



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“SELECCIÓN DE VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN PARA PROCESOS
QUÍMICOS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A
MARICELA GARCÍA PERDOMO



MÉXICO, D. F.

2014



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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: **Profesor:** José Agustín Texta Mena
VOCAL: **Profesor:** Juan Mario Morales Cabrera
SECRETARIO: **Profesor:** Alejandro Rodríguez Valdés
1er. SUPLENTE: **Profesor:** Alma Delia Rojas Rodríguez
2° SUPLENTE: **Profesor:** Manuel Miguel López Ramos

ASESOR DEL TEMA:

Rodríguez Valdés Alejandro

SUSTENTANTE (S):

García Perdomo Maricela

DEDICATORIA

En principio, quiero dedicar este trabajo a mis padres por ser esa fuerza impulsora que me dirigió hasta donde hoy estoy, porque si hoy puedo presentar este trabajo es gracias al esfuerzo y sacrificio que ambos hicieron por mí.

A ti mami, porque me diste la vida, no sólo una vez sino varias, por no dejarme caer nunca, porque más que una madre es mi mejor amiga, mi compañera y mi confidente, porque a pesar de todo siempre has creído en mí, no tengo forma de pagarte todos tus desvelos, tus abrazos, tus besos, tus palabras de aliento, lo único que ahora puedo hacer es dedicarte este mi triunfo porque a fin de cuentas es tuyo.

A ti, papá, por ser mi ejemplo, te dedico este trabajo como resultado de tu esfuerzo y mi esfuerzo, por mostrarme que la vida se vuelve menos compleja luchando y no dándote por vencido, yo no me di por vencida nunca, y el resultado puedes verlo aquí.

A mis hermanas quiero dedicarles esto, porque siempre han sido ese complemento perfecto de una familia hermosa y unida, y porque sé que siempre han creído en mí, Jessica y Cristina, ustedes son mi ejemplo a seguir y una de las mil formas que la vida me ha mostrado que puedo lograr todo lo que me proponga y compartir mis triunfos a su lado.

A mis pequeños, Daniela y Adrián, por ser esa luz que me ha motivado desde que llegaron a nuestras vidas.

A ti, Miguel, porque estuviste presente en esta etapa, y siempre fuiste ese apoyo esencial, por ser mi amigo y estar siempre para mí... ¡Lo logramos!

A mi abuelito, ese ángel que siempre ha estado presente, y sé que en todos y cada uno de los segundos que dedique para lograr esto, él estuvo ahí.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre,

Por su apoyo en todo momento, y por darme las armas necesarias para defenderme en la vida, eres mi ejemplo a seguir... ¡Gracias!

A mi madre,

Por no dejarme ir sola y darme todo el amor y apoyo para terminar mi carrera profesional, porque sé que si hay alguien que cree ciegamente en mi eres tú ¡Gracias mami!

A mis hermanas,

Por soportar esos “ataques de estrés” que continuamente tenía y a pesar de todo siempre estaban ahí apoyándome, incluso abrazándome.

A Miguel,

Por tu apoyo incondicional durante toda la carrera y más aún por escucharme y ayudarme a cumplir mis sueños.

A mi tutor,

Por ayudarme a realizar el presente y confiar en que podría lograrlo.

Índice

Introducción.....	7
Objetivos	10
Nomenclatura	11
Capítulo I.....	13
1. Seguridad.....	13
1.1 Definiciones.....	14
1.2 Riesgo	15
1.2.1 Riesgos industriales graves	18
1.2.1.1 Efectos de riesgos industriales graves:.....	22
1.3 Causas de un accidente:.....	24
1.4 Clasificación de accidentes	27
1.5 Consecuencias. Lo que cuesta un accidente.	30
1.6 Como se previenen los accidentes.....	32
Capítulo 2.....	37
2. Válvulas de seguridad.....	37
2.1 Historia.....	37
2.2 Marco legal:.....	42
2.3 Definiciones.....	43
2.4 Importancia de las válvulas	47
2.5 Diseño	48
2.6 Elementos estructurales principales.....	52
2.7 Funcionamiento.....	55
Capítulo 3.....	58
3.1 Tipos de alivios	58
3.1.1Válvula convencional	59
1.1.1.2 Válvula de alivio de presión convencional (servicio de líquido).....	62
3.1.2 Fuelles balanceados	63
3.1.2.1 Válvula de seguridad equilibrada o compensada de pistón.	65

1.1.2	Discos de ruptura.....	67
Capítulo 4.....		72
4.1	Cálculo analítico del orificio de entrada en las válvulas de seguridad y alivio	72
4.2	Válvula convencional en servicio de líquidos	73
4.3	Válvula convencional, en servicio de vapor y gas	81
4.4	Alivios con disco de ruptura en servicio de líquidos	85
4.5	Discos de ruptura en servicios de vapor o gas.....	85
4.6	Flujo a dos fases	86
4.6. 1	Tipo 1	87
4.6. 2	Tipo 2	89
4.6. 3	Tipo 3.....	90
4.6. 4	Tipo 4	94
4.7	Servicio líquido.....	100
4.8	Servicio vapores o gases	104
4.9	Flujo a dos fases	109
4.9.1	Tipo I & Tipo II.....	109
Capítulo 5.....		111
5.1	Determinación del área de venteo mediante EES (Engineering Equations Solver).....	111
5.1.1	Metodología	113
5.2	Servicio de líquidos.....	114
5.3	Servicio vapores o gases	118
5.4	Flujo Bifásico.....	121
5.4.1	Tipo I & tipo II	121
5.4.2	Tipo III	123
5.4.3	Tipo IV.....	125
5.5	Comparación valores obtenidos analíticamente con los obtenidos mediante ESS.....	126
Capítulo 6.....		130
6.1	Riesgos y estimación de la fuga generada.....	130
Capítulo 7		135

7.1 Conclusiones.....	135
Referencias:.....	138
Anexos:	140
Anexo I.....	140
Especificación de una válvula de seguridad	140
Anexo II.....	141
Hoja de datos de válvula reguladora de presión.....	141
Anexo II.....	143
Balance de energía mecánica	143
Anexo III.....	144
Factor de compresibilidad.....	144
Anexo IV	145
Servicio líquido	145
Anexo V	147
Servicio vapor	147
Anexo VI	151
Servicio tipo I & II.....	151
Anexo VII	155
Servicio tipo IV.....	155

Introducción

Sin lugar a duda la seguridad dentro y fuera del ámbito laboral es una condición de suma importancia para lograr los objetivos planteados de cualquier industria, y esta debe ser una garantía para todos los empleados y personas en general, para evitar accidentes de cualquier tipo. Puesto que las condiciones de operación de ciertos equipos de proceso conlleva un riesgo es necesario establecer ciertas medidas que garanticen la disminución de este mismo, así como el bienestar de las personas.

La mayoría de las industrias cuentan con sistemas de tuberías y equipos que operan a presión distinta a la atmosférica, tales como, reactores, calderas, intercambiadores, entre otros; mismos que pueden verse sometidos a sobrepresiones lo que pone en riesgo la seguridad tanto de las personas que laboran dentro de la misma, como instalaciones cercanas. Razón por la cual es necesario establecer medidas de seguridad en las industrias, entre las que figura la instalación de válvulas de seguridad en los equipos, también llamadas válvulas de alivio de presión PRV (siglas de su nombre en inglés, Pressure Relief Valves), que de igual manera son conocidas como PSV (Pressure Safety Valves), o simplemente válvulas de seguridad.

Las PRV son dispositivos que permiten liberar un fluido cuando la presión interna de un sistema ha superado la permitida o la de diseño, evitando con ello posibles explosiones, derrames o fugas por un fallo en los equipos o tuberías. Estas válvulas constituyen un elemento clave de seguridad dentro de cualquier proceso, por ello es necesario conocer y entender su funcionamiento así como las limitaciones que hay en estos dispositivos.

El principal uso de las válvulas es evitar accidentes que afecten tanto a personas como al medio ambiente, ya que un derrame que contenga sustancias tóxicas hacia la superficie puede llegar a ocasionar un desequilibrio ecológico e incluso la muerte, dependiendo de la intensidad con que se emita y el fluido que se esté liberando.

El objetivo de este proyecto es seleccionar válvulas de alivio, para ello se requiere el cálculo del orificio de la válvula, por lo que hará mención de las especificaciones de una válvula de alivio tales que permitan la liberación de la presión de un flujo para gases, líquidos y un sistema bifásico dado que no pueden ser iguales por las características de cada fluido.

En el primer capítulo se tratará el tema de la seguridad industrial, su importancia y principales definiciones. Asimismo se hará alusión a la normatividad que debe estar presente en toda industria química. Posteriormente se aborda el tema de riesgos, haciendo hincapié en los riesgos industriales graves, considerando a estos como las emisiones, explosiones e incendios, que según estudios realizados son los que se presentan con menor frecuencia pero cuando se suscitan causan daños muchas veces irreparables tanto para las personas (trabajadores, familias, gente de los alrededores), como para las empresas, daños que se reflejan directamente en la economía de la industria.

La importancia de este capítulo radica en entender a la seguridad como algo inherente del ser humano, ya que nada es estático por lo tanto todo lleva asociado un riesgo, pero si se conoce y se previene es posible tener un ambiente laboral con la menor cantidad de accidentes.

En el segundo capítulo se abordará el papel que juegan las válvulas de seguridad en cualquier proceso químico. Se hace una breve reseña histórica del surgimiento de estas y cómo poco a poco dejaron de ser un simple complemento de las industrias para convertirse en un elemento que por norma no debe faltar en equipos que trabajan a presión, se hablará acerca de su funcionamiento, así como las partes estructurales de estas mismas.

Hasta este momento se habrá descrito la importancia de las válvulas de seguridad y alivio, y la importancia de la seguridad dentro de las industrias, por lo que en el capítulo III se abordará a detalle los tipos de válvulas que existen, los cuales cambian dependiendo del escenario con el que se cuente. En cada uno de los procesos se tienen condiciones de flujo, presión, temperatura, etc. distintas. Es por

ello, que la válvula empleada no puede ser la misma pues de lo contrario se corre el riesgo de que no se cumpla con la función de cada una de éstas, lo que puede resultar en accidentes catastróficos. En este capítulo se hablará acerca de las diferencias entre las válvulas, las ventajas y desventajas que tiene el uso de cada una de ellas.

En el capítulo IV se desarrollará el cálculo analítico para el orificio de las válvulas de seguridad, en donde se hará uso de modelos matemáticos empíricos. Esto se hará para servicio de líquidos, gases, vapores y un sistema bifásico, notando con ello la diferencia entre los tipos de válvulas de alivio de presión que se usen, tomando en cuenta características afines a dicho escenario, ya que cada uno de ellos difiere en cuanto a sus propiedades.

En el capítulo V se desarrollarán los modelos matemáticos utilizando EES (Engineering Equation Solver); un software capaz de calcular a partir de información específica, el orificio necesario para el desalajo del exceso de presión. En este mismo capítulo se incluirá una comparación de los resultados obtenidos a partir de EES y los cálculos manuales, mostrando la importancia de cada uno de ellos.

En el capítulo VI se abordarán los riesgos que existen con las válvulas de alivio de presión a detalle, refiriéndose a los tipos de fallo que pueden suscitarse en ellas, entre los cuales se encuentran las fugas por ruptura de tuberías, por lo que se realizará un estudio de éstas y algunas consecuencias tanto ambientales como sociales.

Finalmente en el capítulo VII se presentan recomendaciones pertinentes al uso de los dispositivos y algunas sugerencias para el manejo de estos mismos.

Objetivos

Objetivo general

- Calcular el orificio de venteo para válvulas de alivio de presión mediante EES (Engineering Equation Solver), para un sistema líquido, vapor y una mezcla bifásica, para con ello seleccionar la válvula adecuada dependiendo del proceso químico.

Objetivos particulares

- Conocer la importancia y el papel que desempeñan las válvulas de alivio de presión en los procesos.
- Distinguir las diferencias entre el funcionamiento de las válvulas dependiendo del fluido a manejar.
- Conocer los riesgos que se encuentran presentes al manejar equipos que trabajan a presión.

Nomenclatura

A no ser que se indique lo contrario todos los símbolos que se utilizan en este trabajo se definen de la siguiente manera:

A	Es el área de alivio; [mm ² ó in ²]
C _p	Corresponde a la constante de calor específico del líquido, [kJ/kg K].
C _o	Coeficiente de descarga; [Adimensional]
g _c	Constante gravitacional; [ft lb _m / lb _f s ²]
G	Flux másico, [kg/seg m ²]
G _g	Flux másico cuando no hay flasheo, [kg/s m ²]
G _v	Flux másico cuando hay flasheo, [kg/s m ²]
h _{vl0}	Es el calor latente de vaporización estimado a las condiciones de relevo [kJ/kg].
h _{vlS}	Es el calor latente de vaporización, [kJ/kg].
k _b	Es la corrección por la contrapresión; [adimensional]
k _c	Es un factor de combinación; [adimensional]
k _d	Coeficiente de descarga que se obtiene desde el fabricante de la válvula; [adimensional]
K _N	Factor de corrección para la ecuación de Napier; [adimensional]
K _p	Corrección por la sobrepresión; [adimensional]
k _v	Es la corrección por la viscosidad; [adimensional]
M	Es el peso molecular del gas; [lb _m /lb-mol]
P ₀	Es la presión de relevo de la PRV, [kPa].
P _b	Es el indicador de contrapresión; [kPa]
P _c	Es la presión Crítica, [kPa]
P _s	Presión de ajuste; [kPa ó lb _f /in ²]
P _{s1}	Es la presión de relevo [kPa _a].
P _{g0}	Presión parcial del gas no condensable en la PRV, a condiciones de alivio [kPa _a].
P _{v0}	Es la saturación o la presión en el punto de burbuja correspondiente a T ₀ , [kPa _a]
Q	Caudal másico, [kg/h]
(Q _m) _{ch}	Es la descarga del flujo másico; [lb _m /h]
Q _v	Flujo volumétrico a través del alivio; [gpm]
Re	Número de Reynolds; [adimensional]
R _g	Constante del gas ideal; [ft lb _f / lb-mol °R]
T	Es la temperatura absoluta de descarga; [°K ó °R]
T ₀	Temperatura de relevo, [°K ó °R].
U	La velocidad del líquido a través del relieve; [ft/s]
v ₀	Es el volumen específico del sistema bifásico en la entrada de la PRV, [m ³ /kg].
v _g	Es el volumen específico del sistema bifásico, estimado a 90% de la

	presión de relevo, [m ³ /kg]
V_{v0}	Es el volumen específico del vapor a la entrada de la PRV, [m ³ /kg].
V_{vl0}	Corresponde a la diferencia entre el volumen específico del vapor y el líquido, [m ³ /kg]
V_{vls}	Es la diferencia entre el volumen específico del vapor y el líquido a la presión de saturación, P_s , [m ³ /kg].
W	Tasa de flujo másico [kg/h]
x_0	Fracción masa de vapor en la entrada de la PRV; [adimensional]
x_9	Es la fracción másica de vapor a 90% de la presión del punto de burbuja; [adimensional]
Z	Factor de compresibilidad para gases; [adimensional]

Letras griegas

α_0	Fracción de vaporización de entrada; [adimensional]
ΔP	Caída de presión a través del relieve; [kPa ó lb _f /in ²]
γ	Es la relación de capacidad calorífica para el gas; [adimensional]
η_c	Es la relación de presión Crítica; [adimensional]
η_a	La relación de contrapresión, estimada en el alivio de presión, P_a/P_0 [adimensional]
η_g	Relación de la presión parcial para un sistema donde no ocurre flash; [adimensional]
η_v	Relación de la presión parcial para un sistema donde ocurre un flasheo; [adimensional]
η_{sa}	Relación de contrapresión, P_a/P_0 ; [adimensional]
μ	Viscosidad del fluido, [cP ó lb/s ² in]
ρ	densidad del líquido y/o sustancia; [lb _m /in ³]
ρ/ρ_{ref}	Es la gravedad específica del líquido; [adimensional]
ρ_{l0}	La densidad del líquido en la PRV, a las condiciones de relevo, [kg/m ³].
ρ_9	Es la densidad evaluada a 90% de la presión de saturación del vapor P_s . Correspondiente a la temperatura T_0 , [kg/ m ³].
ρ_{l9}	Es la densidad del líquido a 90% de la presión del punto de burbuja, [kg/m ³].
ρ_{v9}	Es la densidad de vapor a 90% de la presión de burbuja, [kg/m ³].
ω	Factor acéntrico

Capítulo I.

1. Seguridad

La palabra seguridad proviene del latín *securitas*, haciendo referencia a la característica de seguro, es decir donde no se registran peligros, daños ni riesgos. Así pues, una cosa segura es algo firme, cierto e indubitable, que da la idea de certero¹. Existen muchos tipos de seguridad, tantos como actividades realiza el ser humano. En este trabajo se hará alusión a los elementos que contribuyen a la seguridad dentro de la industria química, herramienta indispensable para cualquier función que se desempeñe en ésta, entonces es preciso definir a la seguridad industrial como:

“El conjunto de conocimientos técnicos y su aplicación para la reducción, control y eliminación de accidentes en el trabajo, por medio de sus causas, encargándose de implementar las reglas tendientes a evitar este tipo de accidentes²”.

Actualmente la seguridad, ya no es sólo una prioridad dentro de la industria, sino es la condición en la que cualquier trabajador debe estar laborando, ya que de ésta depende que se cumplan o no los objetivos planteados al inicio de cualquier actividad. De hecho está directamente relacionada con la competitividad de cualquier empresa, por lo que las industrias que desean mantenerse al nivel globalizado y competitivo actual deben tomar medidas que disminuyan los riesgos y sus consecuencias.

Los principales riesgos en la industria están vinculados a los accidentes, que pueden tener un importante impacto ambiental y perjudicar a regiones enteras, aún más allá de la empresa donde ocurre el siniestro. Las industrias químicas, se caracterizan por tener pocos accidentes pero, cuando se producen, son de severidad alta, esto debido a las sustancias químicas que en ellas se manejan. Es

¹ Seguridad industrial: <http://definicion.de/seguridad-industrial/>, Página consultada por última vez el 8 de Mayo de 2013.

² Importancia de seguridad industrial: <http://prezi.com/ex1pbio68fmd/red-de-salud-higiene-y-seguridad>, Página consultada por última vez el 9 de Mayo de 2013.

por ello la importancia de mantener un especial cuidado en el diseño de las plantas, y que los procedimientos de uso sean adecuados desde el arranque de los equipos.

Debido a los diferentes accidentes presentados desde hace tiempo, se han ido implementando diferentes normas obligatorias para las empresas con el fin de proporcionar a los trabajadores un ambiente de trabajo seguro y así mismo reducir la frecuencia de los accidentes; algunas normas son:

- NOM-001-STPS-2008. Edificios , locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo-Condiciónes de seguridad
- NOM-026-STPS-2008.Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías.
- NOM-002-STPS-2000. Condiciones de seguridad, prevención, protección y combate de incendios en los centros de trabajo.
- NOM-004-STPS-1999. Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo.
- NOM-011-STPS-2001. Condiciones de seguridad e higiene en los centros donde se genere ruido.
- NOM-020-STPS-2011.Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas.

1.1 Definiciones

A continuación se enuncian las definiciones más importantes a considerar al hablar de seguridad industrial, ello con el afán de tener un panorama más amplio³:

- *Accidente*: La aparición de una secuencia de eventos que producen lesión no intencional, muerte o daños a la propiedad.
- *Seguridad*: Estrategia de prevención de accidentes.

³Crow Daniel A, et al. (2002), Chemical Process Safety: Fundamentals with applications, 2da edición, Prentice Hall PTR, Pág. 23.

- *Seguridad industrial*: Es la técnica que se encarga de eliminar o disminuir los riesgos de accidentes. Las técnicas que se utilizan en seguridad podrían ser fundamentalmente de la observación de los diferentes factores y su adecuación a la normatividad que las regula.
- *Riesgo*: La probabilidad y consecuencia de un accidente.
- *Peligro*: Una condición química o física que puede provocar un accidente o un daño.
- *Daño*: Es la consecuencia producida por un peligro sobre la calidad de vida individual o colectiva de las personas.
- *Importantes riesgos químicos en las plantas*: La presencia de sustancias inflamables, explosivas, reactivos peligrosos y tóxicos.
- *Análisis de accidente*: Una descripción de los hechos que den lugar a un accidente o incidente. La descripción debe contener información relevante para la definición de las causas.
- *Incidente*: La pérdida de control de los materiales o energía.
- *Escenario*: Una secuencia de acontecimientos que hace que el riesgo de dar lugar a un accidente.
- *Resultado de un incidente*: La manifestación física de un accidente.
- *Prevención*: Técnica de actuación sobre los peligros con el fin de suprimirlos y evitar sus consecuencias perjudiciales. Suele englobar también el término protección.

1.2 Riesgo

Toda actividad realizada por el ser humano lleva asociada un riesgo que es imposible eliminar, ya que nada es estático, por lo tanto no existe algo con probabilidad cero de no tener asociado un riesgo. La importancia de conocer los riesgos radica en disminuirlos con el afán de evitar accidentes que repercutan tanto al trabajador como a la industria.

Existen diferentes maneras para clasificar a los riesgos. Se ha clasificado a éstos como⁴: *riesgo puro* y *riesgo especulativo*.

El riesgo especulativo es aquel riesgo en la cual existe la posibilidad de ganar ó perder. En cambio el riesgo puro es el que se da en la empresa y existe la posibilidad de perder pero jamás de ganar.

El riesgo puro en la empresa a su vez se clasifica en:

- Riesgo inherente
- Riesgo incorporado

El riesgo inherente es aquel riesgo que por su naturaleza no se puede separar de la situación donde existe. Es propio del trabajo a realizar. Es el riesgo propio de cada empresa de acuerdo a su actividad, sírvase de ejemplo, los riesgos en una empresa metalmecánica, en donde el riesgo inherente serían quemaduras o golpes.

Cabe mencionar, que los riesgos inherentes en una empresa se deben controlar y/o eliminar todo lo que sea posible, ya que están en directa relación con la actividad de la empresa, si no se asumen, entonces no se tiene en cuenta su existencia, por lo tanto la exposición al riesgo es mayor.

El riesgo incorporado es aquel riesgo no propio de la actividad, sino que es producto de las conductas poco responsables de un trabajador, el que asume otros riesgos con objeto de conseguir algo que cree que es bueno para él y/ó para la empresa, como por ejemplo ganar tiempo, terminar antes el trabajo para destacar, etc.

Estos riesgos se deben controlar de inmediato, creando conciencia en el trabajador.

También se clasifican como⁵:

⁴ Ramírez César (2000), Seguridad Industrial: Un enfoque Integral, 2da Edición, Limusa, México, Pág.15.

⁵ Ramírez César (2000), Seguridad Industrial: Un enfoque Integral, op. cit. Pág. 2.

- *Riesgos convencionales:* Relacionados con la actividad u el equipo existentes en cualquier sector (electrocución, caídas).
- *Riesgos específicos:* Asociados a la utilización o manipulación de productos, que por su naturaleza, pueden ocasionar daños (productos tóxicos, radioactivos).
- *Riesgos mayores:* Relacionados con los accidentes y situaciones excepcionales. Sus consecuencias pueden presentar una especial gravedad ya que la rápida expulsión de productos peligrosos ó de energía podría afectar áreas considerables (escape de gases y explosiones).

Todo esto se resume a que los riesgos siempre estarán presentes, cualquiera que sea su clasificación o frecuencia, pero lo importante es siempre buscar su disminución tratando de erradicarlos una vez que sean identificados, pues se evitan pérdidas. De hecho algunos autores creen firmemente en que:

“El riesgo con mayor potencial de pérdidas es aquel que no se conoce⁶”

Al hablar de pérdidas se refiere no sólo a lo económico sino también en lo que respecta a vidas, por ello la importancia de prevenir los riesgos. Aunque es cierto que los aspectos económicos de los accidentes están relacionados con los aspectos económicos de su prevención, pues así como las lesiones y daños provocan gastos, la prevención de los accidentes también tiene un costo, pero ineludiblemente este costo no se compara con el valor de una vida, puesto que resultaría importante preguntarse: ¿Qué costo tiene una vida humana?

Matemáticamente el riesgo suele definirse como una relación de la frecuencia por sus consecuencias:

$$R = f(f, c)^7$$

⁶ Control de riesgos de accidentes mayores: Manual práctico, Oficina Internacional del Trabajo (OIT), (1993), Alfaomega, México, pág. 1.

