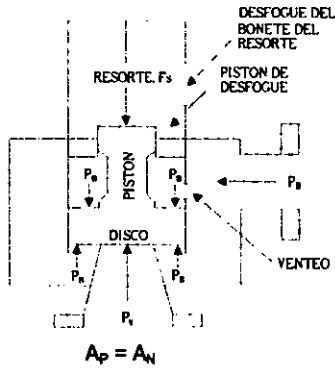
- a) En recipientes de vapor de los calentadores o reboilers.
- b) Como control de presión o válvulas "bypass".

Debido a que las válvulas balanceadas deben tener bonetes con desfogue, la necesidad de entubar el desfogue a una localización segura deberá ser considerada. Si el fuelle fracasa, la válvula de fuelle balanceada, con o sin un pistón de balance auxiliar, descargará el fluido del bonete. El límite de la contrapresión, listada en los catálogos de construcción de las válvulas, dependerá del esfuerzo mecánico del fuelle y no deberá ser excedida.

2.2.1.3 Válvulas de Relevo

Las válvulas de relevo son dispositivos de relevo de presión con regulador de resorte diseñadas para el uso en servicio con líquidos. A la presión de ajuste, la fuerza de la presión a la entrada vence la fuerza del resorte y el disco iniciará su ascenso a cierta distancia del asiento. Cuando se incrementa la presión a la entrada, el ascenso del disco se incrementará permitiendo un incremento del flujo. La presión de cierre estará por debajo de la presión de ajuste y será alcanzado después que la fase de desfogue haya sido completada. Las capacidades de las válvulas de relevo están en una relación del 10 al 25% de la sobrepresión, dependiendo de su aplicación.

TIPO DISCO BALANCEADO Y PISTON DE VENTEO



$A_p = A_n$
 A_B = área de fuelle efectivo.
 A_D = área del disco.
 A_N = área del asiento de la boquilla.
 A_P = área del pistón (tapa).
 F_S = fuerza del resorte.
 P_V = presión manométrica del recipiente.
 P_B = contrapresión sobrepuesta, lb/in².
 P_S = presión manométrica de ajuste, lb/in².
 Nota. En esta figura, $P_V = P_S$; $(P_V)(A_N) = F_S$ (típica); y $P_S = F_S / A_N$.

TIPO DISCO BALANCEADO Y FUELLE DE VENTEO

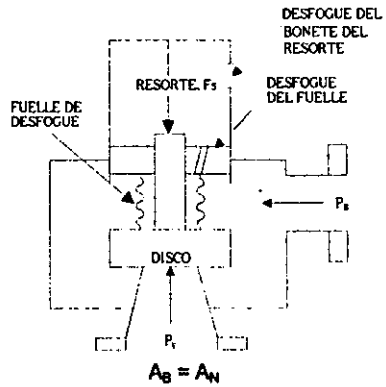


Figura 2.3. Efectos de la contrapresión sobre la presión de ajuste de las válvulas seguridad-relevo balanceada.

Dependiendo del diseño, las válvulas de relevo pueden abrir modularmente o como una válvula de relevo de presión de ascenso completo o, dependiendo del código de interpretación, como una válvula de relevo de presión ordinaria.

Para capacidades de flujos elevados, las válvulas de relevo serán análogas, en diseño, a las válvulas seguridad-relevo, pero estarán equipadas con un deflector de flujo modificado alrededor del disco para alcanzar la fuerza de abertura deseado, característica del flujo de fluido.

Estas válvulas tienen bonete cerrado para prevenir el escape de fluidos tóxicos, corrosivos o costosos. Estos pueden ser abastecidos con una palanca de levantamiento, fuelle balanceado o asientos suaves, de ser necesario.

2.2.1.3.1 Aplicaciones.

Las válvulas de relevo serán, normalmente, usadas para fluidos incompresibles (líquidos)

2.2.1.3.2 Limitaciones.

- a) En servicio con vapor, aire, gas o vapor de agua.
- b) En servicio a contrapresión variable a menos que la válvula tenga un fuelle balanceado diseñado o un pistón diseñado.
- c) Como control de presión o válvula bypass.

2.2.2 Válvulas operadas por piloto

Los dos tipos básicos de válvulas de presión operadas por piloto será el tipo pistón y el tipo diafragma.

El tipo pistón consiste de una válvula principal, la cual encierra un pistón flotante, y una válvula piloto externa. El pistón esta diseñado para tener un área efectiva mayor en la tapa que en el fondo. Cuando aumenta la presión de ajuste, el área de la tapa y el fondo estarán expuestas a la misma presión de operación a la entrada.

Debido a la enorme área efectiva en la tapa del pistón, la fuerza neta mantendrá el ajuste del pistón hasta el asiento de la válvula principal; con el incremento en la presión de operación, la fuerza de asentamiento neta se incrementa y tenderá a marcar el ajuste de la válvula. En el punto de ajuste, el piloto desfogará la presión de la tapa del pistón; la fuerza neta resultante desasentará el pistón, y el flujo del proceso será establecido por medio de la válvula principal. Después de la incidencia por parte de la sobrepresión, el piloto cerrara el desfogue de la tapa, por esto, restableciendo la presión y la fuerza neta ocasionará que el pistón rectifique.

La válvula de relevo operada por piloto tipo diafragma, es análoga al tipo pistón, excepto que el pistón es reemplazado por un diafragma flexible y un disco. El diafragma provee una función desbalanceadora al disco y el disco, el cual cierra la entrada de la válvula principal, es integrado con un diafragma flexible. El piloto externo de la válvula sirve la misma función en el sentido de la presión del proceso, desfoga la tapa del diafragma a la presión de ajuste y recarga del diafragma dado que la presión del proceso retorna a la normalidad. Análogo al tipo pistón, la fuerza de asentamiento se incrementará proporcionalmente con la presión de operación debido al área expuesta, diferencial, del diafragma.

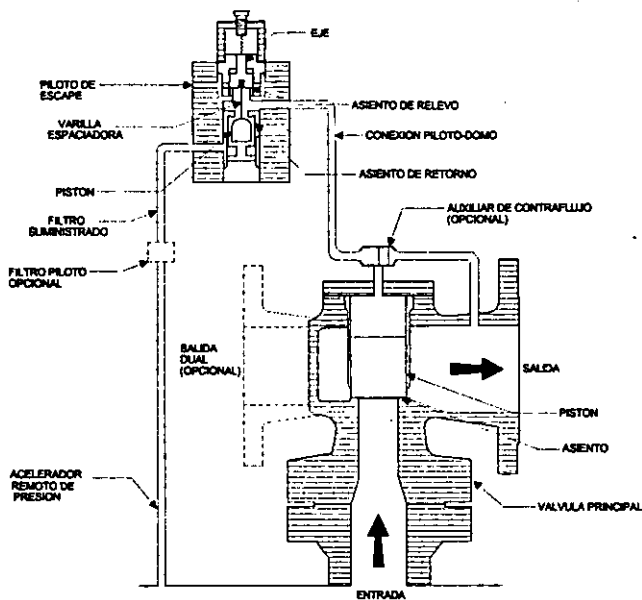
El piloto de la válvula que opera la válvula principal podrá ser del tipo piloto acción-disparo o acción-modulador. En el caso del tipo acción-disparo la operación del piloto causa el ascenso completo de la válvula principal. Por otro lado, la acción-modulador, la operación del piloto abrirá la válvula principal, lo suficiente, únicamente, para satisfacer la capacidad de relevo requerida.

Los pilotos deberán ser del tipo flujo o no-flujo. El tipo flujo permite que le fluido del proceso fluya a través del piloto cuando la válvula principal este abierta; el tipo no-flujo no será así. El usuario consultará al fabricante para determinar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

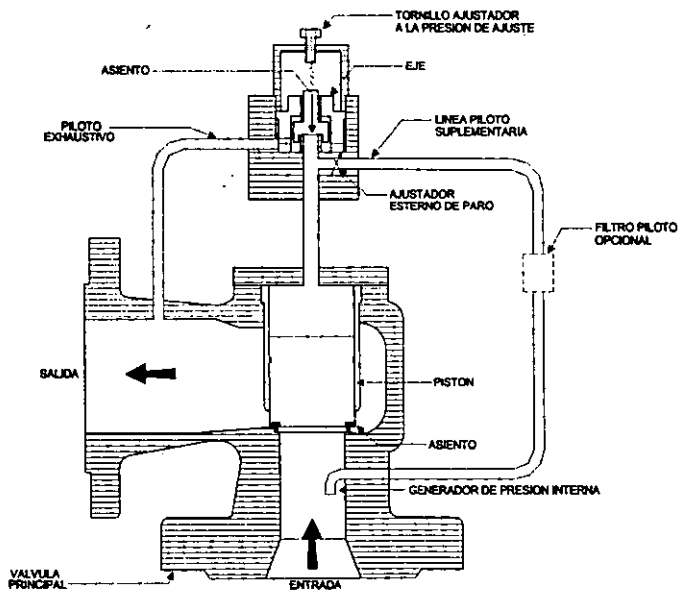
Una protección contraflujo es requerida cuando la presión que se desarrolla a la descarga exceda la presión de entrada de la válvula. El área diferencial causará que el pistón se levante y el flujo en la válvula sea invertido.

2.2.2.1.1 Aplicaciones.

Las válvulas seguridad-relevo operadas por piloto serán generalmente usadas como sigue:



Válvula operada por piloto de acción pop (Tipo no flujo)



Válvula operada por piloto de acción pop (Tipo flujo)

Figura 2.4. Dispositivos de relevo de presión.
Válvulas operadas por piloto

- a) Cuando sea requerida una área grande de relevo a una presión de ajuste, también, grande, dado que muchas de las válvulas operadas por piloto pueden ser ajustadas a la capacidad total de la brida de entrada.
- b) Cuando exista una diferencia baja entre la presión de operación normal del recipiente y la presión de ajuste de la válvula.
- c) En tanques de almacenamiento grandes a baja presión.
- d) Cuando un desfogue corto sea requerido.
- e) Cuando la contrapresión sea muy alta y el diseño balanceada sea requerido, como válvulas operadas por piloto totalmente balanceadas con los pitotos desfogando a la atmósfera.
- f) En servicios de proceso en general donde su uso sea económico.
- g) Donde las condiciones del proceso requieran sensores de presión a una localización y relevo de fluidos a otra localización.

2.2.2.1.2 Limitaciones.

Las válvulas seguridad-relevo operadas por piloto no serán usadas, generalmente, como siguen:

- a) En servicio donde el fluido ensucie.
- b) En servicio con líquidos viscosos, como las válvulas operadas por piloto que tienen orificios pequeños, las cuales llegan a taponarse debido a los líquidos viscosos.
- c) Con vapores que se polimerizan en las válvulas.
- d) En servicios donde la temperatura exceda los límites de seguridad para los diafragmas o sellos seleccionados.
- e) Donde la compatibilidad química de la carga de fluidos con los diafragmas o sellos de las válvulas sea cuestionable o donde la corrosión pueda impedir la acción de los pilotos.

2.3 Dispositivos de disco de ruptura

Un disco de ruptura es un diafragma delgado, normalmente, colocado entre los cabezales especiales que releven la presión de los recipientes a una presión predeterminada. La combinación de un disco de ruptura y su soporte es conocido con un dispositivo de disco de ruptura (o dispositivo de relevo de presión no cerrado).

El uso de los dispositivos de disco en combinación con las válvulas de relevo de presión es aconsejable y deberá ser empleada para sistemas que contengan sustancias que puedan corroer la válvula de relevo de presión o limitar su operación; además minimiza las pérdidas de material valioso, nocivo o de riesgo que puedan permitir el escape del gas a través de la válvula de relevo de presión.

La vida útil de un disco de ruptura es difícil de predecir, ya que la corrosión, los cambios de presión y la temperatura, así como de otras condiciones del proceso, pueden afectar su duración y causar falla prematura. Es recomendable elaborar un programa de cambios cuando se ha logrado conocer el factor de vida útil, ya que un paro programado es, definitivamente, menos caro que un paro de emergencia.

2.3.1 Aplicaciones.

Los dispositivos de disco de ruptura serán, algunas veces, usados como sigue:

- a) Para proteger la descarga, de las válvulas de relevo de presión, contra la corrosión por el fluido del sistema.
- b) Para proteger las válvulas de relevo de presión contra el taponeo u obstrucción por líquidos viscosos o producto de la polimerización.
- c) En lugar de las válvulas de relevo de presión, si el sistema a ser protegido puede tolerar las interrupciones del proceso o las pérdidas de fluido en caso de los discos de ruptura.
- d) Como un dispositivo de relevo de presión secundario, cuando la diferencia entre la presión de operación y la presión de ruptura es mayor, dependiendo del tipo de disco de ruptura seleccionado.
- e) Como protección a la entrada, de las válvulas de relevo de presión, contra la corrosión a la entrada de los cabezales o contra la corrosión atmosférica.
- f) Para la minimizar pérdidas.

El recibo apropiado, el almacenaje, el manejo e instalación de un disco de ruptura serán críticos para su desempeño exitoso. Las instrucciones de construcción, especialmente, aquellas concernientes con los límites de estallido, deberán ser documentados y continuos.

Cuando es instalado un disco de ruptura a la descarga de las válvulas de seguridad, recomendaciones importantes, hechas en la Sec. VIII del código ASME, deberán ser consideradas, por ejemplo, cuando la capacidad de la válvula seguridad-relevo deba ser limitada a un 90% de su capacidad de relevo o la capacidad de la combinación deba ser establecida en acorde con el código ASME. Cuando la instalación de los discos de ruptura sea contemplada, el código ASME y algún otros códigos locales o estatales y los estándares de las compañías, deberán ser consultados.

2.3.2 Limitaciones.

Los discos de ruptura de metal abultado serán instalados de tal manera que la presión ejerza sobre el lado cóncavo y para los discos de ruptura de metal plano, la presión de abertura del sistema protegido esta limitado, generalmente, a un 65-85% de la presión de estallido del disco. El porcentaje exacto depende del tipo de disco empleado. El valor bajo de este rango deberá ser usado si cualquier de lo siguientes sucesos son anticipados en el sistema:

- a) Presión de pulsación.
- b) Ondas continuas o periódicas en la presión.

El servicio de vida de estos discos, bajo condiciones de operación normal, es generalmente de un año. Están sujetos a una falla de esfuerzo rápido, especialmente, a temperaturas de operación elevadas. Si no son reemplazados periódicamente, estos fallarán sin peligro a la presión de operación normal.

Presiones de operación elevadas – superior al 90% de la presión de estallido del disco – serán posibles con los discos de doblez inverso. La pérdida del esfuerzo, debido a la pulsación y al ciclo de la presión de operación, resulta en una vida de servicio más baja a la esperada si el disco fuera instalado con la acción de la presión en el lado cóncavo. Muchos discos de doblez inverso no serán usados en servicio con líquidos.

Sin embargo, si un gas asegura restar la formación de una bolsa alrededor del disco y el fabricante del disco es consultado, el servicio con líquido podrá ser considerado. Con vidas limitadas, estos discos deberán ser reemplazados periódicamente, consultando al fabricante para verificar el tiempo de remplazo recomendado.

Los discos de ruptura de grafito ofrecerán las mismas ventajas y desventajas de los de doblez inverso y lo de tipo de metal. Sin embargo, el arreglo de la tubería deberá ser más complicado y las boquillas serán desiguales o el esfuerzo térmico de la tubería deberá reventar el disco.

PRECAUCIÓN: cuando los discos de ruptura sean reemplazados para inspección o cuando sean acompañados, en servicio, con las válvulas de seguridad, el disco deberá ser, fácilmente, liberado y deberá evitar una falla prematura, si es nuevamente usado. El reemplazo de los discos mantiene un riesgo y falla mínimo.

Cuando se diseñan o se instalan los discos de ruptura, el fabricante del disco deberá ser consultado acerca de la probable explosión, con precisión, de sus discos, cuando sean usados en distintos tamaños, diseños, temperaturas o presión de servicio.

Un disco de ruptura deberá tener una área de tubería total y no deberá fragmentar dentro de la válvula seguridad-relevo después del estallido. Cuando un disco de ruptura es usado junto con una válvula de relevo de presión, las reglas del código ASME sobre la capacidad del disco de ruptura deberán ser seguidas.

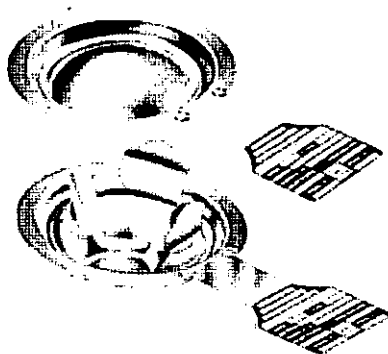


Figura 2.5. Dispositivo de disco de ruptura

2.4 Determinación de los requerimientos de relevo

Cuando la presión aumenta, el dispositivo de relevo de presión desfogará el exceso de presión liberando una cierta cantidad de fluido hacia un lugar seguro.

El dispositivo de relevo debe estar diseñado de tal forma que maneje la masa necesaria para el desfogue, y que, además, no sea mayor de lo realmente requerido pues se elevaría su costo en forma innecesaria.

La contribución de líquido o vapor usado para establecer la determinación de la masa a relevar será desarrollada a partir de la energía neta a la entrada. Las dos formas más comunes de energía serán: (a) el calor a la entrada, la cual es indirecta a la presión de entrada por medio de la vaporización o expansión térmica, y (b) la presión directa a la entrada, debido a las fuentes de elevada presión. La sobrepresión puede resultar a partir de una o ambas de estas fuentes.

La relación de relevo individual es la máxima cantidad de fluido que pueda ser relevada para proteger el equipo de la sobrepresión, debido a una sola causa. La probabilidad de que dos fallas sin relación ocurran simultáneamente es remota y, normalmente, no necesita ser considerada. Cuando existen varias causas posibles, el dispositivo de relevo se diseñará para la mayor masa posible a generarse, funcionando adecuadamente para las otras causas.

De los diagramas de tubería e instrumentación y la distribución de los equipos, se debe analizar donde se considera necesario instalar un dispositivo de relevo de presión, poniendo especial cuidado donde puede existir descarga bloqueada.

Posteriormente se deben localizar los dispositivos de relevo, tratando de proteger el mayor número de equipos con la menor cantidad de dispositivos.

Sobre la base de esto, se efectúa el estudio de los distintos sucesos en la planta para determinar las cargas máximas a los cabezales. Los flujos individuales en cada válvula servirán para su dimensionamiento.

2.4.1 Determinación de las masas a relevar

El gasto que deberá manejar el dispositivo de relevo se calculará de acuerdo a la condición que gobierna el desfogue (flujo máximo), previo cálculo de las diversas contingencias aplicables al equipo en cuestión, de tal manera que cuando se tenga dicha condición no se exceda la presión de acumulación. A continuación, se da una relación de contingencias más comunes, explicando las causas de exceso de presión y se indicará la masa a desfogar en ellas.

2.4.1.1 Descargas bloqueadas

Para proteger un recipiente o sistema de la sobrepresión cuando las salidas de los recipientes o sistemas estén bloqueadas, la capacidad del dispositivo de relevo deberá ser tan grande como la capacidad de la fuente de presión. Si todas las salidas no se encuentran bloqueadas, la capacidad de la salida sin bloquear puede, propiamente, ser considerada. Las fuentes de sobrepresión incluirán bombas, compresores, cabezales de presión y gases separados, y calor de proceso. En el caso de cambiadores de calor, una salida bloqueada puede causar expansión térmica o, posiblemente, generación de vapor.

La cantidad de material a ser relevado deberá ser determinado a las condiciones que corresponden la presión de ajuste más la sobrepresión, en lugar de las condiciones de operación normales. La capacidad de la válvula requerida es, con frecuencia, reducida, considerablemente cuando esta diferencia es tomada en cuenta. El efecto de la caída friccional en la línea de conexión, entre la fuente de la sobrepresión y el sistema a ser protegido, deberá ser considerado en la determinación de la capacidad requerida.

2.4.1.2 Falla de agua de enfriamiento y reflujo

El relevo requerido es determinado a partir de un balance de masa-calor del sistema, a la presión de relevo. En un sistema de destilación, la relación puede requerir cálculos con o sin reflujo. La capacidad normalmente no es tomada para el efecto del frío residual después de la falla de agua de enfriamiento, debido a que su efecto está limitado al tiempo y dependerá de la configuración física de la tubería. Sin embargo, si el sistema de tubería del proceso es, inusualmente, largo y sencillo entonces el efecto del calor perdido a los alrededores deberá ser considerado.

Debido a la dificultad en el cálculo detallado de los balances de calor y masa, las bases simplificadas, descritas a continuación, serán aceptables para determinar la relación de relevo.

2.4.1.2.1 Condensación total

El relevo requerido es la relación total de vapor que ingresa al condensador, recalculada a la temperatura que corresponde la nueva composición del vapor, a la presión de ajuste más la sobrepresión, y el calor que entra prevalecerá el tiempo que dure el relevo. La capacidad en el domo del acumulador, al nivel normal del líquido, está limitado a menos de 10 minutos. Si la falla de agua de enfriamiento excede este tiempo, el reflujo es perdido, y la composición en el domo, la temperatura y la relación de vapor podría cambiar significativamente.

2.4.1.2.2 Condensación parcial

El relevo requerido es la diferencia entre la relación de vapor que ingresa y el de salida a las condiciones de relevo. El vapor que ingresa deberá ser determinado sobre las mismas base empleada en la condensación total. Si la composición o la relación de reflujo es cambiada, la relación de vapor que ingresa al condensador deberá ser determinado para las nuevas condiciones.

2.4.1.2.3 Falla en ventiladores

Debido a los efectos de convección natural, la capacidad de condensación parcial del 20% al 30% de servicio normal es, con frecuencia, usado a menos que los efectos, a las condiciones de relevo, sean determinados hasta ser, significativamente, distintos. La capacidad de la válvula de relevo estará, entonces, basada sobre el 70% al 80%, dependiendo del servicio. Sin embargo, el servicio actual disponible por la convección natural es, generalmente, una función del diseño del cambiador de calor de aire frío.

2.4.1.2.4 Circuito en el domo

En muchos casos, la falla del reflujo resulta, por ejemplo, del paro de la bomba, o cierre de la válvula, a causa de la inundación del condensador, lo cual es equivalente a la pérdida total del agua de enfriamiento encontrada en la condensación total y parcial. Los cambios de composición causados por las pérdidas del reflujo pueden producir propiedades de vapor diferentes que afectan la capacidad. Una válvula diseñada para la

falla total del agua de enfriamiento, generalmente, será adecuada para esta condición, pero cada caso deberá ser examinado con relación a los componentes, en particular, y el sistema que envuelve.

2.4.1.2.5 Circuito alrededor de la bomba

El relevo requerido es la relación de vaporización causada por una cantidad de calor igual al eliminado en el circuito alrededor de la bomba. El calor latente de vaporización deberá corresponder al calor latente bajo las condiciones de relevo de temperatura y presión al punto de relevo.

2.4.1.2.6 Falla de refluo lateral

Principios análogos a los descritos en el caso del circuito en el domo y alrededor de la bomba son aplicables en la inundación del condensador (sí un condensador esta en el sistema) o cambios en las propiedades del vapor resultando, en cambios en la composición. La capacidad de relevo deberá ser lo suficientemente grande para relevar la vaporización nominal causado por la cantidad de calor eliminado del sistema.

2.4.1.3 Falla de controles o de aire de instrumentos

Los dispositivos de control automático, directamente accionados por el proceso o indirectamente accionados por una variable del proceso (por ejemplo, presión, flujo, nivel de líquido o temperatura) serán usados a la entrada o salida de los recipientes o sistemas. Cuando la señal de transmisión, o medio de operación a un elemento final de control (tal como una válvula operadora) falla, el dispositivo de control deberá asumir una posición de abertura total o cierre total acorde a su diseño básico. La posible falla del dispositivo de control, mientras que la válvula bypass este total o parcialmente abierta, merece ser considerada; sin embargo, este factor no intenta cubrir la condición de un sobrediseño de la válvula de control.

En la evaluación de las consideraciones de relevo, el diseñador deberá asumir el diseño apropiado de la válvula de control y la operación de la unidad a/o cercana al diseño, a menos que se conozcan las condiciones específicas que existan en lo opuesto, además deberá estar atento al arranque-paro temporal o a las condiciones de disturbio, cuando la unidad operadora este usando la válvula bypass; dado que serán condiciones de disturbios y de fuera de control, la probabilidad que el relevo requerido se presente es, generalmente, mayor que cuando la unidad esta operando bajo condiciones normales, con todos los bypass cerrados.

2.4.1.3.1 Capacidad de la válvula

En la evaluación del relevo debido a una causa, algunas de las válvulas de control automático no serán consideradas como causantes del relevo requerido y tenderán a relevar el sistema, asumiendo una posición requerida para que se lleve a cabo el flujo normal del proceso. En otras palabras, la no-capacidad deberá ser tomada como una respuesta favorable del instrumento, la posición normal de la válvula es la posición esperada antes de los disturbios, tomando en cuenta la capacidad de diseño y el giro por debajo del sistema. Por lo tanto, a menos que la condición de flujo a través de las válvulas de control cambien, la capacidad puede ser tomada para el flujo normal de estas, corregida a las condiciones de relevo, suponiendo que el sistema a la entrada sea capaz de manejar un incremento de flujo.

2.4.1.3.2 Dispositivos de control a la entrada.

El caso a considerar, es la de una válvula a la entrada que se encuentra en posición totalmente abierta haciendo caso omiso de la falla de la válvula de control. La abertura de esta válvula de control puede ser causada por la falla de los instrumentos o mal operación. Si el sistema tiene múltiples entradas, la posición de algún dispositivo de control, en líneas permanentes, permanecerán en su posición de operación normal, por lo cual, la capacidad de relevo requerida será la diferencia entre el máximo flujo de entrada esperado y el máximo flujo a la salida, ajustado para las condiciones de relevo, tomando en cuenta que las otras válvulas en el sistema están en la posición de operación al flujo normal (es decir, abren normalmente, cierran normalmente o regulan). Si una o más de las salidas de las válvulas están cerradas, o más entradas a las válvulas están abiertas debido a la misma falla que causa que la primera válvula se encuentre abierta, la capacidad de relevo requerida es la diferencia entre el máximo flujo esperado a la entrada y el flujo normal a partir de las salidas de las válvulas que permanecen abiertas. Todos los flujos deberán ser determinados a las condiciones de relevo. Una consideración importante es el efecto de tener un bypass manual sobre la válvula(s) de control a la entrada, mínimo, parcialmente abierto.

En el caso de pérdida del nivel de líquido, el flujo de vapor dentro del sistema de baja presión dependerá de qué el sistema de interconexión, el cual consiste de válvulas de amplia abertura y tubería, pasa con una diferencia de presión basada en la presión de operación normal a contracorriente y la presión de relevo del equipo a la entrada. Esta caída de presión a las condiciones iniciales, con frecuencia, resulta en un flujo crítico y puede causar que la velocidad sea mayor, en rangos de tiempo, que la velocidad normal del vapor que fluye dentro del sistema de alta presión.

2.4.1.3.3 Dispositivos de control a la salida

Cada válvula de control a la salida deberá ser considerada totalmente abierta o cerrada para el propósito de determinar la masa de relevo, esto es haciendo caso omiso de la falla de posición de la válvula de control y puede ser causada por la falla del sistema de instrumentación o mal operación. Si una o más válvulas a la entrada están abiertas, debido a la falla que causa que las salidas de las válvulas permanezca cerradas, los dispositivos de relevo podrán ser requeridos para prevenir la sobrepresión. La capacidad de relevo requerida es la diferencia entre los flujos máximos a la entrada y los máximos de salida; todos los flujos deberán ser calculados a las condiciones de relevo. Además, se debe considerar los efectos inadvertidos de cierre de los dispositivos de control por la acción del operador.

Para la aplicación que envuelve salidas únicas, con dispositivos de control que fallan en la posición de cierre, los dispositivos de relevo de presión serán requeridos para prevenir la sobrepresión. La capacidad de relevo requerida será igual a la máxima esperada a la entrada de flujo, a las condiciones de relevo.

Para aplicaciones que envuelven más de una salida y un dispositivo de control que falla en la posición de cierre sobre una salida individual, la capacidad de relevo requerido es la diferencia entre el flujo esperado, máximo, a la entrada y el flujo de diseño (ajustado a las condiciones de relevo y considerando una unidad bajo corriente) a través de las salidas restantes, asumiendo que las otras válvulas en el sistema permanecen en su posición normal de operación.

Para aplicaciones que envuelven más de una salida, cada una con su dispositivo de control que falla en la posición de cierre, la capacidad de relevo requerida es igual al máximo flujo esperado a la entrada, a las condiciones de relevo.

2.4.1.4 Expansión hidráulica

La expansión hidráulica es el aumento en volumen líquido causado por un incremento de la temperatura. Este fenómeno puede ser el resultado de diversas causas siendo las más comunes las siguientes:

- a) Las tuberías o recipientes están bloqueadas mientras se encuentren llenos de líquido frío y, posteriormente, calentados por trazas de calor, bobinas, calor ganado del ambiente o fuego.
- b) Un cambiador es bloqueado sobre el lado frío con el flujo del lado caliente.
- c) Tuberías o recipientes estarán bloqueados mientras se encuentren llenos con líquido cuya temperatura es cercana al medio ambiente y serán calentado por radiación solar directa.

En ciertas instalaciones, tales como en circuitos de enfriamiento, el esquema del proceso, el arreglo del equipo, y los procedimientos de operación, formaran una eliminación factible de los dispositivos de relevo para la expansión hidráulica, los cuales serán requeridos en el lado frío de un cambiador de tubo y coraza. Tales casos serán aceptables y no es compromiso de seguridad del personal o del equipo, pero el diseñador tendrá precaución, pero no es garantía, de revisar cada caso cuidadosamente antes de decidir un dispositivo de relevo basado en la expansión hidráulica.

2.4.1.4.1 Diseño y presión de ajuste

El requerimiento de capacidad no es fácil de determinar. Debido a que toda la aplicación es para el relevo de líquidos, la capacidad requerida del dispositivo será pequeña. Un tamaño de tubería nominal de ¾-pulgada x 1-pulgada (NPS ¾ x NPS 1) para la válvula de relevo es, comúnmente, usada.

La selección apropiada de la presión de ajuste para estos dispositivos de relevo deberá incluir un estudio del rango de diseño de todos los puntos incluidos en el sistema de bloqueo. El ajuste de la presión de relevo térmica nunca deberá estar por encima de la máxima presión permitida por el componente más débil, protegido del sistema. Sin embargo, el dispositivo de relevo de presión deberá estar ajustado lo suficientemente alto para abrir, únicamente, bajo las condiciones de expansión hidráulica. Cuando las válvulas de relevo térmico descargan dentro de un sistema cerrado, los efectos de la contrapresión deberán ser considerados.

Para el caso de usar una tubería mayor a la nominal, la válvula deberá requerir de tuberías largas, de un diámetro grande, instalado por encima del suelo y en los recipientes grandes o cambiadores operando en su totalidad, llenos de líquido.

Para sistemas llenos de líquido, la relación de expansión, para el diseño de los dispositivos de relevo, podrá ser determinado usando la siguiente fórmula:

$$gpm = \frac{\beta H}{500GC} \quad (2.1)$$

Donde

gpm = Flujo volumétrico a la temperatura del flujo, U.S. galones por minuto

β = Coeficiente de expansión cúbica por °F para el líquido a la temperatura esperada

H = Coeficiente de transferencia de calor total, Btu/hr

G = Gravedad específica a 60°F. La compresibilidad del líquido es ignorada

C = Calor específico del fluido atrapado. Btu/hr*°F

Tabla 2.1. Coeficiente de expansión cúbica para hidrocarburos líquidos y agua a 60°F

Gravedad del líquido (°API)	Valor (por °F)
3-34.9	0.0004
35-50.9	0.0005
51-63.9	0.0006
64-78.9	0.0007
79-88.9	0.0008
89-93.9	0.00085
94-100 y encendedor	0.0009
agua	0.0001

Este método de cálculo proporciona, únicamente, una protección en términos cortos en algunos casos. Si el líquido bloqueado tiene una presión mayor a la presión de diseño del relevo, entonces el dispositivo de relevo deberá ser capaz de manejar la proporción de vapor generado. Si se descubre y corrige antes de la ebullición del líquido, entonces la vaporización necesaria no necesita ser precisa para el diseño del dispositivo de relevo de presión.

2.4.1.5 Fuego externo

Este apartado está limitado a un recipiente, equipo o recipientes múltiples en la misma zona de fuego que tengan la suficiente capacidad de líquido durante el incidente de un fuego externo. Como una regla de dedo, la capacidad de líquido de un recipiente deberá sostener alrededor de 20 minutos la vaporización durante un fuego externo. Si la capacidad de líquido es inadecuado, considerar el caso de un recipiente completamente lleno de vapor o gas.

El procedimiento de diseño de las válvulas de relevo de presión estará basado en las siguientes suposiciones al tiempo en que se lleve a cabo el fuego.

- Asumir que el sistema del proceso está bloqueado internamente. La operación normal es interrumpida y no existirá bombeo del fluido dentro o fuera del sistema de proceso.
- No tomar la capacidad para la descarga del venteo hasta obtener un tamaño más pequeño.
- Tomar la no-capacidad para favorecer acciones de instrumentación, sistema de depresurización de emergencia, o sistema de agua.

- Emplear niveles de líquido mayores al normal para determinar la entrada de calor para los otros recipientes y equipos.
- La disponibilidad de la intervención del operador, dentro de los 10 a 30 minutos, no deberá ser usada.

API 521 recomienda que la máxima extensión, probable, de un incidente por fuego estará limitado a una área de tierra de 2,500 a 5,000 ft². Muchas refinerías emplean 5,000 ft². La guía para definir la localización esta basada sobre la máxima extensión potencial ocasionada por un fuego externo, es decir, dentro de la zona de 5,000 ft², la zona deberá tener una localización que permita aislar los recipientes y la tubería relacionada con los mismos.

Por otra parte, se establece que la porción del recipiente cubierto por su líquido interno, igual o menor a 25 pies por encima de la fuente de la flama, necesita ser incluida dentro de los cálculos. El termino fuente de flama esta referido a un grado de inclinación del terreno, pero puede ser un nivel en donde un derrame de sustancia o una fusión del fuego pueda ser sostenido.

El estándar API asume que un recipiente en un fuego, esta, normalmente, aislado, sin entrada de materia prima y sin flujo de salida del proceso. La suposición no considera la situación cuando la alimentación al recipiente sea continua.

2.4.1.5.1 Cálculo del área húmeda expuesta al fuego

Recipientes verticales

El área de superficie húmeda de un recipiente vertical puede ser determinada empleando la siguiente ecuación empírica, relacionado con el nivel del líquido por encima de la línea tangencial a partir del fondo del recipiente:

$$A_{\text{húmeda}} = 1.089D^2 + \pi Dh \quad (2.2)$$

Donde

D = diámetro del recipiente, ft

h = altura del cilindro, ft

Usar esta ecuación cuando la elevación superficial del líquido sea mayor a 25 ft. Si la elevación de la superficie del nivel del líquido es mayor a 25 ft, reemplazar h por h-(S_E - 25).

Si un recipiente tiene una superficie extra, incluir la superficie húmeda extra como parte del área de superficie húmeda del recipiente principal superior a 25 ft de altura de fuego.

Recipientes horizontales

El área de superficie húmeda de un recipiente horizontal puede ser determinada a partir de las siguientes ecuaciones:

El nivel del líquido se encuentra por debajo de la línea central.

$$S = D \cos^{-1} \left(\frac{h}{R} \right) \quad (2.3)$$

El nivel del líquido se encuentra por encima de la línea central del recipiente.

$$S = D \left(\pi - \cos^{-1} \left(R - \frac{h}{R} \right) \right) \quad (2.4)$$

$$A_{húmeda} = (2.178D^2 + \pi DL) \left(\frac{S}{\pi D} \right) \quad (2.5)$$

Donde

S = arco húmedo, ft

L = longitud tangencial del recipiente, ft

Como en el caso del recipiente vertical, estas ecuaciones serán directamente utilizadas donde la superficie de elevación del líquido sea mayor a 25 ft. Si la elevación de la superficie, del nivel del líquido, es mayor a 25ft, reemplazar h por h-(S_E - 25).

Generalmente, la industria del petróleo emplea una aproximación conservativa para tomar en cuenta la tubería y los accesorios. Se adicionan de un 10 a un 15% el área de superficie húmeda del recipiente principal y los recipientes asociados a la superficie húmeda en su totalidad. Esta consideración incluirá la conexión de la tubería y los accesorios con el recipiente sujeto a la misma exposición del fuego.

Para la estimación de la superficie total húmeda debemos asegurar tener los siguientes puntos:

- El área de superficie húmeda del recipiente principal de interés.
- Las áreas de superficie húmeda de los recipientes asociados que se encuentren en la misma zona de fuego, manteniendo las condiciones establecidas arriba.
- El área de superficie húmeda de la tubería y los accesorios de los recipientes principales y los asociados.

2.4.1.5.2 Ecuación de absorción del calor

Las ecuaciones más comunes recomendadas por API RP 520 (1993) serán:

➤ Caso favorable. El servicio tiene una respuesta pronta contra el fuego y un dren adecuado de materiales inflamables lejos del recipiente. Usar la siguiente ecuación:

$$Q = 21,000 FA^{0.82} \quad (6)$$

➤ Casos severos. El servicio no tiene un equipo, pronto, para contrarrestar el fuego y posee un dren inadecuado de materiales inflamables lejos de los recipientes. Usar la ecuación:

$$Q = 34,500FA^{0.82} \quad (7)$$

Donde

Q = absorción de calor total (entrada) hacia la superficie mojada, Btu/hr.

F = factor ambiental.

A = superficie mojada total, ft². (la expresión A^{-0.18} o 1/A^{0.18}, es el factor de área expuesta o proporción

El factor ambiental, F, es una función del tipo de aislamiento y del espesor del mismo. La capacidad será tomada para el aislamiento de prueba contra el fuego, únicamente, si las dos condiciones siguientes para el aislamiento de prueba contra el fuego son satisfechas:

➤ El aislamiento de prueba contra el fuego deberá funcionar, con efectividad cuando este sujeto a temperaturas de fuego de 1,000-2,000°F para un periodo de 20 minutos a 1 hora.

➤ La instalación del aislamiento deberá asegurar que no este fuera de su lugar cuando se impacte con las corrientes de agua, usada para extinción del fuego. Un mínimo requerimiento es que una banda de acero inoxidable posea el aislamiento.

La capacidad de relevo determinará el tamaño de la válvula de relevo de presión. La capacidad de relevo requerida podrá ser determinada a partir de la siguiente ecuación:

$$W = \frac{Q}{\lambda} \quad (2.8)$$

En donde

W = flujo másico, lb/hr.

λ = calor latente de vaporización, Btu/lb.

La determinación del calor latente de vaporización, λ , es, algunas veces, problemática. Una simulación de computo es recomendada para obtener las propiedades de los hidrocarburos de múltiples componentes a las condiciones de relevo. El personal de las refinerías tiene un estándar informal, generalmente, basan el calor latente requerido sobre un 70-95% mol o masa del hidrocarburo líquido. El cálculo o experimento es realizado por flasheo, por alrededor del 30 o 5% mol o peso de los componentes ligeros de vapor a la presión de relevo.

Este método conservativo previene una sobrestimación de la temperatura de relevo a la presión de relevo definida. Al mismo tiempo, se obtiene un valor razonable del calor latente.

Las áreas de descarga para los dispositivos de relevo de presión en los recipientes que contienen fluidos supercríticos, gases o vapores expuestos a fuego abierto, podrán ser estimadas usando la ecuación 2.9. En el uso de esta ecuación, la no-capacidad ha sido tomada para el aislamiento. La capacidad para el aislamiento, F, podrá ser tomada a partir de la tabla 2.2.

$$A = \frac{F'A'}{\sqrt{P_1}} \quad (2.9)$$

Donde

A = área de descarga efectiva de la válvula, in²

A' = área superficial expuesta del recipiente, ft²

P₁ = presión de relevo, lb/in² abs

F' puede ser determinada a partir de la siguiente relación:

$$F' = \frac{0.1406}{CK_d} \left[\frac{(T_w - T_1)^{1.25}}{T_1^{0.6506}} \right] \quad (2.10)$$

$$C = 520 \quad k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k+1} \quad (2.11)$$

Donde

k = relación de calores específicos del gas o vapor

K_d = coeficiente de descarga. Es igual a 0.975 para el diseño de las válvulas de relevo

T_w = temperatura de la pared del recipiente, °R

T_1 = temperatura del gas, °R, a la presión de ajuste. Es determinada a partir de la siguiente relación:

$$T_1 = \left(\frac{P_1}{P_n} \right) T_n \quad (2.12)$$

Donde

P_n = presión de operación normal del gas, lb/in².

T_n = temperatura de operación normal del gas, °R.

Tabla 2.2. Factores ambientales, F (API 521, 1997)

Tipo de equipo	Factor F
Recipiente descubierto	1.0
Recipientes aislados (con la conductancia del aislamiento, los valores para las condiciones de exposición al fuego tendrán las siguientes unidades. BTU/hr*ft ² *°F.	
4	0.3
2	0.15
1	0.075
0.67	0.05
0.5	0.0376
0.4	0.03
0.33	0.026
Facilidad de aplicación de agua, en los recipientes descubiertos.	1.0
Facilidad de depresurización y vaciado.	1.0
Almacenaje con cubierta de tierra.	0.03
Almacenaje de grado bajo.	0.00

El valor mínimo recomendado para F es de 0.01; cuando el valor mínimo es desconocido, F igual a 0.045 debe ser usado.

La máxima temperatura recomendada para la pared del recipiente, para materiales de acero al carbón, es de 1,100°F. Cuando los recipientes sean fabricados a partir de

aleaciones de metal, el valor de T_w deberá ser cambiado a un máximo recomendado más apropiado.

La carga de relevo puede ser directamente calculada, a partir de la siguiente relación:

$$W = 0.1406 \sqrt{MP_1} \left(\frac{A(T_w - T_1)^{1.25}}{T_1^{1.1506}} \right) \quad (2.13)$$

Donde, M es el peso molecular del gas.

La derivación de las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.13 están basadas sobre las propiedades físicas del aire y la ley de los gases ideales. La derivación asume que el recipiente se encuentra sin aislamiento y no tiene masa, la temperatura de la pared no alcanza esfuerzo de ruptura, y que no hay cambio en la temperatura del fluido. Estas suposiciones deberán ser revisadas para asegurar que sean apropiada para una situación en particular.

2.4.1.6 Falla de la energía eléctrica

La determinación de los requerimientos de relevo resultado de una falla de energía eléctrica requiere un análisis cuidadoso de la planta o del sistema evaluando qué equipo es afectado por la falla y como la falla del equipo afectará la operación de la planta. Un standby automático, es un excelente dispositivo para la maximización del tiempo de una corriente interna, minimizando el paro de la unidad, y asegurando la producción de la unidad. Pero los circuitos, la secuencia y la capacidad de los componentes no estarán, lo suficientemente, disponibles para que permitan la capacidad en el establecimiento de los requerimientos individuales de relevo.

2.4.1.6.1 Análisis

La falla de energía eléctrica deberá ser analizada en cualquiera de las siguientes tres formas:

- a) Como una falla de energía local en la cual una pieza del equipo es afectada
- b) Como una falla de energía intermedia en la cual el centro de distribución, el centro de control para el motor o un ómnibus es afectado
- c) Como una falla de energía total en la cual todos los equipos eléctricos se vean, simultáneamente, afectados

Los efectos de una falla de energía local serán, fácilmente, evaluados cuando las piezas individuales del equipo, tales como bombas, ventiladores, y válvulas solenoides, se vean afectados. Debido a que las causas de disturbio son resueltas, los requerimientos de relevo podrán ser determinados para estas secciones.

La falla de energía intermedia puede causar serios efectos que cualquiera de los otros dos tipos de fallas. Dependiendo del método de división entre los distintos alimentadores a bombas y motores, es posible perder todo el aire frío de los ventiladores al mismo tiempo que las bombas de reflujo sean perdidas. Esto, entonces, inundará el condensador y podrá evitar una capacidad tomando el efecto de la convección natural del condensador.

La falla total de energía requiere un estudio adicional para analizar y evaluar los efectos combinados de las fallas múltiples de los equipos. Consideraciones especiales deberán

ser dadas para el efecto de la abertura simultanea de las válvulas de relevo dentro de un sistema de cabezal cerrado.

2.4.1.7 Falla en los equipos de transferencia de calor

El código ASME, sección VIII, división I, punto UG-133(d) establece que "los cambiadores de calor y los recipientes análogos estarán protegidos con un dispositivo de relevo de presión de capacidad suficiente para evitar la sobrepresión en caso de una falla interna". Esta postulación define un amplio problema, pero también presenta los siguientes problemas específicos:

- a) El tipo y extensión de la falla interna que puede ser anticipada
- b) La determinación de la cantidad de capacidad de relevo requerida
- c) La selección de un dispositivo de relevo que reaccione rápidamente para evitar la sobrepresión
- d) La selección de la localización adecuada para el dispositivo de tal manera que sienta la sobrepresión al tiempo de la reacción

2.4.1.7.1 Consideraciones de presión

La ruptura completa de un tubo, en la cual una gran cantidad de fluido fluye a presión elevada en el lado de baja presión del cambiador, es remota, pero posible. Una pérdida menor puede, pocas veces, ocasionar sobrepresión en un cambiador durante la operación. Dado que la presión de prueba hidrostática es 150% la presión de diseño del equipo, la falla del equipo es improbable que sea, debido a una fractura del tubo, en donde el lado de baja presión estará diseñado para los últimos dos tercios de la presión de diseño del lado de alta presión. El uso de la máxima presión posible del sistema, en lugar de una presión de diseño, podrá ser considerado como la presión de diseño del lado de alta presión.

Donde la presión de prueba actual en el lado de baja presión sea menor al 150% la presión de diseño, esta presión baja será usada para determinar si la protección contra la sobrepresión es necesaria. El relevo de presión para la fractura de tubo no es requerido cuando el lado del cambiador de baja presión este diseñado en o por encima del criterio de dos tercios.

2.4.1.7.2 Determinando la relación requerida de flujo relevado

En la práctica, una falla interna puede variar, desde un pico de alfiler hasta una fractura completa del tubo. Para determinar la relación de relevo requerido, las siguientes bases deberán ser usadas:

- a) La falla del tubo es debido a una fractura fuerte en el tubo
- b) La falla del tubo es asumida que ocurre en la parte posterior del banco de tubos
- c) El fluido de presión alta, se asume que, fluirá a través del tubo reforzado, marcado en la hoja de tubería, y a través de la sección más grande del tubo.

Una suposición simplificada de 2 orificios puede también ser usada en unión con los métodos de arriba produciendo un gran flujo de relevo que pasara a través de una gran abertura del tubo y del tubo reforzado.

La determinación del relevo, será llevada a cabo para líquidos que flashea como resultado de la reducción de la presión o, en el caso de fluidos volátiles que sean calentados, debido a los efectos combinados de la reducción de la presión y la vaporización con el fluido, los cuales estarán, íntimamente, en contacto con el material caliente en el lado de baja presión.

Para líquidos que no vaporizan ("flashean") cuando pasan a través de la abertura, la relación de descarga debido a la falla deberá ser calculada usando fórmulas de flujo incompresible. Para el paso de vapor a través de la abertura, del tubo fracturado, las teorías del flujo compresible aplican.

Dos aproximaciones estarán disponibles para la determinación del diseño del dispositivo de relevo requerido: (a) estado permanente y (b) análisis dinámico. Si el método en estado estacionario es usado, el diseño del dispositivo de relevo deberá estar basado sobre la relación de flujo gas y/o líquido pasando a través de la ruptura. Una aproximación dinámica simula el perfil de presión y la presión transiente desarrollada en el cambiador a partir del tiempo de la ruptura, y generalmente incluye el tiempo de respuesta del dispositivo de relevo.

Este tipo de análisis es recomendado cuando exista una diferencia amplia entre la presión de diseño de los dos lados del cambiador, especialmente, cuando el lado de baja presión esta lleno de líquido, y el lado de alta presión contiene un gas o fluido el cual flashea a través de la ruptura. Este tipo de modelo ha mostrado que bajo estas circunstancias se puede producir una sobrepresión significativa, aún cuando este protegido por un dispositivo de relevo de presión.

2.4.1.7.3 Influencia de la tubería y las condiciones del proceso

Para determinar la influencia de la tubería en la eliminación de la necesidad de un dispositivo de relevo o en la reducción de los requerimientos de relevo, la configuración de la tubería a la descarga y los contenidos (líquido o vapor) del lado de baja presión serán considerada. Cuando el lado de baja presión esta en fase vapor, la capacidad total será tomado como la capacidad de vapor manejado en las líneas de salida y entrada, mencionando que las líneas de entrada no contienen válvula de bloqueo o algún otro equipo que pueda prevenir el contraflujo. Cuando el lado de baja presión este lleno de líquido, la capacidad de relevo efectiva para la cual el sistema de tubería pueda ser acreditada estará basada en el flujo volumétrico del líquido que existe en el lado de baja presión antes de la ruptura del tubo. Sin embargo, si un análisis detallado es llevado a cabo, la capacidad podrá tomarse para la aceleración del líquido en el lado de baja presión.

Cuando la tubería del sistema, en el lado de baja presión del equipo de calor, tiene válvulas, su efecto sobre la capacidad del sistema, cuando ocurre la sobrepresión, deberá ser tomada en cuenta. Las válvulas proporcionadas, únicamente para aislamiento, deberán estar en abertura total. Para determinar la capacidad en la tubería del sistema, serán consideradas las válvulas usadas para el propósito de control, estando en posición equivalente al mínimo requerimiento de flujo normal del proceso especificado. Sin embargo, esta suposición no puede ser hecha si la válvula cierra automáticamente antes de la situación de emergencia.

2.5 Dimensionamiento de los dispositivos de relevo (API RP 520, 2000)

Para establecer el diseño de un dispositivo de relevo de presión en alguna aplicación, el diseñador debe determinar las condiciones para las cuales la protección contra la sobrepresión es requerida. Una revisión razonable deberá ser ejercida para el establecimiento de las distintas contingencias que pudieran resultar de la sobrepresión.

El primer paso en el diseño es el de considerar las contingencias que pudieran causar sobrepresión y evaluarlas en términos de la presión generada y las relaciones de cada uno de los fluidos que deban ser relevados. El diagrama de flujo de proceso, el balance de materia, los diagramas de tuberías e instrumentación, las hojas de especificaciones de los equipos, y las bases de diseño serán necesarios para determinar la relación de relevo para cada uno de los dispositivos de relevo de presión.

2.5.1 Presión de relevo

La presión de relevo, P_1 , es la presión a la entrada del dispositivo de relevo de presión a las condiciones de relevo. La presión de relevo es el resultado de la presión de ajuste más la sobrepresión más la presión atmosférica.

La sobrepresión permitida es establecida a partir de la acumulación permitida por el código aplicable; puede variar para distintas aplicaciones dependiendo de la relación entre la presión de ajuste con la máxima presión de trabajo permisible del recipiente o sistema que este protegiendo. La sobrepresión es igual a la acumulación, únicamente, cuando la presión de ajuste sea igual a la máxima presión de trabajo permisible.

La presión de relevo para las válvulas de relevo de presión en servicio con líquidos esta determinada de una manera similar a la usada para el servicio con vapor. En el caso de la aplicación del código ASME en las válvulas que se encuentran en servicio con líquidos (es decir, para la protección de un recipiente totalmente lleno de líquido), la máxima acumulación permisible estará limitada al 110% de la máxima presión de trabajo, para la operación bajo contingencia. En el caso de la no-aplicación del código ASME, para las válvulas en servicio con líquidos (es decir, para protección de la tubería sin recipiente incluido), el 25% de la sobrepresión es, generalmente, especificada.

2.5.1.1 Contingencias de operación

- Instalación de una sola válvula.

En acorde con los requerimientos del código ASME, Sección VIII, División 1, la presión de acumulación esta limitada al 110% de la máxima presión de trabajo permisible del recipiente, que esta protegido por una sola válvula de relevo de presión diseñada para operar bajo contingencia (no-fuego). La presión de ajuste de la válvula no excederá la máxima presión de trabajo permisible.

Notar que en acorde con el código ASME, la acumulación permisible es de 3 psi cuando la MAWP esta entre 15 y 30 psig.

- Instalación de válvulas múltiples.

La instalación de válvulas múltiples requiere la capacidad combinada de 2 o más dispositivos de relevo de presión para aliviar una contingencia de sobrepresión dada.

En acorde con los requerimientos del código ASME, Sección VIII, División 1, la presión acumulada está limitada al 116% de la máxima presión de trabajo permisible del recipiente el cual estará protegido por válvulas múltiples diseñadas para operar bajo contingencia (no-fuego). La presión de ajuste de la primera válvula no excederá la máxima presión de trabajo permisible. La presión de ajuste de la válvula o válvula(s) adicional (es) no excederán el 105% de la máxima presión de trabajo permisible.

Tabla 2.3. Presión de ajuste y límites de acumulación para las válvulas de relevo de presión

Contingencia.	Instalación de una sola válvula		Instalación de válvulas múltiples	
	Presión de ajuste. (por ciento)	Máxima presión acumulada. (por ciento)	Presión de ajuste. (por ciento)	Máxima presión acumulada. (por ciento)
No-fuego				
Primera válvula.	100	110	100	116
Válvula adicional (s)	---	---	105	116
Fuego				
Primera válvula	100	121	100	121
Válvula adicional (s)	---	---	105	121
Válvula suplementaria	---	---	110	121

Nota. Todos los valores estarán como porcentajes de la máxima presión de trabajo permisible.

Notar que la acumulación permisible es de 4 psi cuando la MAWP este entre 15 y 30 psig.

2.5.1.2 Contingencia por fuego

En acorde con los requerimientos del código ASME, Sección VIII, División 1, la presión acumulada está limitada al 121% de la máxima presión de trabajo permisible del recipiente que está protegido por las válvulas para contingencia de fuego. Esto aplica a la instalación de dispositivo único, múltiple y suplementario.

Los dispositivos, único y múltiple, diseñados para fuego, pueden ser utilizados, también, para los requerimientos de relevo atribuidos a contingencias de operación (no-fuego), estipulando la restricción del 110% y 116% (de la máxima presión de trabajo permisible), de la presión acumulada para la contingencia de no-fuego observado.

- Instalación de una sola dispositivo

Cuando un recipiente esta protegido por un solo dispositivo diseñado para fuego, la presión de ajuste no excederá la máxima presión de trabajo permisible.

- **Instalación de dispositivos múltiples.**

Una instalación de dispositivos múltiples requiere la capacidad combinada de 2 o más válvulas de relevo de presión para aliviar la sobrepresión. La presión de ajuste del primer dispositivo abierto no excederá la máxima presión de trabajo permisible. La presión de ajuste del último dispositivo abierto no excederá el 105% de la máxima presión de trabajo permisible.

- **Instalación de dispositivos suplementarios.**

La instalación de un dispositivo suplementario proporcionará una capacidad de relevo para un peligro adicional creado por la exposición del fuego u otra fuente inesperada de calor externo. La presión de ajuste del dispositivo suplementario para fuego no excederá el 110% de la máxima presión de trabajo permisible. Los dispositivos suplementarios serán usados, únicamente, en adición a los dispositivos usados para la operación

2.5.2 Diseño para el relevo de gas o vapor

2.5.2.1 Comportamiento de flujo crítico

Si un fluido compresible se expande a través de una boquilla, un orificio o el extremo de una tubería, su velocidad y volumen crítico aumentará con la disminución de la presión bajo corriente. Para una condición dada a contracorriente, el flujo másico a través de la boquilla se incrementará hasta que una velocidad límite sea alcanzada en el cuello. Esto puede demostrar que la velocidad límite es la velocidad del sonido en el flujo del fluido a una localización. El flujo que corresponde a la velocidad límite es conocido como flujo crítico.

La relación entre la presión absoluta, la presión a la salida de la boquilla a una velocidad sónica (P_{cf}), con la presión de entrada (P_1), es conocida como presión crítica. P_{cf} es conocida como la presión de flujo crítico.

Bajo condiciones de flujo crítico, la presión actual a la salida de la boquilla no podrá caer por debajo de la presión de flujo crítico, aún si una presión mucho muy baja existe bajo corriente. Al flujo crítico, la expansión a partir de la presión del cuello hasta la presión bajo corriente tomará lugar, irreversiblemente, con la energía disipada por la turbulencia dentro del fluido circundante.

La relación de la presión de flujo crítico, en unidades absolutas, deberá ser estimada usando la relación de gas ideal en la ec. (2.14).

$$\frac{P_{cf}}{P_1} = \left[\frac{2}{k+1} \right]^{k/(k-1)} \quad (2.14)$$

Donde

P_{cf} = presión al flujo crítico, lb/in² abs

P_1 = presión de relevo a contracorriente, lb/in² abs

k = relación de calores específicos para un gas ideal

Las ecuaciones de diseño para las válvulas de relevo de presión en servicio con vapor y gas caerá dentro de 2 categorías generales dependiendo si el flujo es crítico o subcrítico. Si la presión bajo corriente del cuello es menor o igual a la presión del flujo crítico, el flujo

crítico ocurrirá. Si la presión bajo corriente excede la presión de flujo crítico, P_{cr} , entonces el flujo subcrítico ocurrirá.

2.5.2.1.1 Diseño para flujo crítico

Los dispositivos de relevo de presión en servicio con gas o vapor que operan bajo condiciones de flujo crítico podrán ser diseñados usando las ecs. 2.15–2.17. Cada una de las ecuaciones podrán ser usadas para determinar el área de descarga efectiva, A , requerida para alcanzar el flujo a través del dispositivo de relevo de presión. Una válvula que tiene un área de descarga igual o mayor que el valor calculado de A es, entonces, seleccionado para la aplicación.

$$A = \frac{W}{CK_d P_1 K_b K_c} \sqrt{\frac{TZ}{M}} \quad (2.15)$$

$$A = \frac{V \sqrt{TZM}}{6.32 CK_d P_1 K_b K_c} \quad (2.16)$$

$$A = \frac{V \sqrt{TZG}}{1.175 CK_d P_1 K_b K_c} \quad (2.17)$$

Donde

A = área de descarga efectiva requerida del dispositivo, in²

W = flujo requerido a través del dispositivo, lb/ hr

C = coeficiente determinado a partir de una expresión de la relación de los calores específicos del gas o vapor a las condiciones de relevo. Cuando k no pueda ser determinada, se sugiere que un valor de C igual a 315 sea usado

K_c = Factor de corrección combinatorio para las instalaciones con un disco de ruptura a la salida de la válvula de relevo de presión.

= 1.0 cuando un disco de ruptura no es instalado

= 0.9 cuando un disco de ruptura es instalado en combinación con una válvula de relevo de presión y la combinación no tienen valor publicado

K_d = coeficiente de descarga efectiva. Para el diseño preliminar, usar los siguientes valores:

= 0.975 cuando una válvula de relevo de presión sea instalada en combinación con o sin un disco de ruptura

= 0.62 cuando una válvula de relevo de presión no sea instalada y el diseño sea para un disco de ruptura

P_1 = presión de relevo, psia

K_b = factor de corrección de la capacidad debido a la contrapresión. El factor de corrección de la contrapresión aplica, únicamente, a las válvulas de fuelle balanceado. Para las válvulas operadas por pilotos o convencionales, usar un valor de K_b igual a 1.0

T = temperatura de relevo del gas o vapor a la entrada, en °R.

Z = factor de compresibilidad evaluada a las condiciones de entrada.

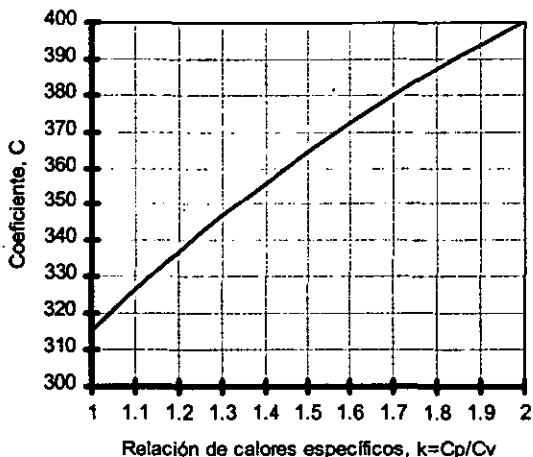
M = peso molecular del gas o vapor

V = flujo requerido a través de la válvula, en ft³/min a 14.7 lb/ in² abs. y 60°F.

G = gravedad específica del gas con referencia al aire.

= 1.00 para el aire a 14.7 lb/ in² abs. y 60°F

El valor del coeficiente C puede ser evaluado a partir de la relación de los calores específicos del gas o vapor. Cuando K no puede ser determinado se sugiere usar un valor de 315.



Nota. La ecuación para esta curva es $C = 520 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}}$

Figura 2.6. Curva para evaluar el Coeficiente C, asumiendo comportamiento ideal.

2.5.2.2 Diseño para flujo subcrítico: gas o vapor

Cuando la contrapresión a la entrada excede la relación de presión crítica, P_d/P_1 , el flujo a través del dispositivo de relevo de presión es subcrítico. Las ecs. 2.18-2.20 podrán ser utilizadas para determinar el área de descarga efectiva para una válvula seguridad-relevo convencional que tiene un regulador de resorte ajustador para compensar la contrapresión sobrepuesta.

$$A = \frac{W}{735 F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{ZT}{MP_1(P_1 - P_2)}} \quad (2.18)$$

$$A = \frac{V}{4645 F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{ZTM}{P_1(P_1 - P_2)}} \quad (2.19)$$

$$A = \frac{V}{864 F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{ZTG}{P_1(P_1 - P_2)}} \quad (2.20)$$

Donde

$F_2 =$ coeficiente de flujo subcrítico

$$F_2 = \sqrt{\left(\frac{k}{k-1} \right) (r)^{2/k} \left[\frac{1-r^{(k-1)/k}}{1-r} \right]}$$

- r = relación de la contrapresión con la presión de relevo, P_2/P_1
- K_d = coeficiente de descarga efectiva. Es igual a 0.975 para las ecuaciones 2.5-2.7
- P_2 = contrapresión, lb/in² abs

2.5.2.3 Procedimiento alternativo de diseño para flujo subcrítico

Las ecuaciones de flujo crítico, 2.15-2.17, podrán ser usadas para calcular el área de descarga efectiva requerida de una válvula de relevo de presión usada en flujo subcrítico. El área obtenida, usando este procedimiento de diseño, es idéntica al área obtenida usando las ecuaciones de flujo subcrítico. En este método alternativo, el factor de corrección de la capacidad debido a la contrapresión, K_b , es derivada a partir de la ecuación para el flujo subcrítico igualada a la ecuación de flujo crítico y algebraicamente resolver para K_b . Este procedimiento de diseño alternativo permite al diseñador usar las ecuaciones de flujo crítico para determinar la misma área obtenida con la ecuación de flujo subcrítico. Se debe hacer notar que este factor de corrección, K_b , es empleado únicamente para el diseño de las válvulas seguridad-relevo convencionales (no balanceada) que tengan su ajustador-regulador de resorte para compensar la contrapresión sobrepuesta.

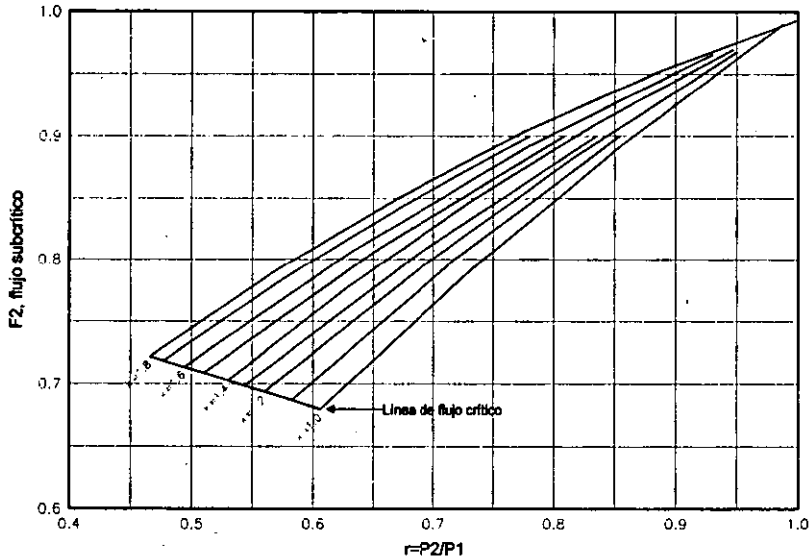


Figura 2.7. Valores de F_2 para flujo subcrítico

2.5.3 Diseño para el relevo de vapor de agua

Las válvulas de relevo de presión en servicio con vapor de agua pueden ser diseñadas usando la ecuación 21.

$$A = \frac{W}{51.5P_1K_dK_bK_cK_NK_{SH}} \quad (2.21)$$

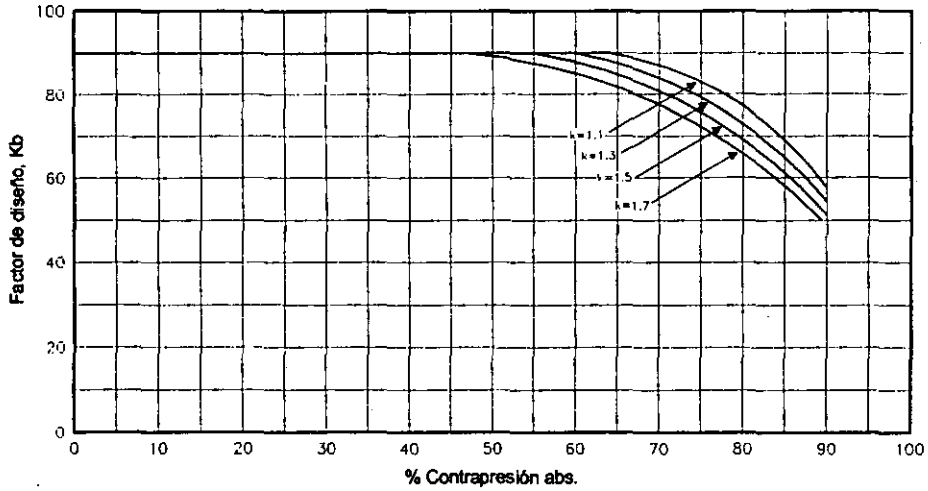
Donde

- K_d = coeficiente de descarga efectiva. Igual a 0.975 para la ecuación 8
- K_N = factor de corrección para la ecuación de Napier
= 1 donde $P_1 \leq 1515$ lb/in² abs

$= (0.1906 P_1 - 1000) / (80.2292 P_1 - 1061)$ donde $P_1 > 1515$ psia y ≤ 3215 psia
 K_{SH} = factor de corrección para el vapor sobrecalentado. $K_{SH}=1.0$ para vapor saturado.

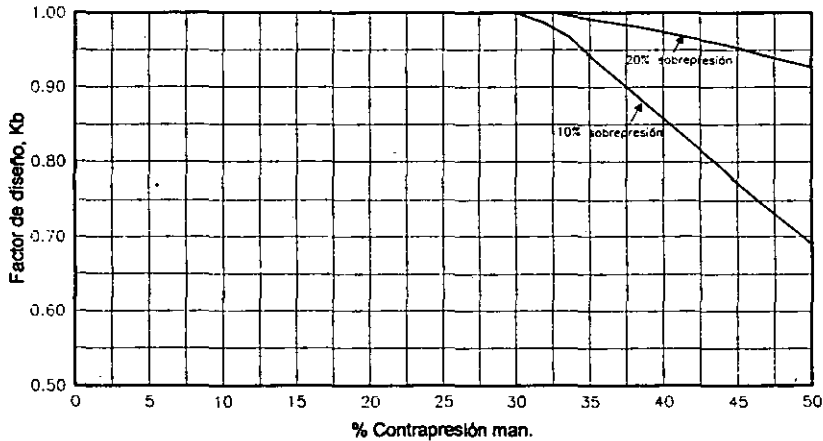
Tabla 2.4. Factor de corrección del vapor sobrecalentado, K_{SH}

Presión de ajuste (psig)	Temperatura (°F)									
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
15	1.00	0.98	0.93	0.88	0.84	0.80	0.77	0.74	0.72	0.70
20	1.00	0.98	0.93	0.88	0.84	0.80	0.77	0.74	0.72	0.70
40	1.00	0.99	0.93	0.88	0.84	0.81	0.77	0.74	0.72	0.70
60	1.00	0.99	0.93	0.88	0.84	0.81	0.77	0.75	0.72	0.70
80	1.00	0.99	0.93	0.88	0.84	0.81	0.77	0.75	0.72	0.70
100	1.00	0.99	0.94	0.89	0.84	0.81	0.77	0.75	0.72	0.70
120	1.00	0.99	0.94	0.89	0.84	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
140	1.00	0.99	0.94	0.89	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
160	1.00	0.99	0.94	0.89	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
180	1.00	0.99	0.94	0.89	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
200	1.00	0.99	0.95	0.89	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
220	1.00	0.99	0.95	0.89	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
240		1.00	0.95	0.90	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
260		1.00	0.95	0.90	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
280		1.00	0.96	0.90	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
300		1.00	0.96	0.90	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
350		1.00	0.96	0.90	0.86	0.82	0.78	0.75	0.72	0.70
400		1.00	0.96	0.91	0.86	0.82	0.78	0.75	0.72	0.70
500		1.00	0.96	0.92	0.86	0.82	0.78	0.75	0.73	0.70
600		1.00	0.97	0.92	0.87	0.82	0.79	0.75	0.73	0.70
800			1.00	0.95	0.88	0.83	0.79	0.76	0.73	0.70
1000			1.00	0.96	0.89	0.84	0.78	0.76	0.73	0.71
1250			1.00	0.97	0.91	0.85	0.80	0.77	0.74	0.71
1500				1.00	0.93	0.86	0.81	0.77	0.74	0.71
1750				1.00	0.94	0.86	0.81	0.77	0.73	0.70
2000				1.00	0.95	0.86	0.80	0.76	0.72	0.69
2500				1.00	0.95	0.85	0.78	0.73	0.69	0.66
3000					1.00	0.82	0.74	0.69	0.65	0.62



Nota. Este diagrama es típico y propio para usarse solamente cuando la característica de la válvula o la presión crítica puntual actual del flujo para el vapor o gas es desconocida; si se conoce el fabricante, este deber ser consultado para especificar el dato

Figura 2.8. Factor de corrección en el dimensionamiento por contrapresión constante para válvulas de seguridad convencionales



Nota. Las curvas representan un compromiso de los valores recomendados por los principales fabricantes de válvulas de relevo y pueden ser usados cuando el origen de fabricación o la presión crítica puntual del flujo, para vapor o gas se desconoce. Cuando el fabricante se conoce, este debe ser consultado para conocer el factor K_b . Estas curvas son para presiones de ajuste igual o mayores de 50 psig; para presiones de ajuste menores de 50 psig, el fabricante debe ser consultado para los valores de K_b

Figura 2.9. Factor de corrección por contrapresión, K_b , para válvulas balanceadas con pistón (vapores o gases)

2.5.4 Diseño para el relevo de líquidos

2.5.4.1 Válvulas de relevo que requieren certificación de capacidad de líquido

La sec. VIII, división I, del código ASME, requiere que la certificación de la capacidad sea obtenida para las válvulas de relevo de presión diseñada para servicio con líquido. El procedimiento para obtener la certificación de la capacidad incluye determinar el coeficiente de descarga para el diseño de las válvulas de relevo de líquidos a un 10% de sobrepresión. Las válvulas que requieran una capacidad en acorde con el código ASME pueden ser diseñadas usando la ecuación 2.22.

$$A = \frac{Q}{38K_d K_w K_c K_v} \sqrt{\frac{G}{P_1 - P_2}} \quad (2.22)$$

Donde

Q = flujo volumétrico, U.S. gal/min

K_d = coeficiente de descarga efectiva. Para una estimación inicial de diseño, un valor de 0.65 podrá ser utilizado

K_w = factor de corrección debido a la contrapresión. Si la contrapresión es la atmosférica, $K_w = 1.0$. En servicios con válvulas balanceadas, el factor se determina gráficamente. Las válvulas convencionales no requieren corrección especial

K_v = factor de corrección debido a la viscosidad

Cuando una válvula de relevo es diseñada para servicio con líquido viscoso, esta deberá ser diseñada, primero, como si fuera una aplicación del tipo no viscoso de tal manera que se obtenga un área de descarga requerida preliminar, A. A partir del tamaño de orificio estándar de los fabricantes (API std 526), el orificio más grande siguiente será usado para determinar el número de Reynolds, R, a partir de cualquiera de las 2 relaciones siguientes:

$$R = \frac{Q(2,800 G)}{\mu \sqrt{A}} \quad (2.23)$$

o

$$R = \frac{12,700Q}{U \sqrt{A}} \quad (2.24)$$

Donde

μ = viscosidad absoluta a la temperatura del fluido, en cp.

A = área de descarga efectiva, en in² (a partir de las áreas de orificio estándar).

U = viscosidad a la temperatura del flujo, en Unidades Saybolt--segundos.

G = gravedad específica del líquido a la temperatura de flujo con referencia al agua. Es igual a 1.0 a 70°F

Después que el valor de R es determinado, el factor K_v es obtenida a partir de la fig. 2.14. K_v es aplicado para corregir el área de descarga efectiva requerida. Si el área corregida excede el área de orificio estándar escogida, los cálculos de arriba deberán ser repetidos usando el siguiente tamaño de orificio estándar mayor.

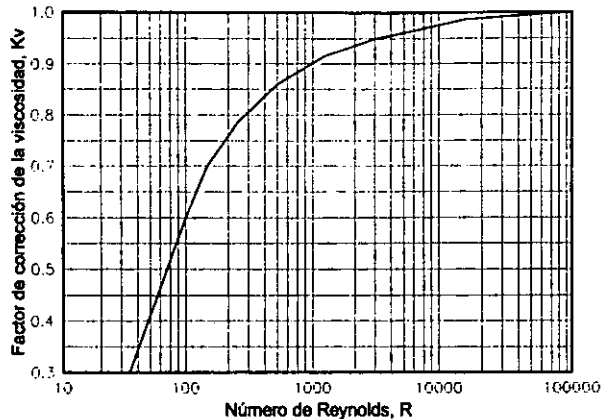


Figura 2.10. Factor de corrección para la capacidad, K_v , debido a la viscosidad

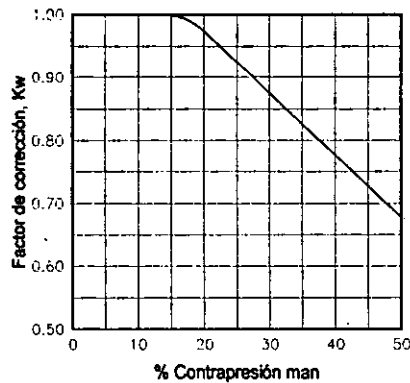


Figura 2.11. Factor de corrección para la capacidad, K_w , debido a la contrapresión en las válvulas balanceadas en servicio con líquido

2.5.4.2 Válvulas de relevo no requiriendo certificación de la capacidad

Antes que el código ASME hiciera mención de la certificación de la capacidad, las válvulas, generalmente, fueron diseñadas para servicio con líquido usando la ecuación 2.25. Este método supone un coeficiente de descarga, $K_d = 0.62$, y 25% de sobrepresión. Un factor de corrección adicional, K_p , fue obtenido a partir de la fig. 16 para la presión d relevo aparte del 25% de sobrepresión. Este método de diseño será usado cuando la certificación de capacidad no sea requerida.

$$A = \frac{Q}{38K_d K_w K_c K_v K_p} \sqrt{\frac{G}{1.25P_1 - P_b}} \quad (2.25)$$

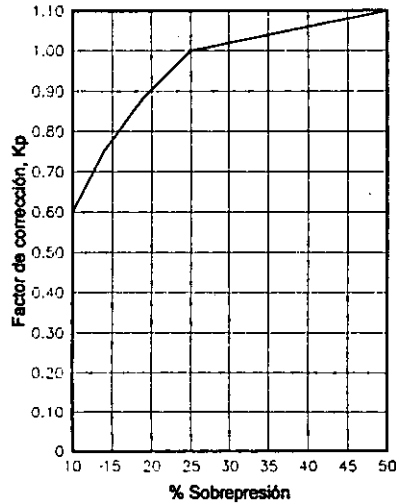
Donde

K_d = coeficiente de descarga efectivo. Para una estimación preliminar de diseño, un valor de 0.62 podrá ser utilizado

K_p = factor de corrección debido a la sobrepresión. Al 25% de la sobrepresión, K_p es

igual a 1.0. Para una sobrepresión distinta al 25%, el factor de corrección se determina gráficamente

P_b = Contrapresión total, lb/in² man



Nota. La curva muestra como la capacidad es afectada por el cambio en la elevación, cambios en el coeficiente de descarga del orificio y los cambios de sobrepresión. Por arriba del 25%, la capacidad es afectada por los cambios de sobrepresión; las válvulas no certificadas que operen a una sobrepresión baja tenderá a vibrar; por lo tanto, la sobrepresión menor a 10% deberá ser evitada

Figura 2.12. Factor de corrección de la capacidad debido a la sobrepresión para válvulas de relevo no certificadas en servicio con líquidos

2.5.5 Diseño de los dispositivos de disco de ruptura

2.5.5.1 Dispositivos de disco de ruptura independientes

Los dispositivos de disco de ruptura pueden ser usados solo o en combinación con la válvula de relevo de presión en servicio con gas o vapor e en servicio con líquido. El diseño del disco de ruptura usado como único esta basado en las ecuaciones aplicables para las válvulas de relevo de presión usadas para todos los fluidos con un coeficiente efectivo de descarga de $K_d = 0.62$.

El área de descarga requerida, A, es determinada usando la ecuación apropiada para el medio de flujo. El dispositivo de disco de ruptura seleccionado deberá ser del tamaño nominal cuya área sea igual o mayor al área de descarga requerida calculada a partir de la ecuación apropiada.

Para los dispositivos de disco de ruptura que tengan un miembro estructural (por ejemplo, una hoja de navaja o soporte a vacío) que reduce el área de descarga efectiva después del estallido, el área proyectada del miembro estructural es deducida a partir del área de flujo de la tubería para determinar el área neta de descarga.

El usuario deberá estar vigilando las siguientes limitaciones en el uso de $K_d = 0.62$ para determinar la capacidad de un disco de ruptura dado, o inversamente, el área requerida para la cantidad de flujo dado:

- a. El dispositivo de disco de ruptura es usado dentro de un rango de tamaño y presión que el constructor ha determinado obteniendo una abertura satisfactoria para el estilo del disco de ruptura en el servicio con el fluido.
- b. El dispositivo de disco de ruptura es instalado dentro de un sistema de tubería corta no adicionando resistencia al flujo en el dispositivo de disco de ruptura.

Sin un disco de ruptura descarga dentro de un sistema de venteo o en un sistema de quemado cerrado, usualmente no contribuye a las pérdidas de presión obtenidas en la tubería de descarga. El diseño de la tubería de entrada y de descarga llega a ser un problema en el diseño de la línea que emplea la relación de relevo y la máxima presión de entrada permisible definida por el código que aplique. En general, una pérdida de presión a través de un disco de ruptura de aproximadamente 75 veces el diámetro puede ser usado. El distribuidor deberá ser consultado si valores más precisos son requeridos. Este problema es similar al diseño de la línea de un proceso excepto que el efecto de la expansión volumétrica sobre las pérdidas de presión debe ser considerada. Esto incluirá un efecto de aceleración (el vapor está saliendo de la tubería de descarga a una velocidad alta) así como el efecto de la densidad a la descarga. Si la línea de venteo, subsecuentemente, descarga dentro de los cabezales de tamaños variados. Las restricciones del flujo crítico deberán ser consideradas.

2.5.5.2 Dispositivos de disco de ruptura usado en combinación con las válvulas de relevo de presión.

Una aplicación importante del dispositivo de disco de ruptura es a la entrada de una válvula de relevo de presión. El diseño de la combinación entre la válvula de relevo y el dispositivo de disco de ruptura requiere que la válvula de relevo, primero, sea diseñada para determinar la capacidad de relevo requerida. La capacidad certificada y publicada de la válvula de relevo de presión usada es, entonces, multiplicada por el factor de capacidad combinada, K_c , para determinar la capacidad de la combinación.

El tamaño nominal del disco de ruptura instalado a la entrada de la válvula de relevo de presión deberá ser igual o mayor que el tamaño nominal de la conexión a la entrada de la válvula para permitir la capacidad de flujo suficiente y el desempeño de la válvula.

El diseño de la tubería a partir del recipiente protegido a la entrada de la válvula de relevo de presión es crucial para el funcionamiento apropiado de la válvula. El usuario deberá consultar los códigos ingenieriles aplicables (ASME, API, etc.) como guía para el diseño de la tubería de entrada. A menos que el dispositivo de relevo de presión sea instalado directamente en el recipiente, una buena práctica es el de analizar las pérdidas de presión por fricción a partir del recipiente hasta la entrada de la válvula a la capacidad de relevo para cumplir con los límites recomendados.

2.5.6 Determinación de los orificios nominales (API 526, 1995)

Posteriormente a la determinación de las áreas efectivas de las válvulas de relevo de presión empleando las ecuaciones antes descritas, se seleccionará el diámetro nominal que corresponda para que pueda proporcionar su máxima capacidad de relevo de presión.

Los fabricantes de válvulas de seguridad, producen estas en ciertos tamaños estándar, y de entre estos, se escoge el que nos brinde un área efectiva inmediatamente mayor a la calculada. Los orificios estándar se designan por ciertas letras del alfabeto:

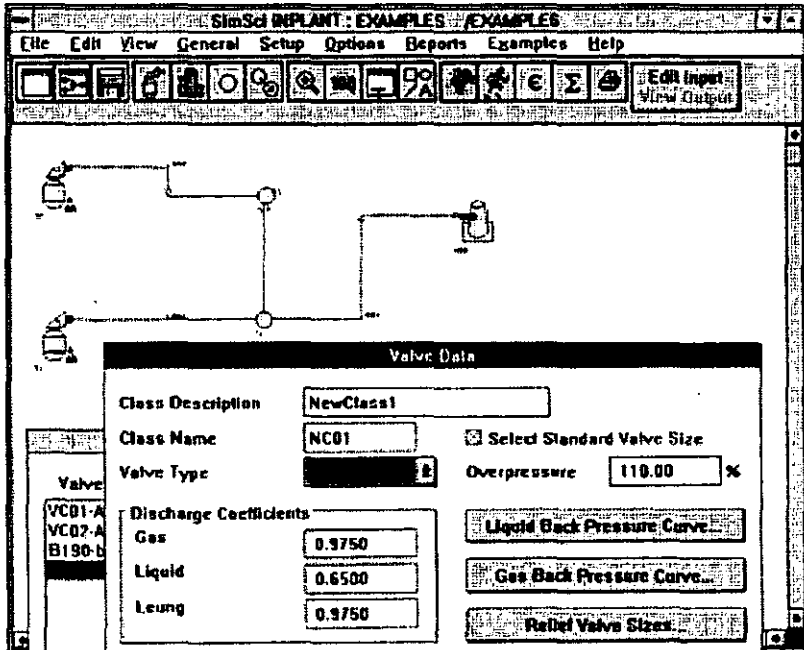
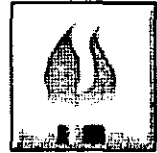
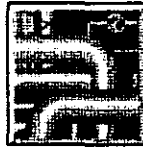
Tabla 2.5. Orificios nominales y área efectiva de descarga para las válvulas de relevo de presión, según API STD 526 (1995)

Designación de orificio	Área efectiva	
	in ²	cm ²
D	0.110	0.709676
E	0.196	1.264514
F	0.307	1.980641
G	0.503	3.245155
H	0.785	5.064506
J	1.287	8.303210
K	1.838	11.858041
L	2.853	18.416415
M	3.60	23.225760
N	4.340	27.999944
P	6.380	41.161210
Q	11.050	71.290180
R	16.0	103.22560
T	26.0	167.74160

Las válvulas operadas por piloto, las de conexión roscadas de acero y bronce y las de seguridad empleadas en el uso en calderas generadoras de vapor, pueden o no cumplir con las áreas nominales indicadas.

CAPITULO 3

ANALISIS DEL SOFTWARE PARA LOS SISTEMAS DE RELEVO DE PRESIÓN



The screenshot displays the SimSci INPLANT software interface. The main window shows a piping diagram with several valves. A 'Valve Data' dialog box is open, providing configuration options for a valve. The dialog includes fields for Class Description, Class Name, Valve Type, Discharge Coefficients (Gas, Liquid, Leung), Overpressure, and buttons for selecting standard valve size, back pressure curves, and rated valve sizes.

Valve Data	
Class Description	NewClass1
Class Name	NC01
Valve Type	[Dropdown]
<input checked="" type="checkbox"/> Select Standard Valve Size	
Overpressure	110.00 %
Discharge Coefficients	
Gas	0.9750
Liquid	0.6500
Leung	0.9750
Liquid Back Pressure Curve...	
Gas Back Pressure Curve...	
Rated Valve Sizes...	

3 Diseño del cabezal de relevo

En las últimas dos décadas, el número de accidentes que envuelven el escape de sustancias peligrosas dentro del aire circundante, tierra y agua, ha crecido dramáticamente. Los principales sucesos causan pérdidas humanas y daños irreparables al ambiente, por lo cual, existe un enfoque especial, en el ámbito mundial, en las propiedades de diseño, mantenimiento y operación de los sistemas de relevo. Adicionalmente, nuevas regulaciones han pasado en muchos países definiendo los mínimos requerimientos para el diseño y operación de los sistemas de seguridad.

Haciendo énfasis a la industria de la computación, que sustituyeron la generación de documentos y dirección, muy pocos programas han ayudado al ingeniero en la práctica del diseño de los servicios de relevo o el análisis de los sistemas ya existentes. Los ingenieros de hoy en día no tienen el tiempo suficiente para aprender los programas complejos que requieren grandes equipos de computo. Adicionalmente, estos programas necesitan trabajar, sin contratiempos, en un ambiente adecuado de tal manera que pueda intercambiar información, fácil y rápidamente, con otros programas, además de tener una estructura abierta que permita la implementación de la tecnología termodinámica y de flujo de fluidos así como la generación de reportes adecuados por personal promedio en el campo.

Para tal caso, los simuladores de la compañía SimSci, INPLANT™ y Visual Flare™ además del realizado dentro del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) fueron desarrollados para reunir las necesidades, día a día, de los ingenieros en la práctica. Usando las técnicas de programación, los simuladores combinan las mejores tecnologías disponibles en las áreas de termodinámica y flujo de fluidos dentro de una simulación, orientada visualmente, ambiental donde el usuario, simplemente, coloca el sistema a ser simulado moviendo y especificando los componentes dentro de un diagrama de flujo principal. El usuario puede proporcionar más detalles, apropiados obviamente, o simplemente introducir los componentes del sistema además de los datos.



3.1 Diseño de sistemas de relevo de presión (IMP). Soporte Técnico

3.1.1 Caída de presión

La ecuación desarrollada por Conison (1960) esta basada en condiciones conocidas a la descarga o determinadas por medio de la ecuación de Crocker para la presión crítica; es el método más aceptado para el cálculo de cabezales y subcabezales.

En la ecuación se asume que la temperatura es constante, es decir, que para su aplicación, debe hacerse el cálculo en tramos de longitud pequeña en los cuales se pueda asumir temperatura constante, haciéndose la consideración de variación de temperaturas entre los distintos tramos.

$$P_1 = \left[P_2^2 + \frac{(1.11970254E-6)(W^2)(P_2)}{(d^4)(\rho_2)} \left(\frac{1}{2} K_f + L_n \frac{P_1}{P_2} \right) \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

Donde

W = flujo másico, lb/hr

ρ_2 = densidad del gas a la salida, lb/ft³

P₁ = presión promedio a la entrada de la línea, lb/in²

P₂ = presión promedio al término de la línea, lb/in²

d = diámetro interno de la tubería, ft

$$K_r = f \frac{L}{D}$$

El cálculo del factor de fricción, f, se hará mediante la ecuación de Colebrook aceptada universalmente.

En la región de flujo turbulento

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.2)$$

y en la región laminar

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (3.3)$$

Como puede observarse para el cálculo del factor de fricción, f, se requiere conocer el número de Reynolds, el cual será definido como:

$$\text{Re} = 6.31 * \left(\frac{W}{d\mu} \right) \quad (3.4)$$

3.1.2 Caída de presión para válvulas y accesorios

El cálculo de longitudes equivalentes de tubería para accesorios y válvulas esta basada en el método de coeficientes de resistencia, "K".

El coeficiente K se define de la siguiente manera:

$$K = f * \left(\frac{L'}{D} \right) \quad (3.5)$$

La relación L'/D, es la longitud equivalente en diámetros de tubería recta, que causa la misma pérdida de presión que el obstáculo, en las mismas condiciones de flujo.

3.1.3 Cálculo de variables y propiedades medias

a) Viscosidad

Para un gas, excepto agua e hidrógeno, la viscosidad es determinada a partir de la ecuación de Wilke, obteniendo resultado semejantes a los reportados en la literatura.

$$\mu = 33.3 * \left[(MT_c)^{1/2} / V_c^{2/3} \right] * [f(1.33T_r)] \quad (3.6)$$

Donde

T_c = temperatura crítica, °K

V_c = volumen crítico, cc/gmol

μ = viscosidad, micropoise

T_r = temperatura reducida, T/T_c

$$f(1.33T_r) = 1.058T_r^{0.645} - \frac{0.261}{(1.9T_r)^{0.9 \log(1.9T_r)}}$$

Para el agua, la viscosidad se obtiene a partir de la ecuación de los estados correspondientes para los gases polares con enlaces de hidrógeno.

$$\mu = [(0.755T_r - 0.055) * Z_c^{-1.25}] / f_i \quad (3.7)$$

$$f_i = T_c^{1/6} * M^{-1/2} * P_c^{-2/3}$$

Para el hidrógeno se empleará la ecuación de Sutherland

$$\mu = 0.0084 \left(\frac{273.1 + 71.7}{T + 71.7} \right) \left(\frac{T}{273.1} \right)^{1.5} \quad (3.8)$$

b) Condiciones críticas

Si el sistema de relevo es operado a presiones altas, el flujo puede ser crítico (sónico) en algunas partes del sistema. En estos casos, una revisión del sistema deberá ser realizada para verificar si el flujo a la descarga de cada una de las tuberías es crítico; si la presión crítica, P_c , es menor a la de descarga, P_2 , el flujo es subcrítico; por el contrario, si es mayor entonces el flujo será crítico.

Para determinar las condiciones críticas se utiliza la ecuación de Crocker (1991). La presión crítica y el diámetro crítico a la descarga serán determinados como sigue:

$$P_c = \frac{W}{11400d^2} \sqrt{\frac{RT}{k(k+1)}} \quad (3.9)$$

$$d_s = \sqrt[4]{\frac{W}{11400P_c} \sqrt{\frac{RT}{k(k+1)}}} \quad (3.10)$$

Donde

W = flujo másico, lb/hr

T = temperatura del fluido, °F

k = relación de calores específicos, C_p/C_v

En los casos en que se calcule la velocidad sónica a partir del diámetro sónico

$$v_s = \frac{W}{3600 * \rho * d_s} \quad (3.11)$$

c) Temperatura de salida de las válvulas

En este caso se utilizaron 2 ecuaciones debido a la diferencia de criterios existentes, cada una de estas es opcional.

Si consideramos la expansión a través de la válvula como isoentrópica, la temperatura al final será

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}} \quad (3.12)$$

Donde

T_1 = temperatura de relevo, °R

T_2 = temperatura a la salida, °R

P_1 = presión de relevo, psia

P_2 = presión a la salida, psia

n = coeficiente isoentrópico. Se considerará a $n = k$

Este tipo de expansión es, comúnmente, encontrado en los procesos donde se tenga que trabajar a baja temperaturas, los criogénicos.

Si la expansión se considera isoentálpica entonces la temperatura final estará dada por

$$T_2 = T_1 - \mu_T (P_1 - P_2) \quad (3.13)$$

Donde μ_T es el coeficiente de Joule-Thomson el cual debe alimentarse como dato.

Por el contrario, este tipo de expansión en común para el diseño de los sistema de relevo de presión dado que describe el flujo continuo en una tubería o boquilla en la que se tiene condiciones cercanas a la realidad.

d) Calculo de las propiedades medias

Las propiedades medias, tales como la viscosidad, capacidad calorífica, coeficiente adiabático, factor de compresibilidad, peso molecular, así como las condiciones de presión y temperatura deben ser alimentadas como dato de cada válvula que releva al sistema; en los puntos intermedios del sistema, cuando se mezclen dos o más corrientes de descarga de distintas válvulas de relevo, las propiedades medias se determinan con las siguientes fórmulas:

El cálculo de las temperaturas de mezcla en cada punto del sistema estará dado por:

$$T_M = \frac{\sum (W_i * C_{p_i} * T_i)}{W_M * C_{p_M}} \quad (3.14)$$

En donde el subíndice "i" indica las válvulas que descargan a ese punto en especial.

El gasto másico W_M estará dado por

$$W_M = \sum W_i \quad (3.15)$$

De la misma manera, el gasto en moles será

$$M_M = \sum (W_i / PM_i) \quad (3.16)$$

Y por lo tanto el peso molecular de la mezcla será

$$PM_M = \sum \frac{W_i}{M_M} \quad (3.17)$$

El Cp de la mezcla es

$$Cp_M = \sum \frac{Cp_i}{M_M} \left(\frac{W_i}{PM_i} \right) \quad (3.18)$$

El coeficiente adiabático estará dado por

$$k_M = \sum \frac{k_i}{M_M} \left(\frac{W_i}{PM_i} \right) \quad (3.19)$$

El factor de compresibilidad de la mezcla, en vista de que no se conocen las condiciones sónicas, se calculará como

$$Z_M = \sum \frac{Z_i}{M_M} \left(\frac{W_i}{PM_i} \right) \quad (3.20)$$

La viscosidad de la mezcla es determinada como:

$$\eta_{mez} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \eta_i}{\sum_{j=1}^n y_j \Phi_j} \quad (3.21)$$

Donde

η_{mez} = viscosidad del gas conteniendo n componentes

η_i = viscosidad del componente puro

y_i = fracción mol del componente i

Φ_j = parámetro estimado de la siguiente manera:

$$\Phi_j = \frac{[1 + (\eta_i/\eta_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}]^2}{[8(1 + M_i/M_j)]^{1/2}}$$

$$\Phi_j = \left(\frac{\eta_j}{\eta_i} \right) \left(\frac{M_i}{M_j} \right) \Phi_j$$

3.1.4 Secuencia de cálculo

1.- Las siguientes consideraciones han sido tomadas para poder efectuar los cálculos

- a) Existe una presión conocida al final del sistema, ya sea en el tanque o en el quemador, la cual se encuentra fija y que el programa cambiará y avisará, en el caso del cálculo solamente de contrapresiones, cuando esta presión sea menor a la crítica y el flujo sea sónico
- b) El cálculo de las válvulas se ha efectuado con anterioridad, de esta forma se fija la presión y la temperatura de relevo, así como el tamaño del orificio y la máxima contrapresión permisible (en el caso de no alimentarse esta, se calculará como el 30% de la presión de relevo)
- c) Es conocido el gasto a relevar para las válvulas en una determinada falla, así como las propiedades físicas medias del gas a relevar, previamente calculadas, para ese caso

d) Se conoce la configuración geométrica del sistema de relevo, así como sus longitudes rectas de tubería

e) Se considerará flujo isotérmico a lo largo de toda la tubería, sin entrada ni salida de calor a los alrededores, y sin cambio en la temperatura para un mismo tramo de tubería debido a la expansión del gas

2.- Establecimiento de la secuencia de cálculo

Llamaremos sistemas a los tramos simples de tubería que no están conectados directamente a una válvula de desfogue y serán válvulas aquellos tramos de tubería unidos directamente a una válvula.

Como se conoce la geometría del sistema de relevo se sabe a que sistema llegará cada válvula o sistema.

Para establecer la secuencia de cálculo u orden se seguirán los siguientes criterios

a. Se iniciará siempre por el sistema final (sistema 1) el cual tendrá presión final fija

b. Se ve que sistemas llegan a este sistema 1, en caso de que alguno de estos corresponda a una válvula se calculará primero, si hay 2 o más se selecciona uno y se deja pendiente el otro

c. Para el sistema seleccionado se sigue un procedimiento similar al sistema 1

d. Cuando a un sistema lleguen solamente válvulas, se calcularán y se considerará terminado por esa rama, y se proseguirá con los sistemas pendientes.

Es necesario hacer notar que la orden de cálculo será seleccionado por el programa y no por el usuario que solamente se limitará a proporcionar la configuración y las válvulas que relevan en cada falla.

3.- Dimensionamiento

Se seguirá el orden del cálculo anterior. Se calculará primero el diámetro sónico para el sistema en cuestión, con este diámetro se calcula su contrapresión y se compara con su máxima contrapresión permitida (si corresponde a una válvula está será la máxima contrapresión a la salida de la válvula, si es n sistema será la menos de estas contrapresiones permitidas de las válvulas que descarguen a este sistema), si esta es mayor se aumenta el diámetro al siguiente comercial y se repite el proceso.

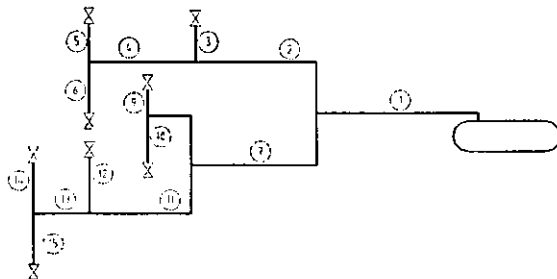


Figura 3.1. Numeración de los sistemas

Cuando se llega a un diámetro que permita la contrapresión deseada se pasa al siguiente sistema en el orden de cálculo.

En el caso de que en un sistema se llegue a un diámetro mayor de aquel del cual depende, se aumentará el diámetro de este último sistema y se reinicia el cálculo para el siguiente sistema.

En el caso especial de válvulas, existe la limitante de que el diámetro de estas válvulas no sea mayor de 2 veces el diámetro del orificio de la válvula.

4.- Cálculo de la contrapresión.

Se sigue también la orden de cálculo, utilizando la ecuación (1) para contrapresiones pero estas no se comparan ni tampoco se alteran los diámetros dados.

También se calcula el diámetro sónico, pero este solo sirve como información adicional.