⁷ Definición de riesgo:

https://docs.google.com/document/d/1g1UFlkk5_RKRjiZU8T7i951k_WhZ5r9zjlx6DGAp4p4/edit?hl=es&pli=1, página consultada por última vez el 6 de Abril de 2014.

Dónde:

R =riesgo

f = frecuencia de ocurrencia

C = consecuencias (pérdidas y/o daños).

El riesgo también puede ser definido a través de las siguientes expresiones:

Combinación de incertidumbre y de daño.

La Secretaria de Trabajo y Previsión social (STPS) define al riesgo como:

La probabilidad de que una sustancia química peligrosa afecte la salud de los trabajadores o dañe al centro de trabajo⁸.

1.2.1 Riesgos industriales graves

A lo largo del tiempo se han ido estudiando estos riesgos, y se ha logrado priorizarlos, por lo que ahora es posible hablar acerca de los “riesgos principales” o “riesgos industriales graves”, que significa *”un acontecimiento, como una emisión importante, un incendio o una explosión, resultante de hechos no controlados en el curso de una actividad industrial, que provoca un peligro grave para el hombre, inmediato o aplazado, dentro o fuera del establecimiento, y para el medio ambiente, y que entraña una o más sustancias peligrosas”⁹.*

A continuación se describirán estos riesgos:

1) Emisiones¹⁰

Se refiere al derrame (líquidos) o fugas (gases y vapores) generalmente por pérdida de contención de los fluidos. Esto debido al escape de material inflamable, que puede mezclarse con el aire, y llegar a formar una nube de vapor inflamable y arrastrar la nube hasta una fuente de ignición, lo que provocará un incendio o una explosión que afectará al lugar y posiblemente a las zonas pobladas más cercanas, o incluso algunas alejadas.

⁸ Diario Oficial de la Federación de fecha 27 de octubre de 2000 Pág.3.

⁹ Control de riesgos de accidentes mayores: Manual práctico, op. cit. Pág. 2.

¹⁰ Control de riesgos de accidentes mayores: Manual práctico, op. cit. Pág. 4.

En el caso de la fuga de materiales inflamables el mayor peligro proviene del repentino escape masivo de líquidos volátiles, o gases que producen una gran nube de vapor inflamable y posiblemente explosivo. Si la nube se llega a inflamar, los efectos de la combustión dependerán de múltiples factores, entre ellos la velocidad del viento y la medida en que la nube este diluida con aire, es decir la concentración del fluido en el aire que puede generar una atmósfera explosiva dependiendo de la relación de concentraciones de ambos.

La fuga repentina de grandes cantidades de materiales tóxicos pueden causar muertes y lesiones graves a una distancia mucho mayor. En teoría, esa fuga podría, en ciertas circunstancias climáticas, producir concentraciones letales a varios kilómetros del punto de fuga, pero el número efectivo de víctimas dependerá de la densidad demográfica en el camino que sigue la nube y de la eficacia de las medidas de emergencia que se tomen, que podría incluir la evacuación.

2) Incendios

Al hablar de incendios se refiere a la combustión (de varias formas) de sustancias, materiales, etc. contenidos o emitidos, generando radiación térmica dañina, cuando aquellos son inflamables.

Los efectos de los incendios sobre las personas son quemaduras de piel por exposición a las radiaciones térmicas. En general, la piel resiste una energía térmica de 10 kw/m^2 durante aproximadamente 5 segundos y de 30 kw/m^2 durante sólo 0.4 segundos antes de que sienta dolor¹¹. Los incendios constituyen un menor peligro potencial que las explosiones y los escapes de sustancias tóxicas.

Los incendios pueden adoptar varias formas diferentes, entre ellas los de incendios de chorro, depósitos, los producidos por relámpagos y explosiones provocadas por la ebullición de líquidos que expanden vapor. Un incendio de surtidor o chorro podría surgir cuando una larga llama estrecha procedente, por

¹¹ Control de riesgos de accidentes mayores: Manual práctico, op. cit. Pág. 3.

ejemplo, de una tubería presurizada de gas inflamado tiene un escape. Un incendio de depósito se producirá, por ejemplo, si una fuga de petróleo bruto de un depósito situado dentro de un muro de protección se inflamara. Un incendio repentino podría originarse si un escape de gas llegara a una fuente de combustión y se quemara rápidamente regresando a la fuente del escape.

Otro efecto letal que debe considerarse al producirse un incendio es la disminución de oxígeno en la atmósfera debido al consumo de oxígeno en el proceso de combustión. Son asimismo importantes los efectos sobre la salud originados por la exposición a los humos generados por el incendio. Esos humos pueden incluir gases tóxicos, como bióxido de azufre, de la combustión de disulfuro de carbono y de óxidos nitrosos de los incendios en los que interviene el nitrato amónico.

3) Explosiones¹²

Las explosiones se catalogan como un riesgo industrial grave debido a las consecuencias que provocan. Se caracterizan por una onda de choque que puede producir un estallido y causar daño a los edificios, romper ventanas y arrojar materiales a varios cientos de metros de distancia. Aunque los efectos de la presión excesiva pueden provocar directamente la muerte, es probable que esto sólo se produzca con las personas que trabajan muy cerca del lugar de la explosión. Los efectos de la onda de choque varían según las características del material, su cantidad y el grado de restricción de la nube de vapor. Las lesiones directas se producen a presiones de 5 a 10 kPa (una sobrepresión mayor origina por lo general la pérdida de la vida), mientras que los edificios se derrumban y las ventanas y las puertas se rompen a presiones tan bajas como de 3 a 10 kPa.

Deflagración y detonación

Las explosiones pueden producirse en forma de una deflagración o de una detonación, en función de la velocidad de combustión durante la explosión. Se

¹² Control de riesgos de accidentes mayores: Manual práctico, op. cit. Pág. 4.

produce una deflagración cuando la velocidad de combustión o la velocidad de la llama es relativamente lenta (subsónica), del orden de 1m/s. En una detonación, en cambio, la velocidad de la llama es extremadamente elevada (supersónica), con una velocidad normal de 2,000 a 3,000 m/s. Una detonación genera mayores presiones y es mucho más destructiva que una deflagración.

El hecho de que se produzca una deflagración o una detonación dependerá del material de que se trate, así como de las condiciones en que ocurre la explosión.

Explosiones de gases y de polvos.

Se producen explosiones de gases, que en general son catastróficas, cuando se liberan y dispersan con el aire considerables cantidades de material inflamable para formar una nube de vapor explosivo antes de que tenga lugar la ignición. Las explosiones de polvos se producen cuando materiales sólidos inflamables se mezclan intensamente con el aire.

Cada uno de estos accidentes tiene múltiples consecuencias, que se ven reflejados en más de un daño, pues hablar de una sola es prácticamente imposible, ya que hay consecuencias tanto para las personas como para las empresas, esto puede verse representando en el siguiente esquema:

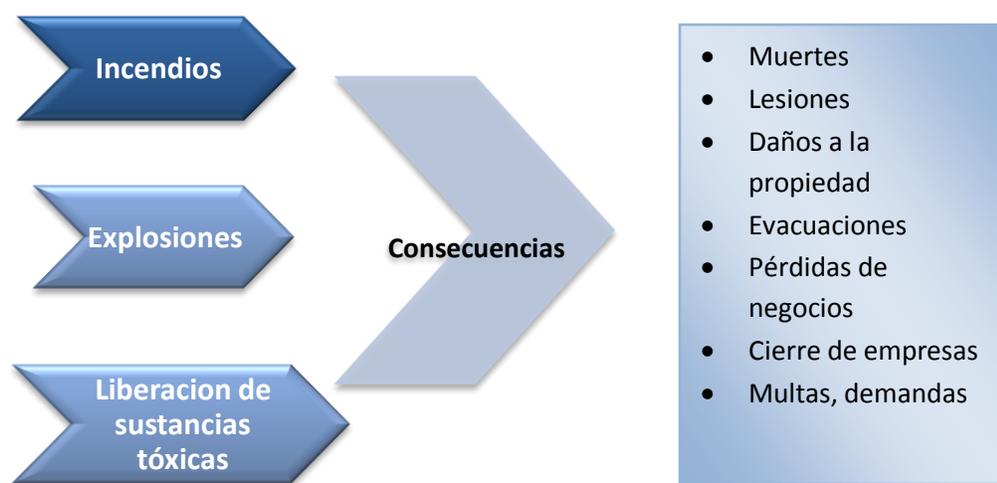


Figura 1. Principales accidentes en las industrias y sus consecuencias.

Es importante estudiar estos patrones, con el fin de anticipar los tipos de accidentes que se producirán en las plantas químicas. En el siguiente gráfico,¹³ es posible ver representado como porcentaje de ocurrencia los tipos de accidentes que se presentan en las industrias, en donde se puede distinguir que los incendios son los más comunes, seguido de las explosiones y de liberación tóxica o fugas. Cabe mencionar que con respecto a los accidentes mortales, el orden se invierte, pues la liberación de sustancias tóxicas tiene el mayor potencial de víctimas mortales al ser casi instantáneo el daño, dependiendo de la toxicidad de la sustancia. En todo tipo de accidente grave la pérdida económica es consistentemente alta, siendo mayor ésta en las explosiones.

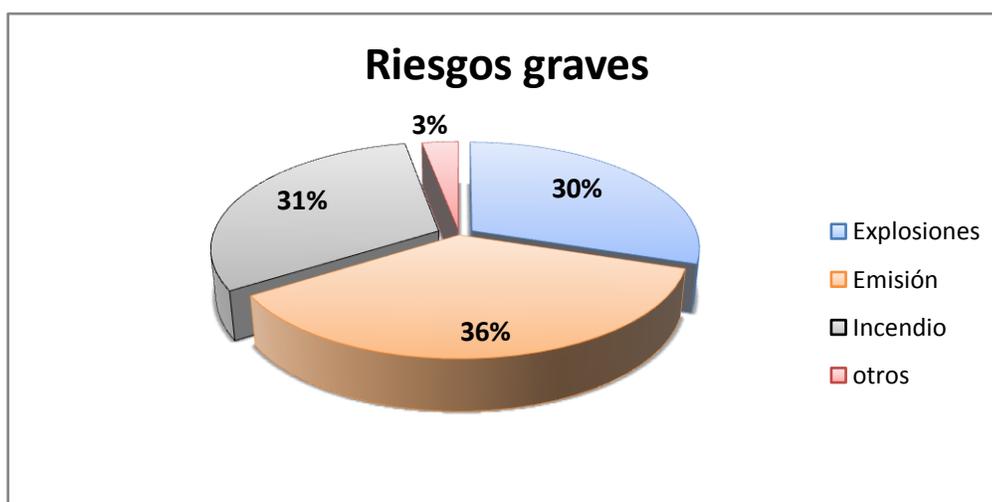


Gráfico 1. Tipos de accidentes en plantas químicas.

Las pérdidas por daños en las industrias de hidrocarburos-químicos: Una revisión de los Treinta Años (New York: Marsh Inc., 1998)

1.2.1.1 Efectos de riesgos industriales graves:

A continuación se citan algunos de los accidentes que han tenido lugar en diferentes países, en donde no se tomaron las medidas de seguridad pertinentes.

En Octubre de 1987 hubo que evacuar en Francia a 60,000 personas como resultado de un incendio que se extendió a nitrato amónico. En Abril de 1987 un

¹³ Crow Daniel A, et al. (2002), op. Cit, Pág. 15.

incendio de metano causó la muerte de 4 personas e hirió a otra en Italia. En Bulgaria una explosión de cloruro de vinilo provocó la muerte de 17 personas y 19 heridos en noviembre de 1986. Una explosión de productos pirotécnicos mató a 11 personas e hirió a 8 en Filipinas en el mes de Abril de 1986¹⁴.

Cabe citar acontecimientos más desastrosos:

La emisión de la sustancia química de isocianato de metilo en Bhopal, India, en 1984, que provocó más de 2,000 muertes y 200,000 heridos. Dos semanas antes se había producido una explosión de gas natural en San Juanico México, D.F. que ocasionó la muerte de 650¹⁵ personas y se reportaron heridas a muchas más.

Por lo que es preciso señalar que los daños económicos resultantes de estos y otros accidentes son descomunales y que la repetición de alguno de ellos reflejaría la poca conciencia que se ha hecho al respecto y la omisión de las medidas de seguridad ya establecidas a nivel mundial.

Todos estos fueron acontecimientos no controlados, constituidos por incendios, explosiones o escapes de sustancias tóxicas que ocasionaron la muerte o lesiones de un gran número de personas dentro y fuera de la industria, causaron amplios daños en los bienes y el medio ambiente, o produjeron ambos efectos. El almacenamiento y la utilización de sustancias químicas inflamables, explosivas o tóxicas que pueden causar esos desastres se suelen designar como riesgos de accidentes mayores, mismos que se definieron anteriormente.

En la Tabla 1 se pueden ver algunas estadísticas de accidentes importantes, que se suscitaron en un periodo de 1900-1996, en ella se puede observar que conforme pasa el tiempo van aumentando el número de accidentes, esto es debido a la demanda creciente de la industria química en el tiempo, al avance tecnológico que va requiriendo cada vez mayor actividad en menor tiempo, por lo que algunos de los procedimientos de ejecución podrían dejar de revisarse, o incluso omitirse.

¹⁴ Control de riesgos de accidentes mayores: Manual práctico, op. Cit., Pág 1.

¹⁵ Crow Daniel A, et al. (2002), op. Cit, Pág. 15.

Decenio	INCENDIOS			EXPLOSIONES			TOTAL INCENDIOS Y EXPLOSIONES		
	Número	Víctimas	Promedio víctimas de incendio	Número	Víctimas	Promedio víctimas de incendio	Número	Víctimas	Promedio víctimas de incendio
1900-09	8	2.678	334.7	2	0.42	210	10	3.098	309.8
1910-19	2	0.689	344.5	8	2.973	371.6	10	3.662	366.2
1920-29	4	0.77	192.5				4	0.77	192.5
1930-39	3	0.749	249.7	3	0.395	131.7	6	1.144	190.6
1940-49	7	1.261	180.1	10	1.923	192.3	17	3.184	187.3
1950-59	6	0.562	93.7	3	1.644	548	9	2.206	245.3
1960-69	10	1.208	120.8	3	0.625	208.3	13	1.833	141
1970-79	32	2.904	90.7	15	1.298	86.5	47	4.202	89.4
1980-89	52	4.146	79.7	27	4.782	177.1	79	8.928	113
1990-96	54	4.316	79.9	42	3.635	86.5	96	7.951	82.8
1900-1996	178	19.283	108.3	113	17.635	156.6	291	36.978	127.1

Tabla 1. Estadísticas de accidentes de 1900-1996¹⁶.

Como se ha ido mencionando a lo largo de este capítulo cuando un riesgo se sale de control produce accidentes que pueden llegar a provocar muertes, lesiones, incapacidades, daños a los equipos, materiales y/o medio ambiente. Todo esto resulta como pérdida para la empresa, ya que ocurrido un accidente la empresa debe:

- I. Contratar un nuevo trabajador y capacitarlo.
- II. Redistribuir los trabajadores en el área.
- III. Pérdidas de tiempo.
- IV. Aumentos de seguro.
- V. Comprar o reparar la maquinaria y/o equipos.
- VI. Pago de indemnizaciones.
- VII. Pérdida de tiempo para los trabajadores involucrados en el accidente.

1.3 Causas de un accidente:

Hablar acerca de las causas de un accidente es una forma de prevenir el riesgo, ya que una vez que se identifican las causas se puede proveer una acción para evitar el accidente, sin embargo son muchas las causas que intervienen en la

¹⁶ Storch de Gracia J.M. y García Marín T., (2008), Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas, Ediciones Díaz de Santos S.A., España, pág. 14.

realización de éste puesto que un accidente es resultado de la combinación de diferentes factores, los cuales son: técnico, el medio ambiente y el trabajador.

No se puede hablar de un accidente como consecuencia de una sola causa, por lo que es muy difícil asegurar por ejemplo, que una persona cayó de alguna escalera por no tener cuidado, ya que probablemente es una de las causas pero esta viene acompañada de otras más, por ejemplo que la escalera ya no servía, que no estaba colocada en la forma correcta, entre otras. *“Al decidir que factor debe considerarse como la causa del accidente, es indispensable elegir aquel cuya repetición realmente pueda impedirse; sólo así la prevención de accidentes podrá lograr resultados prácticos¹⁷”.*

El propósito principal de la investigación de un accidente es hallar sus causas a raíz a fin de tomar las medidas preventivas adecuadas. Recordando que todo accidente, aún el más insignificante, debe investigarse.

El consejo Nacional de Seguridad de los Estados Unidos da las siguientes pautas para investigar los accidentes:

- a) Averiguar las causas del accidente a fin de estar en condiciones de prevenir accidentes similares mediante perfeccionamientos mecánicos, una mejor supervisión o la formación de los trabajadores.
- b) Determinar el “cambio” o desviación que produjo un “error” que a su vez dio lugar a un accidente (análisis de sistemas de seguridad).
- c) Poner el riesgo en conocimiento de los trabajadores y del personal de supervisión y hacer que se preste atención a la prevención de los accidentes en general.

En lo esencial, toda investigación debe aportar respuestas a las siguientes preguntas:

- ✓ ¿Por qué ocurrió el accidente?
- ✓ ¿Cómo ocurrió el accidente?

¹⁷ La prevención de los accidentes: manual de educación obrera, Oficina Internacional del Trabajo (OIT), (1991), Alfaomega, México, pág. 30.

- ✓ ¿Cuándo ocurrió?
- ✓ ¿Dónde ocurrió el accidente?
- ✓ ¿Qué puedo hacer para impedir que un accidente similar se repita?

Así pues, a continuación se enlistará todo lo relacionado a las causas de un accidente:

1. El agente que lo provocó: Va a representar el objeto o la sustancia (máquinas, local o equipo que pudo o podrían protegerse de manera adecuada) directamente relacionados con la lesión.
2. La parte del agente productor de la lesión: Es aquella que está estrechamente asociada o relacionada con la lesión.
3. La condición insegura o peligrosa: Es la condición física o mecánica existente en el local, maquinaria, el equipo, ropa de seguridad o la instalación (que podría haberse protegido o reparado) y que hace posible el accidente.
4. El tipo de lesión o accidente: Es la forma o el modo de contacto entre el agente del accidente y el accidentado, o inclusive el resultado de este contacto.
5. Ubicación de la lesión: Es la parte del cuerpo donde se localiza la lesión.
6. Acto inseguro que provocó el accidente: Es la violación del procedimiento aceptado como seguro, por ejemplo dejar de usar el equipo de protección industrial, distraerse o conversar durante el servicio.
7. Análisis del factor psicológico del personal: Es el estudio del aspecto mental que guarda el trabajador accidentado, que pueda representar un acto inseguro manifestado como fatiga, problemas en el hogar, etc.

Cabe mencionar que al investigar accidentes siempre debe tenerse presente que prevenirlos es mucho más importante que identificar a los culpables, ya que muchas de las industrias parecen darle mayor importancia a la búsqueda de los culpables, de donde no se obtiene ningún beneficio más que producir un ambiente

de trabajo incómodo, y poco motivador, por lo que al investigar las causas reales se podrá lograr un mayor control.

1.4 Clasificación de accidentes

Existen muchos métodos para clasificar a los accidentes de trabajo, algunos denominados “sistemas de clasificación simple” y otros “sistemas de clasificación múltiple”. Cada país sigue un método diferente, por ejemplo, algunos clasifican los accidentes de acuerdo con quien es responsable de ellos, y otros de acuerdo con su causa. La OIT (Organización Internacional de Estadígrafos del Trabajo), en 1923 recomendó un sistema de clasificación simple de los accidentes por su causa en los siguientes grupos principales: maquinaria; transportes; explosiones e incendios; sustancia tóxicas, ardientes o corrosivas; electricidad; caída del trabajador; pisada de objetos; manipulación de objetos sin aparatos mecánicos; herramientas de mano; animales; y causas diversas.

Sin embargo, esta clasificación no dio buenos resultados ya que se pueden tener diversas opiniones en cuanto a las causas que originan los accidentes, y estas suelen estar divididas, por lo que a partir de ellas no fue posible encontrar una clasificación adecuada para los accidentes.

En vista de esto algunos países optaron por dar una clasificación para los accidentes más completa a fin de separar los diversos factores que intervienen en cada accidente, sirva de ejemplo la clasificación del Instituto de Estándares Nacionales de los Estados Unidos, en la cual cada factor esencial de un accidente se registra bajo uno de los siete conceptos siguientes¹⁸:

1. Índole de la lesión: Descripción de la lesión según sus principales características.
2. Parte del cuerpo afectada: Descripción de la parte del cuerpo de la persona lesionada directamente afectada por la lesión descrita previamente.

¹⁸ La prevención de los accidentes: manual de educación obrera, Oficina Internacional del Trabajo (OIT), (1991), Alfaomega, México, pág. 30.

3. Fuente de la lesión: Descripción del objeto, sustancia, explosión o movimiento corporal que causó directamente la lesión previamente descrita.
4. Tipo de accidentes: descripción del hecho que originó directamente la lesión.
5. Condición peligrosa: Descripción de la condición o circunstancia material peligrosa que permitió que ocurriera el tipo de accidente descrito o lo ocasionó.
6. Agente material del accidente o de una parte de él: Descripción del objeto, la sustancia o el lugar dentro del cual o en cuya proximidad existía la condición peligrosa descrita.
7. Acto imprudente: Descripción de la inobservancia de un procedimiento seguro comúnmente aceptado que directamente permitió que ocurriera el tipo de accidente descrito o lo ocasionó.

En Octubre de 1962, la Décima Conferencia Internacional de Estadígrafos del Trabajo, convocada por la OIT, adoptó un sistema de categorización nuevo, en donde los accidentes de trabajo se clasifican de acuerdo a los siguientes conceptos: a) forma del accidente; b) agente material; c) naturaleza de la lesión; y d) ubicación de la lesión.

Así pues, cualquiera que sea el sistema de clasificación por el que se opte, los estudios han demostrado que la mayoría de los accidentes no ocurren con las máquinas más peligrosas, como sierras circulares, ni tampoco con las sustancias más peligrosas, como los explosivos o los líquidos volátiles inflamables sino como consecuencia de circunstancias muy ordinarias como: tropezar, caerse, manipular o levantar objetos incorrectamente y ser golpeado por objetos que caen.