3.2 INPLANT™ (Simsci). Alcance y objetivo.

INPLANT™ es un simulador de flujo de fluidos a régimen permanente para determinar los flujos, caídas de presión y transferencia de calor en tuberías únicas y redes de tuberías. Sus aplicaciones industriales van desde químicos inorgánicos pasando por petroquímicos hasta refinación; puede ser usado para examinar redes de tuberías de proceso, sistema de quemadores y servicios a redes. El modus operandi del INPLANT™ puede ser resumido en 5 subcategorías:

a. **Elementos de flujo.** El INPLANT™ puede ser usado para la simulación del flujo de fluidos en una sola o múltiples fases a través de una combinación de tuberías, accesorios y detalle de los equipos de proceso. En INPLANT™, los tubos, accesorios y equipos de proceso serán, colectivamente, conocidos como *dispositivos de flujo*.

b. **Tipos de fluidos.** El INPLANT™ puede simular fluidos definidos como composicionales, por curvas de contraste (ASTM, TBP), o por medios no composicionales. Para los fluidos definidos como composicionales o de contraste, todos los componentes, los datos de las propiedades termodinámicas y de transporte estarán almacenados dentro, o creados a partir de los datos del INPLANT™ y los bancos de datos. Para fluidos definidos como no composicionales, el INPLANT™ utiliza correlaciones generadas para la determinación de los datos de propiedades físicas que el programa requiere, para llevar a cabo los cálculos de caída de presión y de transferencia de calor.

c. **Modo de cálculo.** El INPLANT™ puede ser empleado para el diseño de nuevo sistemas o la clasificación de alguno existente. Una topología de la tubería puede ser puesto en práctica, a partir de una sola cadena simple del dispositivo de flujo, a través de un sistema de quemador, acumulativa de relevo completo, hasta la red de tubería más compleja, incluyendo un grado de circuito. En configuraciones de redes, el usuario permite la fijación, casi siempre, de alguna combinación de presiones y flujos, donde el INPLANT™ resolverá para todas aquellas que permanezcan desconocidas. En el caso de un sistema de cabezal de quemador, el INPLANT™ podrá ser instruido para la determinación del diseño de una o todas las líneas y los requerimientos de las válvulas de relevo.

d. **Sistemas de tuberías.** El INPLANT™, rigurosamente, simula desde un simple tubo hasta el sistema más complejo de tuberías, con entradas y salidas múltiples. Las capacidades de la línea, la distribución del flujo en los circuitos, los efectos de la transferencia de calor, los efectos de Joule-Thompson, modelo de flujo a la entrada de la línea, velocidades de vapor y líquido, y preferencialmente la división de fases por "tes", serán todos ellos determinados con precisión.

e. **Correlaciones.** El INPLANT™ resuelve caídas de presión y ecuaciones de balance de energía, simultáneamente llevando a cabo cálculos de transferencia de calor rigurosos. Podemos escoger de más de 20 correlaciones estándar industriales para la predicción de la caída de presión.

3.2.1 Cálculo de propiedades

INPLANT™ permite al usuario escoger entre dos distintas categorías de modelos de fluido:

- > Fluido no-composicional.
- > Fluido composicional.

Todos los cálculos de transferencia de calor y caída de presión llevados a cabo por el programa usan ciertas propiedades físicas del fluido. La precisión de estas propiedades del fluido es, por lo tanto, de principal importancia en el sistema de modelo.

3.2.1.1 Modelos de fluidos no-composicionales

Existen tres tipos de fluidos bajo esta categoría:

- > Gas de una sola fase.
- > Líquido de una sola fase.
- > Vapor de agua.

Estos modelos predicen propiedades del fluido solamente a partir de las densidades del gas o líquido, y, por consiguiente, serán utilizados en el sistema donde hay poca información conocida acerca de la composición de la corriente.

a) Gas de una sola fase.

Este modelo de fluido es usado cuando la fase líquida no este presente a lo largo de toda la simulación. La gravedad específica del gas es usada para calcular las propiedades físicas necesarias:

- Compresibilidad del gas, Z.

El usuario escoge entre las correlaciones de Standing-Katz y Hall-Yarborough para determinar la compresibilidad del gas (Z-factor). El dato de Standing-Katz fue tomado a partir de experimentos con gas natural, y el resultado del factor Z estará relacionado con la gravedad específica precisada a la entrada. Standing-Katz correlaciona la existencia de contaminantes tales como nitrógeno, dióxido de carbono o sulfito de hidrógeno. Ambos métodos correlacionan el factor Z como una función de la gravedad específica, temperatura y presión.

- Densidad del gas, ρ_g .

Esta es determinada partir de:

$$\rho_g = \frac{PM}{zRT} \quad (3.22)$$

- Viscosidad del gas, μ_g .

El usuario tendrá que escoger entre las correlaciones de Lee y de Katz. Ambas correlaciones calculan la viscosidad del gas como una función de la gravedad específica del gas, temperatura y presión. El método de Katz usa datos experimentales en el rango de 40-400°F y $1 < Pr < 20$.

Lee.

$$\mu_g = 0.0001K \exp\left(0.0433X\rho_{yg} \frac{P}{zT}\right) \quad (3.23)$$

$$K = \frac{(9.4 + 0.02M)T_A^{1.5}}{(209 + 19M + T_A)}$$

$$X = 3.5 + \frac{986}{T_A} + 0.01M$$

Donde

T_A = temperatura, °R.

- Calor específico del gas, C_{pg} .

El calor específico es calculado a partir de la siguiente relación:

$$C_{pg} = 0.39 + 0.00085(T - 100) \quad (3.24)$$

Donde

T = temperatura, °F.

C_{pg} = capacidad calorífica, Btu/lb.

- b) Líquido en una sola fase.

El modelo de fluido líquido en una sola fase es usada donde no hay fase gas presente a lo largo de la simulación. La gravedad específica del líquido es usada para calcular las propiedades físicas requeridas. Con el modelo de fluido de una sola fase no composicional, el usuario es capaz de especificar el líquido como agua o hidrocarburo, y accionar las correlaciones apropiadas.

- Viscosidad de líquido, μ_L .

El usuario selecciona entre las correlaciones de TUFFP (Vázquez/Beggs) y de Beal-Standing/Chew-Conally para los cálculos de viscosidad del líquido. El último método esta basado en la gravedad API de 60 o menor, y la temperatura de 300°F o menor. También, INPLANT™ fija una viscosidad mínima de 0.2 cP y una máxima de 10,000 cp para el método de Beal-Standing/Chew-Conally.

La correlación TUFFP esta basada en la gravedad que se encuentran en el rango de $16 < API < 58$, temperatura de $70 < T(^{\circ}F) < 295$, y una presión de $0 < P(\text{psig}) < 5250$.

$$\mu_L = 10^X - 1 \quad (3.25)$$

$$X = \frac{10^{3.0324 - 0.02023API}}{T^{1.163}}$$

- Viscosidad del agua, μ_w .

El usuario escoge entre los métodos de Beal y las tablas de vapor del ASME.

c) Modelo de vapor de agua.

Este modelo envuelve una formulación presión-entalpía para determinar una presión y temperatura inicial. Para el modelado del sistema de agua con el método de vapor, INPLANT™ emplea el método dado tabla 3.1 para determinar las propiedades del fluido.

3.2.1.2 Modelos de fluidos composicional.

El modelo de fluido composicional es un método para describir un flujo de vapor basado en su componentes puros y otros pseudocomponentes. Las divisiones de fase de equilibrio y las propiedades de fase homogénea serán determinadas por combinación de las propiedades de los constituyentes de la corriente.

Tabla 3.1. Métodos para calcular las propiedades del vapor

Propiedad	Método
Calidad del vapor y entalpía.	Paquete de vapor de SimSci.
Viscosidad del vapor.	Libro de componente de SimSci.
Entalpía del agua.	Paquete de vapor de SimSci.
Viscosidad del agua.	Dato de Bingham & Jackson.
Densidades del vapor y del agua.	Tablas de vapor de ASME.

3.2.1.3 Modelos de fluidos composicional.

El modelo de fluido composicional es un método para describir un flujo de vapor basado en su componentes puros y otros pseudocomponentes. Las divisiones de fase de equilibrio y las propiedades de fase homogénea serán determinadas por combinación de las propiedades de los constituyentes de la corriente.

La precisión de un modelo de fluido composicional depende de la precisión de las propiedades de los componentes puros, la precisión y aplicabilidad de las propiedades termodinámicas (división de fases, entalpía y densidad) seleccionadas, y la precisión de las correlaciones de mezclado usado en los cálculos de propiedades de transporte.

Las siguientes propiedades serán determinadas para cada uno de los componentes:

- Valor de equilibrio, K (separación de fases)
- Entalpías para gas y líquido
- Densidades para gas y líquido
- Viscosidad para gas y líquido
- Tensión superficial
- Conductividad térmica del gas y líquido

3.2.1.3.1 Valores de equilibrio, K.

Los valores de equilibrio, K, serán usados para predecir la separación de fases a una composición, temperatura y presión dada.

La tabla 3.2, lista los métodos para los valores de K disponibles en INPLANT™. Algunas ecuaciones de estado requieren propiedades de los componentes, tales como la temperatura crítica, presión crítica y el factor acéntrico. Para componentes puros, esta información estará disponible en el banco de datos del INPLANT™, pero para pseudocomponentes de petróleo esta información deberá ser determinada empíricamente.

Los métodos usados y disponibles en INPLANT, para pseudocomponente serán:

- Método de Cavett, método usado en la industria
- Método Cav80, mismo al Cavett, pero usa el método del Data Book API (1980)
- Lee-Kesler.
- Twu.

3.2.1.3.2 Entalpia.

Las entalpias del fluido serán determinadas (excepto para la correlación de Johnson-Grayson) a partir de la relación:

$$H = H^* - \Delta H = H^* + RT(z - 1) + \int_v^1 \left[\left(T \frac{dP}{dT} \right)_T - P \right] dV \quad (3.26)$$

Donde

H = entalpia.

H* = entalpia del gas ideal de la mezcla.

ΔH = desviación de la entalpia para la mezcla.

La tabla 3.3 lista las correlaciones de las entalpias disponibles en INPLANT™.

Tabla 3.2. Correlaciones para la constante de equilibrio, K

Correlación	Ecuación de estado	Notas
Soave-Redlich-Kwong	Soave-Redlich-Kwong	<ol style="list-style-type: none"> 1. Da resultados razonables para un rango amplio de condiciones incluyendo temperaturas criogénicas y presiones superiores a 5,000 psia. 2. Predice correctamente las fases homogéneas. 3. Predice el comportamiento de las fases en la región crítica. Sin embargo los cálculos llegan a ser inestables en el punto crítico. 4. Los resultados para los sistemas hidrógeno-aromáticos pueden ser pobres.

Peng-Robinson	Peng-Robinson	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lo listado para la ecuación de Soave-Rendlich-Kwong, aplica también en la ecuación de Peng-Robinson.
Lee-Kesler-Plöcker	Modificado	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las reglas de mezclado maneja moléculas asimétricas mejor que las reglas de mezclado de Benedict-Webb-Rubin. 2. Imprecisión cercana al punto crítico. No usado para $T_r > 0.96$.
Benedict-Webb-Rubin-Starling-Twu	Benedict-Webb-Rubin-Starling-Twu	<ol style="list-style-type: none"> 1. Genera datos para un rango completo de fluidos incluyendo gases ligeros, aceite sintético y kerosina. 2. Incorpora datos de interacción binaria de Starling modificada por Twu.
Chao-Seader	<p>Ecuación de Hildebrand para los coeficientes de actividad de líquidos.</p> <p>Ecuación de Redlich-Kwong para la fugacidad del vapor</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rangos validos: 0-500 °F; <1500 psia 2. Para hidrocarburos, excepto metano, valido para $0.5 \leq Tr \leq 1.3$. 3. No deberá ser usado cuando la concentración de H_2 y CH_4 en la fase líquida exceda el 20% de los otros gases disueltos. 4. Usa coeficientes especiales para N_2, H_2S y CO_2 desarrollados a partir de datos con < 5% de CO_2 o H_2S a < 400 F y <1000 psia 5. No recomendado para fluidos con > 5% mol de CO_2 o H_2S.
Garyson-Streed		<ol style="list-style-type: none"> 1. Rangos validos: 0-800 °F; <3000 psia 2. Extensión de la ec. Chao-Seader. 3. Usado para sistemas rico en hidrógeno y terminales pesadas. 4. Ha sido extrapolado para 1000 °F con buenos resultados.
Braun K10		<ol style="list-style-type: none"> 1. Rangos validos: >100 °F; <100 psia 2. Bueno para bajas presiones 3. Bueno para terminales pesadas 4. Se encuentran resultados razonables por encima de 1200 °F

Tabla 3.3. Correlaciones de la entalpia para fluidos composicionales

Correlación	Nota
Soave-Redlich-Kwong	<ol style="list-style-type: none"> 1. Comparación con los valores experimentales mostrando una desviación promedio de 1 Btu/lb 2. Produce resultados razonables para no-hidrocarburos cuando, T_c, P_c sean conocidos
Peng-Robinson	<ol style="list-style-type: none"> 1. Esencialmente la misma como la correlación de Soave-Redlich-Kwong excepto que se usa la ecuación de Peng-Robinson 2. Ver las notas de arriba para la ecuación de Soave-Redlich-Kwong
Lee-Kesler	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recomendada por el API Data Book 2. Buenos resultados para una amplia variedad de mezclas de hidrocarburos 3. Cubre un amplio rango de presión y temperatura reducida 4. Da resultados razonables para mezclas químicas, ligeramente, polares 5. Usa un tercer parámetro correspondiente al principio de estado. 6. Desarrollado a partir de 2 ecuaciones de estado análogas a las ecuaciones de Benedict-Webb-Rubin.
Lee-Kesler-Pocker	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modificación de la correlación de Lee-Kesler. 2. Ver las notas de arriba para Lee-Kesler.
Benedict-Webb-Rubin-Starling-Twu.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calcula desviaciones a partir de las entalpias del gas ideal.
Curl-Pitzer	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bueno para $Pr \leq 10$, $0.35 \leq Tr \leq 4.0$ para líquidos, $0.6 \leq Tr \leq 4.0$ para gases. 2. Limitado para mezclas no polares. 3. Predice entalpias para ambas fases. 4. Relaciona la desviación a partir de la entalpia del gas ideal para la Tr, Pr y para la mezcla. 5. Usa el factor acéntrico molar promedio y calcula para la mezcla, el T_c y P_c a partir de la regla de mezclado de Stewart, Buckhart y Voo
Johnson-Grayson	<ol style="list-style-type: none"> 1. Esencialmente, una correlación de la entalpia ideal para fracciones del petróleo. 2. Util para las terminales pesadas entre 0 y 1200 °F. Puede ser extrapolada para temperatura superiores. 3. No deberá ser usada para C_4 - C_5 o mezclas ligeras. 4. Calcula correcciones en gases usando la ecuación de Curl-Pitzer.

3.2.2 Cálculo de la caída de presión

Excepto cuando se especifique lo contrario, el término fluido es usado para denotar una sola fase gaseosa, fase líquida o una corriente de fases múltiples compuesto de una sola fase gaseosa y una o más fases líquidas.

Esta ecuación de caída de presión la cual, dada en su forma más simple, es derivada a partir de la ecuación general de energía:

$$\Delta P_{TOT} = \Delta P_{ELEV} + \Delta P_{FRIC} + \Delta P_{ACCEL} \quad (3.27)$$

Para determinar cada uno de los términos, existen métodos para determinarlos, los cuales pueden ser utilizados individualmente o tomar distintas para cada una de las tuberías. La tabla 3.4 muestra las ecuaciones disponibles en INPLANT™ para determinar la caída de presión.

Tabla 3.4. Métodos de cálculo para la caída de presión

Líquido	Gases
Moody	Moody
Hazen-Williams	Panhandle B
	Weymouth
	American Gas Association

3.2.2.1 Caída de presión para líquidos

a) Hazen-Williams

$$Q = 15.2 E d_1^{2.63} \left[\frac{(P_1 - P_2) - (0.433 \Delta e \gamma_L)}{\gamma_L \Delta L} \right]^{0.54} \quad (3.28)$$

Donde

E = coeficiente de Hazen-Williams

Q = flujo volumétrico, bbl/día

Δe = elevación, ft

d_1 = diámetro, in

b) Moody

$$\Delta P = \left[\frac{f_p V^2}{2g_c d^{1.44}} \right]_f + \left[\frac{\rho g \text{ sen } \phi}{144 g_c} \right]_e \quad (3.29a)$$

$$N_{Re} = 1488 \frac{\rho V d}{\mu} \quad (3.29b)$$

El factor de fricción, f, es determinado a partir del diagrama de Moody

3.2.2.2 Caída de presión para gases

a) Panhandle B

$$\Delta P = \left[\frac{f_p V^2}{2g_c d 144} \right]_f + \left[\frac{\rho g \text{ sen } \phi}{144g_c} \right] \quad (3.30a)$$

Donde el factor de fricción es obtenido a partir de la ecuación:

$$f = \frac{1}{94.2} \left(\frac{\rho}{V \rho d T_b} \right)^{0.04} \quad (3.30b)$$

b) Weymouth

La ecuación de la caída de presión es igual a la de Panhandle B (ecuación 30a)

El factor de fricción es determinado a partir de la siguiente ecuación

$$f = \frac{1}{71.6d^{0.33}} \quad (3.31)$$

c) Moody

$$\Delta P = \left[\frac{f_p V^2}{2g_c d 144} \right]_f + \left[\frac{\rho g \text{ sen } \phi}{144g_c} \right]_e + \left[\frac{\rho V_1 (V_1 - V_2)}{144g_c \Delta L} \right]_{acc} \quad (3.32a)$$

Donde, el factor de fricción esta dado por:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{f}} \right) = 1.74 - 2 \text{Log} \left(\frac{2\varepsilon}{d} + \frac{18.7}{N_{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.32b)$$

d) American Gas Association

$$Q_g = 38.77 d_1^{5/2} f^{1/2} E 5280^{1/2} \left[\frac{\left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{\gamma_g P_{avg}^2} Z_{avg} T_{avg} - 0.0375 \Delta e \right)^{0.5}}{\Delta L} \right] \quad (3.33a)$$

Donde

- E = coeficiente
- De = elevación, ft
- D₁ = diámetro, in

El factor de fricción estará dada por las siguientes ecuaciones.

Para N_{Re} menor o igual a 2000

$$f = \frac{N_{Re}}{16} \quad (3.33b)$$

Para N_{Re} mayor a 2000

$$f = f_4^2; f_4 = \min(f_2, f_3); f_3 = 4\text{Log}\left(\frac{3.7}{\varepsilon/d}\right); f_2 = 3.84\text{Log}\left(\frac{N_{Re}}{1.4124f_1}\right); f_1 = 4\text{Log}\left(\frac{N_{Re}}{f_1}\right) - 0.6 \quad (3.33c)$$

3.2.2.3 Accesorios

INPLANT™ permite especificar los accesorios de la tubería mostrados en la tabla 5 como dispositivos dentro de una línea.

Con la excepción de las boquillas y venturi, la caída de presión para todos los accesorios serán determinados por el método de longitudes equivalentes ("K"). Las ecuaciones de la caída de presión para las boquillas y los venturis serán tomados del manual de fluidos dinámicos aplicados de Blevins, Robert.

Tabla 3.5. Accesorios modelados por INPLANT™

Expansión
 Reducciones
 Válvulas
 Codos
 Orificios
 Boquillas
 Medidor Venturi
 Entradas
 Salidas
 Te

3.2.3 Método de solución de relevo del quemador.

El análisis de los sistemas de relevo, cuando los fluidos del proceso releven como consecuencia de los disturbios del proceso, requiere un modelo especial. Como regla general, se conocen las cargas de relevo y la presión en la base del quemador. Para la carga total en el sistema, la contrapresión de cada una de las válvulas de relevo deberá ser determinada. Una consideración importante es que muchas de las líneas suelen estar operando a flujo crítico en las conexiones o puntos de expansión del sistema. Todos esto requerirá un método de cálculo más complejo el cual maneje situaciones de flujo crítico, así como de resolver una red acumulativa.

El algoritmo FLARE esta diseñado para redes de árbol acumulativas con una sola terminal (la base del quemador). En resumen, el fluido del modelo deberá ser composicional, y la red deberá contener, únicamente, tuberías y accesorios. Ningún equipo deberá ser incluido, excepto el recipiente separador de líquido en la línea de la terminal, si es necesario.

El algoritmo FLARE en INPLANT™ asume que no hay transferencia de calor entre la tubería y los alrededores. La entalpía total del fluido en la fuente sé, entonces, asume igual a la entalpía de la terminal.

El INPLANT™ inicia los cálculos en la cadena de la terminal. Primero se verifica si la presión en la terminal (salida de la cadena) es menor a la presión crítica del fluido, si es así, la presión es recalculada hasta la presión de flujo crítico, y el flujo será flujo crítico a la salida. Una discontinuidad de la presión (onda de choque) ocurrirá a la salida de la cadena debido a la condición de flujo crítico.

INPLANT™ calcula iterativamente la presión a la entrada de la cadena a partir de la presión dada a la salida de la cadena. Para flujo compresible a alta velocidad, un pequeño cambio en la presión de entrada causará un gran cambio a la salida. Situaciones pueden surgir cuando la presión a la entrada ha sido quebrantada dentro de la tolerancia, pero la presión de salida no se encontrará dentro de esa tolerancia. En tal caso, el INPLANT™ usa la presión más alta de la entrada (más conservativa) como la solución para la cadena. Una discontinuidad de la presión anómala será mostrada en el reporte final, si esta situación es alcanzada.

El algoritmo de arriba es, entonces, repetido aplicado al siguiente ajuste de la corriente arriba de la cadena, hasta que todas las cadenas hayan sido calculadas.

El diseño de la tubería y las válvulas de relevo puede también verse envuelto. La restricción para el diseño de la tubería deberá ser el porcentaje del flux másico crítico (o velocidad) y/o una máxima contrapresión para la válvula de relevo. Basado en el cálculo de la contrapresión y la presión de relevo, especificado por el usuario, el INPLANT™ determinará el tamaño de la válvula.

El diseño de la tubería es tal que el tamaño de la tubería a la entrada será, casi siempre, mayor al tamaño de la tubería de salida. INPLANT™ inicia iterando con el tamaño de la tubería, y si ninguna de las restricciones es violada, INPLANT™ no aprobará un tamaño más pequeño. INPLANT™ también diseña accesorios.

3.2.3.1 Flujo crítico en tuberías.

En algunos sistemas de relevo, la velocidad del fluido alcanza la velocidad crítica. Generalmente, esto ocurre cuando el fluido se expande dentro de un cabezal de gran diámetro. Es vital que esta condición sea detectada, dado que el flujo nunca podrá exceder el valor crítico. La falla identificada para el flujo crítico producirá una caída de presión incorrecta en el sistema de quemadores.

El algoritmo de relevo FLARE en INPLANT™ verifica el flujo crítico para cada conexión y terminal. Si el flujo crítico es detectado, INPLANT™ determina una presión crítica para la cadena. Esto evita que una discontinuidad sea observada debido a que la presión crítica es mayor que el nodo inmediato. El reporte de salida indica donde el flujo crítico es detectado.



3.3 Visual Flare.™ (SimSci)

El programa Visual Flare™ proporciona una ingeniería de proceso con una lectura fácil y el uso de herramientas para el diseño y modelo de los sistemas de relevo, desde la válvula de relevo más simple del sistema hasta el diseño de las redes de relevo más complejas; el Visual Flare™ proporciona resultados rápidos y precisos.

Para su fácil manejo, el Visual Flare™ ofrece muchas características no disponibles en otros simuladores de su tipo. Estas características incluyen:

- Disponibilidad de manejo de quemadores múltiples.
- Circuitos de cabezales.
- Entrada de isométrico para la conexión de líneas.
- Generación automática de codos, curvas y expansiones.
- Revisión de flujos críticos en todas las uniones.
- Cálculo riguroso de la caída de presión, punto a punto, incluyendo los cálculos del equilibrio de fases.
- Exportación de datos a hojas de Excel o Lotus.
- Número ilimitado de componentes en el sistema incluyendo recipientes, válvulas de relevo, tuberías, accesorios y quemadores.
- Disponibilidad del uso de conexiones de objetos estandarizados y objetos fuentes (OLE en sus siglas en ingles) dentro del Visual Flare™.
- Cálculo de la caga de relevo definidos.

Usando cálculos termodinámicos, paso a paso, y los cálculos para determinar la caída de presión, el Visual Flare™, simultáneamente, resuelve a la par la(s) red(es) de relevo(s) más complicada(s). Esto incluye una configuración que contenga los múltiples quemadores, líneas de circuitos, y los recipientes knock-out. La revisión del flujo crítico es llevada a cabo en todos los puntos de unión y expansión dentro del sistema.

Contando con una banco de datos de componentes puros de alrededor de 250 componentes estándar, las propiedades físicas y de equilibrio del fluido serán determinados usando la ecuación de estado de SRK (Soave-Rendlich-Kwong). Esta ecuación de estado es usada en combinación con el API (códigos de la American Petroleum Institute) y otros métodos estándar industriales para determinar, con precisión, las entalpías de los fluidos, densidades y viscosidades. Para el sistema químico, se pueden proporcionar datos de componentes adicionales, incluyendo parámetros de interacción binaria. Para operaciones en refinerías, se pueden proporcionar pseudo-componentes del petróleo y curvas de destilación para caracterizar hasta el sistema más complejo.

3.3.1 Métodos termodinámicos

3.3.1.1 Equilibrio de fases.

El Visual Flare™ utiliza una ecuación de estado basado en la modificación de Soave a la ecuación de Redlich-Kwong (1972). Este modelo es usado para determinar la entalpía de salida; la energía libre de Gibbs de salida, la entropía de salida y el coeficiente de fugacidad de cada uno de los componentes de la mezcla. Las derivadas parciales de cada una de estos valores con respecto a la temperatura y al presión serán, también, determinadas.

Para una mezcla, la ecuación de Soave-Redlich-Kwong (SRK) esta definida como:

$$P = \frac{RT}{V - b_m} - \frac{\alpha_m}{V(V + b_m)} \quad (3.34)$$

Donde

$$b_m = \sum_i x_i b_i$$

$$\alpha_m = \sum_i \sum_j x_i x_j (\alpha_i \alpha_j)^{0.5} (1 - k_{ij})$$

$$\alpha_i = \alpha(T) a_{c_i}$$

$$a_{c_i} = 0.42748025 \frac{R^2 T_{c_i}^2}{P_{c_i}}$$

$$\alpha(T)_i = \left[1 + f_{w_i} \left(1 - \sqrt{T_r} \right) \right]^2$$

$$f_{w_i} = 0.48508 + 1.55171\omega_i - 0.15613\omega_i^2$$

$$b_i = 0.08664035 \frac{RT_{c_i}}{P_{c_i}}$$

y k_{ij} = coeficiente de interacción binaria

R = coeficiente de los gases

T_r = temperatura reducida

T_c = temperatura crítica

P_c = presión crítica

ω = factor acéntrico

Mientras que la función $\alpha(T)$ puede, únicamente, ser usada para temperatura subcríticas ($T_r < 1$), la ecuación de SRK es usada, posteriormente, para las regiones por arriba del punto crítico. Para estas regiones, el término $\alpha(T)$ puede ser extrapolado hacia otro punto. Más allá de este punto, las correcciones de los datos comienzan a romperse. Por esta razón, se encontró que para la región supercrítica, el término $\alpha(T)$ puede ser expresada mejor como:

$$\alpha(T) = e^{k(-T_r^2)} \quad (3.35)$$

Los parámetros c y d serán definidos, de la misma manera, a partir de la primera derivada de la raíz cuadrada de α con respecto a la temperatura a $T_r=1$ con el valor de Soave y fijando la segunda derivada igual a cero a la misma temperatura.

Con pocos o nada de datos de la interacción binaria ($k_{ij}=0.0$), la ecuación SRK funcionará tan bien con los fluidos no polares o ligeramente polares. Para una mayor precisión para los fluidos polares, es necesario definir los parámetros de interacción de cada uno de los componentes para ser usado en la simulación.

3.3.1.2 Entalpía.

Visual Flare™ asume que no existe reacción química dentro de la tubería de descarga principal, desde un recipiente fuente hasta un punto de descarga. Para determinar la entalpía del fluido, la entalpía del gas ideal es, primeramente, determinada, seguida por la corrección del fluido a partir de un gas ideal conocida como la entalpía residual.

$$h(T) = \sum_i [c_{1i} + c_{2i}T + c_{3i}T^2 + c_{4i}T^3 + c_{5i}T^4 + c_{6i}T^5] \quad (3.36)$$

Las constantes c_1 hasta c_6 serán proporcionados para cada uno de los componentes puros en el banco de datos en un rango de temperatura. Si la temperatura esta por debajo por el rango dado, entonces la entalpía esta dada por:

$$h(T) = \sum_i [c_{9i} + c_{10i}T^{c_{11i}}] \quad (3.37)$$

Donde c_9 hasta c_{11} estarán proporcionados para cada uno de los componentes. Si la temperatura es mayor que la parte superior del rango de temperatura, entonces la entalpía es extrapolada:

$$h(T) = \sum_i \left[h(T_{alta})_i + \frac{d(h(T_{alta})_i)}{dT} (T - T_{alta}) \right] \quad (3.38)$$

El residual de la entalpía es, entonces, determinada usando la ecuación de estado.

3.3.2 Propiedades físicas.

3.3.2.1 Densidad

La densidad del vapor será determinada a partir de la ecuación de estado de Soave-Rendlich-Kwong (SRK).

La densidad del líquido o mezcla de líquidos serán determinadas usando el método API. Este método envuelve las densidades de los componentes puros que componen la mezcla y ajustar la densidad de la mezcla a las condiciones de operación.

Las densidades de los componentes puros serán combinados usando:

$$\rho_L = \frac{\sum x_i MW_i}{\sum \frac{x_i MW_i}{\rho_{fi}}} \quad (3.39)$$

La densidad de la mezcla es corregida para las condiciones de flujo como:

$$\rho_f = \rho_s \frac{c_2}{c_1}$$

$$c = A_0 + A_1 T_r + A_2 T_r^2 + A_3 T_r^3 \quad (3.40)$$

$$A = B_0 + B_1 P_r + B_2 P_r^2 + B_3 P_r^3 + B_4 P_r^4$$

Donde c_1 es el estado de referencia y c_2 es la temperatura y presión del flujo. Las constantes B_0 hasta B_4 para determinar A_0 hasta A_3 serán dados por el API Technical Data Book.

3.3.2.2 Viscosidad

Para la fase vapor, el método de Chung es usado para determinar la viscosidad de la mezcla.

$$\mu_v = \mu_v^* \left[\frac{36.344(MT_c)^{1/2}}{V_c^{2/3}} \right] \quad (3.41)$$

Donde

μ_v = viscosidad

M = peso molecular

T_c = temperatura crítica

V_c = volumen crítico

$$\mu_v^* = \frac{(T^*)^{1/2}}{\Omega_v} \left\{ F_c \left[(G_2)^{-1} + E_6 y \right] \right\} + \mu_v^{**}$$

$$y = \frac{\rho V_c}{6}$$

$$G_1 = \frac{1 - 0.5y}{(1 - y)^3}$$

$$G_2 = \frac{E \left[(1 - \exp(-E_4 y)) / y \right] + E_2 G_1 \exp(E_5 y) + E G_1}{E_1 E_4 + E_2 + E_3}$$

$$\mu_v^{**} = E_7 y^2 G_2 \exp \left[E_8 + E_9 (T^*)^{-1} + E_{10} (T^*)^{-2} \right]$$

$$\frac{\varepsilon}{\kappa} = \frac{T_c}{1.2593}$$

$$\sigma = 0.809 V_c^{1/3}$$

$$T^* = 1.2593 T_r$$

Para gases diluidos, la viscosidad puede ser representada como:

$$\mu_v = 40.785 \frac{F_c (MT)^{1/2}}{V_c^{2/3} \Omega_v} \quad (3.42)$$

$$F_c = 1 - 0.2756\omega + 0.059035\mu_r^4 + \kappa$$

$$\mu_r = 131.3 \frac{\mu}{(V_c T_c)^{1/2}}$$

$$\rho = \frac{26.69 F_{cm} (M_m T)^{1/2}}{\sigma^2 \Omega_v}$$

Para determinar la viscosidad de la mezcla líquida, Visual Flare™ usa un modelo modificado del modelo de Andrade:

$$\ln \mu_L = A + \frac{B}{T} + CT + DT^2 \quad (3.43)$$

Donde A, B, C y D serán las propiedades de los componentes definidos en el banco de datos del Visual Flare™.

Para bajas temperaturas ($T_r < 0.10$), la viscosidad de la mezcla total será determinada a partir de:

$$\mu_L = e^{\sum x_i \ln \mu_{Li}} \quad (3.44a)$$

Para altas temperaturas ($T_r > 0.76$ y $T_r < 0.98$) la viscosidad de la mezcla será determinada usando el modelo de Letsou-Stiel:

$$\mu_L E = (\mu_L E)^0 + \omega_m (\mu_L E)^1 \quad (3.44b)$$

$$\text{siendo } E = 2.1735 \times 10^6 \frac{T_{cm}^{1/6}}{M_m^{1/2} P_{cm}^{2/3}}$$

Donde los subíndices m corresponden a la mezcla.

3.3.2.3 Tensión superficial

La tensión superficial es determinada usando la correlación de Hakim-Steinberg-Stiel.

Para un componente puro

$$\sigma_L = P_{cm}^{2/3} T_{cm}^{1/3} Q_p \left(\frac{1 - T_r}{0.4} \right)^m \quad (3.45)$$

Donde

$$Q_p = 0.1574 + 0.359\omega_i - 1.769\chi_i - 13.69\chi_i^2 - 0.510\omega_i^2 + 1.298\omega_i\chi_i$$

$$m = 1.210 + 0.5385\omega_i - 14.61\chi_i - 32.07\chi_i^2 - 1.655\omega_i^2 + 22.03\omega_i\chi_i$$

ω = factor acéntrico

χ = factor polar de Stiel

Para el líquido

$$\sigma_L = \sum_i \chi_i (\sigma_{Li})^n \quad (3.46)$$

3.3.3 Caída de presión

Para propósitos ingenieriles, la región de flujo laminar esta definida a un número de Reynolds ($Re=Dv\rho/\mu_e$) menor a 2000 y para la región turbulenta mayor a 4000. La región entre 2000 y 4000 es considerada como una zona de transición y puede ser, comúnmente, impredecible. Visual Flare™ define el corte entre regiones, laminar y turbulenta, en un Reynolds de 2000.

Para la región laminar, la caída de presión es una función de la fricción, debido a la interacción del fluido con la pared, y el perfil de velocidad estará integrado a lo largo de la tubería, para obtener un gradiente de presión total, es decir:

$$v = \frac{d^2}{32\mu} \left(\frac{dP}{dL} \right) \quad (3.47)$$

lo cual dará:

$$f = \frac{64\mu}{\rho v d} = \frac{64}{Re} \quad (3.48)$$

Para el flujo turbulento, el gradiente de velocidad es afectado, enormemente, por las características de la pared del tubo, siendo la más importante la rugosidad de la tubería.

El efecto de la rugosidad de la tubería no es debido a las dimensiones absolutas, pero sí a la dimensión relativa de la rugosidad de la tubería con respecto al diámetro de la misma:

$$\varepsilon = \frac{\text{rugosidad}_{\text{absoluta}}}{\text{diámetro}_{\text{tubería}}} = \text{rugosidad}_{\text{relativa}} \quad (3.49)$$

El gradiente de presión para flujo turbulento es debido a la fricción con la pared de la tubería así como de la fricción interna del fluido debido al mezclado.

Colebrook propuso una ecuación empírica describiendo la variación del factor de fricción con el número de Reynolds para las regiones de transición y turbulenta. Esta ecuación es la base para los distintos diagramas del factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \text{Log} \left(\frac{2\varepsilon}{d} - \frac{18.7}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.50)$$

Dado que la ecuación de Colebrook deberá ser resuelta por prueba y error, las ecuaciones de Zigrang-Sylvester o Jain podrán ser usadas para generar una estimación inicial para la solución iterativa.

Zigrang-Sylvester

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\text{Log}\left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} - \frac{5.02}{R_e} \text{Log}\left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} - \frac{13}{R_e}\right)\right) \quad (3.51)$$

Jain

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2\text{Log}\left(\frac{\varepsilon}{d} + \frac{21.25}{R_e^{0.9}}\right) \quad (3.52)$$

3.3.3.1 Caída de presión para accesorios

Visual Flare™ emplea dos métodos para determinar la caída de presión a través de las válvulas y los accesorios: el método de longitud equivalente (método L/D) y el método de pérdida de la cabeza de velocidad (método de la K).

3.3.4 Solución de una red de relevo.

El corazón del Visual Flare™ es el algoritmo de cálculo para dar solución a una red de relevo. Este algoritmo es usado para analizar todas las formas de una red de relevo, que van desde un sistema de una sola conexión hasta redes, de múltiples conexiones, más complejas.

Los pasos que envuelve el análisis de una red de relevo serán:

- Iniciar con cada uno de los recipientes fuentes, resolviendo todas las líneas de entrada hasta las válvulas de relevo.
- Iniciar con las salidas para todas las válvulas de relevo, determinando todas las posibles geometrías de flujo.
- Estimar todos los flujos en los accesorios de división, tes. La división en las tes está definida como tes en donde exista un solo flujo dentro de la te y de dos flujos fuera de esta.
- Los circuitos, a través de las posibles geometrías, y los esfuerzos serán, simultáneamente, resueltos para el flujo; basado en la estimación inicial de cada te. Si la solución no es encontrada para una geometría de flujo particular, se seguirá con la siguiente.
- Una solución es alcanzada cuando los flujos, en las conexiones, sean determinados satisfaciendo todas las restricciones de presión del sistema. La restricción de presión para la red será que las presiones a la salida deberán satisfacer los valores a la entrada y las presiones de salida deberán estar dentro de la tolerancia de convergencia.
- Dada la presión a la entrada, la contrapresión calculada y el flujo para cada una de las válvulas de relevo, se determinará el área requerida y el tipo de válvula a emplearse.

Un aspecto clave para el análisis de los sistemas de relevo, es el modelo apropiado del flujo crítico dentro de la red. El flujo crítico en una red puede ocurrir en los siguientes puntos del sistema:

- En las tes, donde una línea de alimentación pequeña está dentro de una tubería de gran tamaño.
- Los puntos de expansión, donde un diámetro de tubería es, repentinamente, incrementado.
- A la salida de una línea de desagüe.
- A través de una válvula de relevo.

El flujo crítico no puede ocurrir dentro de una sección recta de tubería.

El Visual Flare™ usa el siguiente procedimiento para determinar la caída de presión a las condiciones críticas, cuando estas ocurren:

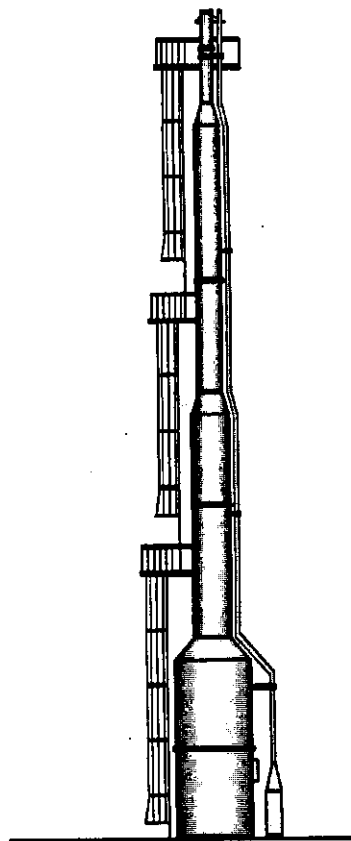
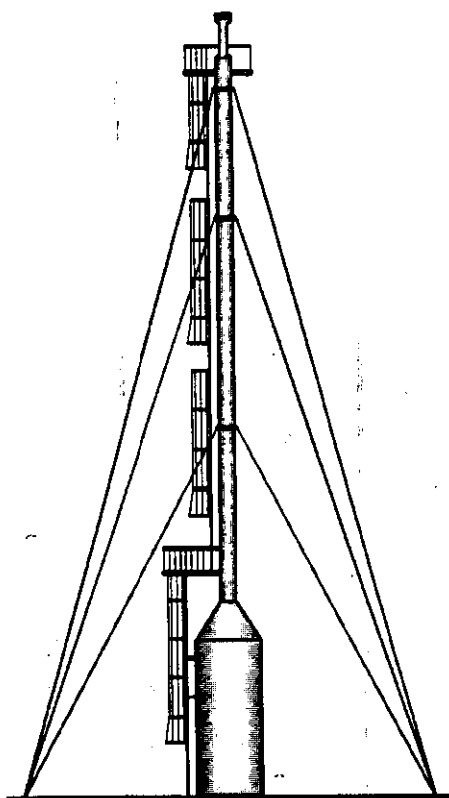
- Determinar primero la caída de presión y la presión a contracorriente, a partir de la longitud equivalente o valor K.
- Dada la presión a contracorriente, las propiedades del fluido y la velocidad crítica serán determinadas.
- Si la velocidad actual a la presión determinada excede la velocidad crítica calculada, la presión a contracorriente es aumentada hasta que la nueva presión a contracorriente produzca una velocidad en la tubería igual a la velocidad crítica.

El método usado en el Visual Flare™ para resolver las redes de relevo complejas impone una serie de limitaciones sobre la red a ser resuelta. Estas limitaciones serán:

- Se asume que no habrá transferencia de calor a los alrededores en todas las líneas.
- Las líneas de entrada, desde un recipiente fuente hasta las válvulas de relevo no podrán ser conjuntada. Múltiples válvulas pueden converger a una sola válvula o múltiples válvulas pueden ser divididas fuera de un solo recipiente fuente.
- La presión, en todas las salidas, deberá ser conocida. Es decir, generalmente, se asume que la presión en la base del quemador es conocida.

CAPITULO 4

QUEMADORES DE CAMPO



4 Recipientes de relevo de presión y quemadores de campo

4.1 Recipientes de relevo

Los líquidos que suelen encontrarse dentro de la corriente de gases de relevo o que pueden condensar en el cabezal de relevo y las líneas de transferencia, serán separados por un recipiente separador de líquidos (*knock-out*), debido a que pueden extinguir la flama o causar una combustión irregular y, por consecuencia, la formación de humaredas. El recipiente separador es, generalmente, un recipiente horizontal o vertical localizado en la base del quemador, o un recipiente vertical localizado internamente en la base del quemador.

Para el diseño de un sistema de quemado que maneje relevos de emergencia, estos recipientes deberán estar diseñados para condiciones de peligro, por ejemplo, pérdidas de agua de enfriamiento o depresurización total de una unidad de proceso; por otro lado, si el sistema de quemado está dedicado al control de las corrientes de VOC (compuestos orgánicos volátiles) del relevo, el diseño de los recipientes estará basado, principalmente, en el flujo de gas de relevo bajo consideraciones dadas por el líquido que entra.

Los recipientes de relevo es una parte importante en el concepto de seguridad. Dentro de los parámetros de diseño aceptables, es necesario revisar y comprender los procedimientos de diseño para derivar un mecanismo capaz de describir rápida y eficientemente la separación líquido-gas y la acumulación del líquido en el recipiente.

Por otro lado, las corrientes de relevo de los procesos serán, generalmente, pasados a través de un sello líquido antes de ir al quemador, este sello líquido puede ser un recipiente knock-out de corriente baja o estar incorporado dentro del mismo recipiente. Esto previene posibles retrocesos del fuego, causado cuando el aire, inadvertidamente, entra al sistema de quemador y la parte frontal de la flama arrastra hacia abajo dentro de la chimenea además sirve para mantener una presión positiva sobre el sistema a la descarga y actúa como un amortiguador mecánico en el quemador elevado.

4.1.1 Fundamento de la separación

La separación vapor/líquido está, generalmente, acompañada de tres etapas. La primera etapa, separación primaria, usa un separador interno de tal manera que el momentum del líquido, que entra con el vapor, cause que las gotas grandes se adhieran al separador y, por lo tanto, caigan por gravedad; la siguiente etapa, separación secundaria, es la separación por gravedad de pequeñas gotas con el vapor fluyendo a través del área vacía y; la etapa final es la eliminación de neblina, en donde muy pequeñas gotas estarán coalesciendo formando grandes gotas, las cuales serán separadas por gravedad.

Para la separación secundaria, la velocidad permisible deberá ser calculada de tal manera que el área de vacío pueda ser determinada. Llevando a cabo un balance de fuerzas sobre las gotas de líquido que sedimentan, proporciona la relación deseada. Cuando la fuerza de gravedad neta, dada por la ecuación 4.1:

$$F_G = \frac{M_p(\rho_L - \rho_V)g}{g_c \rho_V} \quad (4.1)$$

sea balanceada con la fuerza de arrastre, dada por la ecuación 4.2:

$$F_D = \frac{(\pi/8)C_D D_p^2 U_T^2 \rho_V}{g_c} \quad (4.2)$$

Las gotas de líquido pesado sedimentarán a una velocidad terminal constante, U_T . Trabajando con las ecuaciones 4.1 y 4.2, se obtiene la siguiente relación:

$$U_T = \sqrt{\frac{4gD_p(\rho_L - \rho_V)}{3C_D\rho_V}} \quad (4.3)$$

Donde

U_T = velocidad terminal, ft/seg.

g = aceleración debido a la gravedad, a 32 ft/seg².

D = diámetro de partícula, ft.

ρ_L = densidad del líquido a las condiciones de operación, lb/ft³.

ρ_V = densidad del vapor a las condiciones de operación, lb/ft³.

C = coeficiente de arrastre.

El coeficiente de arrastre, C , es una función de la forma de partícula y del número de Reynolds. Puede ser determinada a partir de la siguiente ecuación o de la figura 4.1.

$$C(\text{Re})^2 = \frac{0.95 \times 10^8 \rho_V d_p^3 (\rho_L - \rho_V)}{\mu^2} \quad (4.4)$$

Donde

μ = viscosidad del gas o vapor, cp

d_p = diámetro de la partícula, ft

La diferencia entre la velocidad vertical U_V y la velocidad terminal U_T es grande, las gotas de líquido sedimentarán afuera. Generalmente, la velocidad vertical permisible es fijada entre $0.75U_T$ y U_T . Reacomodando la ecuación 4.3 obtendremos una ecuación tipo Sauters-Brown:

$$U_T = K \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_V)}{\rho_V}} \quad (4.5)$$

En donde: $K = \sqrt{\frac{4gD_p}{3C_D}}$

Prácticamente, gotas muy pequeñas no serán separadas por gravedad. Estas gotas estarán coalesciendo para formar grandes gotas las cuales sedimentarán por gravedad.

4.2 Dimensionamiento del recipiente de relevo de presión

El diseño de los recipientes separadores es, generalmente, un proceso de prueba y error. El primer paso es determinar el tamaño del recipiente requerido para llevar a cabo una separación de líquido correcta. Las partículas de líquido serán separadas cuando: (a) el tiempo de residencia del vapor o del gas sea igual o mayor que el tiempo requerido para que la gota viaje la distancia vertical disponible a la velocidad terminal del líquido, y (b) la

velocidad vertical del gas sea, lo suficientemente, baja para permitir la salida del líquido. La velocidad vertical del vapor y del gas deberá ser, lo suficientemente, menor para prevenir que sean arrastrados tapones de líquido grandes (slugs) hacia el quemador. Debido a que el quemador puede manejar pequeñas gotas de líquido, la velocidad vertical permisible en el recipiente podrá estar basada en la necesidad de separar gotas de 300 μm hasta 600 μm de diámetro.

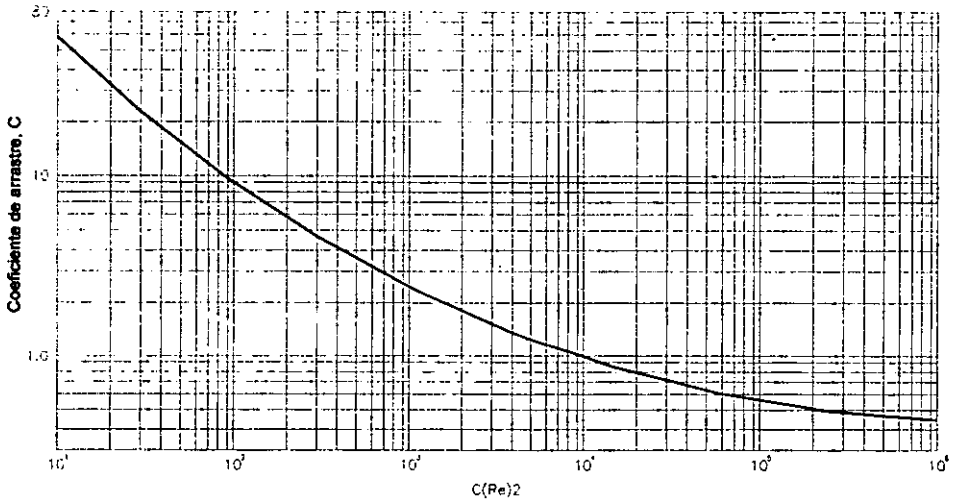


Figura 4.1. Determinación del coeficiente de arrastre, C

El segundo paso en el diseño es considerar el efecto de algún líquido almacenado en el recipiente que pueda ocasionar una reducción del volumen disponible para la descarga del líquido/vapor. Este líquido puede ser el resultado de (a) un condensado que se separa durante una liberación del vapor, o (b) una corriente de líquido que acompaña un escape de vapor. El volumen ocupado por el líquido deberá estar basado en una liberación, por parte del vapor, que dura de 20 a 30 minutos.

Las corrientes de líquido que se envían al tanque serán determinados a partir de los requerimientos de cada diseño, por la composición de las corrientes y sus características.

Los tiempos de residencia que se recomiendan son:

10 a 15 minutos para tanques que tengan bombas con arranque automático a nivel alto, y hasta 30 minutos para tanques sin bombas o con bombas de arranque manual (IMP 1979).

Para la operación de los recipientes a presiones elevadas, un L/D de 2 es recomendado; para presiones moderadas la relación L/D deberá estar entre 3 y 5, una relación de 3 es, por lo general, recomendada para bajas presiones. Los recipientes separadores en los sistemas de relevo, operan a presiones cercanas a la atmosférica.

Aunque los recipientes separadores, horizontal y vertical, estén disponibles en muchos diseños, la diferencia será, principalmente, que tan directa es la ruta del vapor. Los distintos diseños incluyen lo siguiente:

- a. Un recipiente horizontal con el vapor entrando en uno de los extremos del recipiente y saliendo en la parte superior opuesta del extremo (no cambio interno)
- b. Un recipiente vertical con el vapor entrando en una boquilla a un lado del recipiente y la saliendo por una boquilla por la parte superior del recipiente, sobre el eje vertical. La corriente de entrada deberá estar bafleada para direccionar el flujo hacia abajo
- c. Un recipiente vertical con una boquilla tangencial
- d. Un recipiente horizontal con el vapor entrando en uno de los extremos, sobre el eje horizontal, y una salida al centro
- e. Un recipiente horizontal con el vapor entrando en el centro y saliendo en cada terminal sobre el eje horizontal.
- f. Una combinación de un recipiente vertical en la base del quemador y uno horizontal a la descarga para liberar el volumen líquido que entra junto con el vapor. Esta combinación permite el uso de valores grandes, para la constante numérica, en la ecuación de velocidad.

4.2.1 Secuencia de cálculo

El código API RP 521 muestra como determinar el tamaño de los recipientes de relevo usando un procedimiento de prueba-error:

1. Determinar el factor de arrastre de la partícula líquida a partir de la ecuación 4.4
2. Evaluar la velocidad terminal de diseño a partir de la ecuación 4.3 o 4.5
3. Obtener un estimado del L/D a partir de la siguiente relación:

Presión de operación del recipiente, (psig)	L/D ft/ft
$0 < P \leq 250$	1.5-3.0
$250 < P \leq 500$	3.0-4.0
$500 < P$	4.0-6.0

4. A partir del L/D seleccionado, calcular el área de sección transversal, A_t

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.6)$$

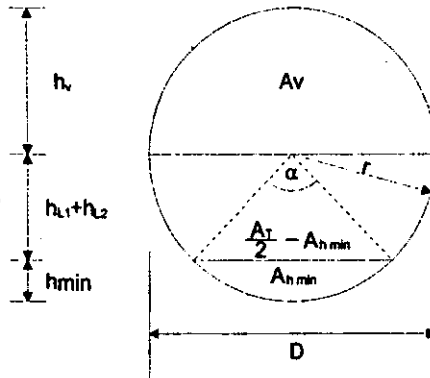
5. Determinar el área requerida para la carga de líquido adicional, A_{L1} .

$$A_{L1} = \frac{V_{L1}}{L} \quad (4.7)$$

Donde

V_{L1} = volumen almacenado para drenar, ft^3

L = longitud del recipiente, ft



6. Calcular el área requerida para el condensado a partir de la corriente que entra, A_{L2} ,

$$A_{L2} = \frac{V}{L} \quad (4.8)$$

Donde

V = volumen del líquido condensado

7. Calcular el área de sección transversal disponible para el flujo de gas, A_v ,

$$A_v = A_T - (A_{L1} + A_{L2}) \quad (4.9)$$

8. La altura vertical, del espacio del líquido y del vapor, es determinada usando la geometría estándar, determinándose, por lo tanto, el diámetro del recipiente, h_t

$$h_t = h_{L1} + h_{L2} + h_v \quad (4.10)$$

9. Verificar si el espacio para el vapor es el adecuado para llevar a cabo la separación gas-líquido, de la siguiente manera: la profundidad vertical disponible para la salida de líquido es igual a h_v (altura del espacio de vapor) en in. Determinar el tiempo de sedimentación para el espacio vertical disponible, θ ,

$$\theta = \frac{h_v}{V_T} \quad (4.11)$$

10. Calcular la velocidad del vapor, U_v ,

$$U_v = \frac{Q}{A_v} \quad (4.12)$$

Donde

Q = flujo de vapor a la entrada, ft^3/seg

11. Determinar la longitud mínima del recipiente para la separación gas-líquido, L_{min}

$$L_{min} = U_v \theta \quad (4.13)$$

12. Comparar L_{min} con L ; si $L_{min} \leq L$, el procedimiento es terminado. Si $L_{min} \geq L$, una nueva L deberá ser supuesta y el procedimiento es repetido

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Debido a que muchos valores de L y D pueden satisfacer la condición $L_{\min} \leq L$, este trabajo de diseño de prueba-error es extenso. El diseñador deberá de llevar a cabo numerosos cálculos al mismo tiempo antes de tomar una decisión.

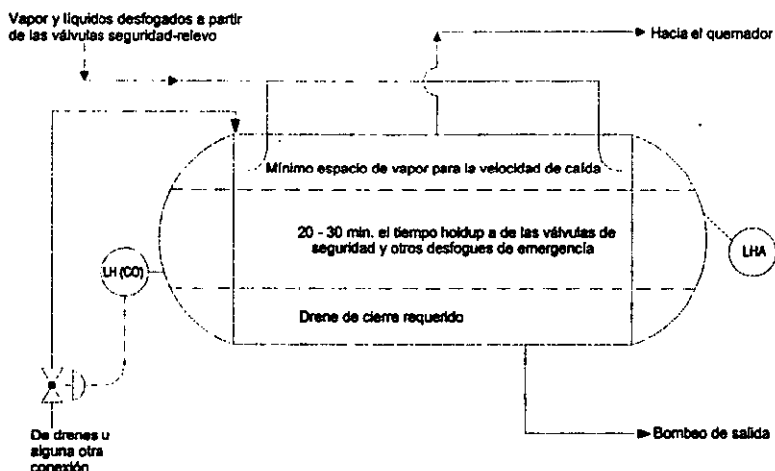


Figura 4.2. Recipiente separador

4.2.2 Criterios para fijar las dimensiones finales de los recipientes (IMP 1977)

Una vez que se obtuvieron las dimensiones por cálculos del equipo, por economía se debe uno referir a las medidas ya establecidas como comerciales.

Los constructores de recipientes emiten catálogos con las medidas disponibles (comerciales) de las distintas partes de un recipiente.

Por ejemplo, para fijar el diámetro del recipiente, se sabe que los fabricantes hacen cabezas que varían sus dimensiones de $\frac{1}{2}$ ft en $\frac{1}{2}$ ft, o sea que el diámetro se redondeará, según el caso, del valor calculado al diámetro inmediato superior, o bien al diámetro inferior comercial.

Para fijar la longitud del recipiente es conveniente conocer cuáles son los anchos de las placas comerciales:

- 4 ft o 1219 mm.
- *6 ft o 1829 mm.
- *8 ft o 2438 mm.
- 10 ft o 3148 mm.
- 12 ft o 3658 mm.

* Los anchos de las placas más comunes en el comercio son los de 6 ft (1829 mm) y 8 ft (2438 mm).

O sea, para fijar la longitud de un recipiente, es conveniente redondear la longitud calculada al ancho comercial de alguna de las placas, o bien igual al ancho de la combinación de dos o más placas. En el caso de que la longitud sea mayor a 12 ft (3658 mm); se pueden hacer combinaciones de las placas comerciales que existen, teniendo así variaciones en la longitud de 2ft en 2 ft (610 mm en 610 mm).

Tabla 4.1. Longitudes recomendadas de los recipientes.

(mm)	(ft)	Ejemplos de combinación de placas comerciales
4267	14	8 ft y 6 ft.
4877	16	8 ft y 8 ft.
5486	18	8 ft y 10 ft.
6096	20	10 ft y 10 ft.
6706	22	8 ft, 8 ft y 6 ft.
7315	24	8 ft, 8 ft y 8 ft.
7925	26	10 ft, 10 ft y 6 ft.

Para longitudes mayores de los recipientes, continuar con el mismo criterio de ajustarse a la longitud que se pueda obtener por combinación de las placas comerciales.

4.3 Quemadores de campo

El quemador es una de las piezas más visibles y espectacular de los equipos asociados a una planta de proceso o área de producción; bajo condiciones máximas de diseño, representa fuego o combustión en una escala masiva. Como punto crítico del proceso y como equipo de control de emisiones, se debe tener un mayor cuidado en el diseño de un sistema de quemadores, para lo cual consideraciones importantes deberán ser consideradas, entre las se pueden encontrar, la estabilidad en el quemado, la radiación de la flama, la caída de presión, la filtración de aire, la eficiencia de la combustión, etc., de tal manera que el objetivo principal – la seguridad, efectividad en la disposición de los gases – no sea comprometido.

En los años 20's, la principal función de un quemador era relevar el exceso de presión generado en plantas de combustibles y refinerías por medio del venteo y quemando el exceso de gas; aquellos primeros quemadores fueron simplemente largas tuberías con un sistema de encendido. Actualmente, los estándares de seguridad y legislación ambiental han transformado la tecnología de estos dispositivos; hoy en día, diseños más complejos son requeridos para llevar a cabo una combustión completa y sin humo a pesar de las velocidades del viento, lluvia y otros factores climáticos

La función primaria de un quemador es prevenir el relevo de gases no quemados, dado que las emisiones no controladas son extremadamente dañinas; un diseño adecuado elimina la posibilidad del salpiqueo de condensados al personal de la planta y al equipo con lluvia de fuego. Cuando las corrientes que se queman tienen una alta densidad y los vapores condensan formando liquido, es probable que ocurra una lluvia de fuego, más cuando el tanque separador no sea diseñado adecuadamente.

Al diseñar un quemador se debe tener en cuenta qué cuando esta sobrediseñado, el quemado se realizará dentro de la boquilla y debido al bajo momentum de la flama se extinguirá por la acción del viento, al considerar flujo excesivo que origine que la flama se levante fuera de la boquilla ocasionando que los compuestos no quemados sean liberados a la atmósfera sin haber sido tratados.

El tamaño del quemador deberá ser tal que a una altura determinada no existan problemas por radiación; sin embargo, la altura efectiva del quemador será aquella en donde debido a un relevo de emergencia, la concentración máxima de compuestos al nivel de piso y en atmósferas adyacentes se encuentre por debajo de los límites de flammabilidad, toxicidad, explosividad, olor y ruido para no afectar al personal.

4.3.1 Propiedades de la combustión.

4.3.1.1 Propiedades de la flama.

Una flama es una reacción química rápida que se lleva a cabo en una zona de reacción distinta. Los dos tipos de flama básicas serán: (a) la flama de difusión, la cual es encontrada en quemadores convencionales y ocurre cuando, durante la ignición de un combustible, se inyecta aire, y (b) la flama aérea, la cual ocurre cuando el combustible y el aire sean, previamente, mezclados antes de llevar a cabo la ignición. La velocidad de quemado, o velocidad de la flama, es la velocidad a la cual una flama viaja a través de una mezcla combustible sin quemar.

En el caso de un quemador, la frontera de la flama estará en la boquilla de la chimenea; sin embargo, a velocidades bajas, el contramezclado del aire se llevará a cabo en la parte superior de la chimenea. En flujos bajos de gas, existe la posibilidad de una combustión en la frontera de la flama, localizada en la parte baja de la chimenea, dando como resultado una temperatura alta en la misma. O puede haber la posibilidad de que la flama se extinga dando como resultado la formación de una mezcla explosiva en la chimenea y sea encendida por una chispa del piloto.

En una flama aérea un fenómeno conocido como retroceso de la flama, puede llevarse a cabo. Este fenómeno resulta debido a que, la velocidad de mezclado del combustible llega a ser menor a la velocidad de la flama, causando que la flama viaje en retroceso al punto de mezclado.

En el caso de las flamas aéreas o de difusión, si el flujo combustible es incrementado hasta exceder la velocidad de la flama en diversos puntos, la flama se elevará por encima del quemador hasta una nueva posición estable de la corriente de gas y se diluye con el aire. Este fenómeno es llamado *blowoff*. Con un diseño adecuado de la boquilla, la flama de la corriente principal puede ser expandida en las regiones límites donde el gradiente de velocidad pueda, por otro lado, exceder el valor crítico para el *blowoff*. Existe evidencia donde la estabilidad de la flama puede ser mantenida a velocidades, relativamente, altas dependiendo de las propiedades de descarga y el tipo de boquilla a ser usada. Las velocidades *blowoff* y de retroceso de flama serán mayores para combustibles que tenga una elevada velocidad de quemado. Pequeñas cantidades de hidrógeno en un combustible hidrocarburo ampliarán el rango de estabilidad dado que la velocidad *blowoff* se incrementará más rápidamente que la velocidad de retroceso de la flama. El diseño puede estar basado en velocidades de 0.5 Mach o mayores, si la caída de presión, ruido u otros factores lo permiten.

4.3.1.2 La formación del humo.

La flama de algunos hidrocarburos será luminosa dado que partículas de carbono incandescentes son formadas en la flama. Bajo ciertas condiciones, estas partículas serán liberadas, dentro de la flama luminosa, en forma de humo. Para una flama típica del quemador, la característica visual dominante de la flama es el color amarillo; este color

amarillo es causado debido a las partículas de carbono producidas en las zonas de combustión rica de hidrocarburos. Si las partículas de carbono se escapan de la flama sin llevar acabo su oxidación total, el humo será producido.

4.3.1.3 Radiación

Un estudio común para determinar la radiación por parte de la flama del quemador a un cierto punto es simplificar la geometría del problema asumiendo que la flama tiene un solo epicentro y usá un solo factor para cubrir un número de variables de transferencia de calor radiactiva.

La intensidad de calor emitido a una unidad del área, alineada para obtener una recepción máxima, puede ser expresada como:

$$K = \frac{\tau F Q}{4\pi D^2} \quad (4.14)$$

Donde

D = distancia mínima desde el punto medio de la flama hasta el objeto considerado, ft

τ = fracción del calor radiado transmitido a la atmósfera

F = fracción de calor radiado

Q = calor liberado (mínimo valor de calentamiento), Btu/hr

K = intensidad de calor radiado por unidad de área, Btu/hrft²

El nivel de radiación permisible está en función del tiempo de exposición del personal; por lo que debe considerarse el tiempo en que tarden las personas de percatarse de una situación de emergencia y el tiempo que requieren para movilizarse.

Tabla 4.2. Tiempo de exposición necesario para llegar al umbral de dolor.

Intensidad Btu/hr ft ²	Umbral del dolor seg	Ampollamiento seg
550	60	
1500	16	
2000	8	20
6300		6

Dado que los niveles de radiación permisibles son una función de la longitud de exposición, los factores que envuelven el tiempo de reacción y la movilidad de la persona deberán ser consideradas. En relevos de emergencia, un tiempo de reacción de 3 a 5 segundos puede ser tomada en cuenta. Tal vez 5 segundos más deberán transcurrir antes de intentar cubrirse o salir del área, lo cual dará como resultado un tiempo de exposición dentro del rango de 8 a 10 segundos.

Como una base de comparación, la intensidad de la radiación solar se encuentra en el rango de 250-300 Btu/hr*ft². La radiación solar puede ser un factor para algunas localizaciones, pero su efecto adicionado a la radiación solar tendrá, únicamente, un menor impacto sobre el tiempo de exposición aceptable. Haciendo caso omiso de su impacto, la radiación solar deberá ser considerada en el cálculo de la radiación total.

Tabla 4.3. Niveles de radiación recomendadas para el diseño.

Nivel de diseño permisible (K); Btu/hr.ft ²	Condiciones
5000	Intensidad de calor en las estructuras y en áreas donde los operadores, probablemente, no se encuentren y donde el refugio contra el calor radiado este disponible (por ejemplo atrás de los equipos).
3000	Valor de K para la radiación de la flama en lugares donde el personal tiene acceso, por ejemplo: en plataforma o en una torre cercana. La exposición se limita a unos pocos segundos, suficientes para escapar, únicamente.
2000	Intensidad del calor en áreas donde las acciones de emergencia duran alrededor de 1 minuto, requeridos por el personal sin protección pero con ropa adecuada.
1500	Intensidad del calor en áreas donde las acciones de emergencia duran varios minutos, requeridos por el personal sin protección pero con ropa adecuada.
500	Valor de K a una localización donde el personal con ropa adecuada puede ser expuesta continuamente.

Otro factor a ser considerado, con respecto a los niveles de radiación térmica, será la ropa que proporciona protección permitiendo que, únicamente, una parte pequeña del cuerpo sea expuesto a la intensidad total. En el caso de la radiación que emana de un punto elevado, la medida de protección al personal estándar, tal como la puesta de un sombrero, podría reducir la exposición térmica.

Los efectos de la radiación térmica sobre el personal quien deba estar expuesto a/o más allá de los límites de la planta, deberán ser considerados.

Es importante conocer que un método para predecir la radiación deberá tener consistencia interna. Si la absorción atmosférica fue considerada en el desarrollo de F, la fracción de calor emitida, entonces esta deberá ser usada en la aplicación del método; si no es así, entonces τ , deberá ser omitida (por ejemplo, $\tau = 1.0$).

Es importante que la emisividad de la flama, ϵ , no sea confundida con la fracción de calor emitida por radiación, F. La emisividad de una flama es una función de la combinación de emisividades por parte de los gases y sólidos presentes en la flama a una cierta temperatura. Por el contrario, la fracción de calor emitido es una característica global de la flama que cuenta con las siguientes variables: composición del gas, tipo de flama, mezclado aire/gas, formación de humo y cenizas, cuantificación del quemado, temperatura de la flama y el diseño de los quemadores. El factor F es determinado empíricamente y deberá ser usado de la misma manera que como fue determinado.

Medidas de la radiación por parte de las flamas indican que la fracción de calor emitido (energía radiante por calor de combustión total) se incrementa hacia un límite, análogo al

incremento de la relación de quemado con el incremento del diámetro por parte de la flama.

Investigadores han usado varias características de los gases como una clave para el valor de F. Algunos proponen una relación entre F y el valor calorífico neto (LHV) del gas (Kent, 1964), o una relación entre F y el peso molecular del gas (Tan, 1967); otros han correlacionado la relación peso del hidrógeno con el carbono (H/C) del gas con F (API 913, 1977). Sin embargo otros reportan a F para diversos gases (API 521, 1997).

4.4 Clasificación de los quemadores

Los quemadores son, generalmente, clasificados de dos maneras: (1) por la altura de la boquilla del quemador (por ejemplo, de fosa o elevados), y (2) por el método de acrecentar el mezclado en la boquilla del quemador (por ejemplo, asistido por aire, asistido por vapor).

4.4.1 Altura de la boquilla de quemado

4.4.1.1 Quemadores elevados.

Aunque existen diferentes tipos de quemadores, los elevados son los más usados, se deben instalar de acuerdo a la dirección de los vientos y localizarlos a distancias adecuadas de otras instalaciones y de áreas urbanas adyacentes para minimizar los riesgos por toxicidad, flammabilidad, explosividad y radiación al personal.

Un quemador elevado es una chimenea o una tubería alta soportada, en cuya punta se lleva a efecto la combustión de gases de desecho. En estos quemadores la combustión se lleva a cabo a gran altura, por lo que no requiere un área demasiado grande y se puede localizar dentro de los límites de proceso o en la periferia inmediata. Se eleva la boquilla de quemado para mantener el resplandor y el calor que irradia la flama lo suficientemente lejos de los equipos y zonas de operación.

El quemador se considera como el de mayor uso; en ocasiones puede operar en conjunto con uno de tipo fosa, el relevo continuo se conduce al quemador de fosa y en la eventualidad de un flujo mayor, este se desvía hacia el quemador elevado a través de sellos de agua. Puede prevenir peligro en condiciones riesgosas al nivel de suelo, cuando la flama esta localizada cerca de una unidad de proceso. Además, los productos de la combustión pueden ser dispersados por encima de las áreas de trabajo reduciendo los efectos de ruido, calor, humo y olores.

4.4.1.1.1 Tipos de quemadores elevados.

Históricamente, tres tipos de quemadores elevados han sido empleados para asegurar servicios dependientes y desempeño eficiente. Obviamente la principal razón para que estos quemadores fueran elevados es la de reducir la radiación térmica a niveles aceptables para el personal de la planta y los equipos. Sin protección contra el viento, temperatura ambiente o ropa de protección, una radiación térmica conservativa para diseñar la altura del quemador será de $1,500 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft}^2$.

Tabla 4.4. Radiación a partir de la difusión de flama de los gases

Gas	Diametro del quemador (centimetros)	Salida radiactiva X 100 Salida termica
Hidrógeno	0.51	9.5
	0.91	9.1
	1.90	9.7
	4.10	11.1
	8.40	15.6
	20.30	15.4
	40.60	16.9
Butano	0.51	21.5
	0.91	25.3
	1.90	28.6
	4.10	28.5
	8.40	29.1
	20.30	28.0
	40.60	29.9
Metano	0.51	10.3
	0.91	11.6
	1.90	16.0
	4.10	16.1
	8.40	14.7
Gas natural (95% CH ₄)	20.30	19.2
	40.60	23.2

El más complicado, y el más limitado, dentro del sistema de quemadores es el quemador con humo. Este es usado para corrientes de hidrocarburos o vapor que se queman rápidamente y no producen humo, tales como el metano, hidrógeno, monóxido de carbono y amoniaco. Hidrocarburos pesados pueden ser quemados usando un quemador humeante, pero, solamente con una eficiencia de combustión baja.

Un segundo tipo de quemador elevado es usado para hidrocarburos pesados. Este es designado como quemador sin humo y proporciona limpieza y eficiencia para disponer de todos los hidrocarburos de las corrientes. Sin embargo, este tipo consume bastante cantidad de energía, comúnmente en la forma de vapor.

Otro diseño de quemador elevado es usado para corrientes de desecho de bajo contenido calorífico, llamado comúnmente endotérmico debido a que el quemado es llevado a cabo adicionando energía a la corriente de desecho para completar la oxidación. Siempre que el contenido calorífico de la corriente de desecho este por debajo de los 115 Btu/ft³, entonces un quemador endotérmico con gas asistido deberá ser usado para asegurar la

completa oxidación del desecho. Los quemadores endotérmicos serán usados para gases residuales de sulfuro y corrientes de desecho de amonio.

Tomando en cuenta la base de su estructura, los quemadores elevados son clasificados de la siguiente manera:

a) Quemador tipo torre.

En este tipo de quemador, la estructura no ocupa mucho espacio, pero si es más robusta para poder soportar el tubo de quemado. Los más comunes tienen soporte estructural de 4 lados, pero también existen de 3 lados, según sea el número de boquillas soportadas.

Es ideal su uso cuando no se dispone de mucho espacio para colocar el quemador y se necesita de mucha altura para mantener los límites de radiación por la cercanía de zonas donde hay equipo y personal en operación.

Es el más caro en construcción y mantenimiento. Puede tener alturas hasta de 300 ft y diámetro de base de 35 ft.

b) Quemador tipo cableado.

Este quemador se utiliza cuando se requieren alturas arriba de 350 ft necesarias en quemadores de gran diámetro. Se soporta mediante cables a 2 o 3 niveles, los cuales son anclados en concreto sobre el piso. Las anclas de los cables forman un círculo cuyo diámetro es, aproximadamente, la altura del quemador, por lo que requieren de gran espacio disponible para su instalación. Cuando se tienen expansiones severas, debe tenerse cuidado en la manera en que se aten los cables, en el ángulo que formen con la tubería elevada y en el número de cables que se utilicen.

c) Quemador tipo autosoportado.

Con este tipo de quemador, no se requiere estructura, se usan diferentes diámetros para la línea de elevación, teniendo el mayor diámetro en la base y el menor en la punta, lo cual reduce la oscilación del quemador causada por la fuerza del viento.

Es el más económico para alturas de 250 ft y ocupa menor área. Su erección es más fácil que la de los otros tipos. Por ejemplo, para una altura de 250 ft, el diámetro de la base es de, aproximadamente, 12 ft, comparada con 24 ft de separación entre piernas para un tipo de torre.

4.4.1.2 Quemadores de fosa.

Los quemadores de fosa son dispositivos diseñados para eliminar "por combustión" corrientes gaseosas de relevo de plantas de refinación, petroquímica y almacenamiento, así como las instalaciones de explotación del petróleo de manera eficiente y cumpliendo con los lineamientos sobre seguridad y contaminación ambiental.

Los quemadores de fosa manejan relevos gaseosos que emiten productos de combustión de tóxicos y se caracterizan por contar con boquillas de quemado instaladas dentro de una fosa al nivel de piso o a un nivel inferior colocadas generalmente en posición horizontal y, en algunos casos en posición vertical.

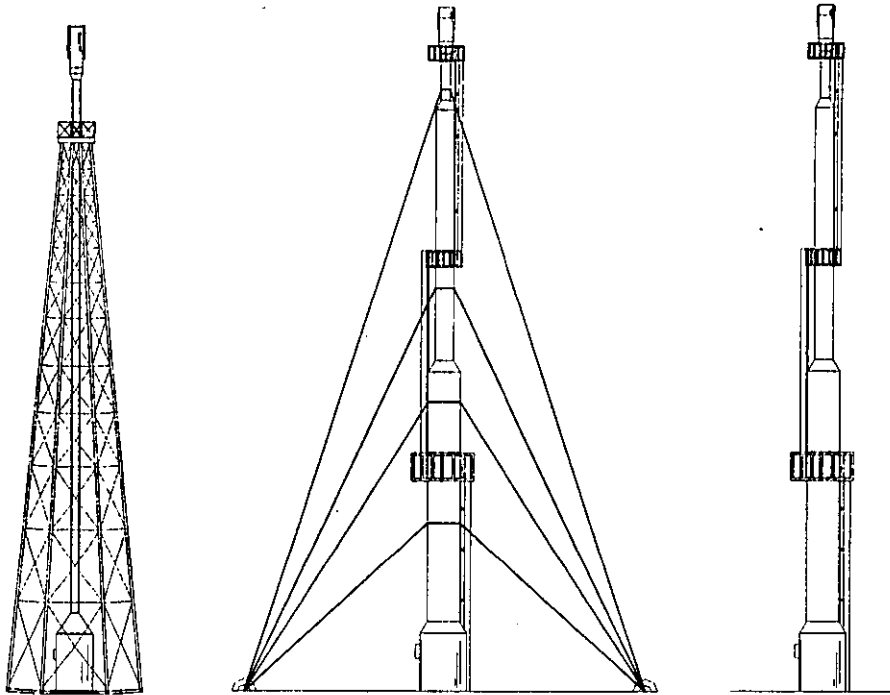


Figura 4.3. Tipos de quemadores elevados.
Tipo torre, cableado y autoportado

Es más económico que el quemador elevado ya que no requiere estructura, y es fácil darle mantenimiento. Sin embargo, el área requerida es mayor debido a que al encontrarse a nivel del piso los niveles de radiación son más altos y las distancias para protección del personal y equipo son mayores. Es recomendable para el quemado de líquidos.

No son recomendables cuando se manejan sustancias tóxicas, ya que si no se logra una combustión completa, las concentraciones al nivel de piso pueden alcanzar niveles mayores a los permisibles al no presentarse el efecto de dilución ocasionada por el viento, característico de los quemadores elevados.

4.4.1.2.1 Clasificación de los quemadores de fosa.

La clasificación de los quemadores de fosa se efectúa en base a las características del proceso de combustión que estén desarrollando combustión completa sin emisión de humo o combustión incompleta con emisión de humo. También se consideran en la clasificación los tipos y características de las boquillas que se hayan instalado en los quemadores de fosa.

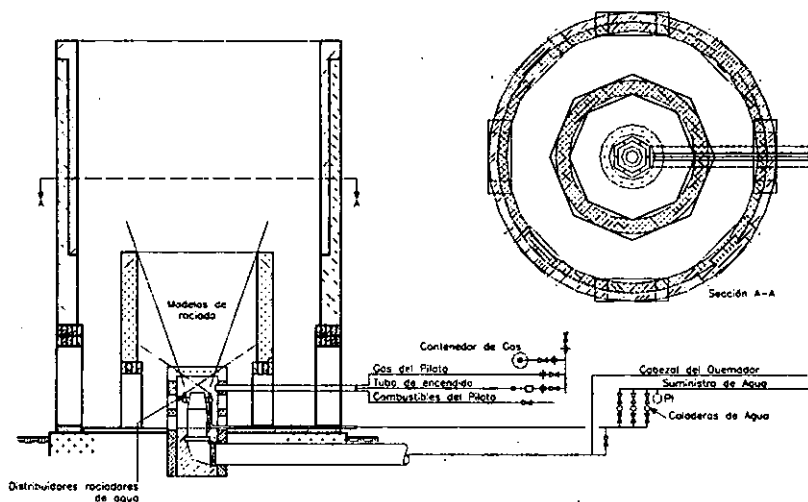


Figura 4.4. Quemador de fosa. Tipo esparcido de agua

a) Quemadores de fosa con emisión de humo.

Están constituidos por una o más boquillas de quemado colocados en posición horizontal dentro de una fosa; un sistema de ignición; piloto de encendido y un sistema de sello interno por medio de mamparas las cuales deben estar protegidas interna y externamente con material refractario, para evitar el retroceso de flama en cada una de las boquillas que lo conforman.

Estos quemadores se deben utilizar para el quemado continuo de gases cuya combustión se efectúe con emisión de humo y no sean tóxicos, o para el quemado de gases no tóxicos con emanación de humo provenientes de relevos de emergencia.

b) Quemadores de fosa sin emisión de humo.

La eliminación de humo en los quemadores de fosa se logra distribuyendo adecuadamente la cantidad suficiente de aire en la zona de combustión para efectuar una combustión completa. Entre este tipo de quemadores está el siguiente:

(i) Eliminación de humo por inyección de vapor de agua.

La inyección de vapor de agua a la zona de aeración localizada entre la base de la flama y la boquilla del quemador propicia la disminución en la temperatura de dicha zona, prolongando el proceso de oxidación y minimizando la descomposición térmica del hidrocarburo.

Algunas de las formas de inyección de vapor a quemadores de fosa son:

- Inyección central. Se efectúa a través de un jet colocado en el centro de la boquilla, por debajo del extremo de ésta.
- Inyección directa a la zona de combustión. Se efectúa por medio de varios jets conectados a un anillo de distribución montado alrededor de la punta de la boquilla. Los jets descargan radialmente hacia el interior de la flama desarrollada sobre la boquilla.

- Inyección combinada. Se utilizan los métodos anteriores (inyección central y periférica) en forma conjunta.

- Inyección de vapor a través de eyectores "Coanda". Se basa en el principio del efecto "Coanda" que consiste en crear una zona de baja presión, por medio del vapor, en cada una de las boquillas de eyección induciendo aire hacia dicha zona y propiciando su mezclado con el vapor antes de descargar a la boquilla del quemador.

- Inyección de vapor a través de tubos eyectores. Se efectúa a través de una serie de boquillas que descargan vapor hacia un número correspondiente de tubos de eyección, los cuales conducen el flujo de aire inducido y vapor hacia el plano superior de la boquilla principal del quemador; zona en la que efectúa el mezclado con el gas de relevo.

(ii) Eliminación de humo por esparado de agua.

La eliminación de humo en los quemadores, puede resolverse empleando espreas que proporcionen ángulos amplios de esparado de agua.

Debe asegurarse que la niebla de agua espreada cubra toda la flama, ya que cuando la flama sobresale de dicha niebla, sobreviene la producción de humo. Estos puede resolverse empleando espreas que proporcionen ángulos amplios de esparado; sin exceder la cantidad de agua requerida, ya que de ocurrir esto, se incrementará el volumen de hidrocarburos emitidos sin haberse quemado.

(iii) Eliminación de humo por suministro de aire forzado.

El aire requerido para lograr una combustión sin producción de humo se suministra por medio de un soplador o ventilador a través de un tubo coaxial a la boquilla del quemador.

El ventilador suministra la cantidad requerida de aire "primario", mezclándose con la corriente de gas antes de efectuar la combustión. El aire "secundario" de combustión es arrastrado hacia la flama por la naturaleza de ésta.

El ventilador también produce una corriente artificial de viento que mantendrá la flama cerca de la zona de mezclado; aún en presencia de fuertes corrientes laterales de viento, reduciendo las distorsiones de la flama y, por lo tanto, la radiación al área.

4.4.2 Métodos para acrecentar el mezclado.

4.4.2.1 Quemadores asistidos de vapor.

La combustión de muchos gases es exotérmica en la cual la energía es liberada cuando la reacción ocurre y el quemado de los gases puede llevarse a cabo a temperaturas elevadas con una elevada eficiencia sin la presencia de un gas que lo asista. Sin embargo, solamente el hidrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos y mezcla de hidrocarburos, del grupo parafínico o con un peso molecular de 20 o menor, serán quemados sin la producción del humo. Por el contrario, otros gases de desecho pueden producir humo blanco, gris o negro.

El método más común para llevar a cabo la combustión sin humo es la inyección de vapor dentro de la flama del quemador, lo cual acrecenta la turbulencia de mezclado gas-aire y lograr, con esto, que la combustión sea lo más completa posible. Aumentando los niveles

de momentum a la entrada, más el aire que entra a la zona de combustión, el vapor contribuirá con mayor fuerza a la operación sin humo.

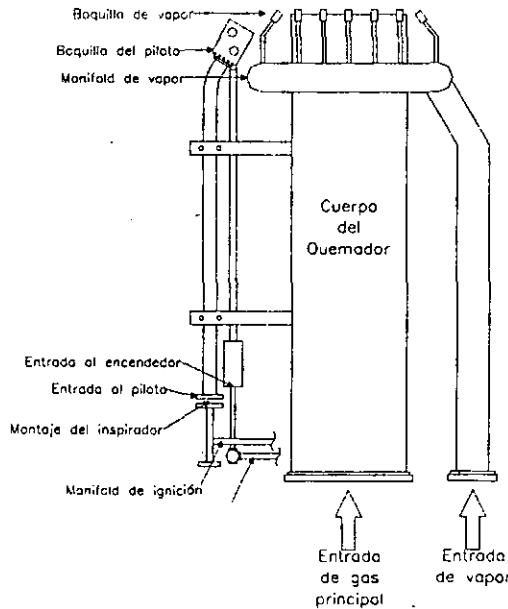


Figura 4.5. Boquilla con suministro de vapor

La cantidad de vapor requerida es, principalmente, una función de la composición del gas, y del flujo de descarga, del gas de desecho; a una velocidad de descarga elevada se requerirá menor vapor debido a la entrada del aire ambiente al gas de desecho. Además, depende también del peso molecular y el valor calorífico del gas a ser quemado, de la relación carbono/hidrógeno, el grado de saturación y otros factores distintos. La cantidad necesaria de vapor de agua para reducir la formación de humo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W_{st} = W \left(0.68 - \frac{10.8}{M} \right) \tag{4.15}$$

Donde

- W_{st} = flujo de vapor de agua, lb/h
- W = flujo de gas de relevo, lb/h
- M = peso molecular del gas, lb/lb mol

La inyección del vapor a velocidades elevadas inducirá la entrada de aire para que se lleve a cabo una operación sin humo. Más sin embargo, existirá una elevada turbulencia y un mezclado íntimo entre el aire y el gas. El momentum elevado del vapor mantendrá la flama del quemador vertical en la región donde se inyecte el vapor asegurando con esto el desempeño sin humo.

Tabla 4.5. Relación de vapor inyectado sugerido (API RP 521, 1997)

Gases a ser quemados	Vapor requerido (lb vapor/lb gas)
Parafinas	
Etano	0.10-0.15
Propano	0.25-0.30
Butano	0.30-0.35
Pentano y más	0.40-0.45
Olefinas	
Etileno	0.40-0.50
Propileno	0.50-0.60
Buteno	0.60-0.70
Di-olefinas	
Propadieno	0.70-0.80
Butadieno	0.90-1.00
Pentadieno	1.10-1.20
Acetilenos	
Acetileno	0.50-0.60
Aromáticos	
Benceno	0.80-0.90
Tolueno	0.85-0.95
Xileno	0.90-1.00

4.4.2.2 Inyección de aire a alta presión.

Esta aplicación es menos común debido a que el aire comprimido es, normalmente, más caro que el vapor. Sin embargo se puede aplicar en instalaciones localizadas en donde haya escasez de agua para producir vapor o donde la corriente de gas relevado puede reaccionar con el agua. El aire normalmente se suministra a 100 lb/in² y la masa requerida es aproximadamente 20% mayor que la requerida para el vapor, ya que el aire comprimido no produce la reacción de arrastre agua-gas que ocurre con el vapor.

4.4.2.3 Boquillas de quemado (Principio Coanda)

Los quemadores de alta presión es también conocido como quemador de efecto Coanda, debido a la utilización efectiva del Principio Coanda. El Principio Coanda es muy básico: cuando un gas a alta velocidad pasa sobre una superficie curva, un vacío es creado, atrayendo aire, el cual será mezclado turbulentamente con el gas produciendo una combustión libre de humo. El quemador de alta presión consiste de una boquilla en forma de tulipán, boquillas de piloto externas, un slot fijo o variable, una alimentación a una presión alta y una alimentación a baja presión. La flama es generada alrededor de la máxima circunferencia del tulipán. Al mismo tiempo, una película de hidrocarburos es generada entre el tulipán y la flama para protección del tulipán debido al sobrecalentamiento. En el diseño de un quemador de alta presión, la radiación y la longitud de la flama deberán ser tomadas en cuenta, generalmente si existe difusión

turbulenta. El calor de radiación de un quemador típico es alrededor de 0.2, mientras que en el quemador Indair es de alrededor de 0.1 – en otras palabras, el porcentaje de energía radiada es, únicamente de 10%.

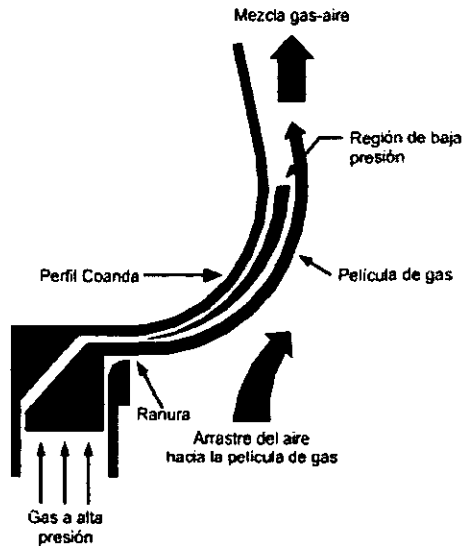


Figura 4.6. Efecto Coanda

4.4.2.4 Atomizado de agua

Si se requiere quemado sin humo se puede usar, también, un chorro atomizado de agua, este procedimiento es poco común y se utiliza especialmente en quemadores horizontales cuando se requiere eliminar grandes cantidades de agua de deshecho o salmuera. La cantidad de agua requerida para la eliminación de humo se determina por la siguiente ecuación:

$$Q = r \left(\frac{W}{500} \right) \quad (4.16)$$

Donde

Q = flujo de agua espreada (gal/min).

W = 10% del gasto máximo de relevo (lb/h).

r = peso de agua requerida para la eliminación de humo por unidad en peso del hidrocarburo quemado. Esta relación es función del peso molecular y del grado de insaturación del hidrocarburo, por ejemplo:

= 19 para gases con alto contenido de insaturados.

= 14 para butano.

= 5 para propileno.

= 2 a 4 para mezclas propano propileno

= 0.7 a 1.9 para gases saturados ligeros

4.5 Equipo auxiliar para el quemado.

4.5.1 Boquilla

Todas las boquillas que se utilizan en los quemadores deberán incluir lo siguiente:

- a) Pantallas rompevientos.
- b) Anillo para retención de flama.
- c) Pilotos con línea de suministro de gas combustible, líneas de ignición y termopares.
- d) Bridas para conexión a sellos o a líneas de relevo.

Los quemadores con emisión de humo deben utilizar boquillas del tipo convencional, constituidas, básicamente, por un tubo revestido internamente con material refractario así como las partes mencionadas anteriormente.

Para el quemado sin humo, pueden emplearse los siguientes tipos de boquillas:

- a) Boquilla con eliminación de humo por suministros de aire. Se caracterizan por contar con dos tubos coaxiales; la central maneja el extremo de la boquilla que debe tener ranuras múltiples a la descarga para asegurar un mezclado homogéneo antes de la combustión.
- b) Boquilla con eliminación de humo por suministros de vapor de agua. Existen dos variantes: con inyección central de vapor o con un anillo de inyección de vapor.

En la primera variante, se debe tener una línea que regule la cantidad de vapor requerida, situada concéntricamente en el interior de la línea de relevo o línea principal de la boquilla. El extremo de la línea de vapor está cerrado y tiene orificios múltiples de descarga orientados en un ángulo apropiado para que el vapor sea distribuido uniformemente en toda la zona de la base de la flama. La boquilla de distribución de vapor debe estar al mismo nivel que la boquilla del quemador.

En la segunda variante, el vapor se debe suministrar a través de una línea que se conecta al anillo o múltiple de distribución que tiene las boquillas de inyección de descarga de $1/8$ de pulgada de diámetro e inyectan vapor radialmente hacia la flama.

Cuando se utiliza agua como medio de eliminación de humo, se tiene las mismas variantes que con el vapor de agua con la diferencia de que las boquillas que se usan son de atomización fina.

4.5.2 Sellos líquidos.

Los sellos líquidos serán componentes muy comunes en el sistema de quemado. Estos serán incluidos como parte integral de la base de un quemador elevado. Algunas de las razones para su uso serán las siguientes:

- a. Protección contra el retroceso de la flama. Los sellos líquidos serán usados para suministrar protección acerca de la propagación de la flama dentro de la tubería de la planta. Un diseño y mantenimiento adecuado de los sellos líquidos ofrecen excelente protección contra el retroceso de la flama para diversos gases inflamables, tales como el acetileno, óxido de etileno, e hidrógeno. Si el quemador de gas contiene oxígeno dentro del mismo, la adición de un sello líquido, como una fuente cerrada de la flama, es recomendada.

b. Mantener una presión positiva en el cabezal. Los sellos líquidos serán usados para asegurar que una presión positiva sea mantenida en el cabezal del quemador. Esto asegura que fugas en el cabezal del quemador no resulten en fugas de gas a la atmósfera y fugas de aire dentro del cabezal. La fuga de aire dentro del cabezal del quemador puede dar como resultado un riesgo potencial, para la mezcla gas/aire, con la posibilidad de una explosión en el quemador o en el cabezal.

c. Flujo de gas directo al quemador. Los sellos líquidos serán usados para gases directos entre dos o más sistemas de quemadores. Por ejemplo, el flujo normal de gas puede estar en un quemador cerrado; sin embargo, cuando la capacidad del quemador cerrado sea alcanzada, el sello deberá ser diseñado de tal que la contrapresión del quemador de gas exceda la profundidad del sello líquido. Así, el gas será enviado a otro quemador para que maneje los flujos adicionales.

4.5.3 Purga.

El propósito de utilizar gas de purga (gas combustible o gas inerte) es asegurar un flujo positivo de gas en la chimenea y por lo tanto prevenir el retroceso o entrada de la flama al sistema de quemado. Sin el auxilio del gas de purga, el aire puede entrar a la chimenea como resultado de un fenómeno difusional. Esto puede originar el retroceso de la flama (flasback) o, incluso una explosión en la chimenea.

Para contar con una condición segura debe mantenerse un flujo positivo de gas libre de oxígeno para evitar en cualquier momentum, que la concentración de oxígeno (del aire atmosférico) dentro de las líneas de conexión a las boquillas de quemado en un punto situado a 25 pies de éstas, sea mayor del 6%.

El flujo de gas de purga, en ft^3/hr , depende del peso molecular, M , y del diámetro, d (in), según la ecuación:

$$efh = bM^{10.565}d^3 \quad (4.17)$$

Donde $b = 0.214$, es una constante derivada experimentalmente para una chimenea de 24 pulgadas de diámetro, utilizando hidrógeno y nitrógeno como gases de purga.

Se recomienda introducir el gas de purga directamente a la línea de entrada del cabezal de relevo a los tanques de sello, de tal forma que se efectúe el barrido desde los tanques, los cabezales a los quemadores, los subcabezales y las líneas de conexión hasta las boquillas de quemado.

4.5.4 Sellos.

El aire que se encuentra presente en la chimenea puede crear una mezcla explosiva con el gas de quemado que ingresa durante las cargas del gas en la parte baja del quemador. Existen dos tipos comunes de sellos mecánicos, generalmente, localizados en/o por debajo de la boquilla de descarga, que serán usados para reducir la cantidad de gas de purga continua, requerida para prevenir la infiltración del aire dentro de la chimenea:

4.5.4.1 Sello tipo difusión.

Este tipo de sello usa la diferencia entre el peso molecular del gas de purga y el aire que se infiltra para formar un sello de gravedad el cual previene que el aire entre dentro de la chimenea. La fuerza de un cilindro arrojado forza la entrada del aire a través de dos

codos de 180° (uno arriba y otro abajo) antes de poder entrar a la chimenea. Si el gas de purga es más ligero que el aire, el gas de purga se acumula en la boquilla del sello y previene la infiltración del aire en el sistema. Si el gas de purga es más pesado que el aire, el gas de purga se acumula en el fondo del sello y previene que el aire se infiltre. Este sello, normalmente, reduce la velocidad de gas de purga requerido a través de la boquilla, 0.01 ft/seg. También, con algunas composiciones del gas de purga, limitará los niveles de oxígeno por debajo del dispositivo, a menos de 0.1%. Sin embargo, estas relaciones bajas de purga no previenen el quemado interno de la boquilla del quemador, lo cual resulta en una vida corta de la boquilla. Este efecto es llamado cáncer debido a la degradación del metal, del cual esta compuesto la pared de la boquilla del quemador. Muchos sellos moleculares serán purgados en relaciones de 0.5 ft/seg para conservar la flama en la boquilla del quemador y asegurar el tiempo de vida del quemador.

4.5.4.2 Sello de velocidad.

Este sello trabaja bajo la premisa que el aire infiltrado entre a través de la boquilla del quemador y estreche la pared interna de la boquilla del quemador. El sello de velocidad tiene la forma de un cono obstruido con uno o múltiples baffles, el cual forza el camino del aire de la pared donde se encuentre el flujo de gas de purga y pase rápidamente hacia fuera de la boquilla. Este sello normalmente reduce la velocidad de gas de purga a través de la boquilla entre 0.02 ft/seg y 0.04 ft/seg, con lo cual se conserva las concentraciones de oxígeno por debajo del sello de 4% a 8% (aproximadamente 50% de la concentración límite de oxígeno requerido para crear una mezcla inflamable).

4.5.5 Sistema de ignición.

Un panel de ignición del piloto es una parte integral de un sistema de quemado utilizando la generación de una flama para la ignición. Un generador de flama ocupara una línea principal de ignición desde el panel hasta el piloto del quemador con una mezcla flamable de aire y gas combustible. Una chispa es, entonces, introducida en el panel hasta encender la mezcla y enviar una flama a través de la tubería hasta encender el piloto. Estos paneles pueden ser operados manualmente, o pueden ser automáticos para la reignición del piloto cuando la flama del piloto sea extinguida. El sistema de ignición electrónica, el cual no requiere propagación de flama, será también usada.

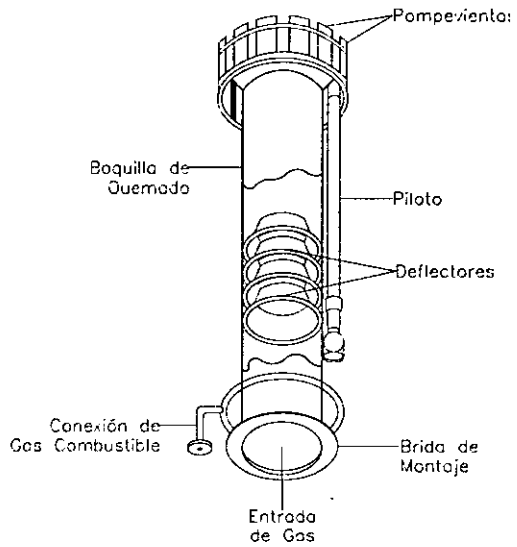
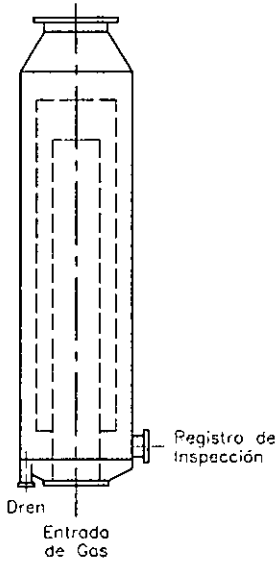
Diversos métodos de monitoreo del piloto estarán disponibles, incluyendo los termocoples instalados dentro de la cabeza del piloto, monitoreo por ionización dentro de la cabeza del piloto y monitoreos ópticos o infrarrojos.

4.6 Dispersión de gases

Los quemadores son usados en la industria del petróleo para disponer con seguridad de los gases durante los desajustes del proceso y emergencias quemando compuestos orgánicos de emisiones, entre las cuales se incluyen el hollín, SO_x, NO_x, CO, etc., sin opción a recuperación usando energía asociada; sin embargo, las eficiencias alcanzadas son bajas emitiendo componentes que por impacto de los fenómenos meteorológicos y las características topográficas, se dispersan como gases y vapores en lugares donde las concentraciones son peligrosas y letales para el personal y corrosivas para los equipos sobre la base de diferentes escenarios, quedando lejos del marco de la legislación ambiental.

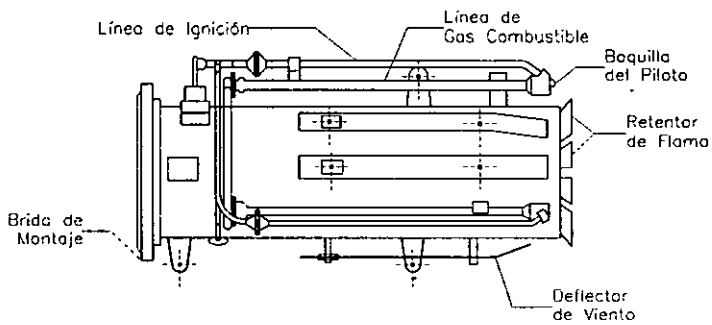
La creciente preocupación por este problema es grande. Se desconocen las concentraciones contaminantes a nivel del piso y en las comunidades adyacentes.