En el siguiente grafico¹⁹ (1.1) se pueden ver algunas de las principales causas de los accidentes en las plantas químicas, en donde es posible apreciar que la causa más importante dentro de estas plantas se debe a las fallas mecánicas. Cabe mencionar que las fallas de este tipo en general, se deben a un problema con el mantenimiento: bombas, válvulas y equipos de control. La segunda causa más

¹⁹ Crow Daniel A, (2002), op cit., Pág. 16.

grave son los errores de operación, por ejemplo, si una válvula no se abre o se cierra en la secuencia apropiada, o si los reactivos en un reactor no se cargan en el orden correcto. En cuanto a la tercera causa que representa un 12% de ocurrencia entre los accidentes, se desconoce ya que es difícil distinguir entre las causas que lo originaron, sin embargo se tomó en consideración puesto que este representa un alto porcentaje, la cuarta causa se debe a procesar molesto, esto ya relacionado con factores psicológicos del trabajador, es decir en donde el trabajador mezcla su estado anímico con lo laboral por lo que no realiza sus actividades de la manera correcta, la quinta y no menos importante causa es el peligro natural de la planta o el entorno, empatada con un error ingenieril, es decir por un diseño de equipo incorrecto:

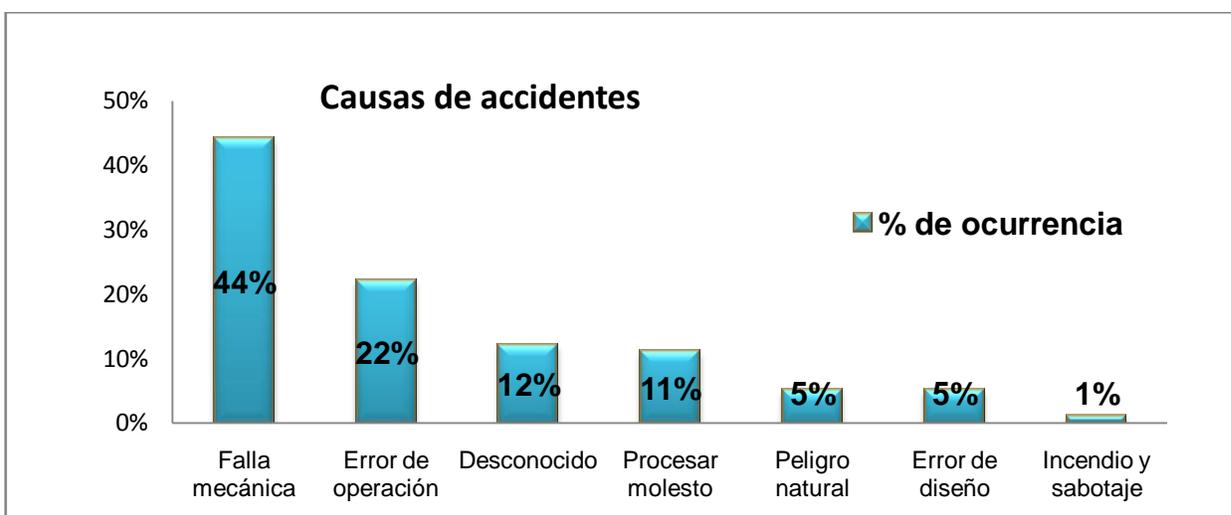


Gráfico 1.1. Las principales causas de accidentes en plantas de hidrocarburos químicos. Fuente: Gran propiedad Pérdidas Daños en las industrias de hidrocarburos-químicos: Una revisión de los Treinta Años (Nueva York: J & H Marsh & McLennan Inc., 1998), p. 2

Para comparar el gráfico anterior, en la Tabla 1.1 podemos ver las causas de accidentes graves a nivel industrial, en áreas de almacenamiento, así mismo se indica los campos en los cuales se debe poner mayor atención para prevenir cualquier tipo de accidente, lo cual ha sido motivo de largas investigaciones:

CAUSAS INMEDIATAS	CAMPO DE PREVENCIÓN
Errores de operación: 21 %	Seguridad en las operaciones - Información -Adiestramiento -Motivación
Procedimientos erróneos:19%	-Seguridad. Mantenimiento -Seguridad en las operaciones -Operaciones conforme al diseño
Fallos de equipos:18%	Seguridad en diseño - Normas y manuales -Actualización
Errores de diseño: 3%	Seguridad en diseño: -Reglamentos, códigos y normas -Revisión y actualización
Varias desconocidas: 22%	-Investigación para reasignar si es posible
Agresión meteorológica:17% (predomina la caída de rayos)	-Pararrayos -Puesta a tierra del equipo

Tabla 1.1 Distribución de causas de incidentes en áreas de almacenamiento²⁰

1.5 Consecuencias. Lo que cuesta un accidente.

Cada año mueren a consecuencia de los accidentes alrededor de 50,000 a 70,000 personas en nuestro país²¹. Los casos en que solamente se presentaron lesiones y no la muerte, ascienden aún más el número citado. De estos se estima que de un 3% a un 4% ocasionaron incapacidad permanente. El costo total del círculo de la economía nacional, se estima en millones de pesos por año, y es ahí donde inciden estos accidentes²².

²⁰ Storch de Gracia J.M. y García Marín T. Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas, (2008), Ediciones Díaz de Santos S.A., España, pág. 17.

²¹ Ramírez Cavassa, César, (1999), Seguridad Industrial, 2da. Edición, Editorial Limusa, México, Pág. 500.

²² La prevención de los accidentes: manual de educación obrera, Oficina Internacional del Trabajo (OIT), (1991), Alfaomega, México, pág. 30.

Sin lugar a duda, evaluar lo que cuestan los accidentes es de suma importancia ya que se tiene una idea del impacto económico y social de este mismo, pero es vital que se trate del conocimiento de los costos reales, es decir sin especulaciones, los cuales puedan considerarse en pro de la prevención de estos mismos.

Según algunos autores²³, y conforme a varios estudios realizados se han hecho clasificaciones también para los costos de los accidentes, llegando a la conclusión de que existen costos directos o subjetivos, como el sufrimiento de la víctima y el dolor de su familia, y costos indirectos, encubiertos o de recursos, como los daños a la propiedad, la destrucción de máquinas o la pérdida de producción entre otras cosas.

De igual manera han calculado que en 1953 cada lesión de que fue víctima un trabajador industrial de su país y que ocasionó su ausencia del trabajo por algún tiempo, costó a su empleador unos 1,800 dólares. De acuerdo, con el mismo autor, la administración de Seguridad Social de los Estados Unidos ha calculado que en un año normal paga indemnizaciones por un total de aproximadamente 535 millones de dólares, mientras que el Consejo Nacional de Seguridad del mismo país ha estimado que sus gastos médicos alcanzan a 130 millones de dólares, lo que da un total de 665 millones de dólares por año.

Y lo que sucede es que los costos asociados al accidente van más allá de una situación sencilla, se debe analizar tanto los directos como los indirectos, que en muchas ocasiones suelen resultar una grande suma de pérdidas. De hecho algunos autores defienden la idea de que los costos indirectos equivalen a entre el doble y el quíntuplo de los directos.

Algunos de los costos indirectos que están asociados al accidente son:

- 1.-Costo del tiempo perdido por el trabajador.
- 2.-Costo del tiempo por otras personas que interrumpen sus trabajos.

²³ La prevención de los accidentes: manual de educación obrera, Oficina Internacional del Trabajo (OIT), (1991), Alfaomega, México, pág. 28.

3.-Costo del tiempo perdido de jefes.

4.-Costo de los daños que se generan a máquinas, herramientas u otros bienes o de las averías ocasionadas a materiales.

Se cree que en total existen hasta 26 costos indirectos diferentes. Sin embargo el que mayor a afectado durante mucho tiempo a las empresas es el pago de las indemnizaciones que se les otorgan a los trabajadores, las cuales han ido aumentando conforme avanzan los años, ejemplo claro es que el costo total de las indemnizaciones a los trabajadores pagadas por las empresas de los Estados Unidos pasó de algo menos de 732 millones de dólares en 1948 a más de 7,000 millones en 1976, por lo cual la prevención de los accidentes elimina estos costos en su mayoría.

En la Tabla 1.2 se pueden ver resumidas unas de las tantas consecuencias que hay después de un accidente.

IMPLICADO (S)	CONSECUENCIA
Para el trabajador	Pérdida parcial de su salario, dolor físico, incapacidad permanente, complejos derivados de las lesiones.
Para la familia	Pérdida del familiar, dolor físico, trastornos emocionales.
Para la empresa	Costos indirectos, costos directos
Para la nación	Menor ingreso
Para el material	Inutilización
Para el equipo	Daños, costos de reparación
Para el entorno	Mala imagen

Tabla 1.2. Consecuencias de los accidentes²⁴

1.6 Como se previenen los accidentes

Como ya se mencionó anteriormente los accidentes son la consecuencia de actos peligrosos y de condiciones peligrosas. El peligro de tales actos y tales condiciones es a su vez consecuencia de una diversidad de factores y es la concatenación de estos factores en cierta secuencia lo que produce un accidente, su prevención consiste pues en la eliminación de al menos uno de los factores.

²⁴ Ramírez Cavassa, César, (1999), Seguridad Industrial, 2da. Edición, Editorial Limusa, México, Pág. 503.

En la actualidad, muchas empresas al hablar de prevención de riesgos tratan de persuadir a los trabajadores de que sus acciones pueden provocar muchos accidentes, con la intención de que ellos mismos detecten estos riesgos y sepan las consecuencias de todos y cada uno de sus actos, así pues para resumir se puede decir que

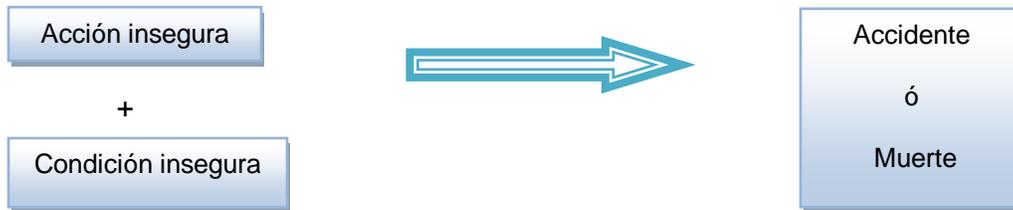


Figura 1.2.Causas de un accidente.

Los diversos métodos utilizados para promover la seguridad en el trabajo pueden clasificarse como sigue:

- a) La reglamentación: Es decir el establecimiento de normas coercitivas sobre las condiciones de trabajo en general, el diseño, construcción, conservación, inspección, verificación y funcionamiento de equipo industrial, las obligaciones de los trabajadores etc. Incluso es común encontrar diferentes leyendas en empresas quienes tratan de persuadir a sus empleados de que todo acto tiene una consecuencia:

“Las acciones imprudentes son nuestros peores enemigos, no las máquinas”²⁵

- b) La estandarización: Es decir el establecimiento de estándares oficiales, semioficiales u oficiosos sobre construcción de ciertos tipos de equipo industrial en forma tal que se eviten riesgos, prácticas de seguridad e higiene, dispositivos de protección de personal, etc.
- c) La inspección, para asegurar el cumplimiento de los riesgos coercitivos.

²⁵ INFRA SA DE CV, 2005, Curso de seguridad Industrial.

Asimismo, muchas empresas recomiendan a sus trabajadores que antes de comenzar cualquier actividad se deben realizar las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles serán los resultados de mis acciones?
 - ¿Cuáles serán los posibles riesgos y peligros?
 - ¿He dejado algo a la suerte? (evitar esto siempre).
- d) Las investigaciones técnicas, por ejemplo la investigación de las propiedades y características de materiales nocivos, el estudio de dispositivos protectores para máquinas, etc.
- e) Las investigaciones médicas, como la investigación de los efectos fisiológicos y patológicos de factores ambientales y tecnológicos, las condiciones físicas que aumentan la probabilidad de accidentes, etc.
- f) La investigación psicológica, a saber, la investigación de los factores psicológicos que provocan los accidentes;
- g) La investigación estadística, para determinar qué tipos de accidentes ocurren, en qué número y a qué clase de personas, en que operaciones, por qué causa, etc.
- h) La educación que entraña la enseñanza de la seguridad como materia en las facultades de ingeniería, colegios de artes y oficios.
- i) La formación profesional, a saber, la instrucción práctica de los trabajadores, y sobre todo de los nuevos trabajadores, en los métodos de seguridad.
- j) La persuasión, o sea el empleo de diversos métodos de propaganda para despertar la atención, y formar una conciencia de la seguridad. Sirva de ejemplo las políticas que siguen en INFRA SA DE CV, una industria dedicada a la distribución de gases medicinales:
- No es más listo que la máquina.
 - No es más rápido que la máquina.
 - Puedo hacer el trabajo sin riesgos.
 - Tengo la capacitación y adiestramiento necesario.
 - Tengo el tiempo suficiente para desarrollar la actividad.

- Tengo el E.P.P. (Equipo de Protección Personal) y las herramientas apropiadas para el trabajo.
- k) El seguro, es decir los estímulos financieros para promover la prevención de accidentes que se otorgan, en forma de reducciones de las primas, a las fábricas que adoptan medidas de seguridad muy estrictas.
- l) La organización de la prevención de accidentes dentro de cada empresa.

Así pues, es importante recordar que ninguna empresa en el ramo en el que se encuentre inclinada está exenta de sufrir cualquier tipo de accidente, y como paso inicial y primordial estriba el hecho de prevenirlos y fomentar en cuantas personas trabajen ahí una cultura de seguridad, invitándolos a apegarse a las reglas de seguridad no sólo como un beneficio para la empresa si no para bien personal. Algunas empresas persuaden a sus empleados a poner en práctica la seguridad en sus vidas promoviendo diferentes leyendas en sus espacios de trabajo, como las siguientes:

- Hoy puede ser el último día de alguien.
- El tiempo no se puede regresar.
- La experiencia no nos garantiza seguridad.
- Las acciones incorrectas no nos ahorran tiempo.
- No seguir los procedimientos correctamente es engañarnos nosotros mismos y poner en riesgo nuestra integridad física o la de nuestros compañeros.

Día a día, se tienen nuevos avances tecnológicos, lo que significa nuevos y en ocasiones mayores riesgos, sin embargo considerar que los accidentes son el precio normal por éste, resulta una posición demasiado cómoda y conformista.

La clave está en que conforme se avanza en los descubrimientos se debe combatir con mayor fuerza los accidentes. Evitando con ello daños a las personas, no sólo a las que trabajan directamente en una industria sino también a las que se encuentran cerca, pues como es sabido muchos de los accidentes que han

causado muertes han sido a personas ajenas a la labor, pero que se encuentran en los alrededores.

En resumen se puede decir que:

- 1) Todas las medidas que se han ido tomando respecto a seguridad industrial a través del tiempo demuestra que los accidentes pueden ser reducidos hasta una cifra que casi signifique la eliminación total de los mismos en cualquier empresa de cualquier ramo de la industria.
- 2) Hacerlo es ventajoso, tanto para los empleados como para el empleador.
- 3) Los desembolsos requeridos son relativamente pequeños comparados con los gastos que se generan de un accidente.
- 4) En toda forma de actividad humana existe un cierto grado de riesgo o peligro, de aquí que el nivel más alto de eliminación de accidentes se puede lograr sólo mediante una atención cuidadosa, detallada, a todos los tipos de actividad que se realice en el establecimiento o empresa de que se trate.
- 5) La prevención de accidentes no se apoya en teorías complicadas o en capacidades técnicas especiales, si no que dependen principalmente de un vigilante sentido de seguridad por parte de empresas y trabajadores, así como un criterio analítico. Este espíritu puede muy bien expresarse diciendo que es una atención siempre activa enfocada a la seguridad en todos y cada uno de los detalles de la labor que se realiza, por parte de todas y cada una de las personas involucradas en la misma.

Capítulo 2

2. Válvulas de seguridad

2.1 Historia

Las válvulas de seguridad surgen de la necesidad de salvaguardar la estabilidad de las personas, debido a que desde la invención de la máquina de vapor ocurrían muchos accidentes, y como resultado muchas personas terminaban lesionadas o en peores casos perdían la vida, esto debido a las grandes presiones a las que estaba expuesta la máquina, por lo que se ponía en riesgo tanto a las personas que estaban en el área de trabajo, como a los alrededores.

Algunos creen que fue el científico Francés Denis Papin el inventor de las válvulas de alivio de presión²⁶, quien aplicó a su nuevo desarrollo de un generador de vapor a finales del siglo XVII. Éste diseño de válvulas de seguridad fue utilizado durante muchos años en Europa sobre todo para instalaciones que operaban con vapor o donde se efectuaban destilaciones.

La válvula de seguridad (Fig. 2)²⁷ se asemeja mucho a los diseños actuales, pero ésta es controlada por un contrapeso móvil instalado en ella y que controlaba la presión oprimiendo un tapón en forma de disco contra su asiento y hasta que la presión igualaba o vencía el peso del sistema de palanca la válvula abría, permitiendo pasar el fluido y aliviando la presión del recipiente. Este dispositivo se usó y se comercializó hasta principios del siglo XX ya que al utilizarse presiones más altas el diseño resultó inadecuado e inseguro. Se cree que Papin hizo sólo algunas mejoras al que ya había propuesto 50 años atrás Rudolf Glauber un alemán Holandés alquimista.

²⁶ Hellemans, Marc, (2009), The Safety Relief Valve Handbook: Design and Use of Process Safety Valves to ASME and International Codes and Standards, Elsevier, EU, Pág. 1.

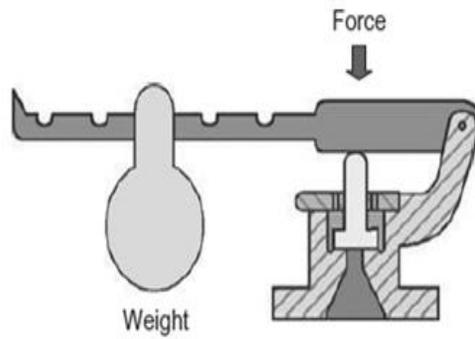


Figura 2. Válvula de Seguridad (Francés Denis Papin)

La válvula controlada por resorte fue inventada al final de la década de 1860, y fue el arquetipo de todos los diseños actuales (Fig. 2.1). El uso de los resortes fue el avance esencial para suplir a las palancas y contrapesos y es el sistema que sigue siendo universal en las válvulas de seguridad y alivio.

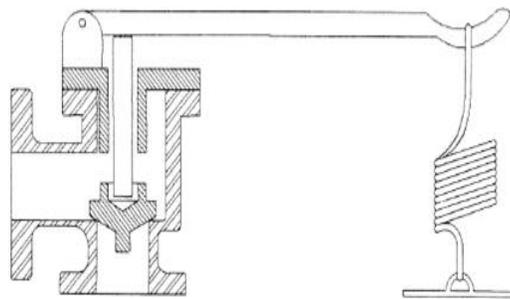


Figura 2.1. Válvula de resorte

Sin embargo, aún y con algunas invenciones de válvulas, seguían habiendo muchos accidentes. Así que debido al gran número de explosiones de calderas y muertes relacionadas, en Europa surgió una comisión especial de la cámara de Comunas Británica, y datadas las explosiones de los buques reportados en junio de 1817 comentó:

“Las Calderas- deben tener dos válvulas de alivio de presión, estas deben ser inspeccionadas y se deben infligir sanciones a personas no autorizadas que hagan mal uso de las válvulas de seguridad”²⁸.

²⁸ Hellamans Marc, (2009), Op. Cit, Pág. 2.

Muchas explosiones fueron causadas por el diseño inadecuado de la caldera o por personas que trataban de aumentar la presión en la caldera, sin previo conocimiento de las medidas de seguridad. Debido a nuevas explosiones en 1882, se dio paso a una ley acerca de las explosiones de las calderas, en la que se define a ésta como:

“Cualquier recipiente cerrado utilizado para la generación de vapor o para la calefacción de agua, o para calentar otros líquidos en las que se admite vapor para calentar, cocinar al vapor, hervir u otros fines similares”²⁹

En gran Bretaña, los organismos voluntarios, como la Asociación de Usuarios de Vapor reportó que en el periodo de 1881-1907 todavía había un total de 1,871 explosiones de calderas, investigado por el Consejo de Comercio. Estas explosiones representaron 732 muertos y 1,563 heridos graves.

En Estados Unidos, los registros de seguridad eran aún peores. En el periodo comprendido entre 1906-1911, hubo explosiones de 1,700 calderas en el área de Nueva Inglaterra, lo que representó 1,300 muertes. Así, la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME)³⁰, formuló un código de diseño, y desarrolló el código de caldera y código de recipientes a presión entre 1911 y 1914 como un conjunto de normas de seguridad para hacer frente al grave problema de las explosiones de calderas en los Estados Unidos.

El código ASME para calderas y recipientes a presión, sección I, se convirtió en un requisito obligatorio en todos los estados que reconoció la necesidad de una legislación, para evitar estos accidentes fatales. Este código incluye disposiciones para la protección contra la sobrepresión de las calderas con base en la mejor práctica de la industria de esa época, las cuales han cambiado muy poco en la actualidad.

²⁹ Hellamans Marc, (2009), Op. Cit, Pág. 2.

³⁰ Es el organismo que define las normas de fabricación, diseño y tolerancia de los materiales con el fin de asegurar la vida útil de los mismos y, de esta manera, proteger no sólo las instalaciones industriales sino también las vidas humanas de los operarios trabajando en las mismas.

Hoy en día, la caldera y el código de recipientes a presión ASME se compone de 12 secciones.

Sección I: Calderas de energía.

Sección II: Especificación de Materiales.

Sección III: Normas para la Construcción de la Planta de Energía Nuclear. Componentes.

Sección IV: Calderas para calefacción.

Sección V: Pruebas no destructivas.

Sección VI: Reglas recomendadas para el cuidado y Operación de las calderas de calefacción.

Sección VII: Guía y Recomendaciones para el Cuidado de Calderas de energía.

Sección VIII: Recipientes a Presión - División I.

Sección IX: Clasificación de soldadura.

Sección X: Recipientes a presión de Plástico reforzado en fibra de vidrio.

Sección XI: Reglas para la Inspección en Servicio de plantas Nucleares.

Sección XII: Normas para la Construcción y la continuidad del servicio. Tanques de Transporte.

Con el crecimiento de las industrias del petróleo y la petroquímica, el Instituto Americano del Petróleo (API), buscó la uniformidad en las características de los dispositivos de alivio de presión y se han generado algunos documentos reconocidos internacionalmente respecto a estos:

API RP * 520: Dimensionamiento, selección e instalación de dispositivos de relevo de presión.

API RP * 521: Guía para sistemas de alivio de presión y de despresurización: industrias de petróleo, petroquímicos y gas natural

API Std 526: Bridas de acero para válvulas de alivio de presión.

API RP * 576: Inspección de los dispositivos de alivio de presión.

API Std 200: Ventilación Tanques de almacenamiento de baja presión.

Mientras que el código ASME es obligatorio, las prácticas recomendadas por la API se convirtieron en recomendaciones internacionales que se siguen utilizando hoy en día. Ambos se aplican en todo el mundo. Muchos países Europeos desarrollaron sus propias normas nacionales para la protección contra la sobrepresión de equipos de proceso y estos se mantuvieron en vigor hasta entrado el siglo XX, la mayoría se basa en el código ASME.

Hoy en día, en Europa, “la válvula de seguridad” se utiliza como término para describir a las válvulas de seguridad y válvulas de alivio, para la Directiva de Equipos a Presión (PED), que también surgió en Europa para regular el mercado de éstas, la válvula de seguridad se incluyen como accesorios de seguridad y la clasificaron en la categoría de riesgo IV, que dicho de otra manera es de los riesgos más altos.

Asimismo se siguieron normas en cuanto a la utilización de los productos, por lo que cada grupo de productos y el tipo debían someterse a una evaluación de la conformidad que comprende el tipo CE (“*Conformité Européenne*” o de Conformidad Europea) Control de Diseño y la seguridad del sistema de calidad de producción. Los procedimientos para certificar la conformidad con la PED son revisadas por un conjunto de los miembros de la comunidad Europea, con la finalización de lo anterior, el fabricante podrá estampar el marcado CE en sus productos.

En la UE (Unidad Europea), como en los Estados Unidos, la marca CE es el testimonio por parte del fabricante de que su producto cumple con los mínimos requisitos legales y técnicos en materia de seguridad y la norma EN 4126 es una

práctica estándar (recomendada). Dado que la economía se ha globalizado, la mayoría de los fabricantes deben cumplir con esto. Por su parte ASME y CE son a la vez el mandato por la ley, mientras que la API y EN (ISO) son recomendaciones, que debe tenerse clara la importancia de seguir estas como estándares importantes para cualquier diseño de los dispositivos.

2.2 Marco legal:

Además de regulaciones locales, surgió la necesidad de hacer que se garantizara la seguridad como un derecho de cualquier trabajador que se enfrente a una situación laboral en la que se trabaje con recipientes a presión, ya que la seguridad es primordial. Se mencionan a continuación algunas disposiciones del apartado “A” del Artículo Constitucional 123° en materia de seguridad e higiene del trabajo³¹.

Capítulo V

Del sistema de tuberías.

Artículo 107. Las disposiciones de este capítulo se aplican en donde existan ductos, incluyendo sus válvulas y accesorios utilizados en el centro de trabajo para el transporte de gases, vapores, líquidos, semilíquidos o plásticos, sin incluir los aparatos de producción o sus partes integrantes, ni los tubos que se usen para transportar sólidos por medio de aire o gas y tuberías para instalaciones eléctricas.

Artículo 108. Los tubos, accesorios y válvulas de los sistemas de tuberías, deberán tener las especificaciones de diseño y material adecuados a la clase de sustancias que conduzcan y deberán ser calculados para soportar la presión y la temperatura a la que se les somete, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana.

Artículo 111. Las conexiones de las tuberías en recipientes a los que entran trabajadores para limpiarlos, deberán estar dotadas de 2 válvulas de paso antes y después del recipiente que puedan ser operadas manualmente.

³¹ Ramos Eusebio, et al., (1988), La teoría del Riesgo del trabajo, Editorial Pac, México, Pág. 20.

Artículo 112. Cuando sea necesario, se deberán instalar drenajes, goteros o trampas adecuadas para desalojar cualquier líquido de un sistema de tuberías cada drenaje o línea de goteo deberá tener su propia válvula.

Artículo 113. El sistema de tuberías en los casos en que conduzca líquidos inflamables o a altas temperaturas deberá sujetarse a las características de seguridad que señalen los instructivos oficiales aplicables.

2.3 Definiciones

Ahora, se citarán algunas de las definiciones más importantes acerca de las válvulas de alivio de presión, para poder entender su funcionamiento, y asimismo el papel que fungen dentro de la seguridad industrial:

Válvulas de alivio de presión: Es un dispositivo automático que está diseñado para abrir a una presión predeterminada y volver a cerrar, previniendo con ello la descarga adicional de flujo, una vez que las condiciones de operación han sido restablecidas. Es el nombre genérico para estas válvulas.