Salida del Gas

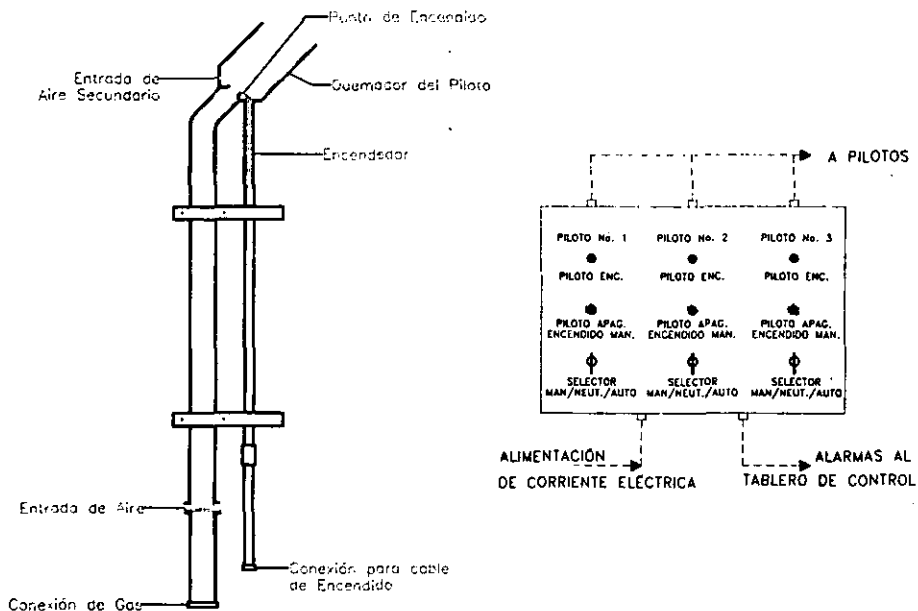


Sello tipo difusión. (Molecular)

Sello tipo velocidad. (Fluídico)



Boquilla tipo convencional



Sistema de encendido electrónico de pilotos

Figura 4.7. Equipo auxiliar para el quemado

Con base en esto, se pretende impulsar la aplicación de modelos de dispersión en los sistemas de quemadores elevados de tal manera que la información generada permita apoyar en la solución de problemas específicos de la industria petrolera; es previsible que los resultados obtenidos apoyarán y enriquecerán trabajos desarrollados en otras disciplinas; se contempla un programa de administración y análisis de riesgos con el propósito de identificar y evaluar cualquier evento de operación anormal o de emergencia y adecuarse a regulaciones ambientales para favorecer el desarrollo sustentable de la industria petrolera en nuestro país en el contexto de dispersión de contaminantes; por lo que la predicción de estos fenómenos es importante para aplicar políticas de prevención de accidentes y desalojo de los habitantes de las comunidades rurales.

El propósito de un modelo de dispersión es el de proporcionar un medio para el cálculo de las concentraciones de contaminantes que se encuentran en el aire, obteniendo información acerca de los contaminantes emitidos y la naturaleza de la atmósfera. La cantidad de contaminantes que serán liberados puede ser determinados a partir de un conocimiento del proceso o medidas actuales; sin embargo, la concentración de dichos contaminantes a nivel del suelo es importante su determinación, debido a que si existe exceso un riesgo significativo pudiera afectar los objetivos de la calidad del aire (www.detr.gov.uk).

4.6.1 Fenómenos meteorológicos y topográficos

Las variables meteorológicas que presentan efectos principales sobre la dispersión atmosférica incluyen la velocidad del viento, la dirección del viento y la estabilidad atmosférica.

La dirección del viento determina el área de vientos descendentes que serán impactados por un escape de químicos.

La velocidad del viento tiene un efecto directo sobre las concentraciones de los contaminantes del aire y, como una regla de dedo, las concentraciones del aire serán inversamente proporcional a la velocidad del viento:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Emisión}}{\text{Veloc.viento}} \times f(\text{Estabil.atmosférica}) \quad (4.18)$$

La estabilidad atmosférica es una medida de la capacidad de la atmósfera para dispersar los químicos. Una atmósfera estable humedece el movimiento del aire en paquetes, mientras que una atmósfera inestable acrecienta el movimiento de un paquete de aire desplazado. Una clasificación estándar disponible, conocido como la clasificación de Pasquill-Gifford-Turner es, comúnmente, utilizada en el modelo de calidad del aire. Este esquema clasifica la estabilidad atmosférica en 6 clases, a partir de la A (muy inestable) hasta la F (muy estable), basada en dichos factores como la velocidad del viento, insolación (exposición al sol) y nubosidad. Aunque dicha clasificación es muy simple, tendrá algunas limitaciones serias en los modelos de dispersión estándar.

Obviamente, es importante el uso de datos seguros meteorológicos que serán representativos de los flujos de vientos locales y la turbulencia atmosférica. El uso de datos meteorológico, basados en casos de peligro, serán requeridos por las agencias reguladoras de la calidad del aire cuando los datos meteorológicos, satisfactorios, no se encuentren disponibles. Esto conducirá a la predicción de los impactos sobre la calidad del aire que pueden ser de 2 a 10 veces mayor que los obtenidos con datos actuales. Así, la colecta de datos meteorológicos actuales es más recomendado para aquellos que seleccionaron los modelos de contaminación del aire.

Por otro lado, las características del terreno local pueden presentar efectos críticos sobre los impactos de las emisiones. Una chimenea elevada que previene los impactos a nivel del suelo es un terreno plano puede, actualmente, acrecentar los impactos sobre una montaña bajo condiciones estables; bajo una atmósfera estable, una pluma elevada aislada de la tierra en un terreno plano, puede tener un mayor impacto sobre una colina cercana. En realidad, el flujo del viento que transporta la pluma sobre las colinas y la pluma con suficiente energía cinética pueden tener un mayor impacto sobre la colina en línea recta.

La presencia de edificios cercanos puede producir downwash de la pluma emitida. Esto ocurre debido al flujo del viento que forman una onda por detrás del edificio; además tiende a acrecentar los impactos a nivel del suelo.

La presencia de grandes cuerpos de agua afectan, también, la dispersión de la pluma como una capa estable de aire, originando interacciones sobre el agua con una capa más inestable por parte de la tierra. Una pluma atrapada en la capa estable, cercana a la

costa, puede, eventualmente, iniciar una fumigación en el suelo, como una capa inestable profunda tierra adentro.

Tabla 4.6. Estimación de las clases de estabilidad de Pasquill

Velocidad del viento superficial A-10 m m*s ⁻¹	Radiación solar			Tiempo de noche Fracción cubierta de nube	
	Fuerte	Moderado	Ligero	≥ 4/8	≤ 3/8
< 2	A	A-B	B	---	---
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	C	D	D
> 6	C	D	C	D	D

A – Extremadamente inestable
 B – Moderadamente inestable
 C – Ligeramente inestable

D – Neutral.
 E – Ligeramente estable.
 F – Moderadamente estable.

Radiación (categoría)	Insolación solar Langley / min	W / m ²
Fuerte	I > 1.0	I > 700
Moderado	0.5 ≤ I ≤ 1.0	350 ≤ I ≤ 700
Ligero	I < 0.5	I < 350

4.6.2 Tipos de pluma y sus características.

La dispersión atmosférica y el comportamiento de las plumas serán dependientes y gobernadas por las condiciones existentes en la atmósfera, es decir, la velocidad del viento y la turbulencia atmosférica. Las condiciones atmosféricas principales serán la estabilidad, neutralidad o cercana a la estabilidad e inestabilidad.

Los distintos tipos de plumas (figura 4.7) pueden resultar a partir de las condiciones atmosféricas y será posible clasificarlas por su tipo de forma. Aunque la siguiente descripción no es precisa, será la más aplicable, particularmente si es aplicada a plumas bajas, relativamente (por ejemplo, 1,000 pies de altura).

1.- Fanning. En el caso de atmósfera estable, (produciendo una pluma fanning), existe una dispersión horizontal en un ángulo recto al viento y paralelo al suelo debido a la turbulencia y difusión. En lo vertical, la dispersión es suprimida debido a la estabilidad de la atmósfera, de tal manera que los contaminantes no se propaguen hacia el suelo. Esta dará como resultado una baja concentración de los contaminantes en el suelo.

2.- Looping. En aire inestable, la pluma, ascenderá y descenderá, conforme se realice el mezclado con la atmósfera (siempre que un paquete de aire vaya hacia arriba, otro paquete de aire deberá estar descendiendo de tal manera que se mantenga la continuidad, la pluma siga esta corriente de aire). Desgraciadamente, la pluma produce humo por debajo más rápidamente, produciendo una mayor concentración cercana a la chimenea comparada con el modelo fanning.

3.- Fumigation. Una inversión hacia arriba atraparà los contaminantes abajo del mismo, dado que la inversión estable previene la dispersión vertical. Los contaminantes liberados por debajo de la capa de la inversión fumigarán la capa de mezclado. Notar que si el humo de la chimenea es lo bastante elevada para liberar los contaminantes dentro de la capa de inversión, la pluma deberá formar un abanico debido a que la pluma surgirá dentro del aire estable.

4.- Coning. En el caso de una atmósfera neutral, la dispersión será horizontal en un ángulo recto al viento, debido a la turbulencia y difusión. La dispersión vertical ocurrirá al mismo tiempo debido a la turbulencia y difusión, dado que los movimientos libres de la turbulencia no tienen dirección específica. No existe convección, debido a la neutralidad de la atmósfera, los paquetes de aire no serán prevenidos debido al movimiento vertical con la turbulencia. Así, la pluma se propagará equitativamente en forma vertical y horizontal formando una pluma con forma de cono.

5.- Lofting. En caso de una pluma del tipo lofting (flotación), los contaminantes se diluyen en la parte de arriba. Esto produce concentraciones muchos muy bajas a nivel del suelo a distancias viento abajo, comparado con el caso de condiciones estables (fanning), debido a la difusión molecular y la turbulencia (ligeramente), permiten que el humo alcance el suelo eventualmente, y en el caso de la pluma fanning no tenga la dispersión compara con la pluma lofting.

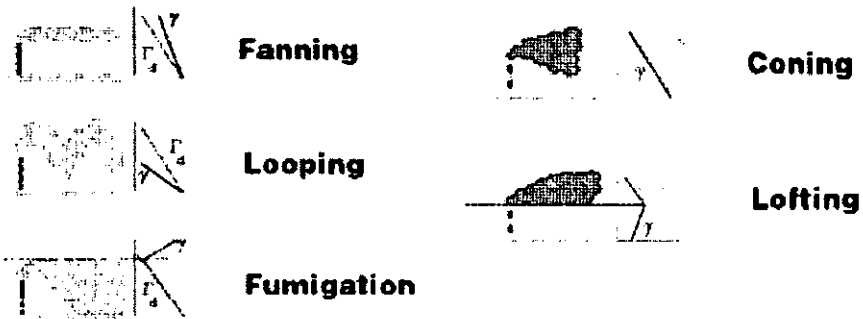


Figura 4.8. Tipos de pluma

4.6.3 Modelos de dispersión.

El ingeniero, con frecuencia, necesita una estimación rigurosa para determinar la magnitud de las emisiones del aire y, por resultado, las concentraciones que se registran por debajo de los vientos.

Un modelo de dispersión es una serie de ecuaciones las cuales describen la relación entre la concentración de un contaminante en la atmósfera, provenientes de una localización seleccionada y la libera, y los factores que afectan la dispersión y la dilución en la atmósfera. El modelo requiere información sobre las características de la emisión y la meteorología de la localidad.

La teoría fundamental de muchos de estos modelos, sin embargo, radica en una sola ecuación (dispersión Gaussiana, ec.4.19), la cual es usada como una herramienta de diseño o de operación, para estimar el impacto de las emisiones de proceso. Comúnmente, este método puede sobrepredecir una concentración puntual, proporcionando una percepción de la magnitud de los efectos sobre la comunidad, esto puede ser usado como una herramienta de comparación para determinar si el modelo más complejo es el adecuado.

$$C = \frac{G}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \left[\exp \frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right] \left[\exp \frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp \frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (4.19)$$

En donde

- x, y, z = coordenadas a nivel del suelo de la chimenea, m.
- C = concentración puntual, kg/m³.
- G = flujo másico de los contaminantes, kg/s.
- H = altura de la fuente por encima del suelo más el ascenso de la pluma, m.
- σ_y, σ_z = coeficientes de dispersión (m), como función de la distancia viento abajo.
- u = velocidad del viento, m/s.

Los datos de viento serán, normalmente, cuantificadas sobre una base de 10 metros. Cuando se descargan pequeñas cantidades de material cerca del nivel del suelo, los datos de la velocidad del viento serán corregidas a partir de una altura de 10 metros, hasta que sean los apropiados para un escape actual; dicha corrección se realizará a partir de una relación de ley de potencia simple apropiada, ecuación 4.20:

$$u_z = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4.20)$$

Donde

- u_z = velocidad del viento a una altura z.
- u_{10} = velocidad del viento a 10 m.
- z = altura por encima del nivel del suelo.
- p = coeficiente de potencia.

Sobre la base de la fuente original, la tabla 4.8 da una lista de valores de σ_y y σ_z correspondiente a las seis clases de estabilidad para distancias, en la dirección del viento, seleccionadas arbitrariamente.

4.6.4 Simuladores comerciales para el modelo de dispersión

Existen muchos modelos de dispersión disponibles para describir los impactos de distintas fuentes y químicos. Los modelos pueden ser clasificados basados en los impactos ambientales que dirigen:

- Impactos locales de emisiones de químicos no reactivos de rutina (o químicos que serán asumidos como no reactivos);

- Impactos locales de emisiones de químicos de rutina, químicamente, reactivos.
- Impactos sobre la visibilidad atmosférica local de emisiones de rutina.
- Impactos local de escapes accidentales; y
- Impactos regionales de emisiones de rutina (por ejemplo, ozono, depósitos de ácido, y bruma regional).

Tabla 4.7. Coeficiente de potencia

Estabilidad	Ley de Potencia	
	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

La tabla 4.9 presenta alguno de estos modelos y sus principales características. Todos estos modelos descritos en EPA (Environmental Protection Agency) estarán disponibles, públicamente, en la Oficina de Planeación de Calidad del Aire y Normatividad (OAQPS por sus siglas en inglés).

Tabla 4.8. Valores aproximados de σ_y y σ_z , m

Distancia (km)	Clases de estabilidad						Clases de estabilidad					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
	Valores de σ_y						Valores de σ_z					
0.1	27	19	13	8	6	4	14	11	7	5	4	2
0.2	50	36	23	15	11	8	29	20	14	8	6	4
0.4	94	67	44	29	21	14	72	40	26	15	11	7
0.7	155	112	74	48	36	24	215	73	43	24	17	11
1.0	215	155	105	68	51	34	455	110	61	32	21	14
20.	390	295	200	130	96	64	1950	230	115	50	34	22
4.0		550	370	245	180	120		500	220	77	49	31
7.0		880	610	400	300	200		780	360	109	66	39
10.0		1190	840	550	420	275		1350	510	135	79	46
20.0		2150	1540	1000	760	500		2900	950	205	110	60

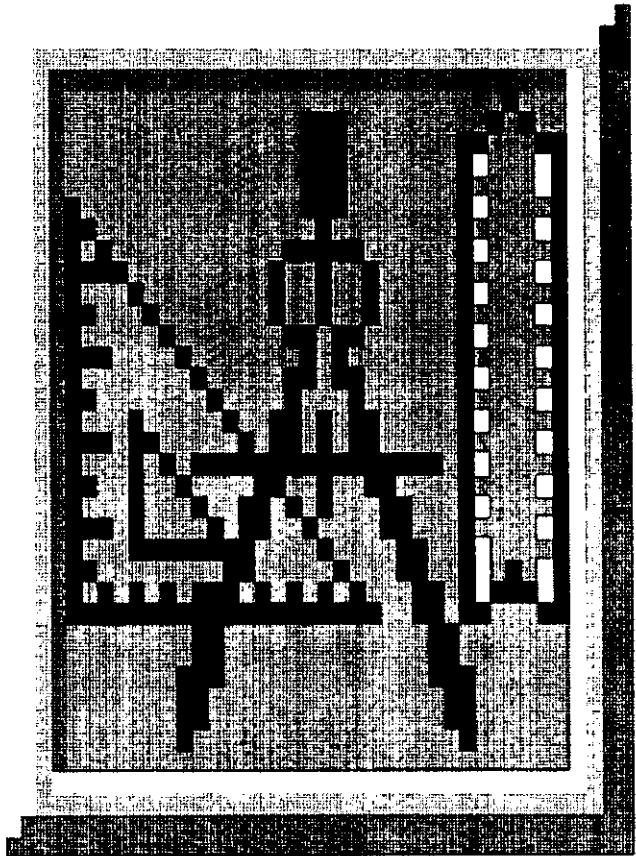
FUENTE: D.B. Turner, Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. Washington, D.C.: HEW, Rev., 1969.

Tabla 4.9. Modelos disponibles para el modelo de las emisiones

Modelo	Número de fuentes	Condiciones meteorológicas	Condiciones ambientales
SCREEN	Uno	Caso peligroso	Terreno plano, acepta elevación del terreno.
Fuente compleja industrial, ISC	Múltiple	Actual	Terreno plano, acepta elevación de terreno, área urbanas o rurales.
COMPLEX 1	Múltiple	Actual	Terreno complejo, área rural.
SHORT-Z LONG-Z	Múltiple	Actual	Terreno plano o complejo, áreas urbanas o rurales.
Modelo de dispersión de terreno áspero (RTDM)	Múltiple, co-localizado.	Actual	Terreno complejo
Dispersión en costa o fuera de tierra (OCD)	Múltiple	Actual	Región costera

CAPITULO 5

DISEÑO DE LOS QUEMADORES DE CAMPO



5 Diseño de los quemadores elevados

Los quemadores son usados en casi todos los procesos químicos para destruir los vapores inflamables, tóxicos o corrosivos. Estos sistemas son diseñados, principalmente, para la destrucción, sin control y con el proceso de quemado, de los vapores producidos durante los disturbios del proceso y escapes de emergencia. La altura de la chimenea es importante para la seguridad del personal y de los alrededores, y el diámetro es de interés para proporcionar la velocidad de flujo suficiente que permita que los vapores/gases escapen por la boquilla manteniendo buen mezclado y dilución, después de la ignición, por parte de los pilotos del quemador.

El American Petroleum Institute (API) propuso factores que tienen influencia sobre el diseño de un quemador, incluyendo la importancia de la velocidad adecuada por parte de la chimenea que permita un mezclado rápido y eficiente. Los gases liberados de la chimenea no deberán diluirse por debajo del límite de inflamabilidad. Los cálculos de la dispersión atmosférica serán importantes para la seguridad de la planta. Los modelos de computo pueden ser usados para evaluar la posición de la pluma cuando se este llevando a cabo el quemado bajo distintas condiciones de viento atmosférico.

La velocidad de descarga de los dispositivos de relevo a través de la chimenea, generalmente, excede los 500 ft/s, debido a esto la velocidad de descarga dentro de aire, es suficiente para llevar a cabo un mezclado turbulento.

Para que un quemador elevado funcione adecuadamente y maneje la capacidad que puede ser requerido, los flujos bajo condiciones de emergencia deberán ser evaluadas. Esto incluye, pero no puede ser limitante, las válvulas de relevo de presión y los discos de ruptura, los blowdown de proceso para el arranque, paro, condiciones de disturbios, y la formación de fuego en la planta creando la necesidad de realizar un vacío o parar todos o parte del sistema.

5.1 Procedimiento de cálculo para el diseño de quemadores elevados.

Para llevar a cabo el diseño de los quemadores elevados, se cuenta con varios procedimientos que se encuentran, tradicionalmente, en la literatura ingenieril siendo los más conocidos los que se encuentran en API RP 521 (1997), API y Brzustowski, y el realizado por la compañía NAO (National AirOil Burner) dirigido por el M. John F. Straitz y es el que, actualmente, utiliza PEMEX para llevar a cabo el estudio sobre la radiación de los quemadores de campo.

La información necesaria para realizar los cálculos, es la siguiente:

- a. Flujo de gas manejado por el sistema
- b. Composición del gas (fracción mol)
- c. Frecuencia de relevo, continuo o intermitente
- d. Humedad relativa
- e. Velocidad del viento
- f. Distancia del quemador al personal expuesto o al equipo a proteger, R

g. Presión atmosférica

Propiedades del gas.

- Peso molecular promedio
- LHV, calor de combustión neto de la mezcla
- Temperatura del gas
- k, relación de calores específicos promedio (Cp/Cv)

5.1.1 Secuencia de cálculo. Método API

- Cálculo del diámetro del quemador
- Del número de Mach a la salida del quemador

$$M = 1.702E - 5 \left(\frac{W}{P_2 d^2} \right) \left(\frac{ZT}{kM_w} \right)^{0.5} \quad (5.1)$$

Donde

M = número de Mach

W = flujo másico; lb/hr

P₂ = presión a la salida del quemador, (atmosférica) psia

d = diámetro interno del quemador, ft

Z = factor de compresibilidad

T = temperatura absoluta, °R

k = relación de calores específicos

M_w = peso molecular de los gases

Un quemador que ha sido seleccionado con base en un análisis real de los flujos, en relación con la operabilidad del proceso muestra un patrón respecto al tiempo en donde se recomienda que el máximo flujo de emergencia manejable por el quemador tenga una velocidad tal que su número de Mach sea hasta un máximo de 0.5 y en condiciones de flujo continuo, este número sea de 0.2. Por lo cual, al fijar el número de Mach y despejando de la ecuación (5.1), el diámetro, d, obtenemos

$$d = \left[1.702E - 5 \left(\frac{W}{P_2 M} \right) \left(\frac{ZT}{kM_w} \right)^{0.5} \right]^{0.5}; \text{ ft} \quad (5.2)$$

- Cálculo de la longitud de la flama

El calor liberado, Q, es determinado como sigue:

$$Q = LHV * W ; \text{ Btu/hr} \quad (5.3)$$

En donde, LHV es el poder calorífico inferior de la mezcla.

Tomando como referencia la figura (5.2), la longitud de la flama es determinada.

- Cálculo de la distorsión de la flama debido a la velocidad del viento

El flujo de vapor esta determinado de la siguiente manera:

$$Q_v = \left(\frac{W}{3600} \right) \left(\frac{379.1}{M_w} \right) \left(\frac{T}{520} \right); \text{ft}^3/\text{s} \quad (5.4)$$

La distorsión de la flama debido a la velocidad del viento esta determinado como sigue:

$$\frac{U_w}{U_j} = \frac{\text{Velocidad - viento}}{\text{Velocidad - descarga}} \quad (5.5)$$

En donde la velocidad de descarga, U_j , esta determinada como sigue:

$$U_j = \frac{4Q_v}{\pi d^{2i}}; \text{ft/s} \quad (5.6)$$

A partir de la figura (5.3), se verifica la distorsión de la flama.

$$\sum \frac{\Delta x}{L}; \text{ para el eje horizontal, ft} \quad (5.7a)$$

$$\sum \frac{\Delta y}{L}; \text{ para el eje vertical, ft} \quad (5.7b)$$

De los cuales, se obtienen los límites de la flama, $\Sigma \Delta x$ y $\Sigma \Delta y$.

Se considera que el epicentro de la flama se encuentra a la mitad de la longitud de la flama, es decir:

$$a = 0.5 * (\Sigma \Delta x); \text{ para el eje horizontal} \quad (5.8a)$$

$$b = 0.5 * (\Sigma \Delta y); \text{ para el eje vertical} \quad (5.8b)$$

- Calculo de la altura requerida del quemador

El nivel de radiación en los alrededores del quemador puede ser estimado, usando la ecuación siguiente:

$$K_r = (\tau F Q_h) / (4\pi D^2) \quad (5.9)$$

Donde

K_r = nivel de radiación, Btu/hr-ft²

τ = fracción de la intensidad de calor transmitido, ≈ 1.0

F = fracción de calor radiado, $\approx 0.15-0.30$ para muchos casos

D = distancia mínima del punto central de la flama al objeto que se considere

Q_h = relación de calor transferido, Btu/hr

La aplicación de la ecuación de diseño asume una propagación esférica de las emisiones térmicas a partir del punto de la fuente. Mediciones experimentales muestran que la suposición de un punto fuente o centro de la flama es valido para distancias grandes, cercana a tres veces la longitud de la flama a partir de la chimenea del quemador. Reacomodando la ecuación de diseño, la distancia, (D), requerida para reducir la intensidad térmica por debajo del limite de seguridad, define la altura de la chimenea como:

$$D = \sqrt{\frac{\tau F Q}{4\pi K}} \quad (5.10)$$

Los niveles de radiación recomendados para diversas condiciones son presentados en la tabla 4.3 (capítulo 4). Comúnmente, se aceptan valores para K de 1500 Btu/hr-ft² para la exposición de las personas que laboran y 3000 Btu/hr-ft² para los equipos expuestos, incluyendo factores de observación pero ignorando la absorción atmosférica.

La altura del quemador, H, esta determinada como sigue:

$$R' = R - a \quad (5.11a)$$

$$H' = H + b \quad (5.11b)$$

Donde

$$D^2 = H'^2 + R'^2 \quad (5.12)$$

$$H' = (D^2 - R'^2)^{0.5}$$

Y, R es la distancia del quemador al personal expuesto, ft.

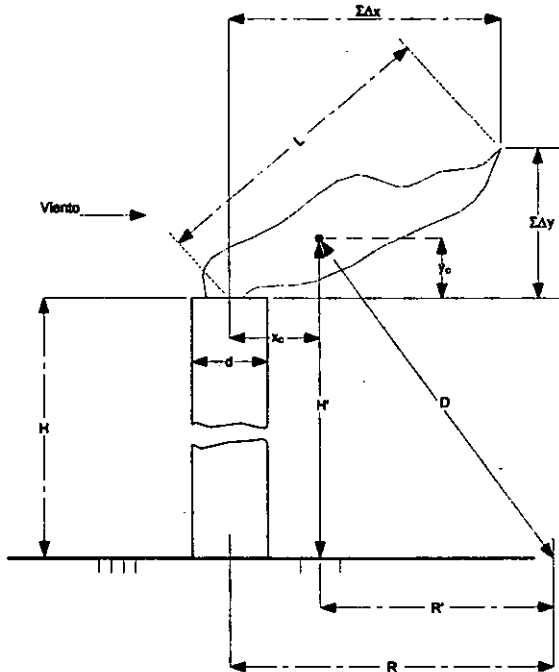


Figura 5.1. Referencias dimensionales para el diseño de un quemador

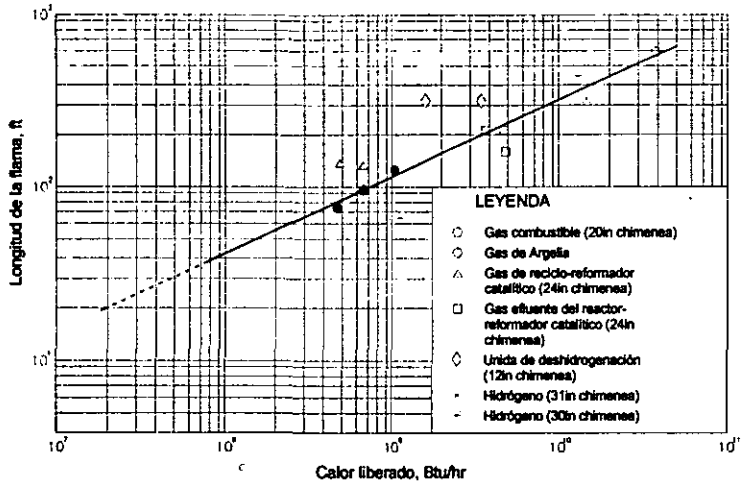
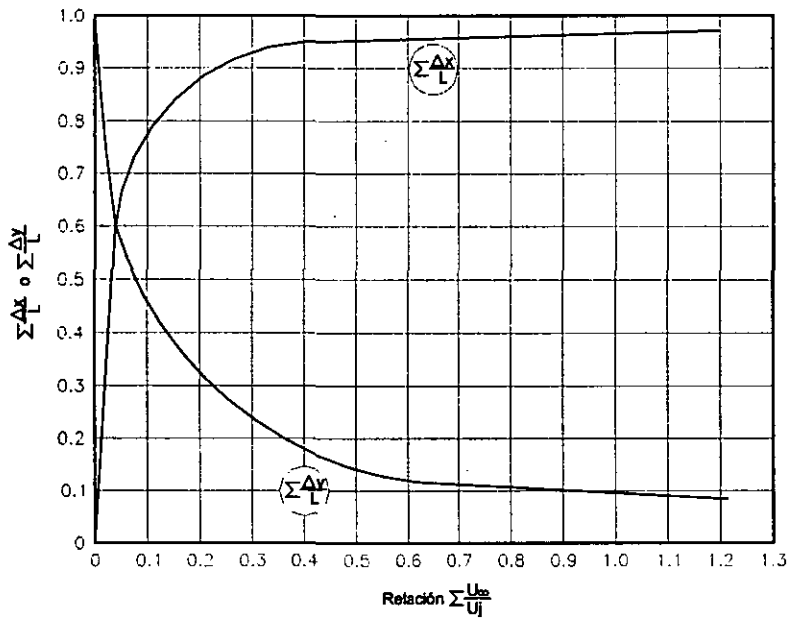


Figura 5.2. Longitud de la flama Vs calor liberado. Tamaños industriales



Nota: U_w es la velocidad lateral del viento
 U_j es la velocidad de salida del gas

Figura 5.3. Distorsión de la flama debido al viento

5.1.2 Procedimiento de cálculo. (Brzustowski)

➤ Diámetro del quemador.

El número de Mach esta definido de la siguiente forma:

$$M = 1.702E - 5 \left(\frac{W}{P_2 d^2} \right) \left(\frac{ZT}{kM_w} \right)^{0.5} \quad (5.1)$$

Donde

M = número de Mach

W = flujo másico; lb/hr

P₂ = presión a la salida del quemador, (atmosférica) psia

d = diámetro interno del quemador, ft

Z = factor de compresibilidad

T = temperatura absoluta, °R

k = relación de calores específicos

M_w = peso molecular de los gases

Un quemador que ha sido seleccionado con base a un análisis real de los flujos, en relación con la operabilidad del proceso, muestra un patrón respecto al tiempo en donde se recomienda que el máximo flujo de emergencia manejable por el quemador tenga una velocidad tal que su número de Mach sea hasta un máximo de 0.5 y en condiciones de flujo continuo, este número sea de 0.2. Por lo cual, al fijar el número de Mach y despejando de la ecuación (1), el diámetro, d, obtenemos

$$d = \left[1.702E - 5 \left(\frac{W}{P_2 M} \right) \left(\frac{ZT}{kM_w} \right)^{0.5} \right]^{0.5} ; \text{ft} \quad (5.2)$$

➤ Centro de la flama

Para poder obtener el centroide de la flama, se seguirá la siguiente secuencia, determinando los siguientes parámetros y sustituyendo en cada uno el resultado obtenido anteriormente:

- Velocidad sónica, V_s

$$V_s = 223 \left(\frac{kT}{M_w} \right)^{0.5} ; \text{ft/s} \quad (5.13)$$

- Velocidad de descarga, V_d

Del número de Mach, (M)

$$M = \frac{V_d}{V_s} ; \text{adimensional} \quad (5.14)$$

$$V_d = M * V_s ; \text{ft/s} \quad (5.15)$$

- Concentración adimensional del gas a ser quemado al limite de explosividad, C_L

$$\bar{C}_L = C_L * \left(\frac{V_d}{V_\infty} \right) * \left(\frac{M_w}{M_\infty} \right) \quad (5.16)$$

Siendo V_∞ la velocidad del viento; M_w y M_∞ , los pesos moleculares del gas y el viento, respectivamente.

- Dimensiones a lo largo del eje del jet, hasta el límite de inclinación

Para $CL \leq 0.5$; las coordenadas de la boquilla para la flama serán determinadas a partir de las siguientes relaciones empíricas.

$$\bar{S}_L = \frac{2.04}{C_L^{1.03}} \quad (5.17)$$

$$\bar{X}_L = \bar{S}_L - 1.65 \quad (5.18)$$

Para $CL > 0.5$;

$$\bar{S}_L = \frac{2.51}{C_L^{0.625}} \quad (5.19)$$

$$\bar{X}_L = \bar{S}_L - 1.65; \text{ para } S_L > 2.35 \quad (5.20a)$$

$$\bar{X}_L = f(\bar{S}_L); \text{ para } S_L \leq 2.35 \quad (5.20b)$$

Donde \bar{S}_L es la distancia adimensional, medida a partir del orificio, a lo largo del eje de la máxima concentración en el quemador; \bar{X}_L es el desplazamiento horizontal de la flama; y $f(\bar{S}_L)$ es la solución para \bar{X}_L de la ecuación:

$$\bar{S}_L = 1.04\bar{X}_L^2 + 2.05\bar{X}_L^{0.28} \quad (5.21)$$

- El ascenso vertical de la boquilla del quemador esta determinado a partir de la siguiente correlación, la cual aplica a lo largo del eje de máxima concentración.

$$\bar{Z}_L = 2.05\bar{X}_L^{0.28} \quad (5.22)$$

- Observando la raíz cuadrada del impulso al flujo en el quemador en relación con el impulso producido por el viento

$$R = \frac{V_d}{V_\infty} \left(\frac{\rho_w}{\rho_\infty} \right)^{0.5} \quad (5.23)$$

Donde ρ_w y ρ_∞ , son la densidad de la mezcla gaseosa y el aire, respectivamente.

Con este parámetro se puede definir las coordenadas dimensionales en base a

$$X_L = \bar{X}_L * D * R; \quad \text{en sentido horizontal} \quad (5.24)$$

$$Z_L = \bar{Z}_L * D * R; \quad \text{en sentido vertical} \quad (5.25)$$

siendo las coordenadas reales del centroide de la flama a la salida del quemador

$$X_c = 0.5 * X_L \quad (5.26)$$

$$Z_c = 0.82 * Z_L \quad (5.27)$$

➤ **Determinación de la altura del quemador**

Para poder llevar a cabo este cálculo, es necesario determinar los siguientes parámetros:

- Distancia desde el epicentro hasta el punto de absorción

$$R' = R - X_c \quad (5.28)$$

- Atenuación atmosférica, es decir, la absorción de la radiación térmica por la atmósfera, la cual depende de las especies que se emiten

$$\tau = 0.79 \left(\frac{100}{r} \right)^{1/16} \left(\frac{100}{D} \right)^{1/16} \quad (5.29)$$

Siendo: r la humedad relativa y D la distancia desde la flama hasta el área iluminada.

- Calor generado

$$Q = LHV * W ; \text{ Btu/hr} \quad (5.3)$$

Donde: LHV es el poder calorífico inferior de la mezcla, Btu/lb; y W el flujo másico del gas, lb/hr.

- Distancia de la flama al punto de interés

$$D = \left(\frac{\tau F Q}{4\pi K} \right)^{0.5} ; \text{ ft} \quad (5.10)$$

Estos parámetros deberán ser determinados empleando un proceso iterativo de tal manera que se obtengan los valores que cumplan con las ecuaciones.

Notas aclaratorias.

1. Los límites inferiores de explosión de una mezcla pueden ser determinados como sigue:

$$C_L = \sum \left(\frac{y_1}{C_{L_1}} \right) + \left(\frac{y_2}{C_{L_2}} \right) + \dots + \left(\frac{y_n}{C_{L_n}} \right)^{-1} \quad (5.30)$$

Donde

C_{L_1} = concentración inferior de explosión del componente en aire.

y_1 = fracción mol (fracción volumen) del componente en la mezcla.

2. La ecuación (5.29) es estrictamente aplicable, únicamente, a flamas de hidrocarburos que emiten luz a 2240 °F, 80 °F a la temperatura de bulbo seco, humedad relativa mayor de 80% y una distancia de la flama entre 100 y 500 ft, pero puede ser empleada para estimar la atenuación atmosférica bajo un amplio rango de condiciones. En el caso de los quemadores, la absorción atmosférica se aproxima por encima del 10 o 20 % a una distancia de 50 ft.

Para un cálculo rápido, puede considerarse a $\tau = 1.0$

2. El factor de emisividad, F, puede ser estimado a partir de la ley de Planck's u alguna otra correlación empírica, pero generalmente es ajustada a los valores de la literatura, sin embargo las recomendadas en la información más reciente son los obtenidos por Oerbring & Sifferman y en general se pueden considerar como:

a. Gases ligeros, $F = 0.25$ ($M = 16$)

b. Gases pesados ($M > 40$)

Con inyección de vapor $F = 0.40$

Sin inyección de vapor $F = 0.50$

5.1.3 Procedimiento de calculo. Método empleado por PEMEX (Straitz III)

❖ Cálculo del diámetro del quemador.

El diseño esta basado en la velocidad de descarga, resuelta para d:

$$d = \left[1.702 \times 10^{-5} \times (W / P_2 M) \times (ZT / kM_w)^{0.5} \right]^{0.5} \quad (5.1)$$

Donde

W = flujo de gas, lb/hr.

P₂ = presión en la boquilla de descarga, psia, (14.7 psia).

d = diámetro interno de la chimenea, ft.

Z = factor de compresibilidad, (igual a 1).

T = temperatura de flujo, °R.

k = relación de calores específicos, Cp/Cv.

M_w = peso molecular promedio de los gases.

M es el número de Mach, el cual es la relación entre la velocidad a la descarga y la velocidad sónica en el vapor. Es igual a 0.5 para un flujo intermitente y de 0.2 para un flujo continuo.

Los quemadores sin humo deberán ser diseñados para las condiciones de operación sin humo, para lo cual se mide el flujo de vapor más el flujo de la corriente. La caída de presión a través de la boquilla del quemador será, para una completa satisfacción, de 2 psia.

❖ Cálculo de la velocidad sónica y la velocidad de descarga.

La velocidad sónica del vapor dentro del vapor es determinada de la siguiente manera:

$$V_{sónica} = 223 \sqrt{\frac{kT}{M_w}} ; \text{ft/s.} \quad (5.13)$$

El flujo volumétrico del vapor es determinado como sigue:

$$Q_v = \left(\frac{W}{3600} \right) \times \left(\frac{379.1}{M_w} \right) \times \left(\frac{T}{520} \right) ; \text{ft}^3/\text{s} \quad (5.4)$$

por lo tanto, la velocidad de descarga será:

$$V_b = \frac{4Q_v}{\pi d^2} ; \text{ft/s} \quad (5.6)$$

❖ Radiación térmica.

Este es el principal interés para un diseño de un quemador. Los cálculos para la radiación térmica deberán ser realizados para evitar valores de exposición peligrosa para el personal, equipo y los alrededores. El siguiente cálculo es un camino conveniente para encontrar la altura del quemador y la intensidad de radiación a distintas localizaciones.

La fórmula para una radiación esférica será:

$$I = \frac{(\text{flujo})(NHV)(e)}{4\pi R^2} \quad (5.31)$$

Donde

I = intensidad de radiación a un punto X, Btu/hr-ft²

Flujo = flujo del gas, lb/hr o SCFH

NHV = valor de calentamiento neto del gas de quemado, Btu/lb o Btu/SCFH

e = emisividad

R = distancia del centro de la flama al punto X.

❖ Intensidad de la flama.

Para determinar la intensidad de la flama a distintas localizaciones, es necesario determinar la longitud de la flama y su ángulo con respecto a la chimenea. Una expresión conveniente para estimar la longitud de la flama, L_f , es:

$$L_f = 10x(d) \left(\frac{\Delta P}{55} \right)^{1/2} \quad (5.32)$$

ΔP es igual a:

$$\Delta P \approx 55x \left(\frac{V_b}{550} \right)^2 \quad (5.33)$$

En donde

L_f = longitud de la flama, ft

d = diámetro interno de la chimenea, in

DP = caída de presión en la boquilla, in H₂O

El centro de la flama se asume que se encuentra localizada a una distancia igual a 1/3 de la longitud de la flama a partir de la boquilla.

El ángulo de la flama resulta de la suma vectorial entre la velocidad del viento y la velocidad de descarga del gas; es decir

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\text{viento}}}{V_{\text{descarga}}} \right) \quad (5.34)$$

Y las coordenadas del centro de la flama con respecto a la boquilla serán:

$$X_c = \frac{L_f}{3} (\cos \theta) \quad (5.35a)$$

$$Y_c = \frac{L_f}{3} (\sen \theta) \quad (5.35b)$$

❖ Determinación de la altura.

La distancia requerida entre el quemador elevado y el punto de exposición a la radiación térmica es expresada como:

$$D = \sqrt{\frac{\tau F Q}{4\pi K}} \quad (5.10)$$

Donde:

K_r = nivel de radiación, Btu/hr-ft².

τ = fracción de la intensidad de calor transmitido

F = fracción de calor radiado

D = distancia mínima del punto central de la flama al objeto que se considere.

Q_h = relación de calor transferido, Btu/hr

Para poder llevar a cabo un trabajo de diseño a partir de los datos obtenidos de la operación del quemador, se sugiere que la relación entre el valor calorífico neto del gas y la fracción F sean usadas.

La relación propuesta es:

$$F = 0.20 \left(\frac{h_c}{900} \right)^{1/2} \quad (5.36)$$

En la cual, el valor de calentamiento neto, h_c , es determinado empleando la siguiente ecuación:

$$h_c = 50m + 100 \quad \text{para hidrocarburos a 14.7 psia y } 60^\circ\text{F.} \quad (5.37a)$$

$$h_c = \sum n h_c \quad \text{para mezcla de gases} \quad (5.37b)$$

Con el valor de h_c determinado para la mezcla de gases, la cantidad de calor emitido puede ser determinada a partir de la ecuación propuesta por Kern (1964), definida como:

$$Q = W \sum n h_c \left(\frac{379}{m} \right) \quad (5.38)$$

donde:

n = es la fracción mol del compuesto de combustión

h_c = valor de calentamiento neto, Btu/SCF

m = peso molecular

Los cálculos finales para determinar la altura del quemador elevado será el mismo empleado en el método API.

Nota: Las siguientes ecuaciones serán empleadas para determinar la intensidad de radiación a distintas localizaciones, tomando en cuenta que la altura del quemador elevado ya fue, previamente, determinada:

a) La distancia de un punto a nivel de suelo al centro de la flama es

$$R = \sqrt{(X - X_c)^2 + (H + Y_c)^2} \quad (5.39)$$

5.2 Nivel de ruido (API RP 521, 1997).

El nivel de ruido para una chimenea puede ser aproximado usando el método descrito en API. Acorde a esta aproximación, el nivel de ruido a 100 ft. desde la parte superior de la chimenea puede ser aproximada por medio de la siguiente ecuación:

$$L_{100} = L + 10 \text{Log}_{10} \left[\frac{1}{2} M C^2 \right] \quad (5.40)$$

Donde

L_{100} = intensidad del ruido a 100 ft, db.

L = parámetro de intensidad del ruido

M = flujo másico a través de la válvula de seguridad, slugs/s.

C = velocidad del sonido del gas, ft/s.

Basado en el parámetro L y el dato de la relación de presión suministrado en formato de gráfica en el API (figura 5.4), la siguiente relación fue establecida, para estimar L basada en la relación de presión, P_r , a través de la válvula de seguridad:

Para $P_r < 2.9$:

$$L = 13.3 + 88.1 \text{Log}_{10} P_r \quad (5.41a)$$

Para $P_r > 2.9$:

$$L = 51.9 + 5.06 \text{Log}_{10} P_r \quad (5.41b)$$

La velocidad del sonido en el gas puede ser estimada usando la siguiente relación:

$$C = 223 \left[\frac{(KT)}{(M_w)} \right]^{0.5} \quad (5.42)$$

Donde

C = velocidad del sonido en el gas, ft/s.

K = relación de calores específicos del gas.

T = temperatura del gas, °R.

M_w = peso molecular, lb/lb-mol.

La ecuación 5.40 esta asociada con las ecuaciones 5.41a, 5.41b y 5.42 y puede ser usada para estimar el impacto del ruido a 100 ft a partir de la parte superior de la chimenea. La siguiente ecuación puede ser usada para estimar el nivel de ruido para las distancias que difieren de los 100 ft tomados como referencia.

$$L_p = L_{100} - 20 \text{Log}_{10} (r/100) \quad (5.43)$$

Donde

L_p = nivel de ruido a la distancia r, decibeles.

r = distancia de la fuente de ruido (parte superior de la chimenea), ft.

Por especificación, el nivel de ruido para los quemadores no debe exceder los siguientes valores:

Etapa(s) de quemado normal: 90 db, evaluados a 10 ft de la fosa o chimenea del quemador (según sea el caso) y a 5 ft de altura, con una presión de referencia de $2.901 \text{exp-9 lb/in}^2$.

Etapa(s) de quemado de emergencia: 110 dBA, evaluados a una distancia igual a la distancia límite prevista por seguridad en efecto de radiación y una altura de 5 ft con una presión de referencia de 2.901×10^{-9} lb/in².

Los límites recomendados para exposición continua al ruido durante la jornada de trabajo son los que se indican en la Tabla 5.1. Para la exposición a niveles superiores de 90 db, debe ser obligatorio el uso de equipo para protección auditiva.

Tabla 5.1. Niveles de ruido permisible.

Tiempo de exposición, hr	Nivel de ruido, db
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1½	102
1	105
½	110
¼ o menos	115

Si la exposición al ruido está compuesta de dos o más niveles de ruido diferentes, se debe considerar su efecto combinado, en lugar del efecto individual de cada uno.

En los casos en que el nivel de ruido exceda el permitido, se deben analizar las siguientes alternativas, a efecto de atenuarlo:

- Modificación de la(s) boquilla(s) de quemado
- Colocar barreras físicas alrededor del área de quemadores

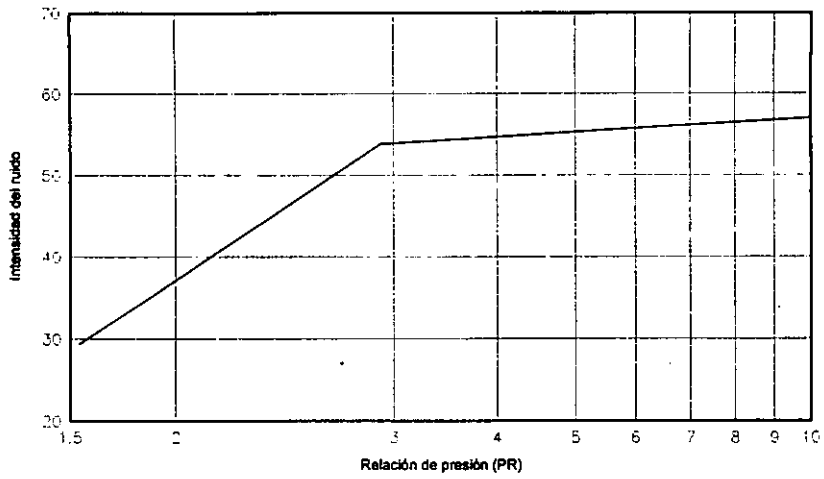


Figura 5.4. Intensidad del ruido a 100 ft de la boquilla del quemador



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 SECUENCIA DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE LOS QUEMADORES
 METODO A.P.I., (API RP 521)

DATOS		
GASTO MASICO	W, [LB/HR]	613913.00
PESO MOLECULAR	M, [LB/Lbmol]	48.0390
FACT. DE COMPRESIBILIDAD	Z	1.0000
No. MACH	Ma	0.5000
Cp / Cv	k	1.1170
CALOR DE COMBUSTION INF.	LHV, [BTU/LB]	29407.7450
CONC.INFERIOR DE EXPLOSION	Ci, [%]	2.4494
TEMPERATURA DEL GAS	T, [°F]	173.1400
TEMPERATURA AMBIENTE	Tw, [°F]	105.2600
PRESION ATMOSFERICA	P, [PSIA]	11.5000
HUMEDAD RELATIVA	Hr, [%]	67.7000
VELOCIDAD DEL VIENTO	Vw, [FT/S]	168.6000
DIST. AL PUNTO A PROTEGER	R, [FT]	350.0000
GASTO VOLUMETRICO	Q, [FT ³ /S]	1638.5533

CALCULOS		
DIAMETRO DE LA BOQUILLA	d, [FT]	2.488
VELOCIDAD DE DESCARGA	Vb, [FT/S]	334.230
Vw / Vb	[(FT/S)/(FT/S)]	0.504
CALOR GENERADO	q, [BTU / HR]	1.805E+10
LONGITUD DE LA FLAMA (1)	Lf, [FT]	425.000
DISTORSION DE LA FLAMA (2)		
ΔX / L	[FT / FT]	0.950
ΔY / L	[FT / FT]	0.167
GEOMETRIA DE LA FLAMA		
ΔX	[FT]	403.750
ΔY	[FT]	70.975
EPICENTRO DE LA FLAMA (3)		
Xc	[FT]	201.875
Yc	[FT]	35.488
DISTANCIA DEL EPICENTRO A "R"	R', [FT]	148.125
FACTOR DE EMISIVIDAD	F	0.300

RESULTADOS FINALES						
FLUX, K	DIST	% CALOR	DIST	% CALOR	DIST	% CALOR
500	928.442	0.704	779.149	0.712	783.429	0.712
1500	536.036	0.729	457.630	0.736	459.897	0.736
2000	464.221	0.735	398.105	0.743	400.021	0.742
3000	379.035	0.745	327.117	0.752	328.626	0.751
5000	293.599	0.757	255.414	0.763	256.529	0.763



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
SECUENCIA DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE LOS QUEMADORES
METODO A.P.I., (API RP 521)

RESULTADOS FINALES, (CONT)

FLUX, K	DIST	%CALOR	DIST (4)	ALT. APR.	ALTURA (4)
500	783.295	0.712	783.299	769.166	733.678
1500	459.826	0.736	459.829	435.317	399.830
2000	399.961	0.742	399.963	371.523	336.035
3000	328.579	0.751	328.581	293.299	257.811
5000	256.494	0.763	256.495	209.401	173.913

Nota. (1) y (2) son obtenidos a partir de graficas

(3) Se considera la localización del epicentro al la mitad (1/2) de la flama

(4) las unidades de estas variables son de longitud, ft.

Perfil de alturas variando distancias, Mach 0.5

Distancia (ft)	Altura (ft)	
	1500 Btu/hr*ft ²	2000 Btu/hr*ft ²
150	----	----
200	-----	-----
250	421.830	361.570
300	413.760	352.250
350	399.830	336.035
400	379.480	311.950
450	351.660	278.200
500	314.620	231.140

Perfil de alturas variando distancias, Mach 0.2

Distancia (ft)	Altura (ft)	
	1500 Btu/hr*ft ²	2000 Btu/hr*ft ²
150	-----	-----
200	-----	-----
250	438.870	378.680
300	431.330	369.980
350	417.980	354.440
400	398.260	331.150
450	371.200	298.420
500	335.120	252.850



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 SECUENCIA DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE LOS QUEMADORES
 METODO BRZUSTOWSKI, (API RP 521)

DATOS		
GASTO MASICO	W, [LB/HR]	613913.00
PESO MOLECULAR	M, [LB/Lbmol]	48.0390
FACT. DE COMPRESIBILIDAD	Z	1.0000
No. MACH	Ma	0.5000
Cp / Cv	k	1.0965
CALOR DE COMBUSTION INF.	LHV, [BTU/LB]	29407.7450
CONC. INFERIOR DE EXPLOSION	Ci, [%]	2.4494
TEMPERATURA DEL GAS	T, [°F]	173.1400
TEMPERATURA AMBIENTE	Tw, [°F]	105.2600
PRESION ATMOSFERICA	P, [PSIA]	11.5000
HUMEDAD RELATIVA	Hr, [%]	67.7000
VELOCIDAD DEL VIENTO	Vw, [FT/S]	168.6000
DIST. AL PUNTO A PROTEGER	R, [FT]	200.0000
GASTO VOLUMETRICO	Q, [FT^3/S]	1638.5533

CALCULOS		
DIAMETRO DE LA BOQUILLA	d, [FT]	2.510
VELOCIDAD SONICA	Vs, [FT/S]	847.739
VELOCIDAD DE DESCARGA	Vb, [FT/S]	423.869
CONC. LIM. INF. EXPLOSIVIDAD (1)	CL, [%]	0.102
COORDENADAS DE BOQUILLA		
S'L		21.416
X'L		19.766
ELEVACION POR ENCIMA		
Z'L		4.727
DENSIDAD DEL GAS	ρi, [LB/FT^3]	0.132
DENSIDAD DEL AIRE	ρw, [LB/FT^3]	0.055
PARAMETRO DE PRESION		
r		3.901
COORDENADAS		
ZL		46.289
XL		193.551
DISTANCIA DEL EPICENTRO A "R"	R', [FT]	103.224
CALOR GENERADO	q, [BTU / HR]	1.805E+10
FACTOR DE EMISIVIDAD	F	0.300

RESULTADOS FINALES						
FLUX, K	DIST.	% CALOR	DIST.	%CALOR	DIST.	%CALOR
500	928.442	0.704	779.149	0.712	783.429	0.712
1500	536.036	0.729	457.630	0.736	459.897	0.736
2000	464.221	0.735	398.105	0.743	400.021	0.742
3000	379.035	0.745	327.117	0.752	328.626	0.751
5000	293.599	0.757	255.414	0.763	256.529	0.763



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
SECUENCIA DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE LOS QUEMADORES
METODO BRZUSTOWSKI, (API RP 521)

RESULTADOS FINALES (CONT)

FLUX, K	DIST	%CALOR	DIST. (3)	ALT. APR.	ALTURA (3)
500	783.295	0.712	783.299	776.467	738.510
1500	459.826	0.736	459.829	448.093	410.135
2000	399.961	0.742	399.963	386.413	348.456
3000	328.579	0.751	328.581	311.945	273.988
5000	256.494	0.763	256.495	234.807	196.850

NOTA. (1). Calculo para cuando la concentracion límite de flamabilidad CL sea menor a 0.5

(2). Al igual que el procedimiento de API, se considera que el epicentro se encuentra a la mitad de la flama

(3). Estas variables tienen unidades de longitud, ft.

Perfil de alturas variando distancias, Mach 0.5

Distancia (ft)	Altura (ft)	
	1500 Btu/hr*ft ²	2000 Btu/hr*ft ²
150	----	----
200	410.150	348.460
250	395.610	331.490
300	374.540	306.530
350	345.890	271.640
400	307.750	222.860
450	256.480	149.670
500	183.100	----

Perfil de alturas variando distancias, Mach 0.2

Distancia (ft)	Altura (ft)	
	1500 Btu/hr*ft ²	2000 Btu/hr*ft ²
150	----	----
200	428.460	368.380
250	421.900	360.820
300	409.610	346.540
350	391.060	324.710
400	365.390	293.820
450	331.070	250.890
500	285.300	188.960



INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
SECUENCIA DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE LOS QUEMADORES
METODO PEMEX

DATOS GASTO MASICO PESO MOLECULAR FACT. DE COMPRESIBILIDAD No. MACH Cp / Cv CALOR DE COMBUSTION INF. CONC.INFERIOR DE EXPLOSION TEMPERATURA DEL GAS TEMPERTAURA AMBIENTE PRESION ATMOSFERICA HUMEDAD RELATIVA VELOCIDAD DEL VIENTO DIST. AL PUNTO A PROTEGER GASTO VOLUMETRICO	W, [LB/HR] M, [LB/Lbmol] Z Ma k LHV, [BTU/LB] Ci, [%] T, [°F] Tw, [°F] P, [PSIA] Hr, [%] Vw, [FT/S] R, [FT] Q, [FT³/S]	613913.00 48.04 1.00 0.50 1.10 29407.75 2.45 173.14 105.26 11.50 67.70 168.60 250.00 1638.55																																														
CALCULOS DIAMETRO DE LA BOQUILLA VELOCIDAD SONICA VELOCIDAD DE DESCARGA ANGULO DE LA FLAMA VIENTO GASES TOTAL CAIDA DE PRESIÓN LONGITUD DE LA FLAMA LONG. CENTRO DE LA FLAMA (1) EPICENTRO DE LA FLAMA Xc Yc VALOR NETO CALORIFICO DEL GAS DISTANCIA DEL EPICENTRO A "R" CALOR GENERADO POR EL HIDROC. FACTOR DE EMISIVIDAD	d, [FT] Vs, [FT/S] Vb, [FT/S] θ θ1 β ΔP, mm Hg Lf, [FT] Lfc, [FT] [FT] [FT] hc, [BTU/FT³] R', [FT] q, [BTU / HR] F	2.510 847.739 331.149 0.471 0.016 0.487 19.938 181.349 90.675 42.416 80.142 2501.950 207.584 1.214E+10 0.333																																														
RESULTADOS FINALES																																																
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">FLUX, K</th> <th style="text-align: left;">DIST</th> <th style="text-align: left;">% CALOR</th> <th style="text-align: left;">DIST</th> <th style="text-align: left;">% CALOR</th> <th style="text-align: left;">DIST</th> <th style="text-align: left;">%CALOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>500</td> <td>802.546</td> <td>0.711</td> <td>676.570</td> <td>0.718</td> <td>680.190</td> <td>0.718</td> </tr> <tr> <td>1500</td> <td>463.350</td> <td>0.736</td> <td>397.381</td> <td>0.743</td> <td>399.293</td> <td>0.742</td> </tr> <tr> <td>2000</td> <td>401.273</td> <td>0.742</td> <td>345.693</td> <td>0.749</td> <td>347.307</td> <td>0.749</td> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>327.638</td> <td>0.752</td> <td>284.051</td> <td>0.758</td> <td>285.321</td> <td>0.758</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>253.787</td> <td>0.764</td> <td>221.788</td> <td>0.770</td> <td>222.724</td> <td>0.770</td> </tr> </tbody> </table>	FLUX, K	DIST	% CALOR	DIST	% CALOR	DIST	%CALOR	500	802.546	0.711	676.570	0.718	680.190	0.718	1500	463.350	0.736	397.381	0.743	399.293	0.742	2000	401.273	0.742	345.693	0.749	347.307	0.749	3000	327.638	0.752	284.051	0.758	285.321	0.758	5000	253.787	0.764	221.788	0.770	222.724	0.770						
FLUX, K	DIST	% CALOR	DIST	% CALOR	DIST	%CALOR																																										
500	802.546	0.711	676.570	0.718	680.190	0.718																																										
1500	463.350	0.736	397.381	0.743	399.293	0.742																																										
2000	401.273	0.742	345.693	0.749	347.307	0.749																																										
3000	327.638	0.752	284.051	0.758	285.321	0.758																																										
5000	253.787	0.764	221.788	0.770	222.724	0.770																																										



INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
SECUENCIA DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE LOS QUEMADORES
METODO PEMEX

RESULTADOS FINALES, (CONT)

FLUX, K	DIST	%CALOR	DIST (2)	ALT. APR.	ALTURA (2)
500	680.077	0.718	680.080	647.625	567.483
1500	399.233	0.742	399.235	341.024	260.882
2000	347.257	0.749	347.258	278.383	198.241
3000	285.281	0.758	285.282	195.691	115.549
5000	222.695	0.770	222.696	80.637	0.495

Nota. (1) Se toma el criterio de la velocidad del viento. Si la velocidad es menor o igual a 30 ft/s, se considera que la longitud del centro de la flama se encuentra a 1/3 de esta. Por el contrario, si es mayor a 30 ft/s la velocidad del viento, entonces se considera dicha longitud como 1/2 la longitud de la flama.

(2) Las unidades de estas variables son de longitud, ft.

Perfil de alturas variando distancias, Mach 0.5

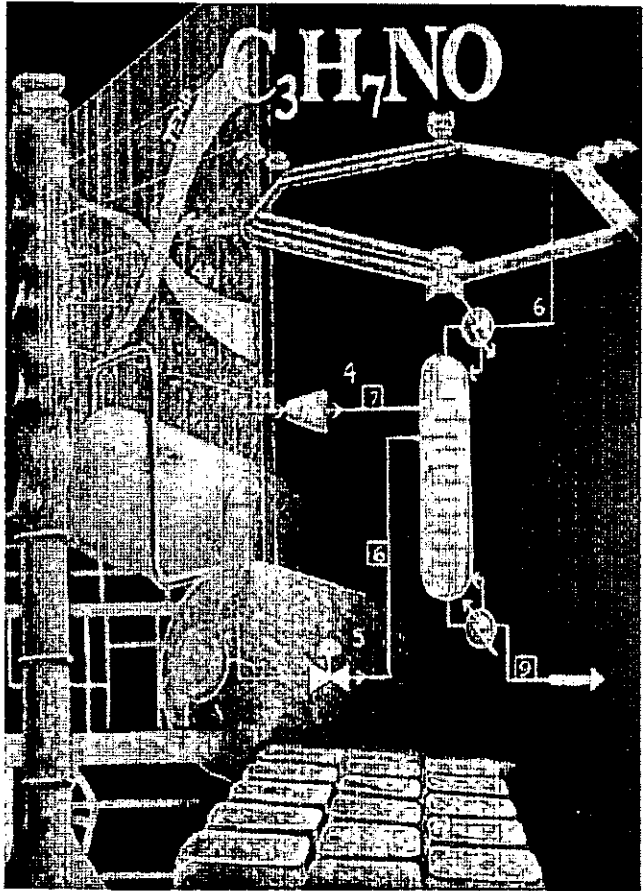
Distancia (ft)	Altura (ft)	
	1500 Btu/hr*ft ²	2000 Btu/hr*ft ²
150	304.324	250.030
200	286.677	229.302
250	260.882	198.241
300	224.881	152.750
350	174.379	81.042
400	97.404	----
450	----	----
500	----	----

Perfil de alturas variando distancias, Mach 0.2

Distancia (ft)	Altura (ft)	
	1500 Btu/hr*ft ²	2000 Btu/hr*ft ²
150	351.961	297.849
200	334.916	277.857
250	309.840	247.740
300	274.780	203.676
350	225.719	135.066
400	151.858	----
450	----	----
500	----	----

CAPITULO 6

OPTIMIZACION DE LOS SISTEMAS DE RELEVO DE PRESION



6 Optimización de los sistemas de relevo de presión

Debido al creciente aumento en el costo de la energía y de los equipos de proceso, es conveniente proponer algunos lineamientos para los criterios de diseño utilizados en los sistemas de relevo, tanto en proyectos de unidades de proceso nuevos como en plantas ya existentes, para determinar si los sistemas son los más convenientes a fin de evitar la pérdida innecesaria de materia y energía.

En estudios recientes ha quedado de manifiesto que una de las formas en que se desperdicia gran cantidad de energía, en las unidades de proceso, es a través de los sistemas de relevo. Dicha pérdida es ocasionada al enviar la materia prima o los productos valiosos hacia el desfogue, como consecuencia de las fallas operativas de los equipos de proceso.

La finalidad de este apartado es el de efectuar una revisión a los criterios tradicionales de diseño de los sistemas de relevo de presión, a fin de establecer nuevos criterios derivados del análisis a las fallas dominantes de los sistemas, trayendo como consecuencia inmediata la disminución de las masas a relevar, con la consecuente reducción, en tamaño, de los equipos, en el diámetro del cabezal y el número de quemadores (optimización). Por otro lado, para los sistemas de relevo ya existentes, la optimización se visualizará en la utilización de los cabezales con otras unidades de la misma planta, reduciendo el número de quemadores a ser usados en el sistema al mismo tiempo, para reducir la cantidad de contaminantes enviados a la atmósfera.

6.1 Fundamento básico

Uno de los mayores problemas que pueden presentarse en una planta es el aumento excesivo de la presión (sobrepresión), que puede provocar fracturas al equipo asociado, o peor aún, la destrucción de éste con las consecuencias que esto implicaría. Por esta razón, se hace necesario tomar en cuenta los riesgos inherentes del proceso en sí, probables fallas en la operación y/o situaciones imprevistas.

Como ya se ha visto (capítulo 1 y 2), la sobrepresión es el resultado de un desbalance en los flujos normales de materia y energía, lo cual crea una condición riesgosa para el personal y puede causar daños al equipo. Existen muchas condiciones posibles que pueden causar la sobrepresión; por lo cual, el ingeniero de diseño deberá determinar cuales condiciones pueden afectar la unidad en operación.

Dentro de las causas dominantes que generan la sobrepresión, algunas de ellas son consideradas más críticas que las otras, las cuales serán incorporadas al diseño y a las especificaciones de tamaño para los sistemas de relevo. Las tres principales fallas que impactan sobre el diseño y el tamaño de los sistemas de relevo de emergencia serán: el fuego externo, el cual nos dará la mayor temperatura para el diseño, debido a que determina la flexibilidad de la tubería; la falla de agua de enfriamiento, la cual proporciona la mayor masa a relevar determinando el diámetro del cabezal y la falla de energía eléctrica.

Si se utilizan los métodos tradicionales de diseño, el tamaño y costo para los sistemas de relevo serían, considerablemente, excesivos. Por esta razón, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) llevo a cabo un proyecto de investigación sobre la manera en como poder disminuir la masa que es enviada al quemador, examinando la capacidad para el Tren de

Naftas en las refinerías del sector II en Tula Hgo., y Salina Cruz, Oax. Este estudio evaluó las opciones para reducir las descargas de relevo usando limitaciones básicas como las indicadas en los códigos internacionales.

En dicho estudio se verificó que para refinerías del extranjero, análogo en capacidad a las que se encuentran en México, los sistemas de relevo manejan hasta una tercera parte del flujo de diseño considerado por firmas de ingeniería nacionales y extranjeras para PEMEX.

El principal objetivo fue, sustancialmente, recortar los flujos de relevo durante las principales fallas que se encuentran en el sistema. Tales reducciones facilitan un ahorro significativo en la especificación del equipo y material asociado con este sistema. El desarrollo de criterios para este estudio puede ser aplicado a otras industrias afines.

6.2 Consideraciones generales de códigos y normas vigentes

En el diseño de una planta no es posible diseñar el equipo de proceso para todas las condiciones posibles que puedan causar operaciones anormales; por lo cual la manera más práctica de proteger este equipo es por medio de un sistema de relevo de presión, compuesto de cabezal, válvulas de seguridad, discos de ruptura, etc.

El detalle adecuado de las situaciones de sobrepresión es una consideración clave en la seguridad de las industrias de procesos químicos. Los estándares del American Petroleum Institute (API) y el Código Internacional ASME, proporcionan criterios para el diseño de los recipientes y la protección de estos de la sobrepresión.

API publica prácticas recomendadas dirigidos a los sistemas de relevo de presión en la industria del petróleo. API 521 describe los métodos de diseño de los sistemas de quemado; estos métodos, básicamente, requieren el diseño de las válvulas de relevo de presión (API 520) para cada uno de los recipientes y el diseño del cabezal principal, dada una situación de riesgo debido a la sobrepresión, considerando el venteo simultáneo de todos los recipientes afectados.

El código ASME es una guía de protección para la industria de procesos, que establece regulaciones para las prácticas seguras en el diseño, construcción, inspección y reparación de los recipientes a presión, no expuestos al fuego, que manejen petróleo o algún otro tipo de fluido peligroso.

De acuerdo al Código ASME, Sección VIII, todos los recipientes a presión, independientemente del tamaño o presión, deberán estar provistos de dispositivos de seguridad de acuerdo a los requerimientos señalados en los párrafos UG-125 a UG-134.

Todos los recipientes a presión, a excepción de los generadores de vapor, deberán estar protegidos por dispositivos de relevo de presión que eviten el incremento de la presión más allá del 10% por encima de la máxima presión de trabajo permisible (MAWP), excepto cuando el exceso de presión sea causado por la exposición al fuego u otra fuente inesperada de calor.

En el caso de que el recipiente sea expuesto al fuego u otra fuente inesperada de calor externa, se deberá instalar dispositivos de relevo de presión capaces de prevenir que el

aumento de presión no sea mayor al 21% de la máxima presión de trabajo permisible del recipiente.

Además, el tamaño de la tubería a la descarga deberá ser tal que la presión que exista o se desarrolle en la línea de descarga no reduzca la capacidad de los dispositivos de relevo por debajo de la cantidad requerida para brindar protección al recipiente de la sobrepresión.

6.3 Criterios para el diseño del cabezal de relevo (Gómez et al, 1999)

El código API 521 establece que la primera consideración es cumplir con los requerimientos establecidos en el código ASME-ANSI-B31.3. El sistema deberá proporcionar una área completa de entrada y evaluar la reducción en la capacidad de la válvula de relevo causada por los dispositivos de disco de ruptura, válvulas de bloqueo u otros componentes.

El segundo requerimiento, cuando se diseña un sistema de relevo, es definir la carga a ser manejada. En este análisis, más de una válvula de relevo de presión será considerada; su carga estará determinada para toda contingencia que pudiera afectar alguna válvula de relevo; y, finalmente, la carga total del sistema la cual deberá estar bien definida. En general, cada válvula que se encuentre en el sistema de relevo deberá tener un flujo, una temperatura y las propiedades de los fluidos determinadas, para cada una de las contingencias pertinentes. Para definir la carga del sistema, no deberá considerarse la simultaneidad de dos o más casos, sin relación, por ejemplo, no es necesario asumir que la falla del agua de enfriamiento ocurra dentro del sistema de proceso bajo condiciones de fuego.

Cuando se considere que el fuego sea una emergencia que pueda ocasionar sobrepresión en los equipos del sistema, no deberán sumarse todas las masas calculadas para los equipos sujetos a emergencia, sino solo aquellas correspondientes a los equipos comprendidos en un área llamada "zona de fuego", la cual esta delimitada por una área de 2,500 ft². Aunque algunos equipos, tales como los tanques de almacenamiento, suelen aislarse por medio de diques o sistemas de aspersión de agua, con el fin de evitar la propagación de un posible incendio (Wong, 2000).

Cuando se diseña la tubería de descarga y el manifold de relevo, de un sistema cerrado, se asume que la contrapresión, la cual puede existir o desarrollarse, no reduce la capacidad de cada uno de los dispositivos de relevo, por debajo de la cantidad requerida para proteger al recipiente de la sobrepresión. Por consiguiente, el efecto de la contrapresión sobre las características de operación de las válvulas deberá ser, cuidadosamente, examinada. La tubería de descarga del sistema deberá ser diseñada de tal manera que la contrapresión generada, causada por el flujo, no reduzca la capacidad de una válvula de relevo de presión que pueda estar relevando simultáneamente. Mecánicamente, el sistema de entrada deberá estar drenando por sí misma. Este sistema estará diseñado de tal manera que prevenga una pérdida excesiva de presión, la cual cause vibración con la consecuente reducción de flujo y daño a las uniones de la tubería y superficies residentes. Otro criterio general para los sistemas de relevo es que los flujos nunca deberán alcanzar una velocidad mayor a 0.7 Mach (Bonilla, A. J. 1978).

Sí el flujo del sistema de relevo de presión es enviado a un quemador, el arreglo específico de los cabezales y la ruta de la tubería, para el sistema de múltiples válvulas,

es una cuestión de minimización de la inversión. Los diseñadores deberán considerar las cargas del sistema, las limitaciones de la contrapresión, los requerimientos para materiales especiales y otros parámetros de diseño. Cuando sean separados los cabezales de relevo, el diseñador deberá tomar en cuenta los siguientes factores:

- a. El fenómeno de la corrosión en los materiales
- b. Diferencias significativas en los niveles de presión del equipo conectado al sistema
- c. Relevo de la presión que puede estar sujeta a la tubería anormalmente elevada o a baja temperatura
- d. Materiales reactivos

En el arreglo del cabezal, diversas consideraciones deberán ser dadas para algún requerimiento de mantenimiento durante el paro o separación de los equipos protegidos. Generalmente no es aconsejable enviar los cabezales, de las válvulas de relevo, a través de una área de operación donde su principal mantenimiento de paro sea desempeñado por separado. Además, es aconsejable aislar los cabezales que sean empleados para el área de proceso de los sistemas de relevo, que aislar las válvulas de relevo de presión dentro de un área de proceso común.

6.4 Optimización de los sistemas de relevo

Uno de los viejos y simples medios de reducir masas a relevar es mediante el relevo de hidrocarburos ligeros hacia la atmósfera bajo condiciones de emergencia. De acuerdo a lo anterior, antes de diseñar un sistema de relevo a la atmósfera, deberá tomarse las siguientes consideraciones:

- El relevo de hidrocarburos hacia la atmósfera en condiciones de emergencia deberá ser permitido por los códigos locales, de acuerdo al grado de toxicidad de las emisiones.
- Los hidrocarburos a relevar, no deberán causar riesgos de incendio.
- El nivel de ruido no deberá ser excesivo durante el relevo.
- Las válvulas de relevo no deberán tener fugas.

Pero para poder enviar las descargas de relevo a la atmósfera es necesario realizar un análisis de las condiciones con las que cuenta el lugar de descarga asegurando la seguridad del personal y comunidades aledañas, de lo contrario, la descarga se hará hacia un sistema cerrado.

El diseño de los sistemas de relevo basado en los criterios indicados anteriormente, algunas veces sobrespecifica a los cabezales y chimeneas de los quemadores con diámetros grandes. El sistema más grande se considera excesivo cuando son comparados con otras unidades, especialmente para el caso de falla de agua de enfriamiento o fuego.

6.4.1 Falla por fuego

El análisis para el caso de fuego externo, puede alcanzar reducciones importantes sobre el flujo de relevo, siguiendo los criterios establecidos en el API 520 (1993):

➤ Para determinar el vapor generado, únicamente la porción del recipiente que se encuentra humedecido por su líquido interno, y es igual o menor a 25ft por arriba de la fuente de la flama, es considerado

➤ La máxima extensión de un fuego esta limitada a un área de tierra de 2,500 a 5,000 ft², muchas refinerías usan 5,000ft² (API 521). El círculo equivalente tendrá un diámetro alrededor de 57 a 80ft; además no se requiere que los recipientes principales se encuentren en el centro de la zona de fuego. La guía para definir la localización, se encuentra basada en el potencial de una máxima extensión ocasionada por un fuego externo, es decir, dentro de la zona de los 5,000 ft², la zona deberá estar cerrada con sus respectivos recipientes y tubería relacionada.

➤ Cuando las descargas de las válvulas sean enviadas a un cabezal de un sistema cerrado, este deberá estar diseñado para que maneje el máximo flujo resultante de una sola contingencia sin el desarrollo excesivo de la contrapresión en las válvulas de relevo conectadas al sistema. Cuando las válvulas relevo-seguridad estén conectados al sistema de relevo de emergencia, el grupo de equipo dentro del área de riesgo por fuego puede influir en el tamaño de la tubería de relevo requerida. Proporcionando separaciones razonables entre los grupos de equipos, la cantidad de material liberado dentro del sistema de quemado, bajo condiciones de fuego, podrá ser reducida. La falla de energía eléctrica relacionada con el fuego deberá ser incluida en el análisis de contingencia para el sistema de quemado (API 2001).

Además de los antes mencionado, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

➤ Un recipiente asociado no deberá estar conectado a su recipiente principal por medio de una válvula de paro. Sin embargo, en acorde al código ASME y el estándar API, una válvula LO (candado abierto) o CSO (sello del vástago abierto) son permitidos.

➤ Deberá considerarse que durante un incendio todas las corrientes de entrada y salida del sistema a relevar y todas las fuentes de calor, dentro del proceso, estén cerrados.

➤ En el caso de que el aislante que contenga el recipiente pueda ser destruido por el fuego, no deberá considerarse la presencia de éste como resistencia a la entrada de calor.

6.4.2 Falla por agua de enfriamiento

La falla de agua de enfriamiento, por otro lado, es más compleja que la falla por fuego, debido a que su posible reducción depende de la interpretación de los códigos. Debido a que la aplicación de los criterios tradicionales de diseño, para la causa de agua de enfriamiento, arrojaban como resultado grandes masas a relevar, y por consiguiente quemadores de campo y equipo asociado con dimensiones excesivas, se vio la necesidad de modificar los criterios, con la finalidad de disminuir los flujos a relevar y reducir el costo de los quemadores, al requerirlos de menor tamaño. Para lo cual, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) decidió combinar el criterio de los códigos internacionales con las consideraciones de Lawley y Kletz's (1975) para reducir el tamaño de los cabezales de relevo, para el caso de una falla de agua de enfriamiento. Los siguientes criterios serán:

➤ Efectuar corte a las fuentes de energía del proceso: combustóleo y/o gas combustible a los hornos y vapor de calentamiento a los rehervidores.

- Con la finalidad de garantizar un calor remanente bajo, se tendrá una señal de paro a las bombas de transferencia (bombas de fondos de la torre respectiva).
- Instalar un interruptor por baja presión en el cabezal de agua de enfriamiento para ejecutar una interconexión lógica.
- Las válvulas de seguridad tendrán la capacidad para manejar la capacidad de diseño total, siguiendo los criterios establecidos por los Códigos Internacionales.
- No se considera una falla simultánea en dos sistemas de corte, ya que de lo contrario los flujos serán aditivos.

El sistema de corte, aplicado para disminuir el flujo del cabezal de relevo, deberá usar 3 interruptores por baja presión, los cuales estarán colocados en el cabezal principal que transporta el agua de enfriamiento. Cuando dos de los tres interruptores se encuentren cerrados, el sistema estará en un modo de operación. El sistema deberá ser probado, con frecuencia, hasta asegurar que su funcionamiento es el correcto, figura 6.1.

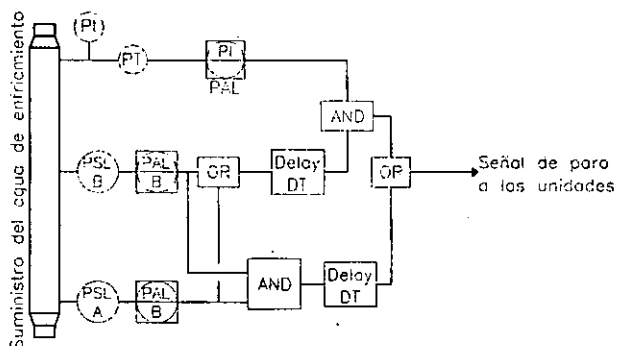


Figura 6.1. Diagrama de control lógico para el sistema de protección contra la falla de agua de enfriamiento

6.4.3 Falla de energía eléctrica

El cálculo para los requerimientos de relevo debido a la falla de energía requiere un análisis cuidadoso de la planta o el sistema para evaluar que equipo será afectado por una falla de energía y que falla de los equipos de proceso afectará la operación completa de la planta.

La experiencia muestra que este tipo de falla tiene muchos efectos. Sin embargo, el caso crítico es cuando los condensadores de las columnas fraccionadoras usan cambiadores de calor con suministro de aire frío como un condensador. En este arreglo, cuando el motor eléctrico se detiene, las consecuencias para las columnas serán análogas a la falla del agua de enfriamiento. La falla de energía total requiere un esfuerzo adicional para analizar y evaluar los efectos combinados de las fallas de múltiples equipos. Consideraciones especiales deberán ser dadas para el efecto llevado a cabo por la apertura simultánea de las válvulas de relevo en distintos servicios, particularmente si las válvulas de relevo descargan dentro de un sistema cerrado.

6.5 Simulación dinámica

La simulación dinámica es una herramienta de diseño, que esta tomando impulso, para la ingeniería de procesos que predice cómo un proceso y sus controles responden a diversos disturbios, como una función del tiempo. La simulación dinámica es usada para evaluar las configuraciones de los equipos y los esquemas de control y determinar un diseño capaz y seguro.

Los modelos usados en el diseño de los procesos, en la simulación dinámica, no están basados en funciones de transferencia, contrarios a otros simuladores, pero estos se encuentran basados en principios fundamentales de la ingeniería y ecuaciones física actuales que gobiernan el proceso. Cuando es usado en el diseño de un proceso, los modelos de la simulación dinámica incluyen lo siguiente:

- Modelos de los equipos que contienen capacidad de masa y energía a partir de los balances diferenciales
- Termodinámica rigurosa basada en correlaciones de propiedades, ecuaciones de estado y tablas de vapor
- Tubería actual, válvula, destilación por etapas, y equipos hidráulicos para flujos incompresibles, compresibles y críticos
- Modelos de control detallado para duplicar los sistemas de control distribuidos modernos.

Estos modelos serán detallados, de tal manera que los resultados obtenidos influyan en las decisiones de los ingenieros de diseño y aseguren una predicción más realista del proceso y la interacción de los sistemas de control asegurando una estabilidad en el sistema de control.

Cuando la simulación dinámica es usada para el diseño de los equipos de proceso y los equipos de seguridad, es necesario asegurar que los modelos supuestos sean conservativos. Por ejemplo, si la simulación dinámica es usada en el cálculo del aumento de la presión en un cambiador de calor después de una fractura de tubo, la presión más alta calculada puede ser usada como la presión de diseño. Si todas las suposiciones son conservativas, la presión del cambiador actual no excederá la presión de diseño durante la ruptura de un tubo. A pesar de estas medidas conservativas, las condiciones de diseño de los equipos calculados a partir de la simulación dinámica serán menos severas que las condiciones determinadas por los métodos de calculo convencionales.

Comúnmente la aplicación de la simulación dinámica incluye:

- Análisis de depresurización en unidades hidrotradoras
- Reducción de la carga de relevo en columnas de destilación
- Análisis transiente en una fractura de tubo en los cambiadores de calor
- Sistema de control en los sistemas de producción y distribución de vapor en la refinería

- Análisis de control del surge en compresores
- Diseño de líneas de transferencia a vacío
- Estudios de depresurización criogénica
- Análisis de control en columnas de destilación

6.5.1 La simulación dinámica en una torre fraccionadora. Reducción de carga de relevo

Los métodos convencionales para determinar las cargas de relevo en una columna fraccionadora serán muy conservativos y pueden conducir a sistemas de quemadores más costosos o reemplazar los cabezales del quemador innecesariamente. También, las refinerías pueden tener espacios reducidos los cuales estarán restringidos por el radio de radiación del quemador. Por consecuencia, las refinerías se verán imposibilitadas para expandirse sin el uso intensivo de controles interconectados o una expansión por parte del quemador. La simulación dinámica proporciona una alternativa a los métodos convencionales de cálculo y, por lo tanto, determinará las cargas de relevo, relativamente, bajas. Las modificaciones de expansión del quemador, pueden evitar el remplazo innecesario de los cabezales del quemador o las interconexiones de control complejas.

6.5.1.1 Escenarios de relevo

Generalmente, las válvulas de relevo de presión y los sistemas de quemado estarán diseñados sobre la falla de energía eléctrica, falla parcial de energía o falla de agua de enfriamiento. En una falla de energía, las bombas accionadas por motor, tales como en el reflujo y los enfriadores alrededor de la bomba, detienen su funcionamiento. También, la falla de energía detiene los ventiladores en los condensadores de aire frío. Las fallas de energía parcial serán con frecuencia más severas que las fallas de energía debido a que la bomba de circulación en un reboiler puede continuar operando mientras que la bomba de reflujo y los motores de los ventiladores del aire frío están parados. La falla de agua de enfriamiento puede conducir a cargas de relevo elevadas debido a que el calor continuo del reboiler, después que el condensador se detenga, inyecta calor al agua de enfriamiento.

6.5.1.2 Cuándo aplica la simulación dinámica

Solamente las columnas de destilación claves deberán ser simuladas para determinar las cargas de relevo debido a que una simulación dinámica rigurosa es más costosa que los métodos de cálculo convencionales. Generalmente, la simulación dinámica deberá ser usada, únicamente, después de un diseño convencional teniendo identificado la necesidad de reducir la carga al quemador. La decisión de si usar la simulación dinámica para determinar la carga de relevo de una sola columna basado en la contribución de la columna a la carga de relevo del quemador. Buenos candidatos para la simulación dinámica incluyen las columnas de crudo y a vacío, torres fraccionadoras FCC, y las torres fraccionadoras de la unidad de hidroprocesamiento. Estos beneficios deberán ser considerados cuando se imponga el potencial de una columna, en particular para la simulación dinámica:

➤ Los métodos de cálculo convencionales, con frecuencia, sobrepredicen la carga de relevo para una columna cuya alimentación tiene un punto de ebullición amplio, por un factor de 2. La simulación dinámica reduce las cargas de relevo calculadas para estas

columnas debido a la precisión de limitar la cantidad de componentes ligeros y el calor sensible requerido para evaporar los componentes pesados

- La simulación dinámica puede proporcionar un cálculo realista del pinch en el reboiler a presiones elevadas usando la dependencia del tiempo con la composición de la alimentación en el reboiler
- La simulación dinámica proporciona una estimación precisa del tiempo requerido para relevar una columna antes que el ascenso, por parte de la válvula de relevo, sea obstáculo para la intervención del operador, es decir, antes de ser accionada la válvula, el operador habrá tomado medidas para controlar el aumento de la presión en los equipos
- La simulación dinámica proporciona una penetración dentro del comportamiento de la columna durante las condiciones de relevo. Por ejemplo, puede indicar si es mejor mantener o parar el reflujó después de una falla de agua de enfriamiento
- La simulación dinámica indicaría que tan grande es la vaporización del líquido en el fondo de la columna tomando en cuenta la alimentación por parte del reboiler. Después de que este líquido sea desplazado, la carga de relevo disminuirá rápidamente

6.5.1.3 Modelo de una columna.

La figura 6.2 muestra un modelo de la columna típica. Este modelo incluye etapas, condensador, recibidor en el domo, fondo de la columna, reboiler y enfriadores alrededor de la bomba. Cada elemento de la columna deberá, correctamente, ser definida para cada uno de los componentes de la alimentación. Las etapas deberán estar, rigurosamente, modeladas y el modelo deberá ser lo suficientemente robusto para manejar una pérdida en la capacidad del líquido.

Los flujos de entrada y salida serán considerados como constante o fijadas a cero si el fluido es alimentado por una bomba que se dispare debido a la pérdida de energía. Por lo tanto, el modelo de las bombas en detalle es innecesario. También, no deberá ser necesario modelar los controles de la columna si los flujos o posición de las válvulas, posteriormente, serán constantes o ajustadas a cero. Las válvulas de relevo podrán ser modeladas como válvulas de módulo o de acción pop.

Los condensadores pueden ser modelados usando el área de transferencia de calor o reglas de dedo, tales como el ajuste del servicio debido a la convección natural a 25% del servicio normal. Para un análisis más detallado, el coeficiente de transferencia de calor por convección natural podrá ser determinado con un programa de cambiadores de calor. Estos coeficientes de transferencia de calor podrán ser correlacionados por las variables dinámicas del proceso tales como la temperatura del vapor en la etapa del domo y el flujo de vapor.

Los reboiler con fuego directo pueden ser modelado manteniendo el servicio constante, al valor de operación normal. El servicio para los reboiler de vapor puede ser modelado basado en la fuerza de movimiento térmico con el calor del fondo de la columna.

Los modelos dinámicos requieren las mismas correlaciones que los requeridos en los modelos en estado permanente. A condiciones estacionarias, el modelo dinámico deberá estar a la par con el modelo en estado estacionario.

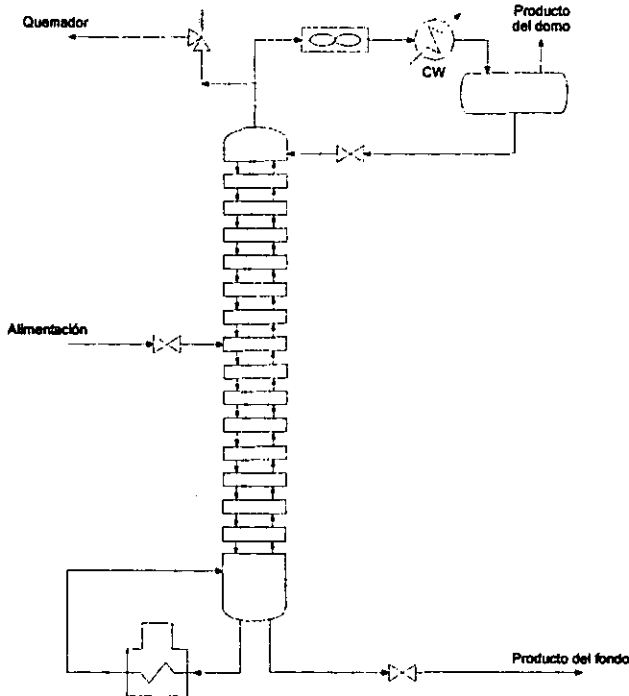


Figura 6.2. Modelo de una columna fraccionadora. Vista en el simulador dinámico

6.6 Aplicabilidad de los criterios de reducción de relevo

Debido a que la aplicación de los criterios tradicionales de diseño arrojaban como resultado grandes masas a relevar y, por consiguiente, quemadores de campo y equipo asociado, con dimensiones excesivas, se vio la necesidad de proponer nuevos criterios de diseño con la finalidad de disminuir los flujos a relevar y reducir el costo de los quemadores, al requerirlos de menor tamaño.

Para tal caso y con el fin de visualizar la manera en como fueron aplicados los criterios de reducción de masas a relevar, se muestra, en forma breve, los resultados obtenidos por parte del estudio llevado a cabo a la refinería de Tula, Hgo., describiendo las consideraciones de diseño y el circuito de control de seguridad instalado, que permita la reducción de las masas a ser relevadas.

Se le ha dado el nombre de "Sector de Gasolinas II" al conjunto de las siguientes unidades de proceso: (1) Hidrodesulfuradora de Naftas No. 2; (2) Hidrodesulfuradora de Destilados Intermedios No. 3; (3) Hidrodesulfuradora de destilados Intermedios No. 4; (4) Reformadora de Naftas No. 2; y (5) Tratadora y Fraccionadora de Hidrocarburos No. 2

Las cuales se encuentran localizadas dentro de la Refinería "Miguel Hidalgo" de Tula, Hgo., y tienen como objetivo principal, producir combustibles de alta calidad para uso en motores de combustión interna, como se muestra en la figura 6.3

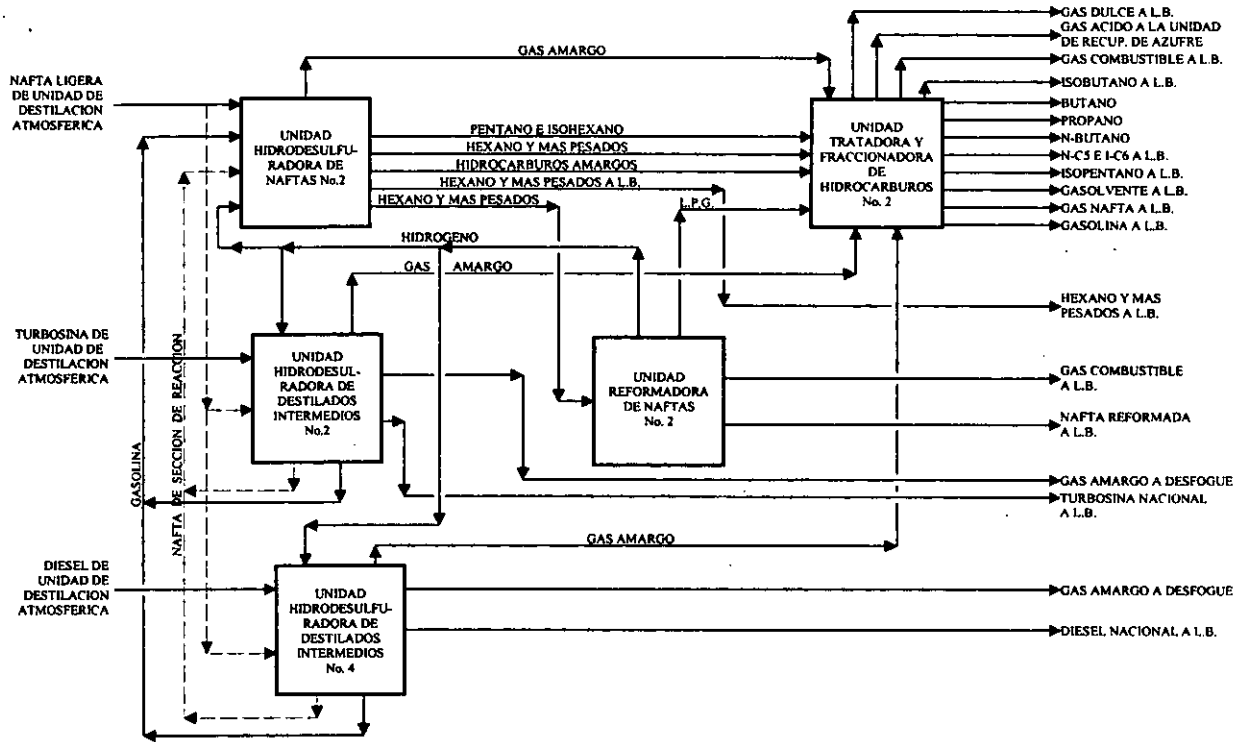


Figura 6.3. Diagrama de bloques de integración, "Sector de Gasolinas II". Refinería de Tula, Hgo

6.6.1 Descripción del sistema de corte en la refinería de Tula, Hgo

El diseño del sistema de relevo correspondiente al Sector de Gasolinas II de Tula, Hgo., está basado en las consideraciones indicadas en el API RP 520 y API RP 521, así como del código ASME Sección VIII Div. I y II. Sin embargo, la revisión y modificación de los criterios de diseño se realizó basándose en medidas alternativas de emergencia, asegurando las observaciones de las recomendaciones y sugerencias contenidas en los códigos vigentes. Las consideraciones finales para la disminución de las masas a relevar fueron definidas una vez efectuando el análisis de fallas en donde se tiene los siguientes puntos importantes:

- Las causas dominantes en el diseño de los cabezales de relevo en una refinería corresponden a falla de agua de enfriamiento y fuego.
- Deberá tenerse atención especial para el caso de falla de algún servicio mayor, como agua de enfriamiento o energía eléctrica. Una falla total de alguno de ellos debe ser considerada si no se cuenta con respaldo adecuado.
- En el caso de fuego, se puede considerar que el área en la cual se le confina se encuentra en 2,500 ft².
- Los parámetros que normalmente rigen el diseño del sistema de relevo son:
 - a) Masa a relevar, que determina el diámetro del cabezal (generalmente por falla de agua de enfriamiento)
 - b) Temperatura, que determina la flexibilidad de la tubería (fuego)

De acuerdo al análisis de fallas susceptibles a presentarse, se determino a la falla de agua de enfriamiento como base para el estudio hacia las posibles disminuciones de masas a relevar.

6.6.1.1 Consideraciones de diseño

Las consideraciones de diseño efectuadas para reducir la masa a relevar a partir de la falla de agua de enfriamiento son las siguientes:

- a) Corte de las fuentes de energía de proceso.
 - Combustible a hornos: se considera que por efecto del calor residual dentro del horno, se reduce la carga térmica de este en un 50% con la consecuente disminución del flujo a través de la válvula de seguridad asociada
 - Vapor a rehervidores: en este caso y debido al tamaño de los equipos, la carga térmica residual es despreciable por lo que el flujo a través de la válvula respectiva se reducirá de acuerdo a la eliminación de esta fuente energética
- b) El calor remanente en los rehervidores con vapor se considera 0% una vez efectuado el corte
- c) Con el fin de garantizar un calor remanente de 0% en el corte de combustibles a hornos, se enviará señal de paro a sus bombas de transferencia, motivo por el cual no se removerá hacia la torre la energía residual de estos

- d) Los cortes se harán en forma automática por medio de interruptores por baja presión ya que la acción manual del operador no se considera suficientemente segura
- e) Las válvulas de seguridad de los equipos tendrán capacidad para relevar el 100% del flujo de diseño en el caso de que sus sistemas de corte a las fuentes de energía no operen
- f) A fin de establecer el flujo máximo con el cual se diseñará el cabezal de relevo y los quemadores de campo, se considerará el gasto remanente producto de los cortes a fuentes de energía, más los flujos de las válvulas para los cuales no se tomo acción de disminución alguna y se le agregará el mayor de los flujos de diseño de las válvulas
- g) No se considera la falla simultánea de dos sistemas de corte a fin de que sus flujos sean aditivos
- h) En los casos en que se requiera, se pondrán dos o más válvulas de seguridad a distintas presiones a fin de evitar la apertura de las válvulas mayores ante contingencias menores

6.6.2 Aplicación de los nuevos criterios a la unidad Hidrodesulfuradora de Naftas No. 2

Los cortes a las fuentes de energía para esta unidad se efectuarán por medio de los sistemas de protección instalados para falla de agua de enfriamiento, los cuales se accionarán al detectarse bajo presión en el cabezal de suministro de agua de enfriamiento de esta unidad.

El sistema de protección consiste de dos interruptores por baja presión, PSL-A y PSL-B, instalados en el cabezal de agua de enfriamiento, que desencadenarán la acción de corte en la alimentación de gas combustible y/o combustóleo a los calentadores de fuego directo, así como paro a los accionadores de las bombas de fondos de las torres fraccionadoras involucradas.

La instalación de los interruptores por baja presión deberá ser tal, que no cuente con un sistema que pueda ocasionar bloqueo accidental en la operación de estos. Además, deberá observar accesibilidad y versatilidad, tanto para la realización de labores de mantenimiento como de prueba, sin necesidad de desencadenar la acción de protección.

Para el caso específico de esta unidad, los cortes se efectuarán automáticamente con la finalidad de evitar el presionamiento de la misma, de la siguiente manera:

En relación con la torre desbutanizadora, DA-401, se efectúa el cierre de las válvulas de gas combustible y/o combustóleo que alimentan al calentador a fuego directo BA-402, asimismo se tendrá señal de paro a los accionadores de las bombas GA-404/RT, de los cuales uno es de motor (GA-404) y el otro de turbina (GA-404 RT) en la cual, al recibir la señal provocara la acción de corte de vapor motriz de la turbina.

Como protección a la Torres Desisohexanizadora, DA-402, se tiene un sistema similar al descrito para la torre DA-401.

Al accionarse automáticamente el corte a las fuentes de energía, se activarán instantáneamente el sistema de protección que actúa cuando se tiene bajo flujo de hidrógeno, el cual provoca el cierre de las válvulas de control de flujo de carga y de las válvulas de suministro de gas combustible y/o combustóleo del calentador de carga BA-401.

Adicional a los interruptores por baja presión en el cabezal de suministro de agua de enfriamiento a la unidad, se cuenta con indicación de presión, alarma por baja presión, indicación de flujo y alarma por bajo flujo, con todas las señales a tableros principal.

En la figura 6.4, se esquematiza el sistema de protección para esta unidad a falla de agua de enfriamiento y la figura 6.5. presentan el diagramas de flujo de proceso, después de la medida de protección.

El sistema de protección propuesto contempla las combinaciones posibles de eventos a falla de uno de los componentes del sistema, PSL-A, PSL-B o PAL; de manera que se garantiza la acción de emergencia a falla de agua de enfriamiento en la unidad.

Dicho sistema contempla además un tiempo suficiente, después de haber efectuado los interruptores PSL-A y PSL-B, que permite al agua de enfriamiento restablecerse a causa de alguna falla momentánea como energía motriz a los accionadores o bien alineamiento de los accionadores de relevo, sin que se desencadene la acción de emergencia.

En el caso de que los interruptores PSL-A y PSL-B desencadenen los cortes a las fuentes de energía, antes mencionadas, se efectuará el paro total y ordenado de la unidad conforme a las siguientes acciones:

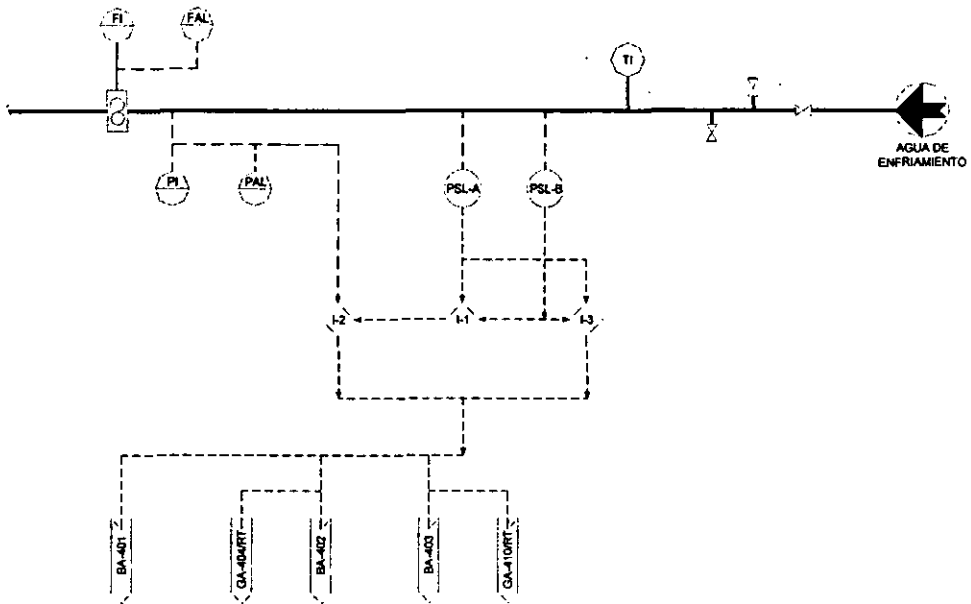
El operador deberá, en primera instancia, parar la bomba de carga BA-401/RT, mediante el interruptor correspondiente, asimismo, se introducirá vapor de apagado a los hogares de los calentadores a fuego directo y se bloqueará la válvula de admisión del hidrógeno proveniente de la Unidad Reformadora de Naftas No. 2, barriendo con el hidrógeno residual los hidrocarburos atrapados en los equipos y líneas hasta el tanque separador FA-402. A continuación se procederá parar el compresor GB-401, así como las bombas a excepción de las de reflujo de las torres, las cuales se pararán hasta que se alcance el nivel mínimo permitido en sus respectivos acumuladores.