Válvula de seguridad: Ese dispositivo empleado para evacuar el caudal de fluido necesario de tal forma que no se sobrepase la presión de timbre del elemento protegido.³² La válvula se abre o se dispara con gran rapidez y se utiliza principalmente en servicios de vapor de agua y gases o vapores.

Válvulas de desahogo: Es una válvula automática para desahogo que funciona con la presión estática en el lado de corriente arriba. La válvula se abre en proporción al aumento en relación con la presión de apertura y su empleo principal es en servicio con líquidos.

Válvula de desahogo de seguridad: Es automática y se puede utilizar como válvula de desahogo o de seguridad.

³² NTP 342: Válvulas de seguridad (I): características técnicas
http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_342.pdf, página consultada por última vez el 3 de mayo de 2013.

Disco de ruptura: Consiste en una lámina metálica delgada, sujeta entre bridas, que rompe y deja paso, cuando se supera, en el lado del proceso, una presión nominal de consigna.

Presión de diseño: Es la máxima presión de trabajo a la temperatura de diseño y será utilizada para el cálculo resistente de las partes a presión del aparato. También se puede definir como la presión utilizada para el cálculo del espesor de un recipiente o un sistema de tuberías³³. Suele fijarse como un cierto % de la presión de operación (Por ejemplo 10% o 2 kg/cm², lo que sea mayor).

Presión máxima de trabajo permisible (MAWP): A veces se denomina la presión de diseño.³⁴ Es la máxima presión medida permisible en un recipiente a su temperatura de diseño. Un recipiente no debe ser operado arriba de esta presión o su equivalente, a una temperatura diferente a la utilizada en su diseño. Consecuentemente ésta es la máxima presión a la cual la válvula de seguridad y alivio debe ser calibrada para su apertura.

Set pressure (Presión de ajuste): Es la presión manométrica a la cual el sistema de alivio empieza a activarse. También puede definirse como la presión a la entrada de la válvula, a la cual ésta ha sido ajustada para abrir bajo condiciones de servicio. En servicio de líquido, la presión de calibración está determinada por la presión en la entrada de la válvula a la cual ésta comienza a tener una descarga continua del líquido. En servicio de vapor o gas, la presión de calibración está determinada por la presión a la entrada de la válvula a la cual está disparada bajo condiciones de servicio.

Presión de operación: Se refiere a la presión manométrica durante el servicio normal, por lo general un 10% por debajo de la MAWP.

Acumulación: Es el incremento de presión sobre la presión de diseño del equipo durante la descarga a través del sistema de alivio. El término se refiere al equipo a proteger y no al dispositivo de alivio de presión. La acumulación máxima permitida está regulada por las normas y códigos de diseño o de trabajo de los equipos y

³³ Válvulas de alivio de presión y vacío para tanques de almacenamiento, <http://www.pemex.com/files/content/NRF-172-PEMEX-2007-F.pdf>, página consultada por última vez el 7 de Mayo de 2013.

³⁴ Crow Daniel A, et al. (2002), Chemical Process Safety: fundamentos with applications, 2da. edición, Editorial Prentice Hall PTR, Pág. 21.

sistemas. La acumulación es el aumento permitido en una situación de emergencia y puede variar del 10% de la presión de diseño, hasta el 25% para situaciones de incendio, tal y como se muestra en la figura 2.2.

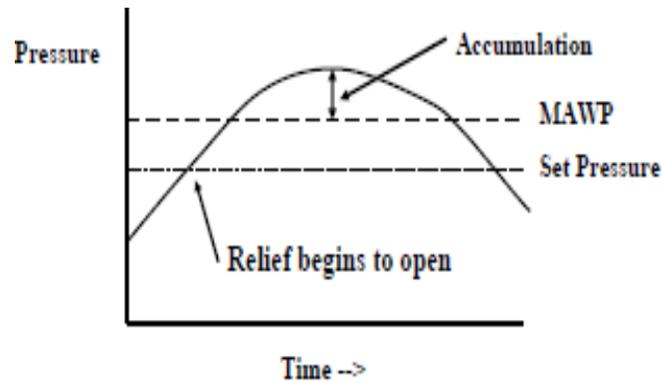


Figura 2.2. Gráfica de acumulación.

Sobrepresión: El aumento de presión en el recipiente sobre la presión establecida durante el proceso de alivio. Sobrepresión es equivalente a la acumulación cuando la presión de reacción está en la MAWP.

Contrapresión: La presión a la salida del dispositivo de alivio durante el proceso de alivio resultante de presión en el sistema de descarga. La contrapresión puede estar impuesta por las condiciones de flujo en el sistema de descarga u originada por el flujo de escape desde la válvula de seguridad a través del sistema de descarga (Ver figura 2.3).

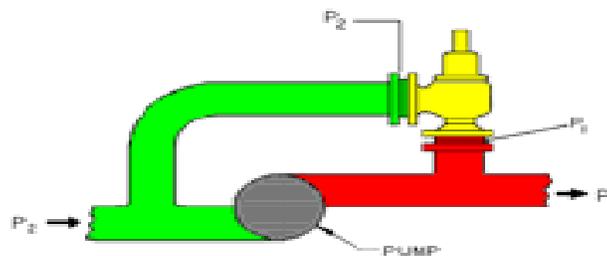


Figura 2.3. Representación de la contrapresión. P_1 es Contrapresión

Purga: La diferencia de presión entre la presión de alivio y la de alimentación. Se expresa como un porcentaje de la presión establecida.

Escape. Despresurización. Subpresión de resiento. (Blowdown): Es la diferencia entre la presión de ajuste y la presión del cierre de nuevo cuando la válvula retorna a su posición normal de descanso. Este término se expresa normalmente como un porcentaje de la presión de ajuste.

Presión de alivio: Es la suma de la presión de ajuste más la sobrepresión.

Caudal de alivio requerido: Es el flujo calculado de descarga de fluido en las condiciones de alivio requeridas para mantener la presión en el equipo protegido en el valor de la acumulación permitida o por debajo de ella.

Presión de trabajo o servicio: Es la presión normal de trabajo del aparato o sistema a la temperatura de servicio.

Simmer (siseo): El siseo aplica a válvulas de seguridad o seguridad y alivio únicamente con fluidos compresibles. (Aire, gases y vapores). El siseo es el indicador audible del paso del fluido a través de los asientos de la válvula, justo antes del disparo. Este se expresa en porcentaje de la presión de calibración o en unidades de presión.

En la siguiente figura (fig.2.4) es posible identificar cada uno de estos conceptos como forma generalizada, para entender cada uno de estos:

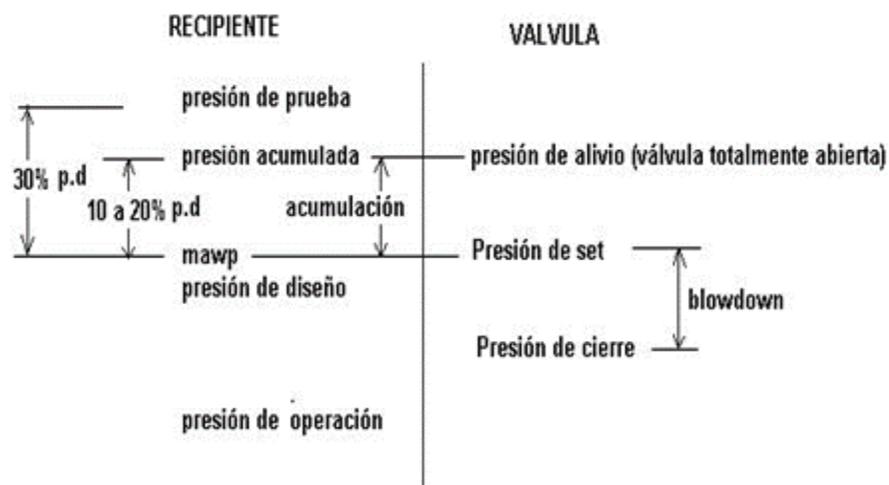


Figura 2.4. Representación de definiciones.

2.4 Importancia de las válvulas

Como ya se ha hecho hincapié a lo largo de éste y el capítulo anterior la seguridad dentro de cualquier industria es muy importante, pero a pesar de las medidas de seguridad que puedan existir en una industria química, algunas fallas en los equipos o del operador pueden llegar a generar un aumento en la presión que va más allá de los niveles de seguridad. La consecuencia de una alta elevación de presión es la rotura de equipos de proceso, lo cual genera la emisión de tóxicos o productos químicos inflamables.

La primer líneas defensa contra este tipo de accidentes son primer lugar las medidas de seguridad que se deben poner en práctica. La segunda línea de defensa es el lograr tener un mejor control del proceso, es decir tenerlo dentro de las regiones de operación seguras, por lo tanto presiones altas o fuera de rango deben minimizarse o evitarse. La tercera línea de defensa contra las presiones excesivas es la instalación de sistemas de ayuda para liberar los líquidos o gases ante las presiones excesivas que se generan en el proceso.

Así, cualquier equipo que trabaje a presión requiere tener un venteo regular para evitar un riesgo mayor, de lo contrario hay una sobrepresión que puede llegar a generar accidentes fatales, por lo que las válvulas de seguridad y alivio fueron creadas para salvaguardar equipos e instalaciones industriales en momentos de emergencia. Dentro de las instalaciones industriales, son vitales para el buen funcionamiento de equipos de proceso y junto los instrumentos de campo y válvulas de control forman parte del grupo de instrumentos que se analizan técnicamente en forma detallada.

Cabe mencionar que las válvulas constituyen del 20 al 30% del costo de la tubería de una planta, según sea el proceso, el costo de un tipo y tamaños dados de válvulas pueden variar en 100% según sea su construcción³⁵. Es preciso señalar

³⁵ Greene Richard W., (1998), válvulas selección uso y mantenimiento, McGraw-Hill, U.S.A., Pág.. 3.

entonces que la importancia de las válvulas de seguridad es que se ven reflejadas en los aspectos económicos, y son fundamentales en la operación de las plantas de proceso.

Es tanta la importancia de las válvulas que los departamentos de seguridad y mantenimiento, en cualquier industria deben tener recopilada una información a detalle de cada una de éstas, identificando a cada una de ellas mediante etiquetas que incluyan TAG, material, proveedor, cantidad, etc., obteniendo con ello un conocimiento pormenorizado acerca de los repuestos con los que se cuentan, y ajustes posteriores a través de todo el proceso.

Todos estos datos son de gran utilidad y aportan los elementos necesarios para la toma de decisiones en momentos cruciales, en los que se debe hacer un análisis para elegir entre el reemplazo de estos dispositivos o servicio de mantenimiento de los mismos.

2.5 Diseño

Como ya se mencionó anteriormente las válvulas de alivio de presión se requieren por diferentes razones entre las principales se encuentran:

- Para proteger al personal de los peligros de equipos de presión excesiva.
- Para minimizar las pérdidas de productos químicos durante las perturbaciones de presión.
- Para evitar daños al equipo.
- Para evitar daños a la propiedad contigua.
- Para cumplir con las regulaciones gubernamentales.

Estos dispositivos ayudan a que los errores cometidos en las condiciones de operación puedan ser disminuidos, por un sobrellenado, alguna falta de mantenimiento, etc., factores pueden provocar que la presión exceda los límites de un equipo.

Basado en los resultados de la evaluación de riesgos, el equipo presurizado puede ser diseñado correctamente, y se seleccionará el sistema de seguridad más efectivo para ese equipo en concreto. Durante el diseño del equipo hay que:

- Eliminar o reducir los riesgos identificados.
- Incorporar sistemas de protección si los riesgos no pueden ser eliminados.
- Informar al usuario de posibles riesgos residuales.
- Indicar las medidas de protección apropiadas.
- Prevenir el uso incorrecto de los sistemas de seguridad.

Los diseños actuales de plantas de procesos incluyen el uso de sistemas de alivio de presión (normalmente válvulas de seguridad y/o discos de ruptura) como medida para salvaguardar los equipos en condiciones anormales de equipos críticos. Es importante recordar que un sistema de alivio de presión es un sistema de seguridad destinado a proteger equipos presurizados en los que un error puede tener consecuencias catastróficas.³⁶ La correcta selección del diseño de una válvula de alivio de presión debe hacerse conociendo los datos inherentes al servicio para el cual va a ser destinada, entre los cuales se encuentra³⁷:

- Fluidos.
- Tipo de descarga.
- Presión de ajuste.
- Temperatura de operación.
- Capacidad de descarga requerida.

El diseño de los sistemas de seguridad y la selección del sistema de alivio de presión debe hacerse en función de todas las condiciones de operación que pueden darse durante la vida del equipo presurizado. En la siguiente figura (fig.

³⁶Roger Bours, Diseño de sistemas de alivio de presión, <http://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/22516-Diseno-de-sistemas-de-alivio-de-presion.html>, página consultada por última vez el 20 de Mayo de 2013.

³⁷ Válvulas de seguridad y alivio de bronce, Manual, Walworth, USA, 1982.

2.5)³⁸ se puede ver el proceso en un panorama muy general para el diseño y selección de una válvula de seguridad. Asimismo, en el Anexo I se incluye una hoja de especificación para una válvula de alivio de PEMEX (Petróleos Mexicanos), en donde se pueden ver los datos que se requieren para dimensionar cualquier válvula de alivio así como las condiciones que se deben conocer para poder saber qué tipo de válvula se requiere para el tipo de escenario con el que se cuenta.

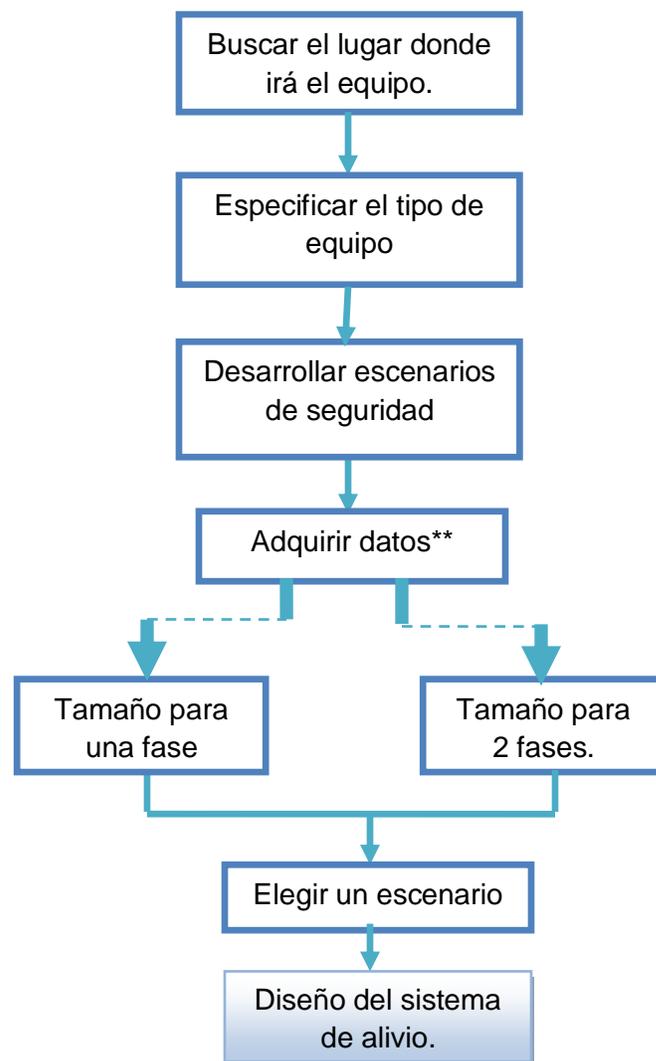


Figura.2.5 Diseño y selección de válvulas de alivio y presión.

³⁸ Crowl, Daniel A. et al., op. cit., Pág. 354.

**Datos como propiedades físicas, liberación de calor, etc. (Ver anexo II para mayor referencia).

Como se puede observar en el diagrama anterior el primer paso es especificar donde debe estar instalado el dispositivo. En segundo lugar el tipo de dispositivo de alivio, que es el apropiado, tomando en cuenta la naturaleza del material del relevo y las características requeridas, ésta parte es de suma importancia ya que el diseño debe ser el correcto, con todas las especificaciones requeridas de acuerdo al material que se va a desfogar.

En tercer lugar los escenarios, en estos se describen las diversas formas en que un alivio puede ocurrir, determinando con ello la masa de material que sale, así como el estado físico del material (líquido, vapor o dos fases). Posteriormente, se recogen los datos sobre el alivio, en donde se reúnen todas las propiedades físicas del material expulsado. Por último se selecciona el diseño y el alivio final se logra. Todos estos pasos deben seguirse muy de cerca ya que cualquier error en uno de estos puede generar fallas catastróficas.

Uno de los problemas que a menudo se menosprecia y que puede provocar fallos inesperados de un sistema de seguridad es el efecto de la contrapresión en los sistemas de alivio. Se han realizado diferentes ensayos en laboratorios a distintas válvulas de seguridad comerciales para comprobar su funcionamiento bajo los efectos de la contrapresión y estos han mostrado la diferencia que puede haber entre el ajuste indicado por el fabricante y el real. Esta diferencia puede ser tan grande que resulten casos en los que el equipo presurizado trabaje por encima de su presión de diseño. La instalación de un fuelle en la válvula puede ayudar, pero no solucionar el problema.

Una posible solución es el uso de discos de ruptura abajo de una válvula de seguridad que ofrecerá una mayor fiabilidad del sistema por un coste bajo, evitando los efectos indeseados de la contrapresión.

La tubería de entrada a los sistemas de alivio de presión deben ser tan cortas y rectas como sea posible, y en el caso de las válvulas de seguridad la pérdida de

carga no debe exceder el 3% de la presión de ajuste de la válvula. La pérdida de carga total se calcula usando la capacidad real de la válvula, y debe tener en cuenta cualquier efecto de la combinación con un disco de ruptura u otro componente.

Es muy importante el diseño y configuración de las tuberías de descarga. La descarga de presión y fluido debe hacerse dentro de unos niveles apropiados de seguridad. Se deben tomar medidas de prevención para evitar que el flujo conecte de forma no deseada otros equipos (por ejemplo instalaciones en mantenimiento o fuera de servicio). Debe considerarse la instalación de accesos para inspección y/o drenaje. Las tuberías de descarga también tienen que ser lo más cortas y rectas posibles.

Bajo cualquier circunstancia se dará preferencia a las soluciones intrínsecamente seguras. Como norma general resultará inevitable el uso de sistemas de seguridad, como por ejemplo el uso de sistemas de alivio de presión, en el diseño de los equipos presurizados. La normativa de equipos a presión (en inglés, Pressure Equipment Directive, PED) así lo indica. Los sistemas de seguridad se diseñarán para poder trabajar independientemente de otras funciones, y deberán ser fiables en cualquiera de las condiciones determinadas en la evaluación de riesgos (puestas en marcha, paradas, mantenimientos, etc.).

2.6 Elementos estructurales principales

En general, las válvulas difieren entre sí, por el material con el que se construyen dependiendo del tipo de fluido para desfogue, además de las características de éste, sin embargo se puede observar en la siguiente figura (Ver fig. 2.6) una representación de los elementos fundamentales para las válvulas, en cualquiera que sea el escenario:

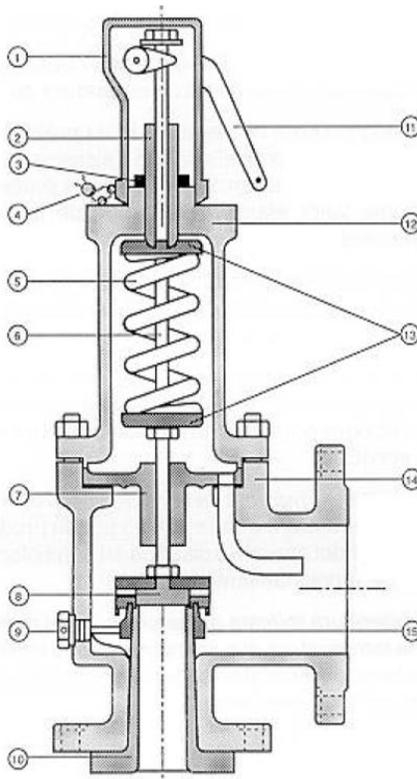


Figura.2.6 Elementos estructurales de una válvula de seguridad

Cada elemento estructural mostrado en la figura anterior, cumple en la válvula una función que permite que las válvulas cumplan con su funcionamiento³⁹.

- 1) *Caperuza; capucha*: Su función es evitar que se modifique la calibración de la válvula, y que el fluido escape por la parte superior.
- 2) *Tensor*: Genera la fuerza necesaria para el ajuste de válvula.
- 3) *Contratuerca*: Tuerca que se superpone a otra para evitar que ésta se afloje, por ejemplo, por efecto de la vibración.
- 4) *Precinto*: Este es el sello de seguridad que evita que la válvula se abra sin autorización (por accidente o adrede).

³⁹NTP 510: Válvulas de seguridad: selección:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_510.pdf, página consultada por última vez el 1 de Abril de 2013.

- 5) *Resorte*: Proporciona la fuerza o carga que mantendrá al disco cerrando el pasaje de flujo, mientras la presión del fluido esté por debajo de la presión de calibración.
- 6) *Vástago; flecha*: Su función radica en transmitir la fuerza del resorte hacia el disco y también sirve de guía para las partes móviles de la válvula y mantener la colinealidad de las fuerzas en todo momento.
- 7) *Guía*: Induce el alineamiento y deslizamiento de las partes móviles.
- 8) *Disco*: Actúa cerrando el flujo de la tobera.
- 9) *Tornillo de ajuste*: Permite calibrar (ajustar) la tensión del resorte para que la válvula actúe a la presión deseada.
- 10) *Tobera; boquilla*: Constituye el pasaje de flujo desde la conexión al recipiente hasta el asiento, pasaje a través del cual entra y se conduce el fluido, y que es obturado por medio del disco u otro elemento móvil.
- 11) *Palanca; dispositivo de levante*: Mecanismo que permite el accionamiento manual de la válvula a una presión menor a la de ajuste, reduciendo la fuerza ejercida sobre el disco. Con la operación manual se verifica el estado de libertad que guardan las partes móviles de la válvula.
- 12) *Cúpula o arcada*: Este funge como un soporte entre un espacio, deposita toda la carga en los apoyos, es decir en las esquinas, mediante un empuje.
- 13) *Bonete; cámara de resorte*: Aloja al resorte y vástago. También se le conoce como bonete cerrado.
- 14) *Cuerpo*: Que contiene las partes interiores y que posee una conexión de entrada y salida, las cuales pueden ser roscadas, bridadas o de otro tipo.
- 15) *Anillo de ajuste; corona; engrane*: Es el elemento interno de la válvula cuya posición modifica las fuerzas de apertura y cierre de la misma, para lograr los requisitos marcados por las especificaciones de funcionamiento. Las válvulas de seguridad poseen dos anillos de ajuste (anillo de tobera y anillo superior o guía); las válvulas de seguridad-alivio solamente poseen el anillo de la tobera, y las válvulas de alivio pueden o no poseer este último.

2.7 Funcionamiento

Como se ha mencionado, existen diferentes tipos de válvulas, sin embargo en general todas tienen un principio de operación similar: cuando la presión de vapor entra a la válvula, actúa sobre la sección del disco y tobera y con ello genera una fuerza que se opone a la fuerza del muelle o resorte. Cuando esta fuerza es mayor que la fuerza del resorte, la válvula abre.

El vapor generado por una apertura mínima del disco, se expande y actúa sobre el anillo inferior, lo que causa una fuerza adicional sobre el área del sostenedor del disco, que ayuda a la válvula a hacer su apertura total. El ajuste necesario del anillo superior permite al disco de la válvula alcanzar su carrera a la sobrepresión de diseño, (normalmente el 3% de sobrepresión). Cuando la presión de entrada disminuye hasta alcanzar la presión de cierre, el disco se mueve hacia abajo, provocando el cierre de la válvula. La disposición del disco y sus partes complementarias, sostenedor del disco, vástago, collar del disco, y tuerca de límite de carrera, permiten al disco alcanzar su posición de cierre con fuerza suficiente para impedir que fugue. El diseño del disco térmico permite una rápida igualación de la temperatura alrededor del asiento, y provee un grado de apriete contra el asiento de la tobera.

En general el funcionamiento de estas válvulas se rige por la actuación de la energía de la presión estática. Cuando en el recipiente o sistema protegido por la válvula se produce un aumento de presión interna, hasta alcanzar la presión de alivio, la fuerza ejercida por el muelle es equilibrada por la fuerza producida por la presión sobre el área del disco de cierre (Fig. 2.7)⁴⁰. A partir de aquí, un pequeño aumento de presión producirá el levantamiento del disco de cierre y permitirá la salida del fluido. Una válvula de alivio de presión abrirá proporcionalmente al incremento de presión producido.

⁴⁰ NTP 342: Válvulas de seguridad (I): características técnicas
http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_342.pdf, página consultada por última vez el 3 de mayo de 2013.

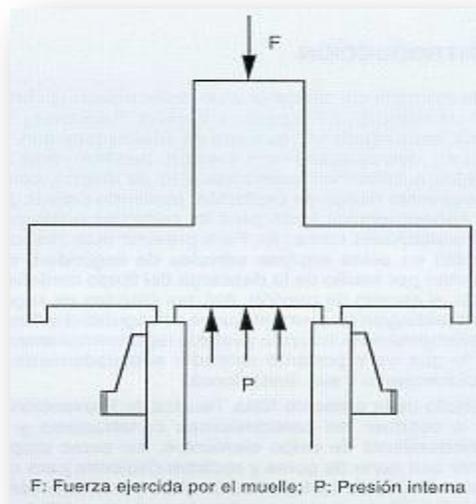


Figura 2.7 Fuerzas que intervienen en las válvulas de alivio

Cuando la presión disminuye, la válvula cierra a una presión ligeramente inferior a la presión de ajuste como consecuencia de la energía cinética del fluido en el escape. En la figura 2.8 se pueden apreciar los diferentes niveles de presión existentes. Son a diferencia de otros dispositivos de alivio (discos de rotura, tapones fusibles térmicos, etc.) mecanismos diseñados para cerrar cuando la presión haya sido restablecida, quedando en disposición de actuar y prevenir un nuevo alivio del fluido.

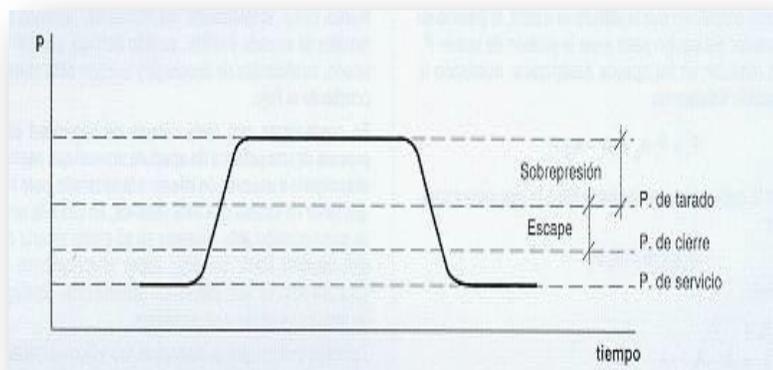


Figura 2.8. Diferentes niveles de presión existentes.

En cuanto al valor del ajuste, en general y como criterio preventivo, la presión de ajuste de las válvulas de seguridad instaladas en un equipo no sobrepasará la presión de diseño ni la máxima de servicio del equipo y el dimensionado del conjunto de válvulas que protegen el equipo debe ser tal que permita aliviar la cantidad de fluido necesario para que el aumento de presión no exceda del 10% de la presión de ajuste para cualquier condición de funcionamiento.

Un aspecto que tiene una notable influencia en el establecimiento del punto de funcionamiento de las válvulas de seguridad es la contrapresión existente en el escape de la válvula, que puede estar generado por pérdidas de carga en la tubería de escape, presiones en la salida o por la instalación de silenciadores, filtros u otros mecanismos en la tubería de escape de la válvula.

Es importante conocer tanto el funcionamiento así como los tipos de válvulas existentes, para que sea posible conocer e identificar las variables y las mejores opciones para la elección de ellas según el escenario que se presente en cualquier industria, razón por la cual es importante conocer a detalle los tipos de válvulas.

Capítulo 3.

3.1 Tipos de alivios

Como se ha mencionado, es posible tener diferentes posibilidades en cuanto a los tipos de alivio, de acuerdo a las condiciones específicas de cada relevo que pueden ser: líquidos, gases, vapores ó mezcla de ellos e incluso también para materiales corrosivos, que pueden ser ventilados a la atmósfera o con ventilación a los sistemas de contención (Depurador, quemador, un condensador, un incinerador y similares), y con base a esto se tienen diferentes tipos de válvulas de alivio.

En términos ingenieriles el tipo de dispositivo se especifica de acuerdo a los detalles del sistema de alivio, del proceso, condiciones y propiedades físicas del fluido que será aliviado, pero es preciso señalar que en general hay dos categorías de clasificación de dispositivos de alivio: con o sin disco de ruptura y dos que funcionan con válvulas: convencional y fuelle balanceado que a su vez tienen algunas subdivisiones, aunque también algunos fabricantes las clasifican de acuerdo a los siguientes criterios:

➤ *Según su elevación*

Válvulas de seguridad de apertura instantánea: Cuando se supera la presión de ajuste la válvula abre repentina y totalmente.

Válvulas de alivio de presión: Cuando se supera la presión de ajuste, la válvula abre proporcionalmente al aumento de presión.

➤ *Según su agrupación*

Válvulas de seguridad sencilla: Son las que alojan en su cuerpo a un solo asiento de válvula.

Válvulas de seguridad dobles o múltiples: Son las que alojan en su cuerpo dos o más asientos de válvulas.

➤ *Según su actuación*

Válvulas de actuación directa: Son válvulas cargadas axialmente, que al alcanzar la presión de ajuste abren automáticamente debido a la acción del fluido a presión sobre el cierre de la válvula.

Válvulas de actuación indirecta: Son válvulas accionadas por piloto. Deben actuar debidamente sin ayuda de ninguna fuente exterior de energía.

Así, cualquiera que sea la clasificación de estas válvulas la función de ellas estriba en el mismo principio: identificar un aumento de presión y proveer una trayectoria para la salida del material que hay en el sistema. El aumento en la presión se detecta con un sistema de equilibrio de fuerzas que consiste en que la presión del proceso actúa en una superficie determinada en contra de un resorte o de un peso. Las válvulas de seguridad accionadas por pesos o contrapesos, mismas de las que se habló en el aparatado anterior ya no se utilizan en las plantas de proceso, salvo cuando son para apertura a presiones muy bajas. Cabe mencionar algunas de las diferencias que existen entre las características de cada tipo de válvula de alivio de presión, como a continuación se describe.

3.1.1 Válvula convencional⁴¹

Estas válvulas están diseñadas para abrirse a una cierta presión. En la siguiente figura pueden verse los elementos fundamentales, en donde:

- La boquilla de entrada está conectada al recipiente a través de un tamaño adecuado de tubería.
- La boquilla de salida está conectada al sistema de descarga, que puede abrir a un sistema de descarga o a un sistema cerrado.
- El disco, un elemento móvil que controla el flujo a través de la válvula.
- El resorte controla la posición del disco.

⁴¹ Datta Arun, Process engineering and design using visual basic, (2008), CRC Press, U.S.A, Pág. 255-256.

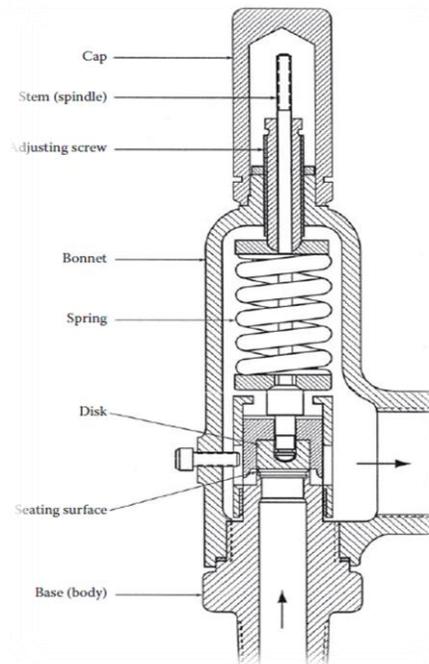


Figura 3 Válvula convencional

El resorte y el disco controlan el flujo a través de la válvula. El disco casi siempre está bajo carga de resorte, el vástago le transmite la fuerza. Cuando la presión de operación en el recipiente o sistema es menor que la presión establecida, la válvula fuerza a que el disco se quede en la boquilla, y el fluido no pasa a través de la boquilla de entrada. Esto continúa hasta que la presión del recipiente o sistema se iguala a la presión de ajuste de la válvula. Cuando la presión del recipiente o sistema excede la presión establecida, esta fuerza mueve la válvula hacia arriba, abriendo así la válvula para liberar el flujo a través de la boquilla de salida. Una vez que la presión cae por debajo de la presión de ajuste, el disco vuelve a caer en la boquilla y el flujo se detiene. El diseño de la válvula es tal que, cuando la presión se acerca a la presión de ajuste el fluido se mueve a otra cámara llamada “cámara acumuladora”. Debido a la mayor área disponible, la fuerza de presión ejercida sobre el disco supera la fuerza del resorte, y hace que la válvula se abra.

Ahora la válvula está abierta, y la fuerza de presión actúa sobre una mayor área. Esto significa que la válvula no se cierra cuando la presión cae a la presión de ajuste (porque la presión actúa sobre un área más grande). El disco volverá a caer

cuando el recipiente o la presión del sistema caen por debajo del conjunto de presión. La diferencia entre la presión de ajuste y la presión de cierre es llamado purga, que es un importante criterio de diseño.

Las presiones de graduación se pueden aumentar hasta en un 10% del ajuste en la fábrica. El resorte está alojado en el bonete de la válvula cuando no se debe permitir que el fluido escape a la atmósfera. Las válvulas para vapor suelen tener un yugo en lugar del bonete y el resorte está descubierto.

La contrapresión en la salida de la válvula de desahogo puede aumentar o disminuir la presión de graduación según sea el diseño de la válvula. Si la contrapresión es constante, hay que compensar sus efectos. Sin embargo, dado que el efecto de la contrapresión es de acuerdo con el diseño de la válvula, no se debe intentar compensarla con el aumento o reducción de la carga del resorte sin antes consultar con el fabricante.

Para este tipo de válvulas hay dos subtipos⁴² según el destino del venteo del ya sea a la atmósfera o a la descarga de la propia válvula, y al representar un balance de las fuerzas que ocurren se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_1 A_N = F_s - P_2 (A_D - A_N) \quad (3)$$

Dónde:

P_1 = Presión desde el lado del equipo protegido

A_N = Área de la boquilla

F_s = Fuerza de muelle

P_2 = Contrapresión en el lado de descarga

A_D = Área del disco

⁴² Storch d García, José María, et al. (2008), Seguridad Industrial en plantas Químicas y energéticas: fundamentos, evaluación de riesgos y diseño, 2da Edición, Ediciones Díaz de Santos, España, pág. 598.

Se observa que la contrapresión que existe por el venteo reduce la presión graduada. Por otro lado si no se tiene un venteo hacia la propia atmósfera el balance de fuerzas ejercidas queda representando como:

$$P_1 A_N = F_S + P_2 A_N \quad (3.1)$$

A través del balance es posible notar que si la contrapresión aumenta la presión graduada también lo hace, esto puede verse representado con mayor claridad en el siguiente esquema:

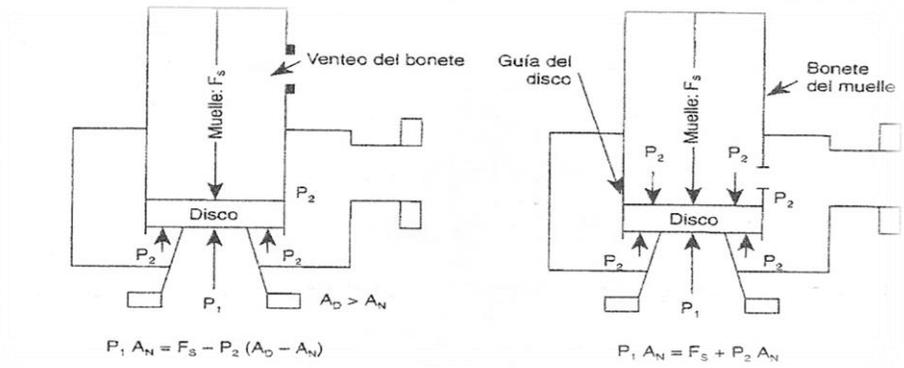


Figura 3.1 Balance de fuerzas en válvulas convencionales.

1.1.1.2 Válvula de alivio de presión convencional (servicio de líquido)

Hay diferencias fundamentales entre el funcionamiento de vapor y servicio de líquido. Esto es debido al hecho de que la fuerza expansiva producida por vapor no está presente en el flujo de líquido. En la apertura inicial, el líquido se escapa a través de las ranuras y se expande radialmente entre dos superficies de asiento. Primero de 2% a 4% de sobrepresión, el líquido crea una fuerza de reacción y mueve el disco hacia arriba.

Con el aumento en la tasa de flujo de líquido a través de la hendidura de apertura, la velocidad también aumenta, causando una abertura más grande, y la válvula repentinamente aumenta de 50% a 100%. Esto ocurre normalmente cuando se

tiene una sobrepresión de 2% a 6%. Las válvulas se requieren para alcanzar 100% de la capacidad en 10% o menos de sobrepresión.

Durante el ciclo inverso, la sobrepresión y la disminución de impulso, y la fuerza del muelle mueve la parte posterior del disco en contacto con el asiento.

En la válvula de desahogo convencional, la contrapresión aumenta o reduce la carga del resorte. Las válvulas equilibradas cancelan la fuerza de la contrapresión que actúa en el disco. También se utilizan en servicios en donde puede ocurrir vaporización instantánea para minimizar el efecto de la formación de vapores en el funcionamiento de la válvula.

Cuando hay variaciones pequeñas en la contrapresión, se puede utilizar la válvula de desahogo de presión convencional sin efectos perjudiciales. Dado que la contrapresión influye en la alzada de la válvula convencional, las variaciones grandes en la contrapresión reducirán la capacidad. Por esta razón nunca se deben emplear las válvulas convencionales cuando se espera que la contrapresión varíe más de un 10% de la presión graduada.

3.1.2 Fuelles balanceados⁴³

Son válvulas de resorte con un fuelle u otros medios de equilibrar el disco de la válvula para reducir al mínimo el efecto de la contrapresión. Están diseñadas para que se igualen las fuerzas ocasionadas por la contrapresión a ambos lados del disco de cierre de la válvula. Puede verse ilustrado en la figura 3.2.

⁴³ Datta Arun, Process engineering and design using visual basic, op cit. Pág. 257-259.

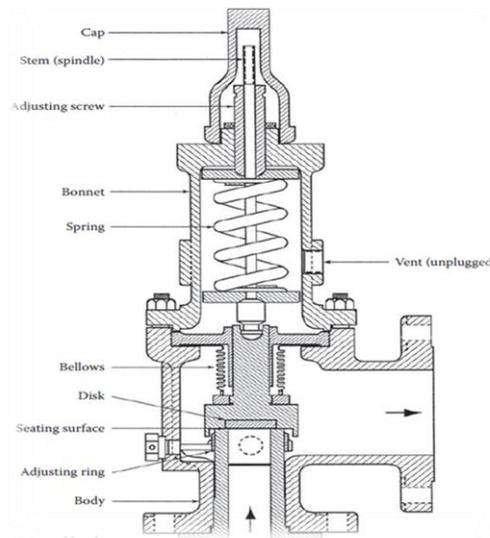


Figura 3.2 Válvula de alivio de presión de Fuelles balanceados.

El sombrerete tiene un orificio en comunicación con la atmósfera, el cual no debe taponarse ya que en ese caso alteraría la presión de ajuste, debido al aumento de la presión en el interior del sombrerete durante la ascensión del vástago, por lo cual la válvula no funcionaría como válvula de seguridad equilibrada. El fuelle también tiene un venteo para no acumular presión en su interior.

El flujo a través del alivio es proporcional a la diferencia de presión a través del asiento, es decir que el flujo de alivio se reduce a medida que aumenta la contrapresión. El relieve de presión de ajuste normalmente se especifica en el 10% por encima de la presión de funcionamiento normal, para evitar que una persona no autorizada cambie la configuración, el tornillo está cubierto con una tapa ajustable roscada.

Estas válvulas se recomiendan para servicio con productos corrosivos, que lleven suciedad o que den lugar a incrustaciones. En el caso de fallo o avería del fuelle, el fluido puede entrar en el espacio del sombrerete y escapar por el orificio de venteo. Es esencial que se detecte cualquier escape a través del orificio del sombrerete ya que afectaría a la presión de ajuste de la válvula. Si no se puede aceptar tal fallo, en especial si es súbito, se debe utilizar una válvula de seguridad equilibrada de pistón o de fuelle con pistón auxiliar.

Estas válvulas se han utilizado con contrapresión variable hasta del 80% de la presión graduada, sin embargo, se debe hacer una corrección de capacidad siempre que la contrapresión excede de alrededor de 15% en una válvula en servicio con líquido o del 20% en una en servicio con vapores.

3.1.2.1 Válvula de seguridad equilibrada o compensada de pistón.

PRV por piloto consiste en un pistón y un conjunto de pilotaje externo esta válvula puede verse representada en la figura 3.3:

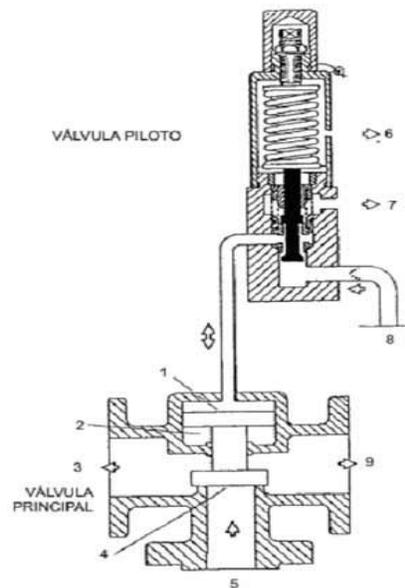


Figura 3.3 Válvula de seguridad equilibrada o compensada de pistón.

La válvula operada por piloto también es de equilibrio de fuerzas pero son reducidas para mantener un control más preciso del punto de graduación. Estas válvulas consisten en dos componentes: el principal y el piloto. La válvula principal tiene un pistón con superficie transversal más grande en el lado de descarga (superior) que en el lado de la entrada.

El ajuste se hace en la válvula piloto, que deja escapar o admite la presión de, proceso a la parte superior del pistón o disco de la válvula. Dado que no se requieren altas velocidades en la boquilla para el disparo, estas válvulas tienen

más capacidad con el mismo tamaño del cuerpo que las válvulas con carga directa de resorte.

Antes de que la presión alcance la presión establecida, la línea de equilibrio mantiene la misma presión en ambos extremos del pistón. Debido a que la sección superior del pistón tiene un área más grande, la fuerza neta que actúa hacia abajo, mantiene la válvula de cierre hermético. Esta característica es una ventaja única de PRV por piloto.

Cuando la presión alcanza la presión de ajuste, las rejillas de ventilación de la parte superior del pistón, causa la fuerza para actuar hacia arriba. La fuerza hacia arriba mueve el pistón, y el flujo se establece a través de la válvula. Una vez que la presión cae, el piloto va a cerrar la rejilla de ventilación, y la fuerza neta hacia abajo hará que el pistón para restablecer.

Una ventaja única de la válvula operada por piloto es que la elevación del pistón no depende de la presión de retorno del sistema y el rendimiento de la válvula no se ve afectada por la contrapresión acumulada.

El piloto puede ventilar la salida de la válvula a la atmósfera si la ventilación está permitida. En caso de que el piloto ventile a la atmósfera, el rendimiento de la válvula no se verá afectada por la presión trasera de la válvula.

El rendimiento del PRV por piloto depende de la presión de equilibrio de la línea. Si se bloquea esta línea, el equilibrio de presión entre la parte superior e parte inferior del pistón no será posible, y la válvula se levantará muy poco. Esta es la principal desventaja de válvulas operadas por piloto. Este tipo de válvula puede ser recomendado sólo si el fluido de trabajo está limpio. La válvula accionada por piloto no es muy popular para los servicios de hidrocarburos.

La purga se puede graduar a solo 1%. Sin embargo las válvulas de seguridad con piloto no han tenido mucha aceptación pues incluyen muchas piezas móviles con tolerancias pequeñas.

1.1.2 Discos de ruptura

Un disco de ruptura⁴⁴ consiste en un sujetador y un disco metálico destinado a romperse o fracturarse a la presión de desahogo. Se pueden utilizar para proteger recipientes con presiones de diseño muy altas que exceden mucho la capacidad de las válvulas de desahogo, estos se pueden usar en un rango de presión que va desde 0.01 kg_f/cm² hasta 4 kg_f/cm², y en un rango de temperatura que va desde 200 °C hasta 500° C. Además, son los indicados para grandes capacidades y toda la cabeza de un recipiente se puede construir en forma de disco de ruptura.

Hay dos tipos básicos: el preabombado, que es el convencional y el de combadura inversa. Una desventaja del tipo preabombado o preabolsado es que requiere una presión de graduación alrededor de 1.5 veces mayor que la de operación, debido a su susceptibilidad a la fatiga por esfuerzo. Esto significa que el recipiente protegido se debe proyectar para una presión más alta. Además, la presión de disparo del tipo preabombado puede ser errática, ejemplo de un disco de ruptura puede verse en la Figura 3.4.

Los discos de ruptura están especialmente diseñados para romperse a una presión de alivio especificado, consisten usualmente en una hoja de metal calibrado. Se utilizan solos, en serie o en paralelo a los dispositivos de alivio de resorte. Se pueden hacer a partir de una variedad de materiales, incluyendo materiales resistentes a la corrosión.



Figura 3.4. El lado izquierdo representa un disco de ruptura antes de que se rompa, mientras que el lado derecho da idea de un disco roto una vez que ha cumplido su función.

⁴⁴ Greene Richard W., (1998), válvulas selección uso y mantenimiento, McGraw-Hill, U.S.A., pág.:51-52

Un problema importante con discos de ruptura es que la flexión del material con las presiones del proceso puede cambiar, por lo que la flexión podría conducir a una falla prematura a presiones inferiores a las establecidas. Por esta razón algunos sistemas de disco de ruptura están diseñados para funcionar a presiones muy por debajo de la presión establecida. Además, el servicio de vacío puede causar fallas en los discos de ruptura si el sistema de alivio no es específicamente diseñado para este servicio.

Otro problema con los sistemas de disco de ruptura es que una vez que se abra se mantienen abiertas, lo cual puede generar la descarga completa del material de proceso, así mismo puede permitir que el aire entre en el proceso, dando lugar a un posible incendio y/o explosión. Algunos accidentes se han generado porque se rompieron los discos, sin que el operador estuviera consiente de la situación. Para evitar este problema, los discos de ruptura vienen con cables integrados que se cortan cuando se rompe el disco, lo que puede activar una alarma en la sala de control para alertar al operador. Cualquier problema de esta índole, se eliminan si el disco de ruptura y el sistema se especifican y diseñan apropiadamente para las condiciones específicas de funcionamiento del proceso.

Los discos de ruptura están disponibles en tamaños mucho más grandes que las válvulas de alivio de resortes, con tamaños comerciales disponibles de hasta varios pies de diámetro. Estos generalmente cuestan menos que los resortes de accionamiento.

Los discos de ruptura se instalan con frecuencia en serie a un alivio de resorte para:

- (1) Proteger un dispositivo de resorte de un ambiente corrosivo.
- (2) Para dar aislamiento absoluto y tener manipulación de productos químicos muy tóxicos.
- (3) Dar absoluto aislamiento de gases inflamables.
- (4) Proteger las piezas de relativa complejidad de un alojamiento elástico, a partir de monómeros reactivos que podrían ocasionar taponamiento.

Cuando los discos de ruptura se utilizan antes de un alivio de resorte, un medidor de presión se instala entre los dos dispositivos. Este sirve como indicador y hace visible la posible ruptura de un disco. El fracaso puede ser resultado de un agujero causado por la corrosión. En cualquiera de los casos el revelador indica cuando el disco debe ser reemplazado.

En resumen se puede decir que hay tres tipos de alivios de presión:

1.- La válvula de alivio es principalmente para el servicio del líquido. La válvula de alivio (sólo líquido) comienza a abrir a la presión establecida. Esta válvula alcanza su capacidad máxima cuando la presión alcanza 25 % sobrepresión. La válvula se cierra cuando la presión vuelve a la establecida.