Cuando se detecte una tendencia a la baja en el flujo del agua de enfriamiento en el cabezal, por medio del indicador de flujo FI, se deberá investigar la causa que la provoca, con la finalidad de continuar con la operación normal de la unidad, o bien, al accionarse la alarma por bajo flujo de agua, FAL, en el cabezal deberá procederse inmediatamente a cortar las fuentes de energía y realizar un paro ordenado de la unidad siguiendo los pasos descritos anteriormente.

Cabe señalar que si por alguna razón se presenta falla en la energía eléctrica, no se afectará el funcionamiento del sistema de protección, ya que deberá estar conectado a la batería de respaldo auxiliar que se tiene contemplada para esta contingencia.

Hay que hacer la aclaración que para las otras unidades con las que cuenta la Refinería, el procedimiento es semejante al antes descrito.

Figura 6.4. Sistema de protección para la unidad Hidrodesulfuradora de Naftas No. 2



Los operadores lógicos tendrán las siguientes funciones:

- I-1 Incluye retardo de señal de cualquier PSL (PSL – A o PSL – B)
- I-2 Envía señal de paro a la unidad, solo cuando actúe la alarma por baja presión y reciba señal de cualquier PSL (PSL – A o PSL – B)
- I-3 Incluye retardo de señal de paro a la unidad al recibir la señal del PSL – A y del PSL – B

6.6.3 Resultados obtenidos después de la aplicación

La tabla 6.1, sintetiza en términos numéricos los resultados obtenidos del estudio a partir de las bases de diseño comentadas en los puntos anteriores. Para propósitos de comparación inmediata, también se tabulan los valores anteriores. Resulta ocioso reiterar que las fallas de agua de enfriamiento y fuego son las causas críticas de diseño para el diámetro del cabezal y el estudio de flexibilidad respectivamente.

Tabla 6.1. Tabla comparativa de resultados finales obtenidos para el Sistema de Relevo por falla de Agua de Enfriamiento para el Sector II de Gasolinas en Tula, Hgo.

	Desfogue de alta presión	Desfogue de baja presión
Masa a relevar anterior, lb/hr	878,214.5	1,011,377.8
Masa a relevar actual, lb/hr	271,466.0	473,845.0
Diámetro. anterior/actual	30"/20"	42"/36"
PM, anterior/actual	15.97/30.26	64.35/73.77
Contrapresión anterior/actual ⁽¹⁾ , psig	40.7/28.9	13.2/10.5
Temperatura en L.B. anterior/actual, °F	169.3/162.0	202.9/225.0
Temperatura en el quemador ^(1,2) , °F	148.0	188.0

NOTAS. (1) La distancia considerada de L. B. del Sector al quemador fue de 850 m
(2) Temperatura en la base del quemador

Otros datos complementarios al estudio son: el flujo máximo para el diseño del quemador de 613,913 lb/hr., con PM de 48.039 y temperatura en su base de 173.14°F. Este gastos contempla las aportaciones de los relevos de alta y baja presión.

Por otro lado, en la figura 6.6 se indica la manera en que están dispuestas las válvulas de seguridad involucradas y el diámetro del cabezal, antes y después de haber sido aplicados los nuevos criterios de reducción de masas a relevar, dentro de cada una de las plantas del Tren de Gasolinas en el Sector II, de acuerdo al relevo a que pertenecen. En la parte inferior se consideran los porcentajes que representan las cantidades actuales para los desfogues de alta presión y de baja presión. Además se indican los diámetros estimados que tendrían los nuevos cabezales considerando los flujos encontrados.

NOTAS

- 1 NORMALMENTE SIN FLUJO
- 2 ○ INDICA ½ VAPORIZACION EN PESO
- 3 NORMALMENTE SIN FLUJO ALIMENTACION EN CASO DE PARO DE LA SECCION DE REACCION
- 4 LINEAS DE DESVIACION PARA CONTROL DE TEMPERATURAS
- 5 PRESION EN Kg/cm², TEMPERATURA EN °C
- 6 MEDIDAS PARA LA REDUCCION DE MASAS

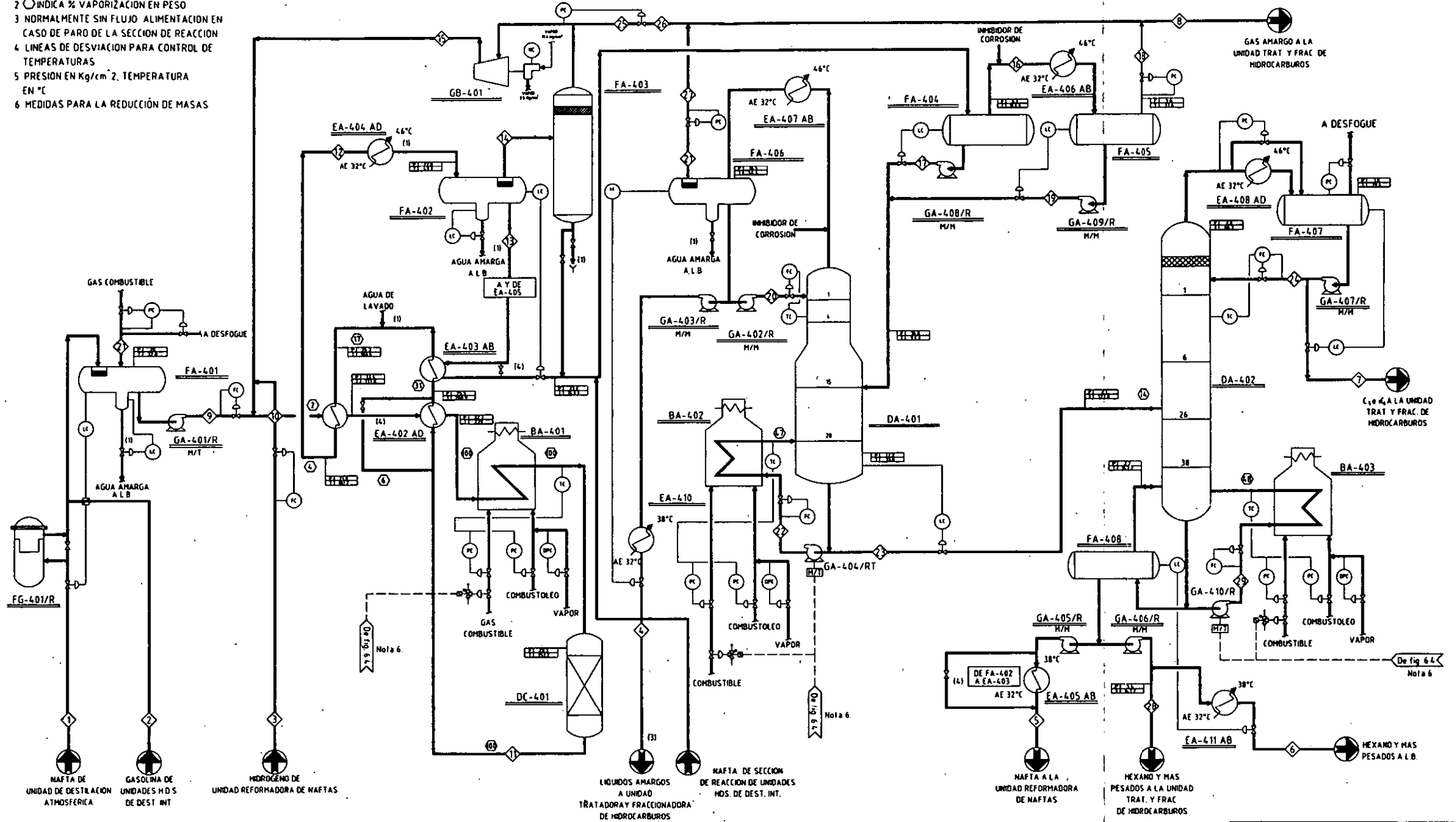
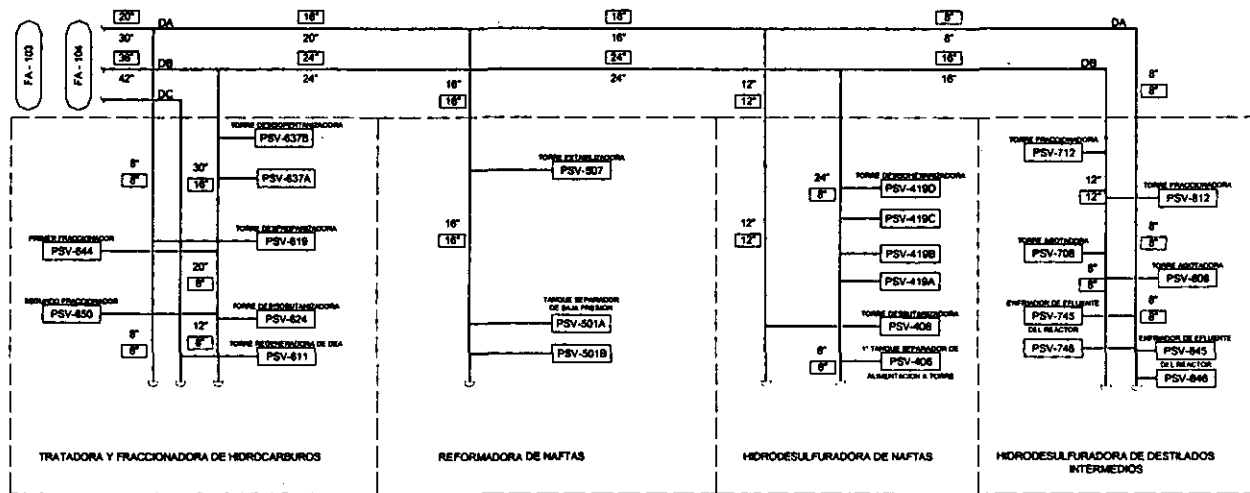


FIGURA 6.5
 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO
 UNIDAD HIDRODESULFURADORA DE NAFTA No. 2
 "SECTOR DE GASOLINAS II"
 REFINERIA DE TULA, HDALGO



- NOTAS:
1. DA, DB, DC - DEFOQUE DE ALTA, BAJA Y ACIDO, RESPECTIVAMENTE
 2. FA-103 Y FA-104 - TANQUES SEPARADORES DE LOS CABEZALES
 3. □ - DIAMETRO NOMINAL DESPUES DE LA APLICACION DE LOS NUEVOS CRITERIOS DE DISEÑO

FIGURA 6.6.
 DIAGRAMA DE DESFOQUE
 SECTOR DE GASOLINAS II
 REFINERIA DE TULA, HIDALGO

6.7 Análisis económico

El incremento en la presión puede deberse a diversas causas, como ya se han mencionado, siendo las fallas de agua de enfriamiento y fuego las causas críticas de diseño para el diámetro del cabezal de desfogue y el estudio de flexibilidad respectiva.

Debido a que la aplicación de los criterios tradicionales de diseño arrojaba como resultado grandes masas a relevar, y por consiguiente quemadores de campo y equipo asociado con dimensiones excesivas, se vio la necesidad de proponer nuevos criterios de diseño con la finalidad de disminuir los flujos a relevar y reducir el costo de los quemadores, al requerirlos de menor tamaño.

Con el propósito de comparación, se llevó a cabo la evaluación económica del sistema de desfogue del "Sector de Gasolinas II" de Tula, Hidalgo, considerando los siguientes equipos, si este fuera diseñado:

- a) Tanque separador de desfogue de alta presión
- b) Tanque separador de desfogue de baja presión
- c) Tanque sello
- d) Quemador de campo
- e) Sistema de tuberías

6.7.1 Costo del sistema de relevo, sin considerar el estudio de reducción de masas a relevar

- a) Tanque separador de relevo de alta presión.

Dimensiones:

Diámetro interno: 4.6 m
Longitud T-T: 12.2 m

Costo: \$127,888.45

- b) Tanque separador de desfogue de baja presión

Dimensiones:

Diámetro interno: 3.6 m
Longitud T-T: 12.2 m

Costo: \$89,384.20

- c) Tanque de sello

Dimensiones:

Diámetro interno: 5.0 m
Longitud T-T: 20.0 m

Costo: \$194,638.84

d) Quemador de campo (elevado)
Flujo: 1,401,468 lb/hr

Costo: \$291,167.37

e) Sistema de tubería:

Costo: \$7'315,032.12

6.7.2 Costo del sistema de relevo, considerando el estudio de reducción de masas a relevar

a) Tanque separador de relevo de alta presión.

Dimensiones:

Diámetro interno: 3.2 m

Longitud T-T: 9.0 m

Costo: \$55,968.66

b) Tanque separador de desfogue de baja presión

Dimensiones:

Diámetro interno: 2.8 m

Longitud T-T: 5.6 m

Costo: \$28,602.94

c) Tanque de sello

Dimensiones:

Diámetro interno: 3.6 m

Longitud T-T: 9.0 m

Costo: \$75,791.25

d) Quemador de campo (elevado)

Flujo: 614,261 lb/hr

Costo: \$218,375.30

e) Sistema de tubería:

Costo: \$3'457,909.00

6.8 Resultados de la comparación

De acuerdo a la comparación del costo del sistema de relevo en las alternativas presentadas, se observa en la tabla como pueden lograrse ahorros con respecto a las instalaciones resultantes del diseño original; sin perjudicar en lo absoluto la seguridad en la operación de las unidades del sector.

Equipo	Costo sin R. M. ⁽¹⁾ (\$)	Costo con R. M. ⁽¹⁾ (\$)	% de ahorro
Tanque de relevo. Alta presión	127,888.45	55,968.66	56
Tanque de relevo. Baja presión	89,384.20	28,602.94	68
Tanque de sello	194,638.84	75,791.25	61
Quemador elevado	291,167.37	218,375.30	25
Sistema de tubería	7'315,032.12	3'457,909.00	53

NOTA:

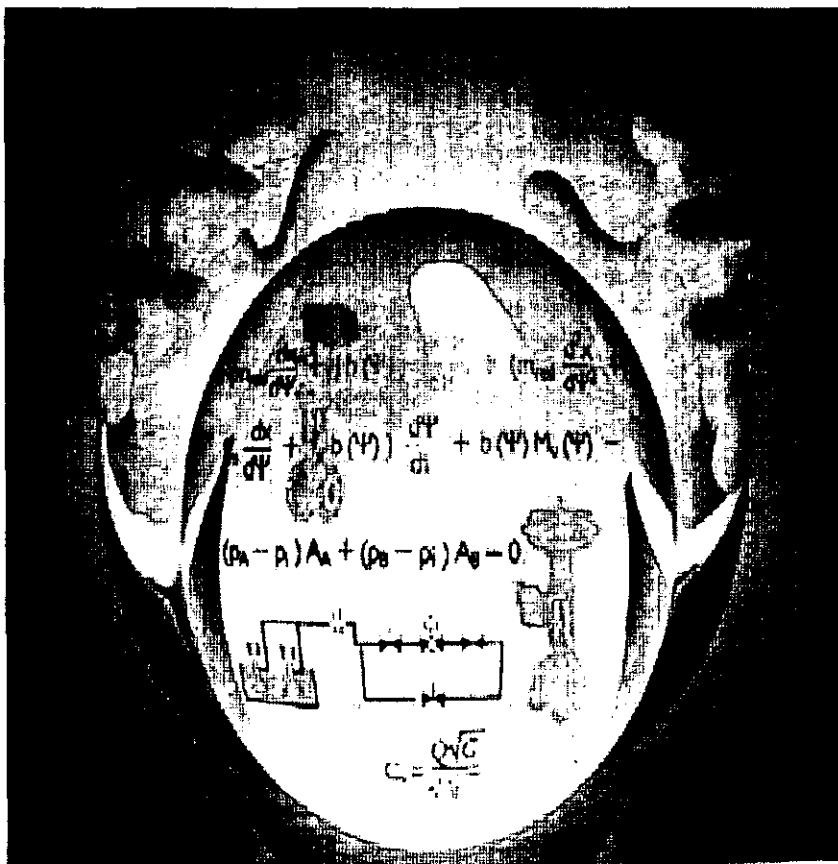
⁽¹⁾ Reducción de masas

Todos los datos proporcionados son actualizados hasta Febrero del 2001

Además de los ahorros observados por parte de los equipos que componen el sistema de relevo de presión, se puede pensar en el ahorro que estos criterios pueden traer al proceso, desde el punto de vista de la materia prima y los productos. Antes de la aplicabilidad de los criterios de reducción, la masa que era relevada al sistema incluía la materia prima y los productos, valiosos o no valiosos; ahora con la aplicación, la cantidad de materia prima y productos obtenidos, sino es que la misma energía por parte de los calentadores, se vio reducida y la pérdida económica, no vista aquí, también se vio reducida.

OBSERVACIONES

CONCLUSIONES



Observaciones

El diseño de los sistemas de relevo de presión consiste en determinar los diámetros requeridos para la red de tuberías que cumplan con las restricciones existentes. Para determinar los diámetros, se requiere establecer el perfil de presiones a través de la red, para lo cual se requiere conocer el perfil de temperaturas visualizando el cambio de temperatura que pudiera darse debido a la consideración de un comportamiento isotérmico. Pero para la determinación del perfil de temperaturas se requiere conocer el perfil de presiones por lo cual el problema se tiene que resolver por sustitución de uno en otro. Por otra parte, para la obtención de la contrapresión se requiere conocer, además de la temperatura, las propiedades termodinámicas de los fluidos a ser relevados, tales como la densidad, viscosidad, capacidad calorífica, etc., las cuales varían a lo largo de la red de tuberías ya que dependen del valor de la temperatura, de la contrapresión y la composición de la mezcla de los gases a ser relevados.

Por tal motivo, el diseño de los sistemas de relevo de presión no es una tarea fácil y el tiempo de elaboración es largo; por lo cual, hoy en día, se hace necesario el uso de algunas herramientas que nos permitan ahorrar tiempo y dinero para realizar dicha tarea. Entre tales herramientas se encuentran los simuladores de procesos, que son programas de computo que contienen un soporte técnico que puede ser utilizado para llevar a cabo el diseño sin problema alguno. Pero el manejo de los simuladores no es cosa fácil, dado que se requiere un conocimiento total del soporte técnico, es decir las ecuaciones con las que cuenta, para poder tomar una decisión acerca de los resultados arrojados por parte de estos.

Por tal motivo, en el presente trabajo se llevo a cabo la revisión del soporte técnico con el que cuenta los paquetes de software, que se encuentran en el IMP, para dar una visualización de cómo se encuentran estructurados y que ventajas y desventajas no traería cada uno de ellos. Para poder conocer un poco más de estos paquetes, se hace un recuento de las características de cada uno de ellos para que posteriormente se pueda definir cual de ellos nos proporciona un diseño óptimo de los sistemas de relevo de presión.

Software de diseño.

Diseño de los sistemas de relevo de presión (IMP)

El simulador que es usado en el Instituto Mexicano del Petróleo realiza en forma aislada el diseño de los sistemas de relevo de presión, tomando en cuenta los aspectos antes mencionados que son necesarios para tal diseño, los cuales son descritos a continuación:

1. Determinación de expansiones y propiedades termodinámicas

Para simular la expansión del gas desde la presión de relevo hasta el valor de la contrapresión en la descarga de cada válvula de seguridad y obtener además las propiedades del gas en la descarga, se utiliza un simulador de procesos desarrollado en el IMP denominado SIMPROC. Este simulador cuenta con una serie de ecuaciones que nos permiten el cálculo preciso de las propiedades termodinámicas de los componentes de la corriente de relevo, determinando entre otros, la temperatura de ebullición, el porcentaje de vaporización, la densidad, viscosidad etc. Para el caso de los pseudocomponentes cuenta con ecuaciones para definir las propiedades de estas, entre los cuales se encuentra la de Lee-Kesler y el factor de caracterización de Watson.

2. Determinación de contrapresiones

El segundo paso consiste en emplear un programa de cómputo, descrito en el capítulo 3, para determinar la red de tuberías que maneja fluidos compresibles a temperatura constante, isotérmica, la cual se necesita evaluar en sentido inverso al flujo. Este programa fue desarrollado en el IMP y no se considera la variación de temperaturas ni de propiedades del gas, solo se obtienen propiedades promedio cuando hay mezcla de corrientes de descarga en las válvulas.

3. Perfil de temperaturas

Por último, mediante un tercer programa, se obtiene el perfil de temperaturas. A este programa se le debe proporcionar la misma información que al anterior, adicionando algunos datos referentes a las condiciones ambientales, ya que considera la transferencia de calor con el medio ambiente.

Este tipo de procedimiento obliga al ingeniero a realizar trabajo por partes e intercambiar información entre las diferentes herramientas con el consiguiente aumento de tiempo, además de que es muy común que se incurra en errores al realizar la codificación de la salida de un programa para su utilización como alimentación a otro y al interpretar los resultados aislados de uno y otro programa. Cabe adarar que los errores cometidos en el diseño pueden poner en riesgo la seguridad de la planta y del personal que la opera.

INPLANT™ (Simsci)

Por otra parte, INPLANT™ lleva a cabo el proceso de diseño de una red de relevo envolviendo los siguientes cuatro pasos claves:

1. La determinación de la carga de relevo requerida para cada uno de los recipientes de descarga, durante una situación de relevo
2. Calcula la contrapresión en cada una de las válvulas de relevo que se encuentren en el sistema
3. Ajusta los diámetros de cada tubería hasta que la contrapresión de cada una de las válvulas de relevo no exceda la máxima contrapresión permisible
4. Diseña las válvulas, individuales, de relevo

Pero para poder lograr un grado de precisión mayor, INPLANT™ involucra lo siguiente;

1. El uso de un método de cálculo paso a paso, para cada uno de los segmentos de la tubería
2. La selección de un modelo de flujo para llevar a cabo el diseño, es decir, si la composición de flujo es conocida, composicional, o es un flujo cuya composición no se encuentra bien definida, no-composicional
3. Realiza el análisis de flujo crítico, si este llega a existir
4. Lleva a cabo la solución simultánea de la red de relevo en su totalidad

Además de lo antes descrito, INPLANT™, presenta las siguiente ventajas:

1. Cuenta con una base de datos superior a los 1,000 componentes para una buena identificación de los componentes que conforman la masa a ser relevada

2. Considera los cambios termodinámicos que se lleven a cabo además de la caída de presión que se genere en el cabezal de relevo y tubería de descarga por parte de las válvulas de relevo
3. Permite la selección de una ecuación que represente lo descrito en el inciso 2 dependiendo de las condiciones en que se lleven a cabo
4. Permite la visualización del sistema y los dispositivos que lo componen
5. Para los pseudocomponentes, emplea correlaciones, definidas en la literatura, para la determinación de las propiedades. O hace uso de las curvas TBP (punto de ebullición normal) para tal fin

Pero a pesar de sus ventajas, INPLANT™ presenta algunas desventajas entre las cuales podemos mencionar las siguientes:

1. Hay que definir claramente los parámetros de diseño, de lo contrario el programa no correrá, o si llega a correr, presentará errores y por consiguiente malos resultados ocasionando una mala interpretación. Esta desventaja no es propia del simulador, sino del usuario del mismo
2. Al igual que el software del IMP, INPLANT™, a pesar de tener las herramientas suficientes, no considera la transferencia de calor con el medio ambiente, y por consiguiente no se obtiene el perfil de temperaturas, por lo cual hace necesario llevar a cabo el análisis empleando otro simulador y la problemática de configuración que esto conlleva.

Visual Flare™

De lo ya antes mencionado en el capítulo 3, Visual Flare™ presenta las siguientes ventajas:

1. El Visual Flare™ incluye métodos para el diseño de una sola o de múltiples válvulas. Usando el administrador de válvulas de relevo, se puede diseñar las válvulas de acuerdo a los diseños comerciales disponibles (como por ejemplo, el API RP 520 (1993)).
2. El Visual Flare™ proporciona el fácil uso ambiental para el manejo completo de una red de relevo. Debido a que el Visual Flare™ emplea una interface del Microsoft Windows estándar, los problemas serán fáciles de resolver.
3. Se puede definir un isométrico de la tubería compleja usando la herramienta de trazado interactivo. Los accesorios de la tubería, tales como codos, tees, y expansiones serán automáticamente definidos e insertados al programa y, al mismo tiempo trazados en la pantalla
4. El Visual Flare™, también nos proporciona, un administrador de casos de estudio completos
5. Se puede desplegar los datos de las corrientes a un tiempo en la pantalla usando la tabla resumida de corrientes contabilizable. Los diagramas de presión y temperatura pueden, también, ser desplegadas simplemente señalando sobre una de las conexiones en el diagrama de simulación

Entre las desventajas que pudiera presentar Visual Flare™, se pueden mencionar las siguientes:

1. Al igual que INPLANT™, si no se definen bien los parámetros de diseño, el simulador no arrojará errores como resultados o simplemente no correrá
2. No considera la transferencia de calor que existe con el medio ambiente por considerar un comportamiento isotérmico a lo largo de la tubería, por lo cual se hace necesario emplear un segundo simulador o programa para llevar a cabo el análisis y completar el diseño

Quemadores de campo

Por otro lado, los quemadores elevados es una parte vital de la operación de una refinería ya que proporciona un medio eficaz, si se lleva a cabo en su totalidad la combustión, para aliviar el exceso de presión en forma segura. Para lograr lo antes descrito, es necesario conocer los parámetros fundamentales, radiación, caída de presión etc., para lograr un diseño adecuado de los quemadores elevados, de lo contrario, hablando desde el punto de vista ambiental, existirá un daño ambiental debido a las emisiones de bióxido de carbono, CO₂, óxidos de azufre, SO_x, óxidos de nitrógeno, NO_x y, si la combustión no es completada, monóxido de carbono, CO, y cenizas u hollín.

Por lo antes mencionado, el diseño de los quemadores elevados no es una tarea sencilla dado que involucra varios parámetros que no son fáciles de determinar y que solo se logran a nivel de laboratorio originándose la complejidad de escalarlos a nivel industrial. Por tal motivo, a lo largo de la historia han surgido procedimientos de cálculo, que involucran dichos parámetros, para el diseño de estos equipos entre los cuales podemos mencionar lo del API RP 521, y el desarrollado por PEMEX (NAO), los cuales son muy comunes en la literatura ingenieril y son considerados como aceptables.

Pero ¿qué ventajas y desventajas nos proporcionan cada uno de estos procedimientos, que fueron considerados en este trabajo, y como podemos interpretar su resultados?. Para contestar esta pregunta, fue necesario analizar, al igual que los software de diseño de los sistemas de relevo, el soporte técnico de cada uno de estos procedimientos y que consideraciones son tomadas en cuenta para cada uno de ellos, obteniéndose las siguientes observaciones:

1. Tomando como referencia el ejemplo realizado para cada uno de los procedimientos, se puede observar que los incluidos en el API 521, API y Brzustowski, son más conservativos que el llevado a cabo por PEMEX
2. En los diseños, comúnmente, de los quemadores elevados consiste en la determinación del diámetro y la altura tomando como referencia un flux de calor definido por parte de la flama. Pero en otras ocasiones, la idea es de visualizar la distancia que se requiere para obtener una radiación definida (círculos de radiación)
3. Comúnmente, los parámetros fraccionarios, tales como el factor de absorción por parte de la atmosférica, (τ), y el factor de compresibilidad, (Z), son considerados como uno (1), para una rápida estimación. Por otro lado, el factor de emisión de la flama, F , se considera que tenga un valor de 0.3 o se le asigna un valor determinado por parte de algún estudio

4. La estimación del epicentro de la flama es considerada, para el API, que se encuentra a la mitad de la flama sin importar la contribución del viento; por el contrario, el desarrollado en PEMEX, considera que si la velocidad del viento es mayor a 30 ft/seg entonces el epicentro se localizará a 1/3 la distancia de la flama, de ser mayor se considera que se encuentra a la mitad de la flama.
5. El procedimiento llevado a cabo por API es gráfico, es decir, es necesario el empleo de una serie de gráficos para proporcionar los valores necesarios para el diseño. Por el contrario, la metodología de PEMEX es una secuencia de ecuaciones en las cuales se consideran una serie de parámetros necesarios para el diseño, tal como la caída de presión.
6. El flux de calor, K (Btu/hr*ft²), empleados en el diseño, son aquellos que se encuentran en el API RP 521, pero realmente se considera el flux de 1,500 Btu/hr*ft² y de 2,000 Btu/hr*ft², por ser la máxima radiación que puede soportar el ser humano sin protección alguna, y la máxima que puede soportar los equipos que se encuentren en los alrededores.

Por tal motivo, los resultados obtenidos por parte de estas secuencias se deberían de considerar como una estimación de los reales dado que en cierta manera es absurdo tener quemadores de hasta 200 metros de longitud, que puede llegar el caso, para poder disponer de los gases enviados a este equipo. Además, esta estimación es enviada al concesionario el cual indicará que tipo de quemador y que características deberá tener para poder obtener una combustión lo más completa posible.

Por último, es necesario poner más énfasis en la caída de presión y la radiación térmica por parte de la flama ya que se considera que son los parámetros más importantes que realmente nos rigen el diseño de los quemadores elevados.

Optimización de los sistemas de relevo

Al aplicar los nuevos criterios de diseño a un sistema de relevo, tal fue el caso de la Refinería de Tula, Hgo, se observo que además de la disminución en diámetro del cabezal de relevo y los beneficios económicos por parte de los otros equipos, se pueden obtener otras ventajas entre las cuales se encuentran:

1. Al efectuar la optimización de los sistemas de relevo de presión, se contribuyó a disminuir la cantidad de materia prima y productos generados, por parte del proceso, que se envían al quemador, generando con esto un ahorro económico adicional
2. La cantidad de vapor o aire proporcionado al quemador, para evitar la formación del molesto humo, se puede ver disminuida
3. La purga suministrada al sistema se vio reducida al mismo tiempo
4. Se disminuyo la cantidad de contaminantes que eran enviados a la atmósfera por parte del quemador

Conclusiones

Como resultado del estudio desarrollado, podemos constatar que los sistemas de relevo de presión y los quemadores son los dispositivos de seguridad que actúan como sistemas de emergencia para disponer de los excesos de hidrocarburos y compuestos tóxicos e inflamables generados durante los trastornos en los procesos o fallas de los equipos, además de que su diseño deberá estar enfocado, principalmente, a la seguridad del personal que labora, a la seguridad de la planta y, por supuesto, al ambiente.

Además, debido a la inquietud de ver que la cantidad de masa, que era enviada al quemador, por parte de la industria química, era demasiado grande comparada con la descarga de las plantas del extranjero, semejantes en capacidad, se vio la necesidad de llevar a cabo un estudio que nos indicará la manera de poder disminuir dicha masa. Como resultado de esto, se obtuvieron nuevos criterios de diseño para los sistemas de relevo de presión y la importancia que pueden tener estos al momento de ser aplicados correctamente, concluyendo con lo siguiente:

- La aplicabilidad correcta de los nuevos criterios de diseño puede llegar a tener una reducción considerable en la masa total a relevar y, en general, del sistema de relevo
- Llevando a cabo estudios de las distintas condiciones ambientales que imperan en los alrededores, con el fin de evitar la formación de nubes explosivas o tóxicas, se pueden enviar vapores a la atmósfera
- Se puede disminuir considerablemente la carga generada por la falla de agua de enfriamiento como causa de diseño de los sistemas de relevo, quedando el caso del fuego como causa dominante
- La aplicación de los nuevos criterios de diseño, además de reducir la masa a ser relevada, trae como consecuencia una disminución en el diámetro del cabezal y modificaciones en los valores de los parámetros involucrados, tales como la contrapresión, la temperatura de relevo, el peso molecular, etc., obteniendo un ahorro de hasta el 50% en los costos de los equipos del sistema, como son el tanque de relevo, el tanque sello entre otros
- Se ve beneficiada el ambiente al no enviar gran cantidad de material inflamable al quemador elevado
- Los servicios con los que cuenta el sistema de relevo, como el servicio de purga, se ven reducido en gran medida
- Además de lo anterior, se puede visualizar un ahorro económico debido a que la materia prima y los productos, que eran enviados al sistema de relevo para su disposición, se vieron reducidos debido a la aplicación de los criterios de diseño

La interpretación y, como una consecuencia, la aplicación de los códigos de diseño puede ayudar al diseño, costo efectivo y diseño seguro, de los sistemas de relevo de presión. Sin embargo, el personal deberá reconocer que el riesgo puede ser reducido por medio de un programa de mantenimiento que incluya una prueba periódica de los sistemas de paro de emergencia.

Por otra parte, para la aplicabilidad de los criterios de reducción de masas, es necesario tener presente que los diseños de los sistemas de relevo de presión deben ser lo más completo y lo preciso posible. Para lo cual, cumpliendo con los objetivos propuestos, se llevó a cabo el análisis del soporte técnico de tres simuladores con los que cuenta el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), obteniendo las siguientes conclusiones:

➤ Para el diseño adecuado de los sistemas de relevo, se deben considerar tres aspectos importantes: la determinación de las propiedades de mezcla, la determinación del diámetro de los cabezales de relevo y el perfil de temperaturas, si cualquiera de ellos falta el diseño no será del todo concluido

➤ De lo anterior, INPLANT™ Y Visual Flare™ al no presentar una retroalimentación se ignora por completo en el diseño el efecto de las variaciones de temperatura y precisión en el cálculo de las propiedades de los gases, las cuales tienen una gran influencia directa sobre el cálculo de la caída de presión, por lo cual ambos necesitaran un segundo simulador para poder completar el diseño adecuadamente; por el contrario, el simulador del IMP, cumple con los tres aspectos, pero su inconveniente principal es el vaciado de información de un simulador a otro, lo cual traería pérdida de tiempo y posibles errores de configuración

➤ INPLANT™ y Visual Flare™ proporcionan una ingeniería de proceso con una fácil lectura y el uso fácil de herramientas para el diseño y modelo de los sistemas de relevo, tales como sus representaciones gráficas (tipo DFP e isométrico, respectivamente), desde la válvula de relevo más simple del sistema hasta el diseño de las redes de relevo más complejas

➤ Por su simplicidad al vaciado de datos, INPLANT™ y Visual Flare™, son más simples de comprender y la proporción de resultados son rápidos

➤ Por otra parte, en la bibliografía existente, referente a la metodología de cálculo de los diversos parámetros involucrados en la simulación de sistemas de relevo de presión, existe, en general, congruencia en cuanto a las ecuaciones que se recomiendan emplear en cada una de las etapas de diseño. Sin embargo existirán diferencias significativas en opinión solo cuando se presentan estudios para simplificar la metodología o cuando se requiere disminuir al máximo el número de iteraciones, con el objeto de presentar un procedimiento de cálculo más accesible para realizarlo con herramientas de computo simples.

Por último, hay que hacer mención que el Simulador INPLANT™ es realmente un simulador para flujo de fluidos en el cual se encuentra involucrado el cálculo de diseño de los sistemas de relevo, de ahí la gran cantidad de ecuaciones que posee y nos presenta para una mejor selección. Por otra parte, Visual Flare™ es un simulador específicamente para el diseño y análisis de los sistemas de relevo el cual contiene una menor cantidad de ecuaciones, con respecto a INPLANT™, pero no por eso es inferior, todo lo contrario, tiene un soporte bastante bueno como para obtener buenos resultados y con una precisión, en opinión de un servidor, más alta que la del INPLANT™.

Continuando con el sistema de relevo, los quemadores, como ya fueron definidos, son la parte final del sistema y es el que dispone con seguridad de los compuestos tóxicos e inflamables. Pero para que su funcionamiento sea el adecuado es necesario considerar una serie de parámetros, como se ha visto a lo largo del trabajo, los cuales afectan el

diseño y son de considerable importancia por lo cual se reconoce que deben ser determinados con precisión. Para lo anterior, se analizaron tres metodologías de cálculo para el diseño de estos equipos de los cuales podemos hacer las siguientes conclusiones:

- Comúnmente, los procedimientos que se encuentran en el API 521, tal como el API y Brzustowski, son considerados demasiados estrictos y por lo tanto incrementarán la altura del quemador

- El término de fracción de calor disipada en forma de radiación, F , es uno de los factores que ha sido discutido en su evaluación y que comúnmente en confundida con el término de emisividad, aún cuando guardan cierta relación. Pero la obtención de F es puramente experimental y ciertos autores dan algunos valores recomendables para cada uno de los gases o proponen relaciones para su estimación, tal como la de Kent (1967)

- La consideración de los flux de calor emitidos por la flama en forma de radiación en una refinería, son los niveles de radiación total de diseño recomendados por el API 521 para la exposición del personal o equipos adyacentes

- En relación con la longitud e inclinación de la flama, existen varios métodos de cálculo propuestos, como los de API, Brzustowski y PEMEX, siendo el de Brzustowski, según pruebas experimentales, el más adecuado para la estimación de longitudes e inclinación

- Se ha visto que comúnmente los parámetros fraccionarios, tal como la absorción atmosférica, τ , o el factor de compresibilidad, Z , son considerados con un valor de uno (1). Para una estimación rápida, es válido considerar lo antes descritos, pero para un diseño más preciso es necesario considerar todos los factores y no hacer suposiciones o estimaciones rápidas

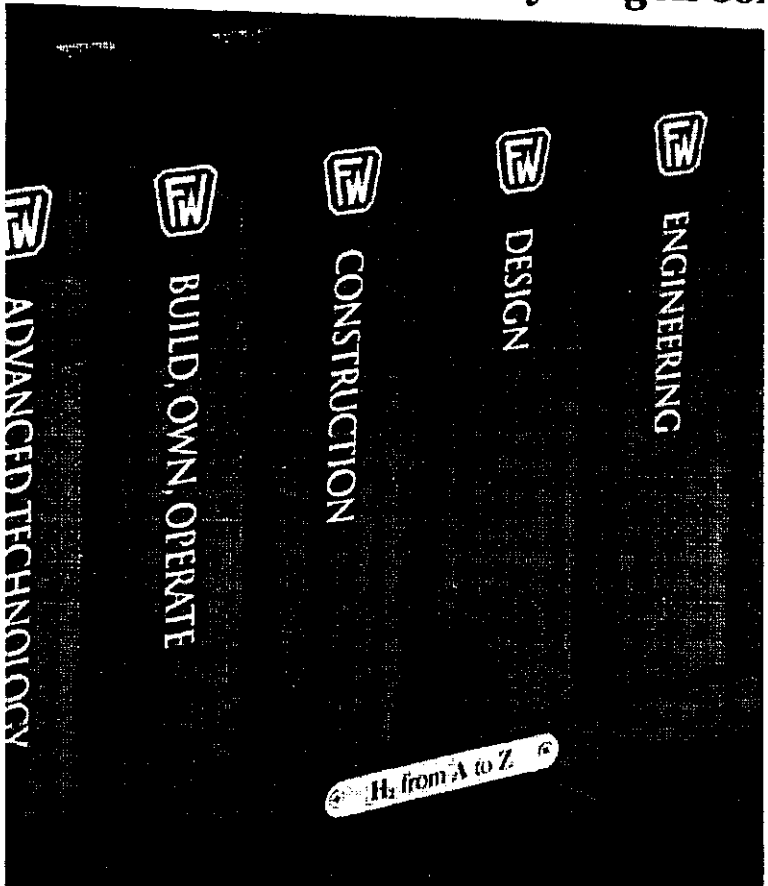
- La intensidad de la radiación solar puede ser un factor, para alguna localización, pero su efecto adicional a la radiación del quemador es considerado de menor impacto sobre el tiempo de exposición. Sin tomar en cuenta lo antes dicho, se deberá considerar este factor dentro del cálculo de radiación total para el diseño del quemador

Para terminar, es importante aclarar que la información existente en los códigos API RP 520 (2000), API RP 521 (1997) y ASME Sec. VIII División I y II así como la literatura técnica disponible de reciente publicación y en la metodología y recomendaciones contenidas en el diseño, no son normativas, ya que en los primeros queda a la interpretación del diseñador su aplicación en tanto que en los segundos son experiencias personales muy particulares que difícilmente pueden hacerse extensivas a otros casos. Además la información con la cual se han diseñado los sistemas de relevo tienen su origen en los criterios que emplearon firmas de ingeniería como Lummus y Kellogg en diseños para Petróleos Mexicanos. Hoy en día, este tipo de evaluación puede ser más precisa para estos sistemas si se puede contar con el uso de Simuladores Dinámicos. Por lo cual, se llega a concluir que es necesario efectuar análisis de riesgos integral de la planta, pero haciendo hincapié en los lugares en donde se generen la sobrepresión debido a una falla, por medio del cual se conozca, principalmente, lo siguiente:

- Las variaciones de presión de operación de los equipos, durante la ocurrencia de ciertas contingencias, lo cual es importante para los equipos en donde la diferencia entre la presión normal de operación y de ajuste de las válvulas de relevo es muy grande

GLOSARIO

APENDICES Y BIBLIOGRAFIA



GLOSARIO.

❖ Acumulación.

Es el incremento de presión por encima de la MAWP del recipiente durante la descarga a través del dispositivo de relevo de presión, expresado en unidades de presión o como un porcentaje. La máxima acumulación permisible está establecida por los códigos aplicables para las contingencias de operación o fuego.

❖ Area de boquilla.

Es el área de flujo de sección transversal de una boquilla al diámetro mínimo de la boquilla.

❖ Area de descarga actual.

Es la mínima área medida que determina el flujo a través de la válvula.

❖ Area de descarga efectiva o área de flujo equivalente.

Es el área nominal o calculada de una válvula de relevo de presión utilizado en fórmulas de flujo reconocidos para determinar el tamaño de la válvula. Esta área será menor al área de descarga actual.

❖ Banda de frecuencias.

Intervalo de frecuencia donde se presentan componentes preponderantes de ruido.

❖ Cabezal de desfogue.

Es la tubería principal a la que llegan todas las tuberías secundarias de fluido (aliviado) llevándolo hasta el quemador.

❖ Capacidad de relevo asignada.

Es la porción de la capacidad de relevo medida permitida por el código aplicable o regulación para ser usado como una base para la aplicación de un dispositivo de relevo de presión.

❖ Capacidad de sello.

Es la capacidad de relevo asignada que aparecerá en la placa del dispositivo. La capacidad de sello esta basada en la presión de ajuste o presión de estallido más la sobrepresión permisible para fluidos compresibles y la presión diferencial para fluidos incompresibles.

❖ Condición que gobierna el desfogue.

Es la contingencia o la combinación de varias de ellas que produzcan el máximo flujo que es necesario manejar con un dispositivo de alivio. Normalmente, se tienen varias contingencias posibles que pueden afectar a un equipo protegidos con dispositivos de alivio, tales como incendio, falla de agua de enfriamiento, equipo bloqueado accidentalmente, etc.

❖ Contrapresión.

Es la presión que existe a la salida de un dispositivo de relevo de presión como un resultado de la presión en el sistema de descarga. Esta es la suma de la contrapresión sobrepuesta y la generada.

❖ **Contrapresión generada.**

Es el incremento de la presión en el cabezal de descarga que se desarrolla como un resultado del flujo después que el dispositivo de relevo de presión haya abierto.

❖ **Contrapresión sobrepuesta.**

Es la presión estática que existe a la salida de un dispositivo de relevo de presión al mismo tiempo que el dispositivo requiera operar. Es el resultado de la presión en el sistema de descarga próxima a otras fuentes y puede ser constante o variable.

❖ **Decibel.**

Décima parte de un bel; su símbolo es dB.

❖ **Degradación**

Proceso de descomposición de la materia, por medios físicos, químicos o biológicos.

❖ **Dispersión acústica.**

Fenómeno físico consistente en que la intensidad de la energía disminuye a medida que se aleja de la fuente.

❖ **Disposición final.**

Acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al ambiente.

❖ **Dispositivos de relevo de presión.**

Un dispositivo de relevo de presión es accionado por la presión estática a la entrada y esta diseñada para abrir durante una condición de emergencia o anormal para prevenir un ascenso en la presión interna del fluido en exceso de un valor especificado. Este dispositivo también suele ser diseñado para prevenir una presión de vacío interno en exceso. El dispositivo puede ser una válvula de relevo de presión, un dispositivo de relevo de protección carente de la posibilidad de cierre o una válvula de relevo a vacío.

❖ **Emisión.**

La descarga directa o indirecta a la atmósfera de toda sustancia, en cualquiera de sus estados físicos, o de energía.

❖ **Estabilidad de la flama.**

Es la permanencia de la flama principal en la punta del quemador. Se presentan problemas para mantener una flama estable cuando la velocidad del gas combustible es menor que la velocidad de la flama, ya que existe la posibilidad de combustión dentro de la boquilla. Cuando existen velocidades alta del gas combustible, mayores que la velocidad de flama se tienen problemas de separación de la flama de la boquilla del quemador.

❖ **Flama.**

Reacción de combustión que se propaga a través del espacio a velocidad inferior a la del sonido acompañada normalmente de radiaciones visibles.

❖ **Flama premezclada.**

Se produce cuando la combustión tiene lugar en un medio constituido por una mezcla previamente preparada de combustible-comburente en íntimo contacto.

❖ **Frecuencia.**

El número de ciclos por unidad de tiempo es un tono puro; su unidad es el Hertz, cuyo símbolo es Hz.

❖ **Fuente de emisión de gases.**

Es cualquier instalación que produce gases.

❖ **Fuente múltiple.**

Aquella fuente fija que tiene dos o más ductos o chimeneas por las que se descargan las emisiones a la atmósfera, provenientes de un solo proceso.

❖ **Fuente nueva**

Es toda instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

❖ **Holdup del líquido sin desplazamiento.**

Es la fracción volumétrica del líquido a la entrada. Esta definición considera que la velocidad real del gas es igual a la velocidad real del líquido.

❖ **Holdup del líquido.**

Se define como la relación entre el volumen de un segmento de la tubería ocupada por el líquido y el volumen total de ese segmento. Este valor varía entre 0 y 1, y por lo tanto la diferencia de 1 menos el holdup del líquido nos dará el holdup del gas. Cada método propone una ecuación diferente para su evaluación y suele depender del patrón de flujo y de la posición de la tubería.

❖ **Humo.**

Es el resultado de la emisión de partículas de carbón, formadas como producto de una combustión incompleta.

❖ **Incineración.**

Método de tratamiento que consiste en la oxidación de los residuos, vía combustión controlada.

❖ **Instalaciones finales de sistemas de desfogue.**

Son las instalaciones, tales como quemadores, blowdown, etc., utilizadas para tratar, quemar o eliminar de alguna forma los fluidos provenientes de las redes de tuberías de desfogue.

❖ **Limites de flamabilidad (explosividad).**

En el caso de gases o vapores que forman mezclas flamables con el aire, oxígeno u otro oxidante, tal como el cloruro o óxido de nitrato, existe una concentración mínima del material el cual por debajo del mismo la propagación de la flama no puede llevarse a cabo. Análogamente, existe una concentración máxima por encima de la cual la propagación de la flama no ocurre. Estas mezclas límites, las cuales, sin ignición, propagan la flama, serán conocidas como límites inferior y superior de inflamación o de explosión, y serán expresadas, comúnmente, como un porcentaje por volumen de material en aire (u otro oxidante). En términos populares, una mezcla por debajo del límite inferior de flamabilidad (LFL) es demasiado pobre para ser quemado, mientras que una

mezcla por encima del límite superior de flamabilidad (UFL) es demasiado rica para llevar a cabo el quemado.

❖ **Máxima condición de desfogue.**

Es aquella condición que ocasiona el mayor flujo o mayor contrapresión en el sistema de desfogue.

❖ **Máxima presión de operación.**

Es la máxima presión esperada durante la operación del sistema.

❖ **Máxima presión de trabajo permisible (MAWP).**

Es la máxima presión manométrica permisible en la parte superior de un recipiente completo en su posición de operación a una temperatura designada. Esta presión se basa en los cálculos de cada componente del recipiente utilizando el espesor nominal, excluyendo las tolerancias para la corrosión y espesores requeridos para cargas diferentes de la presión interna. La MAWP es la base para la presión del asiento de los dispositivos de relevo de presión que protege al recipiente.

❖ **Meteorología.**

Es la ciencia que estudia la atmósfera, comprende el estudio del tiempo y el clima y se ocupa del estudio físico, dinámico y químico de la atmósfera terrestre

❖ **Presión de ajuste.**

Es la presión manométrica a la entrada a la cual la válvula de relevo de presión esta ajustada para abrir bajo condiciones de servicio.

❖ **Presión de abertura.**

Es el valor de incremento de la presión estática de entrada a la cual hay un ascenso medible del disco o a la cual la descarga del fluido llega a ser continua.

❖ **Presión de cierre.**

Es el valor de disminución de la presión estática a la entrada a la cual el disco de la válvula restablece contacto con el asiento o a la cual el levante llega a ser cero.