2.- La válvula de seguridad para el servicio de gas, ésta válvula se abre cuando la presión ha excedido la presión normal. Esto se logra mediante el uso de una boquilla de descarga que dirige a alta velocidad materiales hacia el asiento de la válvula. Después de que se purga el exceso de presión la válvula reasienta, es decir vuelve en aproximadamente 4% por debajo de la presión establecida; la válvula tiene un “*blowdown*” de 4%.

3.- Las válvulas de seguridad para servicios de líquidos y gases. Funcionan como una válvula para líquidos y como una válvula de escape para gases.

Las válvulas en servicio con polímeros y otros materiales viscosos o que producen carbonización, necesitan protección contra las obstrucciones. Por lo general se montan discos de ruptura debajo de la válvula de desahogo y al ras con el interior del recipiente de presión; se gradúan a la misma presión que la válvula y el tubo entre la válvula y el disco de ruptura descarga a la atmósfera mediante una válvula de retención de exceso de circulación.

A partir de la información recopilada a continuación se elaborará una tabla que permita distinguir las ventajas y desventajas de usar uno u otro dispositivo, y esto se puede ver en la Tabla 3.1.

Tipo de dispositivo	Ventaja	Desventaja
Válvula convencional	<ul style="list-style-type: none"> *Simple en diseño *La más baja en costos 	<ul style="list-style-type: none"> *No debe ser utilizada si la contrapresión excede 10% de la presión establecida *No se recomienda para servicio intermitente, ya que si varía la tasa de vapor aumenta la contrapresión más allá del 10% de la presión establecida.
Fuelles balanceados	<ul style="list-style-type: none"> *Se puede utilizar para una mayor contrapresión *Se utilizan normalmente cuando la contrapresión excede 10% *Son utilizadas para servicio intermitente. *Puede ser utilizado para servicio corrosivo 	<ul style="list-style-type: none"> *Al elegir entre fuelles y válvulas convencionales, las PRV convencionales resultan ser una mejor opción.
Válvulas accionadas por piloto	<ul style="list-style-type: none"> *Se puede utilizar para muy baja presión de ajuste *A menudo se utiliza cuando la contrapresión es demasiado alta *Si la tubería lo permite, se pueden operar a control remoto para la purga manual del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> *No adecuado para servicio corrosivo *No apto para servicio de vapor
Discos de ruptura	<ul style="list-style-type: none"> *Recomendable cuando el aumento de la tasa de presión es muy alta. *Se puede usar en reactores con posibilidad de reacción fuera de control *Se pueden utilizar en serie con PRV si la fuga es un problema, así si el disco está instalado a la entrada de una PRV, la presión entre el disco y la válvula se puede controlar para detectar cualquier fuga. *Menos costoso para proporcionar resistencia a la corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> * No vuelva a cerrar tras el alivio. *La presión de rotura no se puede probar. *Exige la sustitución periódica *Mayor sensibilidad a los daños mecánicos *Mayor sensibilidad a la temperatura

Tabla 3. Comparación de dispositivos de alivio de presión.

Así, dependiendo del tipo de servicio para el cual vaya a ser usada la válvula debe escogerse la adecuada para las condiciones dadas, tomando en cuenta que es un paso importante ya que es tan importante el diseño de estos dispositivos, como lo es la adecuada elección. Cómo se observó en el capítulo anterior todo esto es un proceso que viene desde la identificación de la ubicación del equipo hasta la instalación del mismo, aunque este trabajo mostrará una parte de este proceso, que es el cálculo del orificio de alivio de presión, para posteriormente una selección de válvulas.

Capítulo 4

“Conforme las unidades de proceso se vuelven más complejas y tienen más energía almacenada el diseño de dispositivos de desahogo seguros, económicos y confiables e instalaciones para eliminación se vuelve más importante que nunca”.

Marx Isaacs, Fluor Corp

4.1 Cálculo analítico del orificio de entrada en las válvulas de seguridad y alivio

A lo largo de este trabajo se ha hecho hincapié acerca de la importancia de la seguridad industrial, así mismo se ha hablado de uno de los dispositivos que hacen posible mantener en condiciones seguras un área de trabajo en la que hay equipos que trabajan a presión. Sin embargo la importancia de estos dispositivos radica en un buen diseño, ya que de lo contrario se pueden tener situaciones catastróficas que ponen en riesgo la seguridad de las personas y los equipos mismos.

Así, calcular el tamaño del orificio de una válvula es muy importante ya que se determina con ello el área de venteo, teniendo en cuenta la capacidad máxima que debe haber. Este tamaño debe ser determinado basándose en el trabajo a realizar y depende del tipo de fluido (líquido, vapor o bifásico) y el tipo de alivio usado (convencional, fuelle o disco de ruptura). Como es de esperarse un dispositivo de alivio que es diseñado para mantener la presión a la presión de ajuste podría requerir un área de venteo muy grande.

Cabe mencionar algo que es muy importante a considerar que es que el área de alivio se reduce conforme la sobrepresión aumenta. El área óptima de venteo para un particular sistema de alivio depende de la aplicación específica. La especificación de la sobrepresión es parte del diseño de un sistema de alivio.

Es importante mencionar que los dispositivos de relevo son especificados para sobrepresiones de 10% a 25% dependiendo del requerimiento de los equipos y el tipo de material aliviado. Los dispositivos de relevo requieren 25-30 % de

capacidad de flujo máxima para mantener el asiento de la válvula en la posición abierta.

Un dispositivo de alivio con un área que es demasiado grande para el caudal requerido produce el llamado “*chatter*”, que es el “*castañeteo*” de la válvula que consiste en un movimiento alternativo rápido de las piezas móviles sin contacto entre el disco y el asiento. Por esta y otras razones los relieves de alivio deben ser diseñados con el área de ventilación adecuada, es decir ni más grande pero tampoco demasiado pequeña, ya que un error puede resultar en fallas muy peligrosas.

Ahora se hará alusión a los modelos matemáticos que permiten obtener el área de venteo para diferentes escenarios, dichos desarrollos se obtienen del libro: *Chemical Process Safety: fundamentals with applications*, (2002).

4.2 Válvula convencional en servicio de líquidos⁴⁵

El flujo a través de relevos de resorte se asemeja al flujo a través de un orificio. Una ecuación que representa de este flujo deriva del balance de energía mecánica**

$$u = C_o \sqrt{\frac{2g_c \Delta P}{\rho}} \quad (4.1)$$

** Ver balance de energía mecánica (anexo II).

Dónde

U= Es la velocidad del líquido a través del relieve; [ft/s]

C_o= Es el coeficiente de descarga; [Adimensional]

ΔP=Es la caída de presión a través del relieve; [lb_f/in²]

ρ= Es la densidad del líquido; [lb_m/in³]

⁴⁵ Crow Daniel A, et al. (2002), *Chemical Process Safety: fundamentals with applications*, 2da. edición, Editorial Prentice Hall PTR, Pág. 384-388.

$g_c=1$

Esta ecuación es muy importante ya que se aplica a placas de orificio o medidores de flujo (Venturi) y se obtiene a partir del balance de energía⁴⁶:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{u_2^2}{\alpha_2 g} - \frac{u_1^2}{\alpha_1 g} \right) + (z_2 - z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho g} \right) + \frac{\Sigma F}{g} = \frac{W}{g} \quad (4.1.1)$$

En donde el primer término representa la carga cinética, el segundo término representa la carga potencial, el tercer término por su parte representa la carga de presión, finalmente el cuarto término representa las pérdidas por carga que se deben al rozamiento (fricción), mientras que el lado derecho de la ecuación representa el trabajo.

Haciendo las siguientes consideraciones de la ecuación de Bernoulli (4.1.1)

$$\alpha = 1; u_1 = 0; (z_2 - z_1) = 1; P_1 \neq P_2 = \Delta P; W = 0; \Sigma F = C_o$$

Reacomodando la ecuación tenemos lo siguiente:

$$u_1^2 - u_2^2 = \left(\frac{2g_c(P_1 - P_2)}{\rho} \right) \quad (4.1.2)$$

Ya que la densidad es constante, la relación de Bernoulli puede escribirse como:

$$u_1 = \left(\frac{D_b}{D_a} \right)^2; u_2 = \beta^2 u_1 \quad (4.1.3)$$

Dónde:

D_a = Diámetro de la tubería

D_b =Diámetro del estrechamiento del aparato

β =Relación de diámetros D_b/D_a

⁴⁶ **McCabe, W.L., Smith, J.C. y Harriot, P. (2001).** "Unit Operations in Chemical Engineering". 6ª edición. McGraw-Hill. New York, sección 2.

Si se elimina u_b y se agrega C_o como coeficiente debido a la fricción la ecuación 4.1.4 representa la velocidad del líquido a través del relevo:

$$u_b = \frac{C_o}{\sqrt{\alpha_2 - \beta^4 \alpha_1}} \sqrt{\frac{2g_c(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (4.1.4)$$

Se puede despreciar la relación β cuando D_b es mayor de $D_a/4$ y se llega a la ecuación 4.1 antes mostrada.

El flujo volumétrico del líquido es el producto del tiempo de velocidad en un área o UA. Sustituyendo la ecuación 4.1 y despejando el área de ventilación A del alivio, obtenemos:

$$A = \frac{Q_V}{C_o \sqrt{2g_c}} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (4.2)$$

Trabajando la ecuación y reacomodando unidades de la ecuación 4.2, y reemplazando la densidad por la densidad relativa $\frac{\rho}{\rho_{ref}}$ se obtiene la siguiente ecuación:

$$A = \left[\frac{\text{in}^2 (\text{psi})^{1/2}}{38 \text{gpm}} \right] \frac{Q_V}{C_o} \sqrt{\frac{\rho/\rho_{ref}}{\Delta P}} \quad (4.3)$$

Dónde

A= Es el área de alivio; [in^2]

Q_V =Es el flujo volumétrico a través del alivio; [gpm]

C_o =Es el coeficiente de descarga; [adimensional]

ρ/ρ_{ref} =Es la gravedad específica del líquido; [adimensional]

ΔP =Es la caída de presión a través del alivio; [lb_f/in^2]

Como puede suponerse el flujo a través de un relieve de tipo resorte es diferente al flujo a través del orificio de una válvula convencional. A medida que aumenta la presión, el resorte de alivio se comprime, aumentando el área de descarga y aumentando el flujo. Un orificio verdadero tiene un área fija. Además la ecuación

4.3 no considera la viscosidad del fluido. Muchos de los fluidos de proceso tienen altas viscosidades. El área de ventilación de alivio debe aumentar a medida que la viscosidad del fluido aumenta. Por último la ecuación 4.3 no considera el caso especial del fuelle equilibrado. La ecuación 4.3 ha sido modificada por el Instituto Americano del Petróleo (API) para incluir las correcciones para las situaciones anteriores. El resultado es:

$$A = \left[\frac{\text{in}^2(\text{psi})^{1/2}}{38\text{gpm}} \right] \frac{Q_V}{C_0 K_V K_P K_B} \sqrt{\frac{\rho/\rho_{\text{ref}}}{1.25 P_s - P_b}} \quad (4.4)$$

Dónde:

A= Es el área de alivio; [in²]

Q_V=Es el flujo volumétrico a través del alivio; [gpm]

C₀=Es el coeficiente de descarga; [adimensional]

K_V=Es la corrección por la viscosidad; [adimensional]

K_P= Corrección por la sobrepresión; [adimensional]

K_B=Es la corrección por la contrapresión; [adimensional]

ρ/ρ_{ref}=Es la gravedad específica del líquido; [adimensional]

P_s= Presión de ajuste; [lb_f/in²]

P_b= Es el indicador de contrapresión; [lb_f/in²]

Nótese que el término de ΔP de la ecuación 4.3 ha sido reemplazado por el término que involucra la diferencia entre la presión de ajuste y la contrapresión. La ecuación 4.4 parece suponer una presión máxima igual a 1.25 veces la presión establecida. La descarga y otra presión máxima se tiene en cuenta en el término de sobrepresión K_b. C₀ es el coeficiente de descarga. Si no se sabe a ciencia cierta el valor de este mismo se usa el valor de 0.61 para maximizar el área de ventilación de alivio.

La corrección por viscosidad k_v corrige las pérdidas adicionales por fricción resultantes de flujo de material de alta viscosidad a través de la válvula. Esta

corrección se puede ver en la figura 4.1. El área de alivio requerida aumenta con la viscosidad (número de Reynolds altos). Debido a que el número de Reynolds se requiere para determinar la corrección de viscosidad y porque el área de ventilación es necesaria para calcular el número de Reynolds, el procedimiento es iterativo. Para la mayoría de los alivios el número de Reynolds es mayor que 5,000 y la corrección es cerca de 1. Esta suposición se utiliza con frecuencia como una estimación inicial de los cálculos.

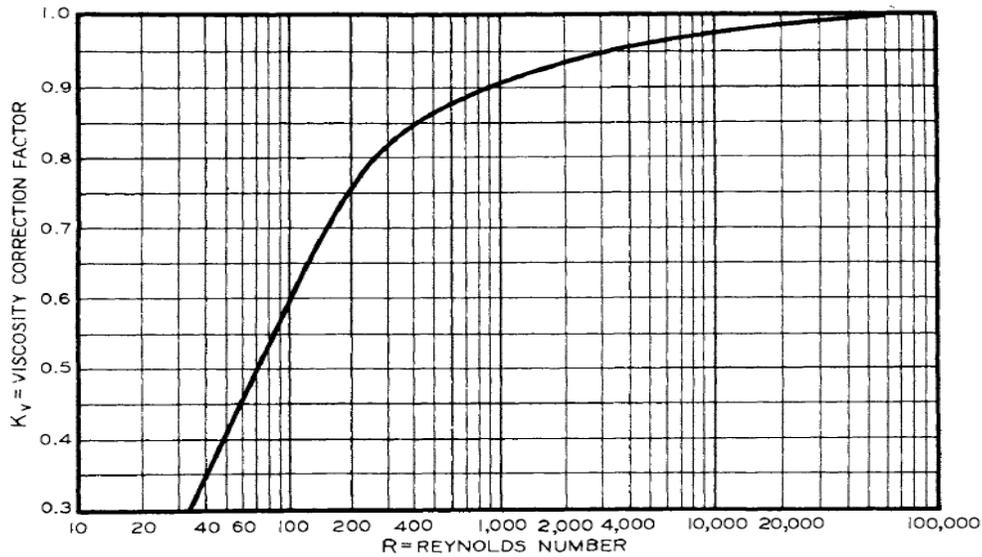


Figura 4.1 Corrección de viscosidad K_v para válvulas convencionales en servicio de líquidos. Fuente: API RP 520 Recommended Practice for the Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Systems in Refineries, 6th ed. (1993), p. 35.

Darby y Molavi, desarrollaron una ecuación para representar el factor de corrección de viscosidad, para no hacer uso de la figura anterior y se aplica solo a números de Reynolds superiores a 100:

$$K_v = 0.975 \sqrt{\frac{1}{\frac{170}{Re} + 0.98}} \quad (4.5)$$

Dónde:

K_v = Es el factor de corrección por viscosidad; [adimensional]

Re = Es el numero de Reynolds; [adimensional]

La corrección por la sobrepresión K_p incluye el efecto de la presión de descarga mayor que la presión de ajuste. Esta corrección se muestra en la figura 4.2 como una forma más sencilla para estimar este factor:

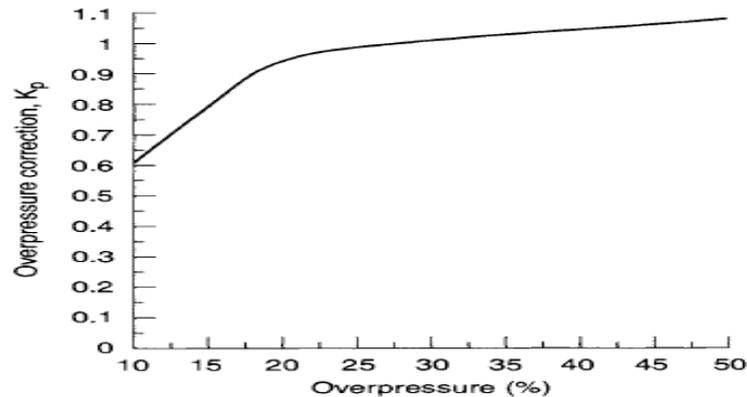


Figura 4.2. Corrección por sobrepresión (K_p) Fuente: API RP 520 Recommended Practice for the Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Systems in Refineries, 6th ed. (1993), p. 35.

La corrección por sobrepresión K_p , es una función de la sobrepresión especificada para el diseño. A medida que el exceso de presión se hace más pequeño, el valor de corrección disminuye, resultando un área de alivio más grande. El factor de corrección por sobrepresión se obtiene de la curva en la figura 4.2 que muestra hasta incluyendo el 25% de sobrepresión, la capacidad del dispositivo de alivio se ve afectada por un cambio en el área de descarga así como ascensores de válvulas, el cambio en el coeficiente de orificio de descarga y el cambio en sobrepresión.

Por encima del 25% la capacidad de la válvula es afectada sólo por el cambio en la sobrepresión porque el área de descarga de la válvula es constante y se comporta como un verdadero orificio. Las válvulas que operan a bajas presiones tienden a “chatter”, así sobrepresiones menores que 10% deberían ser evitadas.

La corrección por contrapresión K_b se utiliza solo para relieves de fuelles-equilibrados y esta es fácilmente estimada mediante la figura 4.3:

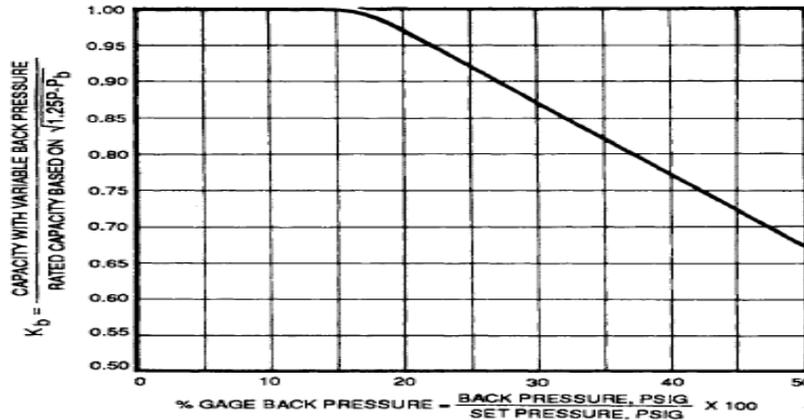


Figura 4.3. Corrección por contrapresión (K_b) para sobrepresiones de 25% en fueles balanceados para servicio de líquidos. Fuente: API RP 520 Recommended Practice for the Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Systems in Refineries, 6th ed. (1993), p. 35.

Ha habido muchas recomendaciones en cuanto a la estimación de esta área, aunque se tomen diferentes modelos lo importante es llegar a un resultado congruente y que tenga sentido físico, por lo que se presenta otra ecuación proporcionada por la API⁴⁷.

$$A = \frac{11.78 \cdot Q}{K_v K_c K_d K_w} \sqrt{\frac{G}{P_1 - P_2}} \quad (4.6)$$

Dónde:

A= Es el área de alivio; [mm²]

Q=Tasa de flujo; [l/min]

K_v =Es la corrección por la viscosidad; [adimensional]

K_d =Coeficiente de descarga; [adimensional]

0.65 cuando se instala con o sin disco de ruptura

0.62 para el diseño de disco de ruptura

K_w =Es la corrección por la contrapresión; [adimensional]

⁴⁷ Datta Arun, Process engineering and design using visual basic, (2008), CRC Press, U.S.A, Pág. 307-309

G=Es la gravedad específica del líquido a condiciones estándar; [adimensional]

P₁= Es la presión de relevo; [kPa_a]

P₂= Es la contrapresión; [kPa_a]

K_c= Factor de combinación

1 cuando no está instalado un disco de ruptura

0.9 con disco de ruptura instalado

K_v=Factor de corrección por viscosidad

$$K_v = \frac{1}{0.9935 * \frac{2.878}{Re^{0.5}} + \frac{324.75}{Re^{1.5}}} \quad (4.7)$$

Dónde el Número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{18800 * Q * G}{\mu \sqrt{A}} \quad (4.8)$$

Dónde:

Q= Flujo (l/min)

G= Es el peso específico del líquido a temperatura del agua en condiciones normales

μ=Viscosidad del líquido; [Cp]

A=Es el área de descarga requerida; [mm²]

La estimación puede realizarse con cualquiera de los dos modelos, y en general varían en el orden de unidades y consideraciones pero a fin de cuentas el resultado no debería variar, todo depende de los datos con los que se cuente y el buen manejo de ellos, cómo se verá más adelante al realizar estimaciones relacionadas con ello.

4.3 Válvula convencional, en servicio de vapor y gas ⁴⁸

Para muchas descargas de vapor a través de los sistemas de alivio el flujo es crítico. Sin embargo, la presión debe ser revisada para asegurarse de que es menor que la presión de estrangulamiento, usando la siguiente ecuación del gas ideal:

$$(Q_m)_{choked} = CoAP \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)(\gamma-1)}} \quad (4.9)$$

Dónde:

$(Q_m)_{choked}$ = Es la descarga del flujo másico; [lb_m/h]

Co= Es el coeficiente de descarga; [adimensional]

A= Es el área de descarga; [in²]

P= Es la presión absoluta arriba; [lb_f/ in²]

γ= Es la relación de capacidad calorífica para el gas; [adimensional]

g_c=Es la constante gravitacional; [ft lb_m/ lb_f s²]

M= Es el peso molecular del gas; [lb_m/lb-mol]

R_g= Es la constante del gas ideal; [ft lb_f/ lb-mol°R]

T= Es la temperatura absoluta de descarga; [°R]

La ecuación anterior se resuelve para el área de la válvula de alivio dado un determinado caudal másico Q_m:

$$A = \frac{Q_m}{CoP} \sqrt{\frac{T/M}{\frac{\gamma g_c M}{R_g T} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)(\gamma-1)}}} \quad (4.10)$$

Esta última ecuación se simplifica definiendo una función x:

$$x = \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)(\gamma-1)}} \quad (4.11)$$

⁴⁸ Crow Daniel A, et al. (2002), Chemical Process Safety: fundamentos with applications op. cit. Pág. 389-392

Luego, la zona de alivio de ventilación requerido para un gas ideal se estima utilizando una forma simplificada de la ecuación 4.7:

$$A = \frac{Q_m}{C_{ox}P} = \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (4.12)$$

Para gases no ideales la ecuación 4.9 se modifica, ya que en Ésta se incluye el factor de compresibilidad para representar un gas no ideal y que es un factor determinante que difiere a los gases ideales y no ideales, además que incluye una corrección k_b de contrapresión. La ecuación queda representada como:

$$A = \frac{Q_m}{C_{ox}K_bP} = \sqrt{\frac{Tz}{M}} \quad (4.13)$$

Dónde:

A= Es el área de alivio; [in²]

Q_m = Es el flujo de descarga; [lb_m/h]

C_o = Es el coeficiente efectivo de descarga, usualmente 0.975, [adimensional]

K_b = Es la corrección por la contrapresión; [adimensional]

P=Es la presión absoluta máxima de descarga; [Psia]

T= es la temperatura absoluta; [°R]

Z^{**} = es el factor de compresibilidad; [adimensional]

M= Es el promedio del peso molecular de la descarga del material; [lb_m/lb-mol]

La constante x representada en la ecuación 4.8 se puede estimar con la siguiente expresión:

$$x = 519.5 \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)(\gamma-1)}} \quad (4.14)$$

K_b es la corrección de contrapresión y depende del tipo de relieve utilizado, como ya se aludió antes, los valores se pueden estimar en la Figura 4.4 para relieves convencionales y en la Figura 4.5 para alivio de fuelle equilibrado:

** Ver anexo III, para diferentes presiones y temperaturas críticas.

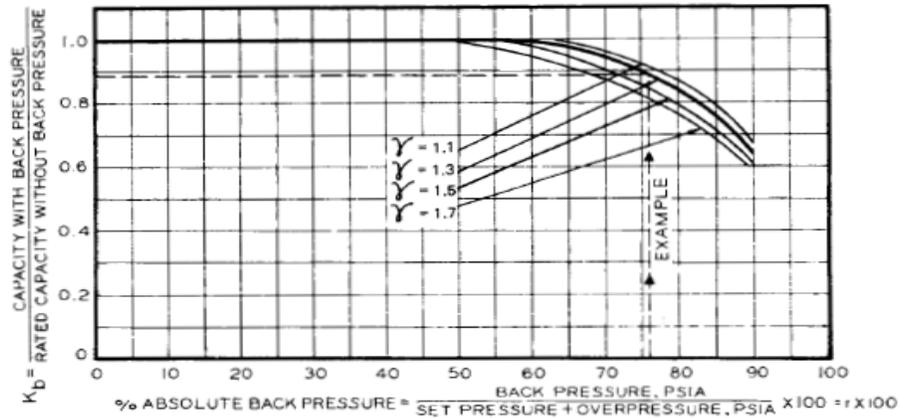


Figura 4.4. Corrección por contrapresión, para válvulas convencionales en servicio de vapor o gas. Fuente: API RP 520 Recommended Practice for the Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Systems in Refineries, 6th ed. (1993), p. 33.

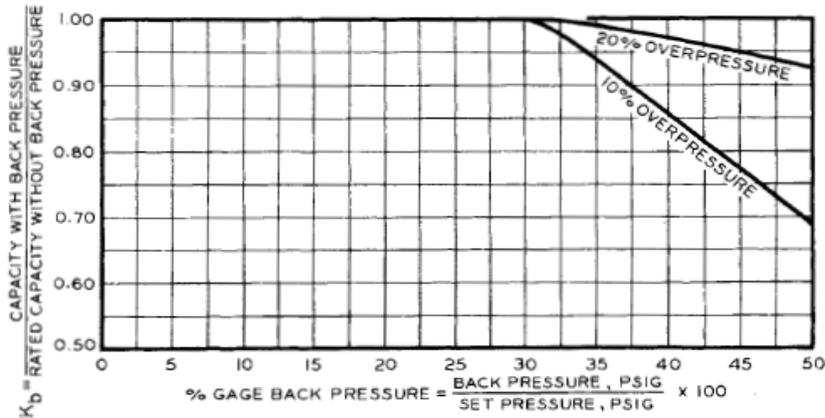


Figura 4.5. Corrección por contrapresión, para válvulas de fuelles balanceados en servicio de vapor o gas. Fuente: API RP 520 Recommended Practice for the Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Systems in Refineries, 6th ed. (1993), p. 29.

La presión utilizada en la ecuación 4.10 es la presión máxima absoluta para aliviar. Y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$P = P_{m\acute{a}x} + 14.7 \quad (4.15)$$

Dónde

$P_{m\acute{a}x}$ = Es la presión máxima medida; [psig]

Así, para alivio de vapor se recomiendan⁴⁹:

⁴⁹ ASME Boiler and Pressure Vessel Code (New York: American Society of Mechanical Engineers, 1998).

$$P_{\text{máx}} = 1.1 P_s \text{ para recipientes a presión no expuestos al fuego} \quad (4.16)$$

$$P_{\text{máx}} = 1.2 P_s \text{ para recipientes a presión expuestos al fuego} \quad (4.17)$$

$$P_{\text{máx}} = 1.3 P_s \text{ para tubería} \quad (4.18)$$

Dependiendo de la bibliografía, la ecuación general también queda representada como:

$$A = \frac{190.4 * W}{P_1 k_d k_b k_c k_N k_{SH}} \quad (4.19)$$

Dónde:

K_N = factor de corrección para la ecuación de Napier
 = 1 donde $P_1 > 10,339 \text{ kPa}_a$ y $22057 \leq \text{kPa}_a$

A = Área de descarga requerida; [mm^2]

W = Flujo; [kg / h]

T = Temperatura de alivio; [$^{\circ}\text{K}$]

Z = Factor de compresibilidad; [adimensional]

MW = Peso molecular del vapor; [$\text{lb}_m / \text{lb-mol}$]

K_d = Coeficiente de descarga, para el análisis preliminar

0,975 cuando PRV se instala con o sin disco de ruptura

0.62 para el disco de ruptura sólo

K_b factor de corrección = contrapresión, obtenido a partir de la figura 4.4 y 4.5

1 para PRV convencional y operada por piloto

1 si la contrapresión es menos de 30% de la presión de ajuste

C_0 = coeficiente de descarga, establecido como sigue:

$$C = 520 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (4.20)$$

K = Factor de combinación

4.4 Alivios con disco de ruptura en servicio de líquidos

Para alivios de líquidos a través de un disco de ruptura, en donde los diámetros de tuberías son pequeños y a bajo flujo, la ecuación que permite estimar el área de venteo está representado por la ecuación 4.2 y 4.3 para el flujo a través de un orificio de bordes.

$$A = \frac{Q_V}{C_0 \sqrt{2g_c}} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (4.2)$$

$$A = \left[\frac{\text{in}^2 (\text{psi})^{1/2}}{38 \text{gpm}} \right] \frac{Q_V}{C_0} \sqrt{\frac{\rho/\rho_{\text{ref}}}{\Delta P}} \quad (4.3)$$

Para estas ecuaciones no se sugieren correcciones.

Las ecuaciones mostradas anteriormente se usan para descargas de discos de ruptura directamente a la atmósfera. Para las descargas con discos de ruptura en un sistema de seguridad (que podría incluir tanques, depuradores, etc.) el disco de ruptura se considera una restricción de flujo, y el flujo total a través del sistema de la tubería debe ser considerado. El cálculo se realiza de forma idéntica a la tubería de flujo normal. El cálculo para determinar el área de un disco de ruptura es iterativo para cada caso. Isaacs⁵⁰ recomendó asumir que el disco de ruptura es equivalente a 50 diámetros de tubo en el cálculo.

4.5 Discos de ruptura en servicios de vapor o gas

El flujo de vapor a través del disco de ruptura se describe mediante una ecuación similar a la ecuación 4.10, pero sin los factores adicionales de corrección. El resultado es el siguiente:

$$A = \frac{Q_m}{xP} = \sqrt{\frac{Tz}{M}} \quad (4.21)$$

Esta ecuación asume un coeficiente de descarga C_0 igual a 1. Si existen contrapresiones desde los sistemas de alivio, se requiere un procedimiento similar

⁵⁰ Marx Isaacs, Pressure Relief Systems. Chemical Engineering (Feb. 22, 1971), pág, 113.

al usado para alivios de líquidos a través de un disco de ruptura se requiere. El procedimiento es iterativo.

4.6 Flujo a dos fases⁵¹

La situación más sencilla a manejar es que se presente un flujo de un fluido en una sola fase que puede ser un líquido, un vapor ó un gas, ya dependiendo de las condiciones y características del fluido se elegiría el tipo de relevo a emplear y el cálculo del orificio es particular a cada uno de estos, sin embargo la realidad es que en la mayoría de los procesos se cuentan con fluidos en distinto estado (fluidos bifásicos), y es a partir de esta premisa que se consideraran 4 escenarios diferentes para fluidos bifásicos y con ello se puede tomar en consideración cada una de sus características.

Tipo 1: Comprende un líquido saturado y vapor que entran a la PRV y tienen una vaporización instantánea (*“flashea”*), No hay gases no condensables presentes (aire, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, dióxido de carbono).

Tipo 2: Líquido altamente subenfriado y gas no condensable, vapor condensable, o ambos entran a la válvula y el líquido no *“flashea”*.

Tipo 3: Se trata de líquido sub-enfriado que *“flashea”* y no hay vapor condensable o gases no condensables.

Tipo 4: Comprende un gas no condensable o bien, vapor condensable y gas no condensable y también líquido sub-enfriado o saturado entran a la válvula y hacen *“flash”* o dicho de otra forma se vaporizan. El gas no condensable siempre está presente.

Por lo que a partir de estos tipos de flujos bifásicos el cálculo para el orificio de la PRV será realizado de manera particular, tomando en cuenta propiedades físicas:

⁵¹ Datta Arun, Process engineering and design using visual basic, (2008), CRC Press, U.S.A, Pág. 313-323

4.6. 1 Tipo 1

El cálculo depende directamente del punto nominal de ebullición de la mezcla. Si el rango es menor que 83°C el parámetro omega (ω) que representa: el punto de saturación de los fluidos, se estima utilizando la ecuación 4.14 ó 4.15. Si el rango nominal de ebullición es mayor que 83°C ó un sistema de un sólo componente está cerca del punto crítico, la ecuación 4.16 es usada para estimar el parámetro ω :

$$\omega = \frac{x_0 v_{v0}}{v_0} \left(1 - \frac{2P_0 v_{vl0}}{h_{vl0}} \right) + \frac{C_p T_0 P_0}{V_0} \left(\frac{v_{vl0}}{h_{vl0}} \right)^2 \quad (4.22)$$

$$\omega = \frac{x_0 v_{v0}}{v_0 k} + \frac{C_p T_0 P_0}{V_0} \left(\frac{v_{vl0}}{h_{vl0}} \right)^2 \quad (4.23)$$

$$\omega = 9 \left(\frac{v_9}{h_0} - 1 \right) \quad (4.24)$$

Dónde:

x_0 =Es la fracción masa de vapor en la entrada de la PRV

v_{v0} =Es el volumen específico del vapor a la entrada de la PRV, [m³/kg]

v_0 =Es el volumen específico del sistema bifásico en la entrada de la PRV, [m³/kg]

P_0 =Es la presión de relevo de la PRV, [kPa_a]

v_{vl0} =Corresponde a la diferencia entre el volumen específico del vapor y el líquido, [m³/kg]

h_{vl0} =Es el calor latente de vaporización estimado a las condiciones de relevo [kJ/kg]. Para sistemas multicomponentes la diferencia entre la entalpia específica del vapor y el líquido puede ser usada como el calor latente.

C_p =Corresponde a la constante de calor específico del líquido, [kJ/kg.K]

T_0 =Temperatura de relevo, [K]

k =Es la relación de calor específico del vapor

v_9 =Es el volumen específico del sistema bifásico, estimado a 90% de la presión de relevo, [m³/kg].

La relación de presión crítica y la presión crítica se estiman utilizando la siguiente ecuación:

$$\eta_c^2 + (\omega^2 - 2\omega)(1 - \eta_c)^2 + 2\omega^2 \ln \eta_c + 2\omega^2(1 - \eta_c) = 0 \quad (4.25)$$

$$P_C = \eta_c P_0 \quad (4.26)$$

Dónde:

P_C = Es la presión Crítica, [kPa_a]

η_c = Es la relación de presión Crítica

De igual manera la relación de la presión crítica y la presión crítica puede ser obtenida de la Figura 4.6, que se muestra a continuación:

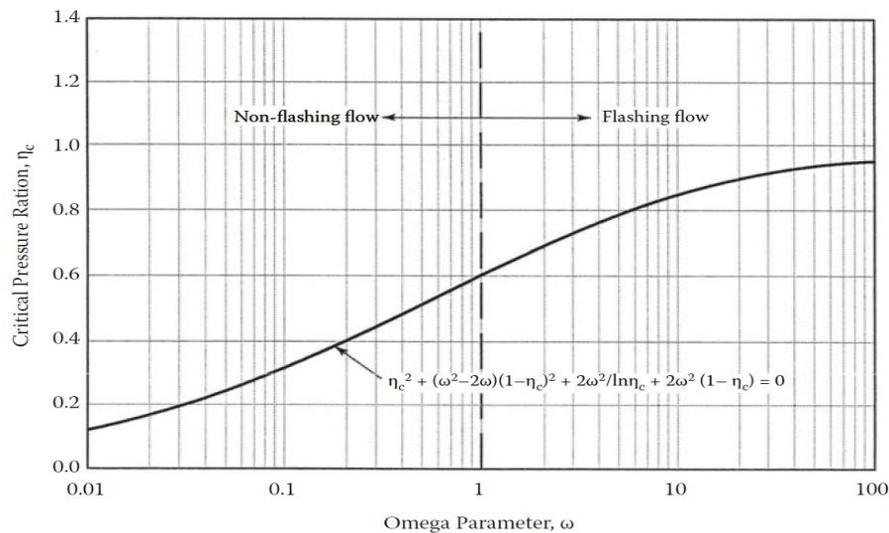


Figura 4.6. Correlación para boquillas, en un flujo Crítico para un sistema que flashea y no flashea. (Courtesy American Petroleum Institute, 1220 L Street, NW, Washington, D.C.)

Si la contrapresión es menor o igual a la presión crítica el fluido es crítico, por otro lado si la presión crítica es menor a la contrapresión, el fluido es subcrítico.

Considerando esto, con las ecuaciones 4.19 y 4.20 se puede estimar el flujo másico para los fluidos críticos y subcríticos:

Fluido Crítico:

$$G = 31.637 \eta_c \sqrt{\frac{P_0}{v_0 \omega}} \quad (4.27)$$

Fluido subcrítico:

$$G = \frac{31.637 \{-2[\omega \ln \eta_a + (\omega - 1)(1 - \eta_a)]\}^{0.5} \sqrt{\frac{P_0}{v_0}}}{\omega \left(\frac{1}{\eta_a} - 1\right) + 1} \quad (4.28)$$

Considerando la misma nomenclatura citada anteriormente.

Dónde:

η_a = La relación de contrapresión, estimada en el alivio de presión, P_a/P_0

De esta manera el área debe ser estimada como:

$$A = \frac{277.777W}{K_d K_b K_c G} \quad (4.29)$$

Dónde:

A = Área de descarga requerida [mm²]

W = Tasa de flujo másico [kg/h]

K_d = Coeficiente de descarga que se obtiene desde el fabricante de la válvula. Para una preliminar estimación se puede considerar que es igual a 0.85

K_b = Es el factor de corrección por contrapresión para fuelles balanceados que puede estimarse con la figura 4.3 antes mostrada

K_c = Es un factor de combinación. Es igual a 1 cuando no hay un disco de ruptura instalado, y es igual a 0.9 cuando hay un disco de ruptura instalado en combinación con una PRV

4.6. 2 Tipo 2

Para un sistema bifásico en donde no hay flasheo, el método para calcular el orificio de la PRV es el mismo que el que se usó para el tipo 1, la única variante es que el parámetro ω se calcula con la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{x_0 v_{vg0}}{v_0 k} \quad (4.30)$$

4.6. 3 Tipo 3

Para este tipo de sistema bifásico, al igual que en el tipo 1, el tipo 3 depende del intervalo nominal de ebullición. Si el intervalo nominal de ebullición es menor que 83°C, el parámetro ω , punto de saturación es estimado usando las ecuaciones que a continuación se citan.

La ecuación 4.23 se usa siempre y cuando el líquido este lejos de su punto crítico termodinámico (Temperatura reducida ≤ 0.9 y presión reducida ≤ 0.5).

$$w_s = \rho_{l0} C_p T_0 P_{s1} \left(\frac{v_{vls}}{h_{vls}} \right)^2 \quad (4.31)$$

Por otro lado, si el intervalo de ebullición nominal es mayor a 83°C o el líquido se encuentra cerca de su punto crítico termodinámico la ecuación para estimar el parámetro ω en el punto de saturación es la siguiente:

$$\omega_s = 9 \left(\frac{\rho_{l0}}{\rho_9} - 1 \right) \quad (4.32)$$

Dónde:

ρ_{l0} =La densidad del líquido en la PRV, a las condiciones de relevo, [kg/m³].

C_p =Es la capacidad calorífica del líquido en la PRV a las condiciones de relevo, [kJ/kg °C].

T_0 = Temperatura en la PRV a las condiciones de relevo, [K].

P_s = Presión de saturación correspondiente a la temperatura T_0 [kPa_a].

v_{vls} =Es la diferencia entre el volumen específico del vapor y el líquido a la presión de saturación, P_s , [m³/kg].

h_{vls} =Es el calor latente de vaporización, [kJ/kg].

ρ_9 =Es la densidad evaluada a 90% de la presión de saturación del vapor P_s , correspondiente a la temperatura T_0 , [kg/ m³].

P_{s1} =Es la presión de relevo [kPa_a].

La estimación de P_s , u_{vls} , h_{vls} , y ρ_9 se realiza mediante una estimación que involucra a todas estas variables. El procedimiento en forma general lo podemos ver:

- 1.- Considere la entrada del líquido a la temperatura T_0 .
- 2.- Ajustar la presión hasta que se alcanza el punto de ebullición. En los paquetes de simulación, la presión es estimada considerando a la fracción vapor como 0. La presión se estima en la presión de saturación P_s . Debido a que este cálculo se basa en el líquido subenfriado en la entrada del PRV, la presión de saturación (P_s) siempre será menor que la presión de descarga (P_0).
- 3.- Se puede realizar un cálculo rápido usando una pequeña fracción de vapor por ejemplo: 0.01, manteniendo la presión como P_s , la temperatura cambiará ligeramente.
- 4.- Si hay “flasheo” arriba (vapor=0.01 fracción mol), u_{vls} es estimada como la diferencia entre los volúmenes específicos entre el líquido y el vapor. Del mismo modo el calor latente de vaporización se establece como la diferencia entre las entalpías específicas de vapores y líquidos.
- 5.- La densidad se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_9 = (1 - x_9) * \rho_{l9} + x_9 * \rho_{v9} \quad (4.33)$$

Dónde:

x_9 =Es la fracción másica de vapor a 90% de la presión del punto de burbuja (P_s)

ρ_{l9} =Es la densidad del líquido a 90% de la presión del punto de burbuja, [kg/m³]

ρ_{v9} =Es la densidad de vapor a 90% de la presión de burbuja, [kg/m³]

Región subenfriada.

La región de subenfriamiento se define en base al punto de flasheo del líquido. En caso de una región baja de subenfriamiento el flasheo ocurre arriba y en caso de una región alta de subenfriamiento el flasheo ocurre abajo.

Región de bajo subenfriamiento:

$$P_{S1} > \eta_{st} * P_0 \quad (4.34)$$

Región de alto subenfriamiento:

$$P_{S1} < \eta_{st} * P_0 \quad (4.35)$$

Donde η_{st} es la relación de la presión de saturación de transición y se define como:

$$\eta_{st} = \frac{2\omega_s}{1+2\omega_s} \quad (4.36)$$

Flujo crítico:

La condición de flujo crítico depende de la región de subenfriamiento, como puede verse resumido a continuación:

Región de bajo subenfriamiento:

- Es flujo Crítico si: $P_C > P_a$
- Es flujo subcrítico si: $P_C < P_a$

Región de alto subenfriamiento:

- Es flujo Crítico si: $P_{s1} > P_a$
- Es flujo subcrítico si: $P_{s1} < P_a$

Dónde:

P_C = Presión crítica [kPa_a]

P_a = Contrapresión [kPa_a]

Para obtener el valor numérico de la presión crítica se requiere de un procedimiento sencillo, pero importante realizar:

1.- Estimar la relación de presión de saturación η_s como sigue:

$$\eta_s = P_{s1}/P_0 \quad (4.37)$$

2.- Mediante la figura 4.7, estableciendo el valor de η_c :

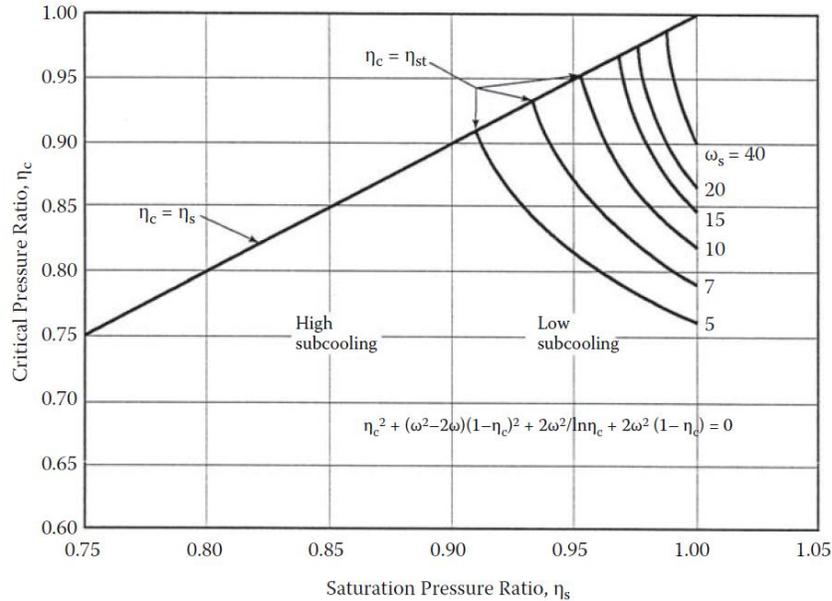


Figura 4.7. Correlación para obtener la relación de presión crítica para líquidos subenfriados. (Courtesy American Petroleum Institute, 1220 L Street, NW, Washington, D.C.)

3.- Finalmente la presión crítica queda dada por la siguiente ecuación:

$$P_C = \eta_C P_0 \quad (4.38)$$

Para poder estimar el área de venteo se requiere conocer el flujo, siendo esta una variable indispensable para determinar dicha área, sin embargo dado que tenemos un área por donde será el venteo en específico, es importante calcular el flux para cada uno de los tipos de flujo antes citados, en donde este nos representa el flujo que circula por un área conocida:

Para flujo Crítico:

$$G = \frac{31.637 \left\{ 2(1 - \eta_S) + 2 \left[\omega_S \eta_S \ln \left(\frac{\eta_S}{\eta_C} \right) - (\omega_S - 1)(\eta_S - \eta_C) \right] \right\}^{0.5}}{\omega_S \left(\frac{\eta_S}{\eta_a} - 1 \right) + 1} \sqrt{P_0 \rho_{l0}} \quad (4.39)$$

Para flujo Subcrítico:

$$G = \frac{31.637 \left\{ 2(1 - \eta_S) + 2 \left[\omega_S \eta_S \ln \left(\frac{\eta_S}{\eta_a} \right) - (\omega_S - 1)(\eta_S - \eta_a) \right] \right\}^{0.5}}{\omega_S \left(\frac{\eta_S}{\eta_a} - 1 \right) + 1} \sqrt{P_0 \rho_{l0}} \quad (4.40)$$

Flux másico en la región

Flujo crítico:

$$G = 44.745[\rho_{l0}(P_0 - P_{S1})]^{0.5} \quad (4.41)$$

Flujo subcrítico:

$$G = 44.745[\rho_{l0}(P_0 - P_a)]^{0.5} \quad (4.42)$$

Dónde:

η_S =Es la relación de presión de saturación; P_S/P_0

η_a =Es la relación de contrapresión; P_a/P_0

G =Es el flux másico; [kg/s m²]

Por lo que a partir de lo anterior se puede estimar el área de venteo como:

$$A = 277.777 \frac{Q\rho_{l0}}{K_a K_b K_c G} \quad (4.43)$$

Siendo la nomenclatura la misma que se ha venido empleando.

4.6. 4 Tipo 4

La fracción de vaporización de entrada α_0 es estimada como:

$$\alpha_0 = \frac{x_0 v_{vg0}}{v_0} \quad (4.44)$$

Dónde:

α_0 = Fracción de vaporización de entrada

x_0 =Fracción masa de la mezcla (gas y vapor) a las condiciones de relevo

v_{vg0} =Volumen específico de la mezcla gas y vapor a las condiciones de relevo [m³/kg]

v_0 =Volumen específico del sistema bifásico a las condiciones de relevo [m³/kg]

Para calcular el parámetro ω , y el flux se deben considerar dos escenarios diferentes, por las condiciones del sistema y estas se describen a continuación:

Escenario 1

Este escenario es aplicable si el sistema satisface las siguientes condiciones:

1. Contiene menos de 0.1% (w/w) de hidrógeno
2. El intervalo nominal de ebullición es menor que 83°C
3. Cualquier sistema en donde $P_{v0} < P_0$ es menor que 0.9 o $P_{g0} < P_0$ es más grande que 0.1
4. Lejos de su punto crítico termodinámico ($T_r \leq 0.9$ o $P_r \leq 0.5$)

Dónde:

P_{g0} = Presión parcial del gas no condensable en la PRV, a condiciones de alivio [kPa_a].

P_0 = Es la presión de relevo en la PRV]; [kPa_a].

P_{v0} = Es la saturación o la presión en el punto de burbuja correspondiente a T_0 , [kPa_a]. Esta estimación se realiza sin tener en cuenta cualquier gas condensable en el sistema.

Sólo en este caso el parámetro ω se estima como:

$$\omega = \frac{\alpha_0}{k} + (1 - \alpha_0) \rho_{l0} C_p T_0 P_{v0} \left(\frac{v_{vl0}}{h_{vl0}} \right)^2 \quad (4.45)$$

Dónde:

P_{v0} = Es la saturación o la presión en el punto de burbuja correspondiente a T_0 , [kPa_a]. Esta estimación se realiza sin tener en cuenta cualquier gas condensable en el sistema.

k ó γ = Relación de calores específicos de la combinación del gas y vapor.