❖ **Presión de diseño manométrica.**

Esta referida a la presión mínima esperada bajo condiciones severas coincidentes de temperatura y presión. Esta presión puede ser usada en lugar de la máxima presión de trabajo permisible en todos los casos don de la MAWP no haya sido establecida. La presión de diseño es igual o menor de la MAWP.

❖ **Radiación.**

Mecanismo de transferencia de calor caracterizado por la transmisión de energía radiante desde una fuente de elevada temperatura hacia un receptor de menor temperatura.

❖ **Retroceso de flama.**

Es el fenómeno producido cuando el flujo de gases de desecho es bajo y el aire llega a difundirse dentro de la boquilla, formándose una flama que se propaga hacia dentro del quemador.

❖ **Ruido.**

Todo sonido indeseable que molesta o perjudica a las personas.

❖ **Siseo.**

Es el escape audible o visible de un fluido compresible entre el asiento y el disco a una presión estática ligeramente por debajo de la presión de ajuste y no de la capacidad medible.

❖ **Sobrepresión.**

Es la presión que se incrementa por encima de la presión de ajuste del dispositivo de relevo de presión, expresado en unidades de presión o como un porcentaje. La sobrepresión es la misma a la acumulación, cuando el dispositivo de relevo está ajustado a la MAWP del recipiente.

❖ **Tamaño de entrada.**

Es el tamaño nominal de tubería (NPS) a la conexión de entrada de la válvula, a menos que el diseño sea otro.

❖ **Tamaño de salida.**

Es el tamaño nominal de tubería (NPS) a la conexión de descarga de la válvula, a menos que el diseño sea otro.

❖ **Tanque sello.**

Es un recipiente que contiene agua cuyo objeto es extinguir una flama que ha retrocedido desde el quemador. El sello en el tanque está determinado por la presión de descarga en la boquilla del quemador.

❖ **Tanque separador de líquidos.**

Es un recipiente cilíndrico que se instala en un sistema de desfogue con el fin de eliminar el líquido arrastrado por la corriente de desfogue, para evitar su presencia en los quemadores.

❖ **Temperatura de ignición.**

La temperatura de ignición de una sustancia, sea esta sólida, líquida o gas, es la temperatura mínima necesaria para ocasionar una combustión sustentada, independientemente, del calentamiento o medio de calentamiento. Las temperaturas de ignición pueden diferir, marcadamente, de la observada en un punto a ciertas condiciones a aquellas que serán observadas a otras condiciones fijadas. Por esta razón, la temperatura de ignición deberá ser tomada como una aproximación. Algunas de las variables conocidas para el efecto sobre la temperatura de ignición serán: el porcentaje de gas y líquido en una mezcla; la forma y tamaño del recipiente de prueba, la relación y duración del calentamiento, la clase y la temperatura de la fuente de ignición y los efectos catalíticos u otros materiales que puedan estar presentes. Así como existen muchas diferencias en los métodos de prueba para la temperatura de ignición, tales como el tamaño y forma de los recipientes de prueba, el material de construcción del recipiente, método y relación de calentamiento, tiempo de permanencia y el método de detección de la flama, no se suprime que las temperaturas de ignición reportadas puedan diferir para el mismo material.

❖ **Tiempo de escape.**

Es el intervalo requerido para que una persona abandone la zona de radiación de la fuente de calor. Este tiempo se considera de 8 a 10 segundos.

❖ Toxicidad.

Indica el grado máximo de concentración a la que puede ser tolerada una sustancia en el aire para un periodo determinado de tiempo.

❖ Tuberías de desfogue.

Tuberías individuales de alivio, cabezales de conexión de tuberías de alivio, tuberías de purga, y tuberías colectoras de drenajes automáticos, con descarga a recipientes separadores, a quemadores de chimenea o algún punto en los límites de planta. Los sistemas de alivio con colectores de condensado representan casos especiales y costosos, que deberán analizarse por separado, para determinar la conveniencia de su instalación fuera de los arreglos de la tubería principal. Este tipo de sistemas se considerará dentro de la tubería principal, eliminando los colectores y proyectando su instalación a un nivel mayor que el correspondiente a la cama superior de tubería y con pendiente, usualmente sobre soporte tipo "T" de construcción como extensión de las columnas. Este tipo de instalación no será necesario en los sistemas que vayan a manejar gases no condensables.

❖ Válvula de relevo de presión con regulador de resorte.

Es un dispositivo de relevo de presión diseñado para cerrarse automáticamente y prevenir el fuerte flujo del fluido.

❖ Velocidad del viento.

Razón del movimiento del viento en unidad de distancia por unidad de tiempo.

❖ Venteos de equipos.

Son los relevos intencionales de fluidos para purga de equipos o para mantener una presión de operación cuando así se requiera. Como ejemplos se pueden citar los desfogues manuales y las válvulas automáticas de control de presión.

❖ Viento.

Aire en movimiento relativo a la superficie de la tierra, casi exclusivamente usado para denotar la componente horizontal.

❖ Zona crítica

Aquella en la que por sus condiciones topográficas y meteorológicas, se dificulte la dispersión o se registren altas concentraciones de contaminantes a la atmósfera.

APENDICE A

A.1. Cálculo del calor de combustión de un compuesto

Para poder llevar a cabo este cálculo, es necesario obtener el poder calorífico del compuesto o mezcla de estos que se vaya a quemar. El poder calorífico es el calor producido a volumen constante por la combustión completa de una cantidad unitaria de carbón en un calorímetro de bomba de oxígeno en condiciones específicas. El resultado incluye el calor latente de vaporización del agua en los productos de combustión y se denomina calentamiento bruto o poder calorífico superior (HHV). Cuando el agua no se ha condensado, el poder calorífico se denomina poder calorífico inferior (LHV), y se obtiene de

$$LHV = HHV - 1030W$$

Donde $W = \text{lb de agua formada/lb de combustible}$. Este dato puede obtenerse fácilmente considerando que por cada molécula de H_2 se forman 18 lb de agua (i molécula de agua). De acuerdo al número de hidrógenos que tenga el compuesto, se dividen por 2 (para obtener el No. De moléculas de H_2) y se multiplican por 18, después se divide entre el peso molecular del combustible y de esta manera se obtienen las libras de agua formada por libra de combustible.

El factor 1030 convierte el poder calorífico superior a volumen constante en poder calorífico inferior a presión constante. Cuando se trata de gases es muy útil la ecuación siguiente:

$$LHV = HHV - \left(\frac{859pv}{T} \right)$$

Donde

LHV y HHV = Btu/ft³ de gas

p = presión, in Hg

v = ft³ de agua en productos de combustión/ft³ de combustible

T = temperatura, °R

Para 60°F y 29.92 in Hg, la ecuación se simplifica para obtener:

$$LHV = HHV - 49.4v$$

HHV, en Btu/lb, puede aproximarse mediante una fórmula desarrollada por el Institute of Gas Technology

$$HHV = 146.58C + 568.78H + 29.4S - 6.58A - 51.53(O + N)$$

Donde C, H, S, A, O y N son los porcentajes en base seca de carbono, hidrógeno, azufre, cenizas, oxígeno y nitrógeno, respectivamente. La desviación estándar para 775 muestra de carbón es 127.

Tabla A-1. Calor de combustión de algunos hidrocarburos

No.	Substancia	Peso molecular	Calor de Combustión (Btu/lb)	
			Bruto	Neto
1.	Carbono	12.01	14093	14093
2.	Hidrógeno	2.016	61100	51623
3.	Oxígeno	32.000	----	----
4.	Nitrógeno	28.016	----	----
5.	Monóxido de Carbono	28.01	4347	4347
6.	Dióxido de Carbono	44.01	----	----
Serie parafínica				
7.	Metano	16.041	23879	21520
8.	Etano	30.067	22320	20432
9.	Propano	44.092	21661	19944
10.	n-Butano	58.118	21308	19680
11.	Isobutano	58.118	21257	19629
12.	n-Pentano	72.144	21091	19517
13.	Isopentano	72.144	21052	19478
14.	Neopentano	72.144	20970	19396
15.	n-Hexano	86.169	20940	19403
16.	n-Heptano	100.007	20825	19314
17.	n-Octano	114.088	20747	19256
18.	n-Nonano	128.099	20687	19211
19.	n-Decano	140.110	20638	19175
20.	n-Undecano	156.121	20598	19145
21.	n-Dodecano	170.132	20564	19120
22.	n-Tridecano	184.143	20536	19099
23.	n-Tetradecano	198.154	20512	19081
24.	n-Pentadecano	212.165	20491	19065
25.	n-Hexadecano	226.176	20472	19052
26.	n-Heptadecano	240.187	20456	19039
27.	n-Octadecano	254.198	20441	19028
28.	n-Nonadecano	268.209	20428	19019
29.	n-Eicosano	282.220	20416	19010

Serie olefínica				
30.	Etileno	28.051	21644	20295
31.	Propileno	42.077	21041	19691
32.	n-Buteno	56.102	20840	19496
33.	Isobuteno	56.102	20730	19382
34.	n-Penteno	70.128	20712	19363
Serie aromática				
35.	Benceno	78.107	18210	17480
36.	Tolueno	92.132	18440	17620
37.	Xileno	106.158	18650	17760
38.	n-Propilbenceno	120.099	18832	17887
39.	Isopropilbenceno	120.099	18818	17873
40.	n-Butilbenceno	134.110	18971	17984
Cicloalcano				
41.	Ciclopentano	70.055	20350	19001
42.	Metilciclopentano	84.066	20279	18930
43.	Etilciclopentano	98.077	20267	18918
44.	n-Propilciclopentano	112.088	20256	18907
45.	n-Butilciclopentano	126.099	20250	18901
46.	Ciclohexano	84.066	20195	18846
47.	Metilciclohexano	98.077	20146	18797
48.	Etilciclohexano	112.088	20166	18816
49.	n-Propilciclohexano	126.099	20165	18816
50.	Butilciclohexano	140.011	20170	18821
Gases diversos				
51.	Acetileno	26.036	21500	20776
52.	Naftaleno	128.162	17298	16708
53.	Alcohol metílico	32.041	10259	9078
54.	Alcohol etílico	46.067	13161	11929
55.	Amoniaco	17.031	9668	8001
56.	Azufre	32.06	3983	3983
57.	Sulfuro de hidrógeno	34.076	7100	6545
58.	Dióxido de azufre	64.06	---	---

APENDICE B

Tabla B-1. Límites, inferior y superior, de inflamabilidad

No.	Substancia	Límites de inflamabilidad, %vol	
		Inferior	Superior
1.	Acetaldehído	4.0	60.0
2.	Ácido acético	4.0	19.9 @ 200°F
3.	Anhídrido acético	2.7	10.3
4.	Acetona	2.5	12.8
5.	Acetileno	2.5	100.0
6.	Acroleína	2.8	31.0
7.	Acrilonitrilo	3.0	17.0
8.	Alcohol alílico	2.5	18.0
9.	Alilamina	2.2	22.0
10.	3-Bromo propeno	4.4	7.3
11.	3-Cloro propeno	2.9	11.1
12.	Propino	1.7	
13.	Amoniaco	15	28
14.	n-Amil acetato	1.1	7.5
15.	Iso-Amil acetato	1.0 @ 212°F	7.5
16.	1-Pentanol	1.2	10 @ 212°F
17.	3-Metil 1 Butanol	1.2	9.0 @ 212°F
18.	1-Cloropentano	1.6	8.6
19.	n-Amileno	1.5	8.7
20.	Anilina	1.3	1.1
21.	Anfraceno	0.6	
22.	Benceno	1.2	7.8
23.	Eter de petróleo	1.1	5.9
24.	Clorobenzil	1.1	1.1
25.	Diclorohexil	0.7 @ 212°F	5.1 @ 302°F
26.	Difenil	0.6 @ 232°F	5.8 @ 311°F
27.	1,3-Butadieno	2.0	12.0
28.	n-Butano	1.8	8.5
29.	i-Butano	1.8	8.4

30.	1-Buteno	1.6	10.0
31.	n-Butilacetato	1.7	7.6
32.	Sec-Butilacetato	1.7	9.8
33.	Alcohol butílico	1.4	11.2
34.	Alcohol iso-butílico	1.7 @ 123°F	10.6 @ 202°F
35.	Alcohol sec-butílico	1.7 @ 212°F	9.8 @ 212°F
36.	Alcohol ter-butílico	2.4	8.0
37.	Butilamina	1.7	9.8
38.	n-Butilbenceno	0.8	5.8
39.	Iso-Butilbenceno	0.8	6.0
40.	Sec-Butilbenceno	0.8	6.9
41.	Ter-Butilbenceno	0.7 @ 212°F	5.7 @ 212°F
42.	1-Bromobutano	2.6 @ 212°F	6.6 @ 212°F
43.	1-Clorobutano	1.8	10.1
44.	1-Buteno	1.6	10.0
45.	Butilaldehido	1.9	12.5
46.	Bisulfuro de carbono	1.3	50.0
47.	Monóxido de carbono	12.5	74
48.	Oxisulfuro de carbono	12	29
49.	Clorobenceno	1.3	9.6
50.	1-Cloropropileno	4.5	16
51.	Clorotrifluoretileno	8.4	16.0
52.	o-Cresol	1.4 @ 300°F	
53.	p-Cresol	1.1 @ 302°F	
54.	2-Butenal	2.1	15.5
55.	2-Butino	1.4	
56.	Cianógeno	6.6	32.0
57.	Ciclohexano	1.3	8.0
58.	Ciclohexanona	1.1 @ 212°F	9.4
59.	Ciclopropano	2.4	10.4
60.	4-isopropil-1-metilbenceno	0.7 @ 212°F	5.6
61.	Decahidronaftaleno	0.7 @ 212°F	4.9 @ 212 °F
62.	n-Decano	0.8	5.4

63.	Deuterio	5.0	75
64.	Diacetona	1.8	6.9
65.	1-Butoxibutano	1.5	7.6
66.	Alcohol nonílico	0.8 @ 212°F	6.1 @ 212°F
67.	o-Diclorobenceno	2.2	9.2
68.	1,1-Dicloroetileno	6.5	15.5
69.	1,2- Dicloroetileno	5.6	12.8
70.	Dietilamina	1.8	10.1
71.	Óxido de dietileno	2.0	11.8
72.	p-Dioxano	2.0	22
73.	Eter dietílico	1.9	36
74.	Selenide dietílico	2.5	
75.	Di-isobutil cetona	0.8 @ 200°F	7.1 @ 200°F
76.	Dimetilamina	2.8	14.4
77.	2,2-Dimetilbutano	1.2	7.0
78.	2,3-Dimetilbutano	1.2	7.0
79.	Dimetildiclorosilano	3.4	9.5
80.	Eter metílico	3.4	27.0
81.	2,3-Dimetilpentano	1.1	6.7
82.	2,2-Dimetilpropano	1.4	7.5
83.	Sulfuro de dimetilo	2.2	19.7
84.	Sulfóxido de dimetilo	2.6	42.0
85.	Dinitroclorobenceno	2.0	22
86.	Dipenteno	0.7 @ 302°F	6.1 @ 302°F
87.	Eter vinílico	1.7	27.0
88.	Etano	3.0	12.5
89.	Etanoato de etilo	2.0	11.5
90.	Alcohol etílico	3.3	19
91.	Aminoetano	3.5	14.0
92.	Etilbenceno	0.8	6.7
93.	Bromoetano	6.8	8.0
94.	2-Etilbutiraldehido	1.2	7.7
95.	Cloroetano	3.8	15.4

96.	Etilciclobutano	1.20	7.7
97.	Etilciclohexano	0.9	6.6
98.	Etilciclopentano	1.1	6.7
99.	Etileno	2.7	36.0
100.	1,2-Dicloetileno	6.2	16.0
101.	Etilenglicol	3.2	
102.	Etilenammina	3.5	14.0
103.	Oxido de etileno	3.0	100
104.	Metanoato de etilo	2.8	16.0
105.	Etanotiol	2.8	18.0
106.	Nitrato de etilo	4.0	
107.	Nitrilo de etilo	4.0	50
108.	Propianato de etilo	1.9	11.0
109.	1-Etoxipropano	1.7	9.0
110.	Formaldehido	7.0	73.0
111.	Aceite combustible #1	0.7	5.0
112.	Furfural	2.1	19.3
113.	Alcohol furfúrico	1.8	16.3
114.	Gas natural	3.8-6.5	13-17
115.	Gasoleo	6.0	
116.	Gasolina C ₅ H ₁₂ hasta C ₉ H ₂₀ 56-60 Octanos 73 Octanos 92 Octanos 100 Octanos	1.4 1.4 1.4 1.5 1.4	7.6 7.6 7.6 7.6 7.4
117.	Gasolina 100-130 (grado aviación)	1.3	7.1
118.	Gasolina 115-145 (grado aviación)	1.2	7.1
119.	n-Heptano	1.05	6.7
120.	iso-Heptano	1.0	6.0
121.	n-Hexano	1.1	7.5

122.	iso-Hexano	1.0	7.0
123.	Hidrazina	2.9	98
124.	Acido hidrocianhídrico	5.6	40.0
125.	Hidrógeno	4.0	75.0
126.	Acido sulfhídrico	4.4	44.0
127.	Isobutano	1.8	8.4
128.	Keroseno	0.7	5.0
129.	Anhídrido maleico	1.4	7.1
130.	Metano	5.0	15.0
131.	Acetato de metilo	3.1	16.0
132.	Alcohol metílico	6.0	36
133.	Monoetilamina	4.9	20.7
134.	Bromometano	10	16
135.	2-Hexanona		8.0
136.	4-Metil-2-Pentanona	1.2 @ 200°F	8.0 @ 200°F
137.	Clorometano	8.1	17.4
138.	Metilciclohexano	1.2	6.7
139.	Metilciclopentadieno	1.3 @ 212°F	7.6 @ 212°F
140.	Diclorometano	13	23
141.	Metil etil eter	2.0	10.1
142.	2-Butanona	1.44 @ 200°F	11.4 @ 200°F
143.	Metanoato de metilo	4.25	23.0
144.	1,3-dimetilbutanol	1.0	5.5
145.	Metil isopropenil cetona	1.8	9.0
146.	Metil lactato	2.2 @ 212°F	
147.	Metanotiol	3.9	21.8
148.	2-Metil pentano	1.2	7.0
149.	2-Metil-1-Fenil etileno	1.9	
150.	2-Metil propeno	1.8	9.6
151.	Metil propionato	2.5	13.0
152.	2-Pentanona	1.5	8.2
153.	Nafta (petróleo)	1.1	5.9
154.	Naftaleno	0.9	5.9

155.	Nicotina	0.7	4.0
156.	Nitrobenzeno	1.8 @ 200°F	
157.	Nitroetano	3.4	
158.	Nitrometano	7.3	
159.	1-Nitropropano	2.2	
160.	2-Nitropropano	2.6	11.0
161.	n-Nonano	0.8	2.9
162.	n-Octano	1.0	6.5
163.	Paraldehido	1.3	
164.	n-Pentano	1.5	7.8
165.	i-Pentano	1.4	
166.	Eter petróleo	1.1	5.9
167.	Anhidrido ftálico	1.7	10.5
168.	Pinano	0.7 @ 320°F	7.2 @ 320°F
169.	Propano	2.1	9.5
170.	n-Propil acetato	1.7 @ 100°F	8
171.	i-Propil acetato	1.8 @ 100°F	8
172.	Propanol	2.2	13.7
173.	Alcohol iso-propílico	2.0	12.7 @ 200°F
174.	Propilamina	2.0	10.4
175.	1-Cloropropano	2.6	11.1
176.	2-Cloropropano	2.8	10.7
177.	Propileno	2.0	11.1
178.	1,2-Dicloropropano	3.4	14.5
179.	Propilenglicol	2.6	12.5
180.	Oxido de propileno	2.3	36
181.	Eter isopropílico	1.4	7.9
182.	Propil nitrato	2.0	100.0
183.	Piridina	1.8	12.4
184.	Resorcinol	1.4 @ 392°F	
185.	Estireno	0.9	6.8
186.	Tetradecano	0.5	
187.	Oxido de dietileno	2.0	11.8

188.	Tetralina	0.8 @ 212°F	5.0 @ 312°F
189.	Tolueno	1.1	7.1
190.	Tricloroetileno	8 @ 77°F 7.8 @ 212°F	10.5 @ 77°F 52 @ 212°F
191.	Trietilamina	1.2	8.0
192.	Trietilenglicol	0.9	9.2
193.	Trimetilamina	2.0	11.6
194.	2,2,4-Trimetilpentano	1.1	6.0
195.	Trioxano	3.6	29
196.	Acetato de vinilo	2.6	13.4
197.	Clorovinilo	3.6	33.0
198.	o-Xileno	0.9	6.7

APENDICE C

C.1. Concentraciones permisibles de contaminantes

Aunque muchas corrientes de vapores son dañinas para ser respirables a concentraciones altas, la mayoría de estas presentan poco o nada de riesgo para el personal aún cuando sean descargados después de haber sido quemados. Una persona en promedio puede tolerar una exposición, en términos cortos, de los vapores de hidrocarburos a concentraciones equivalentes o por encima del límite de inflamabilidad inferior (LHV).

Ciertas corrientes de las refinerías pueden contener vapores que son peligrosos a concentraciones extremadamente bajas. Cuando los materiales tóxicos estén presentes en las corrientes de relevo, se deberá llevar a cabo un desarrollo para determinar la máxima concentración a una localización donde el personal pueda ser expuesto. Se debe poner atención a las estructuras elevadas adyacentes que puedan entrar en la ruta de la pluma y sean expuestas a las altas concentraciones.

Cada situación en las cuales los vapores tóxicos puedan ser liberados a la atmósfera requerirá un análisis cuidadoso. Debido a que la toxicidad varía enormemente para diferentes materiales, la máxima concentración que podrá ser tolerada deberá ser, primero, determinada al mismo tiempo que se determina la duración, probable, del escape. Muchas emergencias que causan sobrepresión al equipo podrán ser controlada dentro de los 5-10 minutos siguientes; la duración de la emergencia varía, dependiendo del proceso y equipo que envuelve, en un periodo de 10 minutos a 30 minutos los cuales serán suficientes para controlar una situación de emergencia y evitar una catástrofe.

Para relevar gases tóxicos inflamables, estos solo se pueden enviar directamente al quemador cuando sus productos de combustión no sean tóxicos o bien que éstos últimos, en todo momento, estén en concentraciones inferiores a las concentraciones nocivas, en caso contrario, los relevos pasarán antes por un sistema de neutralización, adsorción o cualquier otro necesario para mantener las concentraciones en la atmósfera en niveles permisibles de acuerdo a lo establecido en la siguiente tabla o en su defecto de acuerdo a la toxicología más reciente.

Tabla C-1. Niveles máximos permisibles de concentración de los contaminantes para exposición laboral.

CPT: Concentración Ponderada en el Tiempo (8 horas de exposición)

Gas o vapor	CPT (ppm)
Acetaldehído	100
Acido acético	10
Anhídrido acético	5
Acetona	1000
Acroleína	0.1
Acrolonitrilo	2
Alcohol alílico	2
Disulfuro propil alílico	2
Amoniaco	25
Acetato de amilo	100
Alcohol amílico	100
Anilina	2
Arsina	0.05
Benceno	10
Cloruro de benceno	1
Bromo	0.1
1,3-Butadieno	1000
Metil etil cetona	200
n-Acetato de butilo	150
n-Butanol	100
Butil amina	5
2-Butoxi etanol	25
Dióxido de carbono	5000
Disulfuro de carbono	10
Monóxido de carbono	50
2 Cloro 1,3 butadieno	10
Cresol	5
Ciclohexano	300
Ciclohexanol	500

Gas o vapor	CPT (ppm)
Ciclohexanona	50
Ciclohexeno	300
Ciclopropano	400
4 Hidroxi 4 metil 2 pentanona	50
Diborano	0.1
Diclorobenceno	50
Cicloro difluoro metano	1000
1,1-Dicloro etano	200
1,2-Dicloro etileno	200
Dicloro etil-éter	15
Dicloro monofluorometano	1000
1,1-Dicloro 1 nitroetano	2
Dicloro tetrafluoro etano	1000
Dietilamina	10
Difluoro dibromo metano	100
Diisobutil cetona	50
Dimetilnilina	5
Dimetilsulfato	1
Dioxano	25
Etil acetato	400
Etanol	1000
Tetracloruro de carbono	10
2-Etoxi etanol	50
2-Etoxi etil acetato	50
Cloro	1
Trifluoro de cloro	0.1
Clorobenceno	75
Tricloro metano	100
1 Cloro 1 nitro propano	20

Etilen diamina	10
1,2-Dibromo etano	25
1,2-Dicloro etano	100
Etilen amina	5
Óxido de etileno	100
Fluor	1
Fluor tricloro metano	1000
Formaldehido	5
Gasolina	500
n-Heptano	400
n-Hexano	100
Metil butil cetona	100
Metil isobutil cetona	100
Hidrazina	1
Bromuro de hidrógeno	3
Cloruro de hidrógeno	5
Cianuro de hidrógeno	10
Etilamina	10
Etilbenceno	100
Bromuro de etilo	200
Cloruro de etilo	1000
Etil éter	400
Etil fosfato	100
Etil silicato	100
Etilen clorhidrina	1
Metil ciclohexano	400
Metil ciclohexanol	50
Metil ciclohexanona	50
Metil fosfato	100
Alcohol metil amílico	25
Cloruro de metileno	100
Nafta (alquitran de hulla)	200
Nafta (petróleo)	500

Niquel carbonil	0.05
p-Nitro anilina	1
Nitrobenceno	1
Nitroetano	100
2-Nitro propano	25
Ozono	0.1
Pentano	600
Fluoruro de hidrógeno	3
Peróxido de hidrógeno	1
Selenuro de hidrógeno	0.05
Sulfuro de hidrógeno	10
Yodo	0.1
Isoforona	5
Isopropil amina	5
Óxido de mesitil	25
Metil acetato	200
Metil acetileno	1000
Alcohol amílico	200
Bromuro de metilo	15
2-Metoxi etanol	25
Etilénglicol monometil éter	25
Acetato	25
Cloruro de metilo	50
1,1,1-Tricloroetano	350
Dimetoximetano	1000
Monómero de estireno	200
Dióxido de azufre	2
Hexafluoruro de azufre	1000
Monocloruro de azufre	1
Pentafluoruro de azufre	0.025
p-Terbutil tolueno	10
1,1,2,2-Tetracloroetano	5
Tetracloruro etileno	200

Fenol	5
Fenil hidrazina	5
Fosgeno	1
Fosfina	0.3
Tricloruro de fósforo	0.5
Propil acetato	200
Alcohol isopropílico	400
Éter isopropílico	250
1,2-Dicloro propano	75
Propilenimina	2
Piridina	5
Quinona	0.1

APENDICE D

D.1. Normatividad ecológica aplicada en la República Mexicana

• Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

I.- Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar;

II.- Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;

III.- La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;

IV.- La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas.

V.- El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;

VI.- La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;

VII.- Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;

VIII.- El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución;

IX.- El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental, y

X.- El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

En todo lo no previsto en la presente Ley, se aplicarán las disposiciones contenidas en otras leyes relacionadas con las materias que regula este ordenamiento.

Se consideran de utilidad pública:

I.- El ordenamiento ecológico del territorio nacional en los casos previstos por ésta y las demás leyes aplicables;

II.- El establecimiento, protección y preservación de las áreas naturales protegidas y de las zonas de restauración ecológica;

III.- La formulación y ejecución de acciones de protección y preservación de la biodiversidad del territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, así como el aprovechamiento de material genético; y

IV.- El establecimiento de zonas intermedias de salvaguardia, con motivo de la presencia de actividades consideradas como riesgosas.

La presente ley esta conformada de la siguiente manera:

Título I Disposiciones Generales.

- Capítulo I Notas Preliminares
- Capítulo II Distribución de Competencias y Coordinación
- Capítulo III Política Ambiental
- Capítulo IV Instrumentos de la Política Ambiental
 - Sección I Planeación Ambiental
 - Sección II Ordenamiento Ecológico del Territorio
 - Sección III Instrumentos Económicos
 - Sección IV Regulación Ambiental de los Asentamientos Humanos
 - Sección V Evaluación del Impacto Ambiental
 - Sección VI Normas Oficiales Mexicanas en Materia Ambiental
 - Sección VII Autorregulación y Auditorias Ambientales
 - Sección VIII Investigación y Educación Ecológicas

Título II Biodiversidad.

- Capítulo I Áreas Naturales Protegidas
 - Sección I Disposiciones Generales
 - Sección II Tipos y Características de las Áreas Naturales Protegidas
 - Sección III Declaratorias para el Establecimiento, Administración y Vigilancia de Áreas Naturales Protegidas
 - Sección IV Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas
- Capítulo II Zonas de Restauración
- Capítulo III Flora y Fauna Silvestre

Título III Aprovechamiento Sustentable de los Elementos Naturales

- Capítulo I Aprovechamiento Sustentable del Agua y los Ecosistemas Acuáticos
- Capítulo II Preservación y Aprovechamiento Sustentable del Suelo y sus Recursos
- Capítulo III De la Exploración y Explotación de los Recursos no-Renovables en el Equilibrio Ecológico

Título IV Protección al Ambiente

- Capítulo I Disposiciones Generales
- Capítulo II Prevención y Control de la contaminación Atmosférica
- Capítulo III Preservación y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos
- Capítulo IV Preservación y Control de la Contaminación del suelo
- Capítulo V Actividades Consideradas como Altamente Riesgosas

- Capítulo VI Materiales y Residuos Peligrosos
- Capítulo VII Energía Nuclear
- Capítulo VIII Ruido, Vibraciones, Energía Térmica y Lumínica, Olores y Contaminación Visual

Título V Participación Social e Información Ambiental
 Capítulo I Derecho a la Información ambiental

- Título VI Medidas de Control y Seguridad y Sanciones
- Capítulo I Disposiciones Generales
 - Capítulo II Inspección y Vigilancia
 - Capítulo III Medidas de Seguridad
 - Capítulo IV Sanciones Administrativas
 - Capítulo V Recursos de Revisión
 - Capítulo VI De los Delitos del Orden Federal
 - Capítulo VII Denuncia Popular

Transitorios.

Tomando como referencia esta conformación, se visualiza que el título IV es el que aplica directamente en la cuestión de los sistemas de desfogue cerrados.

• **Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera**

El presente Reglamento rige en todo el territorio nacional y las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, y tiene por objeto reglamentar la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en lo que se refiere a la prevención y control de la contaminación de la atmósfera.

El presente reglamento esta conformado de la siguiente manera:

- Capítulo I Disposiciones Generales
 - Capítulo II De la Emisión de Contaminantes a la Atmósfera, Generada por Fuentes Fijas
 - Capítulo III De la Emisión de Contaminantes a la Atmósfera, Generada por Fuentes Móviles
 - Capítulo IV Del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire
 - Capítulo V De las Medidas de Control y Seguridad y Sanciones
- Transitorios

• **Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos**

El presente Reglamento rige en todo el territorio nacional y las zonas en donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, y tiene por objeto reglamentar la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en lo que se refiere a residuos peligrosos.

El presente reglamento esta conformado de la siguiente manera:

- Capítulo I Disposiciones Generales
- Capítulo II De la Generación de Residuos Peligrosos
- Capítulo III Del Manejo de Residuos Peligrosos
- Capítulo IV De la Importancia y Exportación de Residuos Peligrosos
- Capítulo V De las Medidas de Control y de Seguridad y Sanciones

- **Reglamento para la Protección del Ambiente Contra la Contaminación Originada por la Emisión del Ruido**

El presente Reglamento es de observancia general en todo el Territorio Nacional y tiene por objeto proveer, en la esfera administrativa, al cumplimiento de la Ley Federal de Protección al Ambiente, en lo que se refiere a emisión contaminante de ruido, proveniente de fuentes artificiales.

El presente reglamento esta conformado de la siguiente manera:

Capítulo I	Disposiciones Generales
Capítulo II	De las Definiciones
Capítulo III	De la Emisión de Ruido
Capítulo IV	De las Medidas de orientación y Educación
Capítulo V	De la Vigilancia e Inspección
Capítulo VI	Del Procedimiento para Aplicar las Sanciones
Capítulo VII	Del Recurso Administrativo de Conformidad
Capítulo VIII	De la Acción Popular
Capítulo IX	De las sanciones
Transitorios	

- **Norma Oficial Mexicana. NOM-037-ECOL-1993**

Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

Objeto

Esta norma oficial mexicana establece el método de medición para determinar la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

Campo de aplicación

Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria en la operación de los equipos, estaciones o sistemas de monitoreo de la calidad del aire con fines de difusión o información al público o cuando los resultados tengan validez oficial.

- **Norma Oficial Mexicana NOM-038-ECOL-1993**

Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

Objeto

Esta norma mexicana establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

Campo de aplicación

Esta norma mexicana es de observancia obligatoria en la operación de los equipos, estaciones o sistemas de monitoreo de la calidad del aire con fines de difusión o información al público o cuando los resultados tengan validez oficial.

- **Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993**

Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Objeto

Esta norma oficial mexicana establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Campo de aplicación

Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria en la definición y clasificación de residuos peligrosos.

- **Norma Oficial Mexicana NOM-053-ECOL-1993**

Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Objeto

Esta norma oficial mexicana establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Campo de aplicación

Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria en la generación y manejo de residuos peligrosos.

- **Norma Oficial Mexicana NOM-081-ECOL-1994**

Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.

Objeto

Esta norma oficial mexicana establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido que genera el funcionamiento de las fuentes fijas y el método de medición por el cual se determina su nivel emitido hacia el ambiente.

Campo de aplicación

Esta norma oficial mexicana se aplica en la pequeña, mediana y gran industria, comercios establecidos, servicios públicos o privados y actividades en la vía pública.

- **Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994**

Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles, sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

Objeto

Norma oficial mexicana para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos

permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas, suspendidas y totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión; así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

Campo de aplicación

Norma oficial mexicana para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos y gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, será de observancia obligatoria para el uso de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los equipos de generación eléctrica que utilizan la tecnología de ciclo combinado. Será obligatoria igualmente solo en emisiones de bióxido de azufre para el uso de los equipos de calentamiento directo por combustión.

Se exceptúan los equipos domésticos de calentamiento, de calefacción y las estufas utilizados en casas habitación, escuelas, hospitales y centros recreativos, en las industrias cuando estos equipos sean utilizados en las áreas de servicios al personal, sin embargo, aplicará para el caso de industrias, comercios y servicios, cuando los equipos y sistemas de combustión en lo individual o la suma de varios rebasen los 10 cc de capacidad en cada instalación.

También se exceptúan los quemadores industriales de campo; el sistema de regeneración de las plantas de desintegración catalítica; las plantas recuperadoras de azufre y los procesos de calentamiento directo que producen bióxido de azufre adicional al proveniente del combustible.

• Norma Oficial Mexicana: NOM-010-STPS-1994

Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral.

Objetivo.

Establecer medidas para prevenir y proteger la salud de los trabajadores y mejorar las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas que por sus propiedades, niveles de concentración y tiempo de acción sean capaces de contaminar el medio ambiente laboral y alterar la salud de los trabajadores, así como los niveles máximos permisibles de concentración de dichas sustancias, de acuerdo al tipo de exposición.

Campo de Aplicación

La presente NOM-STPS debe aplicarse en todos los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el ambiente laboral.

BIBLIOGRAFÍA

Sistemas de relevo

- 1.- A.P.I. R. P. 520 (1993). Sizing, selection and installation of pressure-relieving devices in refineries. Part I. Sizing and selection. Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 6° Edic.
- 2.- A.P.I. R. P. 520 (2000). Sizing, selection and installation of pressure-relieving devices in refineries. Part I. Sizing and selection. Washington, D.C. American Petroleum Institute, 7° Edic.
- 3.- A.P.I. R. P. 521 (1997). Guide for pressure-relieving and depressuring systems. Washington, D.C. American Petroleum Institute, 4° Edic.
- 4.- A.P.I. R. P. 526 (1995). Flanged steel pressure relief valves. Washington, D.C. American Petroleum Institute, 4° Edic.
- 5.- A.P.I. R. P. 576 (1992). Inspection of pressure-relieving devices. Washington, D.C. American Petroleum Institute, 1° Edic.
- 6.- A.P.I. Std. 2000 (1998). Venting atmospheric and low-pressure storage tanks. Washington, D.C. American Petroleum Institute, 5° Edic.
- 7.- A.S.M.E. B31.3 (1990). Chemical plant and petroleum refinery piping. New York, U. S. A. American Society of Mechanical Engineers, Ed. 1990.
- 8.- Bluhm, William C. (1959). Protective facilities for refinery process units. Proceedings Division of Refinery. United State of America, American Petroleum Institute, 39 [III].
- 9.- Brosius, Mark G & L. Dial II, John. (1997). Properly model relief system. Chemical Engineering Progress, 93 (7), 78-82.
- 10.- Coker, A. K. (1991). Determine process-pipe sizes. Chemical Engineering Progress, 87 (3), 33-39.
- 11.- Coker, A. K. (1992). Size relief valves sensibly. Chemical Engineering Progress, 88 (8), 20-27.
- 12.- Coker, A. K. (1992). Size relief valves sensibly. Part. 2. Chemical Engineering Progress, 88 (11), 94-102.
- 13.- Conison, Joseph. (1963). Factors in sizing a safe and economical vapor relief system. Proceedings Division of Refinery. United State of America, American Petroleum Institute, vol. 43 [III].
- 14.- Crozier, R. A. (1985). Sizing relief valves for fire emergencies. Chemical Engineering, 92, 49-54.
- 15.- Emerson, Gary B. (1985). Selecting pressure relief valves. Chemical Engineering, 92.

- 16.- Fisher, Harold G. (1991). An overview of emergency relief system design practice. *Plant/Operation Progress*, 10 (1), 1-12.
- 17.- Hall, Stephen M. (1993). Size and design relief headers. *Chemical Engineering Progress*, 89 (3), 117-122.
- 18.- Instituto Mexicano del Petróleo. (1979). Diseño de sistemas de relevo de presión. Departamento de Ingeniería de Sistemas. División de Proceso.
- 19.- Jenett, Eric. (1963). Design considerations for pressure-relieving systems. *Chemical Engineering*, 70 (14), 125-130.
- 20.- Jenett, Eric. (1963). Components of pressure-relieving systems. *Chemical Engineering*, 70 (17), 151-158.
- 21.- Jenett, Eric. (1963). How to calculate back pressure in vent lines. *Chemical Engineering*, 70 (18), 83-86.
- 22.- Jenkins, J. H., Kelly, P. E., et. al. (1977). Design for better safety relief. *Hydrocarbon Processing*, 56 (8), 93-97.
- 23.- Kern, Robert. (1975). How to size piping and components as gas expands at flow conditions. *Chemical Engineering*, 82, 125-132.
- 24.- Petróleos Mexicanos. (1989). Norma GPEI-IT-0203. Especificaciones mínimas de seguridad para sistemas de desfogue. Gerencia de protección ecológica e industrial. Especificaciones generales.
- 25.- Petróleos Mexicanos. (1990). Norma No. 2.461.01. Sistemas de desfogues. Normas para proyectos de obras.
- 26.- Ranade, M. (1996). Improve sizing for relief systems. *Hydrocarbon processing*, 75 (4), 83-85.
- 27.- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1994). Norma Oficial Mexicana, NOM-093-SCFI. Válvulas de relevo de presión (seguridad, seguridad-alivio y alivio) operadas por resorte y piloto; fabricadas de acero y bronce. Diario Oficial de la Federación, Martes 8 de diciembre.
- 28.- Simulation Science. (1994). INPLANT. Input manual. United States of America.
- 29.- Simulation Science. (1996). Visual Flare. User's Guide. United States of America.
- 30.- Westman, Martin A. (1997). Rapidly design safety relief valve inlet piping system. *Chemical Engineering Progress*, 93 (3), 80-88.
- 31.- Westman, Martin A. (1997). Easily design safety relief vent header systems. *Chemical Engineering Progress*, 93 (10), 70-76.
- 32.- Wong, Wing Y. (1999). Improve the fire protection of pressure vessels. *Chemical Engineering*, 106 (10), 193-196.

33.- Zappe, R.W. (1981). Valve Selection Handbook. United State of America, Gulf Publishing Company.

Recipiente separador

1.- Anaya Durand, Alejandro, Abraján Osorio, Raúl & Hernández Suárez, Rogelio. (1996). New program sizes pressure-relief drums. Oil & Gas Journal, 94, 104-110.

2.- D. Scheiman, Adolph. (1963). Size vapor-liquid separators quicker by nomograph. Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner, 42 (10), 165-168.

3.- Gerunda, A. (1981). How to size liquid-vapor separators. Chemical Engineering, 88, 74-80.

4.- Instituto Mexicano del Petróleo. (1977). Manual para la especificación de recipientes. Departamento de Diseño de Proceso. División de Proceso.

5.- Lapple, C.E. & Shepherd, C.B. (1940). Calculation of particle trajectories. Industrial and Engineering Chemistry, 32 (5), 605-617.

6.- Souders, Mott & Granger Brown, George. (1934). Design of fractionating columns. Entrainment and capacity. Industrial and Engineering Chemistry, 26 (1), 98-103.

7.- Svrcek, W. Y. & Monnery, W. D. (1993). Design two-phase separators within the right limits. Chemical Engineering Progress, 89 (10), 53-60.

8.- Talavera, P. G. (1990). Selecting gas/liquid separators. Hydrocarbon Processing, 69 (6), 81-84.

9.- Watkins, R. N. (1967). Sizing separators and accumulators. Hydrocarbon Processing, 46 (11), 253-256.

10.- G. Woinsky, Samuel. (1994). Help cut pollution with vapor/liquid and liquid/liquid separators. Chemical Engineering Progress, 90 (10), 55-58

Quemadores

1.- American Petroleum Institute. (1957). Smokeless Flares. Manual on disposal of refinery wastes. Vol. II. Wastes gases and particulate.

2.- Bluhm, William C. (1961). Safe operation of refinery flare system. Proceedings Division of Refinery. United State of America, American Petroleum Institute, 41 [III].

3.- Bodurtha, F.T. (1958). Flare Stacks – How Tall?. Chemical Engineering, 65 (25), 177-180.

4.- Brzustowski, T. A. (s/a). Flaring: the state of the art. University of Waterloo, Ontario, Canada.

5.- Brzustowski, T. A. & Sommer, E. C. (1973). Predicting radiant heating from flares. Proceedings Division of Refinery, American Petroleum Institute, 53 [III], 865-893.

- 6.- Chaudhuri, Mrinal & Diefenderfer, Jason J. (1995). Chemical Engineering Progress. 91 (6), 40-43.
- 7.- Kent, G. R. (1964). Practical design of flare stacks. Hydrocarbon Processing, 43 (8), 121-125.
- 8.- Kent, G.R. (1968). Find radiation effect of flares. Hydrocarbon Processing, 47 (6), 119-130.
- 9.- Kumar, Ajay. (1998). Design & operate flares safely. Chemical Engineering, 105 (13), 133-138.
- 10.- Leite, O. C. (1991). Smokeless, efficient, nontoxic flaring. Hydrocarbon Processing, 70 (3), 77-80.
- 11.- Leite, O. C. (1992). Flare systems 1: Design alternatives, components key to optimum flares. Oil & Gas Journal, 90, 70-75.
- 12.- Leite, O. C. (1992). Flare systems 2: Safety, noise and emissions elements round out flare guidelines. Oil & Gas Journal, 90, 68-74.
- 13.- Niemeyer, Christopher E. & Livingston, Gerald N. (1993). Choose the right flare system design. Chemical Engineering Progress, 89 (12), 39-44.
- 14.- Oenbring, P. R. & Sifferman, T. R. (1980). Flare design...are current methods too conservative?. Hydrocarbon Processing, 59 (5), 124-129.
- 15.- Petróleos Mexicanos. (1990). Sistemas de quemadores. Normas para proyecto de obras.
- 16.- Schwartz, Robert. E & W. White, Jeff. (1997). Predict radiation from flares. Chemical Engineering Progress, 93 (7), 42-49.
- 17.- Stone, Diana K., Lynch, Susan K. & Pandullo, Richard F. (1992). Flares. Part I: Flaring technologies for controlling VOC-containing waste streams. Journal Air Waste Management Associate, 42 (3), 333-340.
- 18.- Stone, Diana K., Lynch, Susan K. & Pandullo, Richard F. (1992). Flares. Part II: Capital and annual costs. Journal Air Waste Management Associate, 42 (4), 488-493.
- 19.- Straitz III, John F., & Altube, Ricardo J. (s/a). Flares: design and operation. National Airoil Burner Company (NAO).
- 20.- Straitz III, John F. (1977). Make the flare protect the enviroment. Hydrocarbon Processing, 56 (10), 131-135.
- 21.- Straitz III, John F. (1987). Flare technology safety. Chemical Engineering Progress, 83 (7), 53-62.
- 22.- Straitz III, John F. (1994). Improve flare design. Hydrocarbon Processing, 73 (10), 61-66.

- 23.- Straitz III, John F. (1996). Clearing the air about flare systems. *Chemical Engineering*, 103 (9), 116-122.
- 24.- Tan, Soen H. (1967). Flare system design simplified. *Hydrocarbon Processing*, 46 (1), 172-176.
- 25.- Tan, Soen H. (1967). Simplified flare system sizing. *Hydrocarbon Processing*, 46 (10), 149-155.
- 26.- Vanderlinde, L. G. (1974). State of the art... Smokeless flares. *Hydrocarbon Processing*, 53 (10), 99-104.
- 27.- Villalobos Martínez, Angélica. (1991). Manual de calculo de quemadores elevados. Instituto Mexicano del Petróleo, Departamento de Ingeniería de Sistemas, México D.F.

Dispersión

- 1.- American Petroleum Institute. (1957). Dispersion of gases from stacks and flares. Manual on disposal of refinery wastes. Vol. II. Wastes gases and particulate.
- 2.- American Petroleum Institute (1974). Manual on disposal of refinery wastes. Volume on atmospheric emissions. Chap. 6. Dispersion of gases. United State of America.
- 3.- A.P.I. Std. 224 (1988). Review of EPA's proposed flare plume rise procedure. Washington, D.C. American Petroleum Institute,
- 4.- A.P.I. Pub. 4421 (1986). Plume rise research for refinery facilities. Washington, D.C. American Petroleum Institute,
- 5.- Department of the environment, transport and the regions. (1995). Review and Assessment: selection and use of dispersion models part IV. London, England. (<http://www.detr.gov.uk>)
- 6.- Finch, R. N. & Serth, R. W. (1990). Model air emissions better. *Hydrocarbon Processing*, 69 (1), 75-80
- 7.- Green, A. E., Singhal, R. P., et.al. (1980). Analytic extensions of the Gaussian Plume Model. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 30 (7), 773-776.
- 8.- Loudon, D. E. (1963). Requirements for safe discharge of hydrocarbons to atmosphere. Proceedings. Division of refinery. United America of State, American Petroleum Institute, vol. 43 [III].
- 9.- Petersen, Ronald L. (1987). Performance evaluation of integral and analytical plume rise algorithms. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 37, 1314-1319.
- 10.- Secretaria del Trabajo y Previsión Social. (1994). Norma Oficial Mexicana, NOM-010-STPS-1994. Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral. *Diario Oficial de la Federación*, Viernes 8 de julio, 1-32.

11.- Schulman, Lloyd L & Hahna, Steve R. (1986). Evaluation of downwash modifications to the industrial source complex model. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 36, 258-264.

12.- Turner, Bruce. (1979). Atmospheric dispersion modeling. A critical review. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 29 (5), 502-519.

13.- USA, Department of Commerce. (1991). Control technologies for hazardous air pollutants. Environmental Protection Agency, 4.20-4.27.

Reducción de masas

1.- ASME Boiler and Pressure Vessel Code. (1992). Secciones I y VIII, División 1 y 2.

2.- Bonilla, Jorge. (1978). Estimate safe flare-header quickly. *Chemical Engineering*, 85, 135-140.

3.- Bradford, Mike & Durrett, David G. (1984). Avoding common mistakes in sizing. Distillation safety valves. *Chemical Engineering*, 91, 78-84.

4.- Ernest, J. B. & Depew, C. A. (1995). Use dynamic simulation to model HPU reactor depressuring. *Hydrocarbon Processing*. 74 (1), 72-79.

5.- Depew, C. A. & Nielsen, R. B. (1996). Dynamic simulation for process design. *Hydrocarbon Processing*. 75 (7), 67-75.

6.- Lawley, Herbert G., & A. Kletz, Trevor. (1975). High-pressure-trip systems for vessel protection. *Chemical Engineering*, 82, 81-88.

7.- Walker, J. J. (1970). Sizing relief areas for distillation columns. *Chemical Engineering Progress*, 66 (9), 38-40

8.- Wong, Wing Y. (2000). Fire, vessels and the pressure relief valve. *Chemical Engineering*, 107 (5), 84-92.

9.- Wu, Chung-you. (1983). Are you flare systems adequate?. *Chemical Engineering*, 90, 41-44.

Paginas de consultadas de Internet

1.- <http://www.air-dispersion.com>

2.- Anderson Greenwood. <http://www.andersongreenwood.com>.

3.- <http://www.atmos.ucla.edu/AS2/scrms/top10.html>

4.- http://bigmac.civil.mtu.edu/public_html/classes/ce352/lectures/Lecture1.html

5.- Diario Oficial de la Federación (Catálogo). <http://cronos.cta.com.mx/normas>.

6.- Environmental Protection Agency (EPA). <http://www.epa.gov>.

- 7.- De esta página se consultaron los siguientes textos:
- 8.- Code of Federal Regulations (CFR)
- 9.- Toxics Release Inventory Chemicals (TRI)
- 10.- Unified Air Toxics Website (UATW)
- 11.- Inspection tool for the Hazardous Organic Neshap
- 12.- Refinery
- 13.- John Zink. <http://www.johnzink.com>.
- 14.- Kaldair. <http://www.kaldair.com>.
- 15.- National Airoil Burner Company. <http://www.nao.com>.
- 16.- Occupational Safety & Health Administration. <http://www.osha-scl.gov>
- 17.- Secretaría del Comercio y Fomento Industrial. <http://www.secofi-siem.gob.mx>.