ρ_{l0} = Densidad del líquido a las condiciones de relevo [kg/m³]

C_p =Es el calor específico del líquido en la PRV a las condiciones de relevo, [kJ/kg °C]

T_0 = Temperatura de relevo [K]

v_{vl0} =Es la diferencia entre el volumen específico del vapor (con exclusión de los gases condensables presentes), y el líquido a las condiciones de relevo [m³/kg]

h_{vl0} =Es el calor latente de vaporización, [kJ/kg]

La relación de presión crítica en donde no ocurre flash, η_{gc} , se calcula como sigue:

$$\eta_{vc}^2 + \left\{ \left(\frac{\alpha_0}{k} \right)^2 - \frac{2\alpha_0}{k} \right\} (1 - \eta_{gc})^2 + 2 \left(\frac{\alpha_0}{k} \right)^2 \ln \eta_{gc} + 2 \left(\frac{\alpha_0}{k} \right)^2 (1 - \eta_{gc}) = 0 \quad (4.46)$$

Por otro lado la relación de presión crítica donde hay flash, η_{gc} , se estima de la siguiente manera:

$$\eta_{vc}^2 + (\omega^2 - 2\omega)(1 - \eta_{vc})^2 + 2\omega^2 \ln \eta_{vc} + 2\omega^2(1 - \eta_{vc}) = 0 \quad (4.47)$$

La fracción mol para gases no condensables se estima de la siguiente manera:

$$y_{g0} = \frac{P_{g0}}{P_0} \quad (4.48)$$

Mientras que a presión crítica se estima como sigue:

$$P_C = \{y_{g0}\eta_{gc} + (1 - y_{g0})\eta_{gc}\}P_0 \quad (4.49)$$

Considerando que:

Se trata de un flujo crítico si: $P_C \geq P_a$

Se trata de un flujo subcrítico si: $P_C < P_a$

Donde:

P_c = presión Crítica, [kPa_a].

P_a = Es la contrapresión, [kPa_a].

A partir de lo anterior se puede calcular el flux para un flujo crítico:

$$G = 31.637 \left[\frac{P_0}{v_0} \left\{ \frac{y_{g0} \eta_{gc}^2 k}{\alpha_0} + \frac{(1-y_{g0}) \eta_{gc}^2}{\omega} \right\} \right]^{0.5} \quad (4.50)$$

Dónde:

G= Flux; [kg/s m²]

Para estimar el flux para un flujo subcrítico,

$$\eta_a = y_{g0} \eta_g + (1 - y_{g0}) \eta_v \quad (4.51)$$

$$\frac{\alpha_0}{k} \left(\frac{1}{\eta_g} - 1 \right) = \omega \left(\frac{1}{\eta_v} - 1 \right) \quad (4.52)$$

Dónde:

η_g = Relación de la presión parcial para un sistema donde no ocurre flash.

η_v = Relación de la presión parcial para un sistema donde ocurre un flasheo.

η_{sa} = Relación de contrapresión, P_a/P_0 .

P_a = Es la contrapresión, [kPa_a].

Por lo que el flux másico para un sistema en donde no hay un flasheo se estima como sigue:

$$G_g = \frac{31.367 \left\{ -2 \left[\frac{\alpha_0}{k} \ln \eta_g + \left(\frac{\alpha_0}{k} - 1 \right) (1 - \eta_g) \right] \right\}^{0.5} \sqrt{\frac{P_0}{v_0}}}{\frac{\alpha_0}{k} \left(\frac{1}{\eta_g} - 1 \right) + 1} \quad (4.53)$$

Mientras que para un sistema donde ocurre un flasheo el flux se estima de la siguiente manera:

$$G_v = \frac{31.367 \left\{ -2 \left[\omega \ln \eta_v + (\omega - 1) (1 - \eta_v) \right] \right\}^{0.5} \sqrt{\frac{P_0}{v_0}}}{\omega \left(\frac{1}{\eta_v} - 1 \right) + 1} \quad (4.54)$$

Por lo que finalmente obtenemos:

$$G = \left\{ y_{g0} G_g^2 + (1 - y_{g0}) G_v^2 \right\}^{0.5} \quad (4.55)$$

Dónde:

G_g =Flux másico cuando no hay flasheo; [kg/s m²]

G_v =Flux másico cuando hay flasheo; [kg/s m²]

G = flux másico; [kg/s m²]

Escenario 2.

Este escenario es aplicable si el sistema satisface una de las siguientes condiciones:

1. Contiene menos de 0.1% (w/w) de hidrógeno
2. El intervalo nominal de ebullición es menor que 83°C
3. Cualquier sistema en donde $P_{v0} < P_0$ es menor que 0.9 o $P_{g0} < P_0$ es más grande que 0.1
4. Lejos de su punto crítico termodinámico ($T_r \leq 0.9$ o $P_r \leq 0.5$)

El parámetro ω se estima como sigue:

$$\omega = 9 \left(\frac{v_g}{v_0} - 1 \right) \quad (4.56)$$

Dónde:

v_g =El volumen específico evaluado a 90% de las PRV a la presión de relevo [m³/kg], evaluado a través de un cálculo de flash isotrópico.

La relación de presión crítica es estimada de la siguiente manera:

$$\eta_c^2 + (\omega^2 - 2\omega)(1 - \eta_c)^2 + 2\omega^2 \ln \eta_c + 2\omega^2(1 - \eta_c) = 0 \quad (4.57)$$

La presión Crítica se estima con la siguiente ecuación:

$$P_c = \eta_c P_0 \quad (4.58)$$

Cabe mencionar también las restricciones:

Se trata de un flujo crítico si: $P_c \geq P_a$

Se trata de un flujo subcrítico si: $P_c < P_a$

Dónde:

P_c = presión Crítica, [kPa_a].

P_a = Es la contrapresión, [kPa_a].

A partir de lo anterior se puede calcular el flux para un flujo crítico:

$$G = 31.637\eta_c \sqrt{\frac{P_0}{v_0\omega}} \quad (4.59)$$

Y para un flujo subcrítico se obtiene como:

$$G_v = \frac{31.367\{-2[\omega \ln \eta_a + (\omega - 1)(1 - \eta_a)]\}^{0.5}}{\omega \left(\frac{1}{\eta_a} - 1\right) + 1} \sqrt{\frac{P_0}{v_0}} \quad (4.60)$$

Dónde:

G = Flux; [kg/s m²]

η_a =Relación de contrapresión; P_a/P_0

Y finalmente es posible estimar el área efectiva de descarga como:

$$A = \frac{277.777W}{K_d K_b K_c G} \quad (4.61)$$

Donde:

A = Es el área efectiva de descarga; [mm²]

W = Tasa de flujo másico, [kg/h]

Las variables que aparecen en la ecuación anterior ya han sido definidas antes.

El cálculo analítico para el orificio de las válvulas de alivio de presión se vuelve cada vez más complejo, esto dependiendo de cada una de las variables que impliquen la formulación de un modelo matemático que permita tomar en cuenta todas las condiciones, por ello se han ido generando alternativas que permitan realizar estas estimaciones con mayor facilidad y que a su vez sean lo más confiables posible.

Actualmente la selección de una válvula resulta un paso de vital importancia, sin embargo muchos proveedores de las mismas ya cuentan con catálogos que

permiten hacer una elección adecuada, por lo que el punto crucial radica en la especificación de la misma, es decir el cálculo del área de alivio de la válvula, razón por la cual un cálculo analítico para un proceso que requiere muchas válvulas dentro del mismo se vuelve complejo y en ocasiones confuso, por lo que muchas empresas utilizan software especializados que permitan realizar la estimación con una reducción de tiempos para los mismos.

Sin embargo no deja de ser importante saber de principio a fin el procedimiento que permite tener una estimación.

A continuación se realizará el cálculo analítico para cada uno de los casos mencionados anteriormente:

4.7 Servicio líquido

A partir de los modelos matemáticos ya desarrollados anteriormente se calcularon las áreas de venteo para cada uno de los escenarios que se han mencionado a lo largo del presente, y se realizaron analíticamente para agua, en estado líquido.

Para ello se necesitan algunos datos:

- Fluido.
- Tipo de escenario.
- Tipo de válvula de relevo (de acuerdo a las condiciones que se conocerán previamente).
- Flujo que se maneja en la línea.
- Presión de ajuste.
- Contrapresión
- Porcentaje de sobrepresión

Para esto se contaba con datos de flujo de un tanque de almacenamiento los datos eran:

Fluido: **Agua**

Servicio: **Líquido**

Flujo: **200 gpm**

Presión de ajuste: **200 psig**

Sobrepresión: **10%, 25 %**

Y a partir de esto, se procedió al cálculo y los resultados pueden verse resumidos en la Tabla 4.1:

Tipo	Qv(gpm)	G	Presión de ajuste (P1) psig	Contrapresión (P2)psig	ΔP (psig)	% sobrepresión	C ₀	K _v	K _p	K _b	Área (in ²)
Convencional	200	1	200	20	180	10	0.61	1	0.6	1	0.94
Fuelle	200	1	200	20	180	10	0.61	1	0.61	1	0.93
Disco de ruptura	200	1	200	20	180	10	0.61				0.64
Convencional	200	1	200	40	160	25	0.61	1	1	1	0.59
Fuelle	200	1	200	40	160	25	0.61	1	1	0.97	0.61
Disco de ruptura	200	1	200	40	160	25	0.61				0.68
Convencional	200	1	300	25	275	10	0.61	1	0.61	1	0.75
Fuelle	200	1	300	25	275	10	0.61	1	0.61	1	0.60
Disco de ruptura	200	1	300	25	275	10	0.61				0.52

Tabla. 4.1 Cálculo analítico del orificio de alivio de una válvula de alivio de presión para servicio de líquido.



Cálculos



Datos

Para ello se contaba con la información antes mencionada.

El Coeficiente de descarga, C₀, se considero 0.61, ya que si no se cuenta con él, se puede asumir como tal, esto a partir de experimentaciones que se han hecho.

K_v, el coeficiente de corrección por viscosidad, y como se vio para Reynolds mayores a 100 puede estimarse con la ecuación 4.5, tomándose en cuenta que:

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds; [adimensional]

ρ= Es la densidad del fluido; [lb/in²]

D= Es el diámetro de la tubería; [in]

v = Es la velocidad característica del fluido; [in/s²]

μ =Es la viscosidad del fluido; [lb/s²in]

O bien también se puede definir como:

$$Re = \frac{18800 * Q * G}{\mu \sqrt{A}}$$

Donde:

Q= Flujo; [l/mim]

G= Es el peso específico del líquido a temperatura del agua en condiciones normales

μ =Viscosidad del líquido; [Cp]

A=Es el área de descarga requerida; [mm²]

Además, en este caso en particular no se contaba con el valor de Re, pero se sabe que

- Para valores de $Re < 2000$ el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas, que interactúan sólo en función de los esfuerzos tangenciales existentes. Por eso a este flujo se le llama flujo laminar.
- Para valores de $2000 \leq Re \leq 4000$ el régimen se denomina de transición
- Para valores de $Re \geq 4000$ el régimen es llamado turbulento, es decir caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

Además, se cuenta con un flujo de 200 gpm por lo que se puede asumir que el Reynolds será más grande que 5000, así se puede aproximar $K_v=1$, a partir de la gráfica 4.1.

Para obtener el valor de corrección por sobrepresión se tomó en cuenta el porcentaje de sobrepresión y a partir de este y empleado la gráfica 4.2 se pudo obtener K_p .

Por otro lado, para obtener K_b , que representa el valor de corrección por contrapresión, se utilizó la gráfica 4.3 para fuelles balanceados, mientras que para válvulas convencionales este valor no afecta y se consideró 1. Cabe destacar que se tienen valores de 1 puesto que el valor de presión de ajuste y contrapresión influye al obtenerlo, y en los casos presentados se obtuvo lo mismo.

Para estimar el área que se requiere usando un disco de ruptura se empleó la ecuación 4.3.

Como puede verse en la tabla el área de venteo requerida para una válvula convencional es menor que para una válvula de fuelle, y esto es debido a el resorte en el caso de la válvula de fuelle que impide el flujo salga a la misma velocidad, mientras que para un disco de ruptura esta área es aún menor, y como puede apreciarse en todos los casos lo que importa también es el factor de contrapresión resultando una variable predominante en la estimación, ya que a medida que aumenta la sobrepresión el área de venteo requerida disminuye.

De igual manera se realizó un cálculo similar con la ecuación alterna y los resultados fueron los siguientes.

Fluido: **Agua**

Servicio: **Líquido**

Tipo	Q(l/min)	G	Presión de Relevo (P1) kPa	Contrapresión (P2)kPa	ΔP (kPa _a)	K_w	K_v	K_c	K_d	Área (mm ²)
Convencional	757.08	1	1711.18	136.89	1574.29	1	1	1	0.65	0.685
Fuelle	757.08	1	1711.18	136.89	1574.29	1	1	1	0.65	0.685
Disco de ruptura	757.08	1	1711.18	136.89	1574.29	1	1	0.9	0.62	0.502
Convencional	757.08	1	1711.18	273.79	1437.39	1	1	1	0.65	0.710
Fuelle	757.08	1	1711.18	273.79	1437.39	1	1	1	0.65	0.710
Disco de ruptura	757.08	1	1711.18	273.79	1437.39	1	1	0.9	0.62	0.525
Convencional	757.08	1	1711.18	171.11	1540.07	1	1	1	0.65	0.691
Fuelle	757.08	1	1711.18	171.11	1540.07	1	1	1	0.65	0.691

Disco de ruptura	757.08	1	1711.18	171.11	1540.07	1	1	0.9	0.62	0.508
------------------	--------	---	---------	--------	---------	---	---	-----	------	-------

Tabla. 4.2 Cálculo analítico del orificio de alivio de una válvula de alivio de presión para servicio de líquido.



Cálculos



Datos

Los resultados varían en magnitud considerable dado a las consideraciones que se hicieron la momento de realizar los cálculos. Se observa una desviación mínima de acuerdo a las consideraciones que se hacen en cada una de ellas.

4.8 Servicio vapores o gases

En este caso se requieren datos distintos al alivio de líquidos como se vio en el desarrollo de los modelos matemáticos citados anteriormente, los datos necesarios son:

- Fluido
- Tipo de escenario
- Tipo de válvula de relevo (de acuerdo a las condiciones que se conocerán previamente)
- Flujo que se maneja en la línea
- Presión de ajuste
- Contrapresión
- Porcentaje de sobrepresión
- Temperatura
- Diámetro de la tubería por la que circula el fluido (o algún dato que permita estimar este)

Además se requieren datos de propiedades físicas del fluido tales como:

- Peso molecular
- Coeficiente de dilatación adiabática

- Factor de compresibilidad

Y a continuación se procedió a realizar el cálculo para diferentes circunstancias y variando entre un fuelle balanceado y una válvula convencional, y dependiendo de si se contaba con disco de ruptura o no. Como paso previo se calculó la descarga del flujo másico para comprobar que sea menor que la presión de choque:

Datos:

Servicio:	Gas/Vapor
Flujo (Qv/ gpm): :	200
Presión de ajuste (psig) :	50
PRESION atm:	1.033
Contrapresión (psig)	20
Delta P(psig)	30
% Sobrepresión	10
C₀	1
T (°R)	530
Presión máx.	150

Propiedades

Diámetro de línea	6
gc (lb_m/lb_f s²)	32.17
Rg(ftlb_m/lb_f s²)	1545

Se realizó el cálculo de Q_m de choque para diferentes gases a partir de la ecuación 4.6, antes citada. Se obtuvieron los datos necesarios de diferentes referencias bibliográficas:

Se realiza para:

- Nitrógeno
- Agua
- Metano
- Propano
- Butano

Servicio	Fluido	Tipo	Ad(in ²)	y ⁵²	M(lb _m /lb-mol)	Qm(lbmol/s) _{cho}	Qm(lbmol/s) _{cho}
Gas	Nitrógeno	Fuelle	28.27	1.4	28	105.76	380724.77
Gas	Nitrógeno	Convencional	28.27	1.4	28	105.76	380724.77
Gas	Nitrógeno	Disco de ruptura	28.27	1.4	28	105.76	380724.77
Vapor	Agua	Fuelle	28.27	1.31	18	82.85	298273.98
Vapor	Agua	Convencional	28.27	1.31	18	82.85	298273.98
Vapor	Agua	Disco de ruptura	28.27	1.31	18	82.85	298273.98
Gas	Metano	Fuelle	28.27	1.32	16	78.32	281967.19
Gas	Metano	convencional	28.27	1.32	16	78.32	281967.19
Gas	Metano	Disco de ruptura	28.27	1.32	16	78.32	281967.19
Gas	Etano	Fuelle	28.27	1.22	30	104.30	375471.82
Gas	Etano	convencional	28.27	1.22	30	104.30	375471.82
Gas	Etano	Disco de ruptura	28.27	1.22	30	104.30	375471.82
Gas	Propano	Fuelle	28.27	1.15	44	123.65	445136.39
Gas	Propano	convencional	28.27	1.15	44	123.65	445136.39
Gas	Propano	Disco de ruptura	28.27	1.15	44	123.65	445136.39
Gas	Butano	Fuelle	28.27	1.11	58	140.14	504516.18
Gas	Butano	convencional	28.27	1.11	58	140.14	504516.18
Gas	Butano	Disco de ruptura	28.27	1.11	58	140.14	380724.77

Tabla. 4.3 Obtención de Q_m para el cálculo del orificio del alivio de presión en servicio de gas/ vapor.



Cálculos



Datos

El área se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * 6^2}{4} = 28.27in^2$$

La presión máxima absoluta para aliviar se obtuvo mediante la ecuación 4.12 antes citada:

⁵² Crane, Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, Editorial McGraw-Hill, 1985, México, Sección I-8.

$$P = 150 + 14.7 = 164.7 \text{psia}$$

Posteriormente se realizó la estimación para cada caso: fuelle, convencional o con disco de ruptura.

Para los dos primeros casos lo que variaba además de sus propiedades físicas, era el factor de corrección por contrapresión (K_b), para fuelle se obtuvo a partir de la figura 4.5 y para el convencional se obtuvo a partir de la figura 4.4 antes mostradas.

Servicio	Fluido	Tipo	x	K_b	z^{53}	Área (in ²)
Gas	Nitrógeno	Fuelle	355.718	0.86	1	7.968
Gas	Nitrógeno	Convencional	355.718	1	1	6.852
Gas	Nitrógeno	Disco de ruptura	355.718		1	5.746
Vapor	Agua	Fuelle	347.578	0.86	0.235	3.862
Vapor	Agua	Convencional	347.578	1	0.235	3.322
Vapor	Agua	Disco de ruptura	347.578		0.235	2.785
Gas	Metano	Fuelle	348.508	0.86	0.286	4.261
Gas	Metano	convencional	348.508	1	0.289	3.684
Gas	Metano	Disco de ruptura	348.508		0.289	3.089
Gas	Etano	Fuelle	338.915	0.86	0.279	4.209
Gas	Etano	convencional	338.915	1	0.279	3.619
Gas	Etano	Disco de ruptura	338.915		0.279	3.035
Gas	Propano	Fuelle	331.773	0.86	0.276	2.066
Gas	Propano	convencional	331.773	1	0.276	1.180
Gas	Propano	Disco de ruptura	331.773		0.276	3.054
Gas	Butano	Fuelle	327.518	0.86	0.274	3.497
Gas	Butano	convencional	327.518	1.00	0.274	3.097
Gas	Butano	Disco de ruptura	327.518		0.274	3.007

Tabla. 4.4 Cálculo analítico del orificio de alivio de una válvula de alivio de presión para servicio de gas y/o vapor.



Cálculos



Datos

⁵³ Smith, J.M., (1996), Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química, 4ª edición, McGraw-Hill, México, Página 725.

En este caso la presión máxima se obtiene con la ecuación 4.13 antes citada

$$P_{\text{máx}} = 1.1 P_s$$

$$P_{\text{máx}} = 1.1 * 50 = 55 \text{ psig} + 14.7 = 69.7 \text{ psia}$$

A partir de ella y de k_b se obtiene el área necesaria de venteo como puede observarse resumido en la tabla 4.3, en donde de igual manera se observa que la menor área que se requiere es en el caso de disco de ruptura, e igualmente que en el caso de servicio de líquidos el área mayor es para fuelles, ya que aquí la contrapresión afecta

Los resultados que se compararán son:

Datos:

Servicio:	Vapor sobrecalentado
Fluido	Agua
Flujo (kg/h)	20000
Presión de ajuste (kPa)	1100
% Sobrepresión	10
Presión de relevo (kPa)	1311
K ó γ	1.31
z	0.229

Fluido: **Agua**

Servicio	Tipo	C₀	k_d	k_b	k_c	MW	K_{sh}	K_N	A (mm²)
Vapor	Convencional	347.913	0.975	1	1	18			1526.87
Vapor	Disco de ruptura	347.913	0.620	1	0.9	18			2667.92
Vapor/sobrecalentado	Convencional		0.975	1	1	18	1	1	3152.52
Vapor/sobrecalentado	Disco de ruptura		0.620	1	0.9	18	1	1	5508.44

Tabla. 4.5 Cálculo analítico del orificio de alivio de una válvula de alivio de presión para servicio de gas y/o vapor.

Como puede verse los valores cambian, en donde se observa que para un servicio de líquido las áreas requeridas son menores, esto dependerá definitivamente de las condiciones que se presenten en cada situación.

4.9 Flujo a dos fases

4.9.1 Tipo I & Tipo II

Se realizó de igual manera el cálculo para estos escenarios haciendo uso de los modelos matemáticos antes mostrados, los valores iniciales se obtuvieron de la lietarura.

Servicio: **Tipo I**

Fluido: **Agua**

Tipo I:

Tipo	ω	v_{l0}	v_{v0}	x_0	x_0	C_p	k	k_d	k_c	k_b	G	A (mm ²)
Convencional	<83°C	0.002	0.091	0.409	18	2.555	1	0.85	1	1	1684	3830
Disco de ruptura	<83°C	0.620	1.000	0.900	18	2.555	1	1.00	1	1	1684	4562

Tabla. 4.6 Cálculo analítico del orificio de alivio de una válvula de alivio de presión para servicio Tipo I

Tipo II:

Tipo	ω	v_{l0}	v_{v0}	x_0	x_0	C_p	k	k_d	k_c	k_b	G	A (mm ²)
Convencional	<83°C	0.022	0.091	0.370	18	2.555	1	0.95	1	1	1684	3950
Disco de ruptura	<83°C	0.527	1.000	0.950	18	2.555	1	1.00	1	1	1684	4876

Tabla. 4.7 Cálculo analítico del orificio de alivio de una válvula de alivio de presión para servicio Tipo II.

Como puede verse en los cálculos realizados se requieren datos y que estos datos sean utilizados adecuadamente, sin embargo realizar las estimaciones una por una se vuelve un proceso complejo y poco asequible. Cabe mencionar que las industrias no podrían realizar estas estimaciones manualmente por lo que utilizan para ello software especializados, algunos de difícil manejo y otros más accesibles, pero la importancia estriba en contar con todos ellos ya que si uno falta la estimación es imposible y si se asume un valor incierto se corre el riesgo de la válvula falle y ocurra un siniestro.

A continuación se muestran los cálculos realizados con EES.

Capítulo 5

5.1 Determinación del área de venteo mediante EES (Engineering Equations Solver)

Sin lugar a duda el cálculo analítico del área de venteo de una válvula de alivio es importante, ya que a partir de este es posible obtener un panorama general, y con ello conocer a detalle cada una de las variables que intervienen dentro de esta estimación, pero el realizar cálculos analíticos se vuelve complejo y poco eficiente, ya que no se requiere sólo una. Para ello actualmente se cuenta con software especializados en hacer estas estimaciones, los hay desde muy sofisticados y por lo tanto altos en costos, y también los hay menos sofisticados y que de igual forma permiten realizar esta estimación de manera muy aproximada.

Se usó EES (Engineering Equations Solver), un software capaz de resolver ecuaciones algebraicas tanto lineales como no lineales simultáneas, este resultó ser un programa muy útil ya que además de ser de fácil manejo se obtuvieron resultados muy aproximados a los ya calculados, y además una vez entendidos los códigos necesarios para la programación la estimación se realiza más rápido.

La principal ventaja de este software frente a otros es que proporciona muchas funciones especializadas y almacena propiedades termodinámicas, lo que evita que se deba realizar el cálculo a mano. Además identifica automáticamente y agrupa ecuaciones que deben ser resueltas simultáneamente, este rasgo simplifica el proceso para el usuario y asegura que el programa siempre operará con la eficiencia óptima. No obstante, permite introducir tablas paramétricas para generar gráficos los cuales sirven de apoyo para los cálculos. El software se basa en códigos los cuales permiten introducir ecuaciones de cualquier tipo.

Cabe mencionar que también es posible elegir el sistema de unidades en el que se desea trabajar, y se pueden ir ajustando a lo largo de la programación. Además, se pueden especificar los límites para ayudar al proceso iterativo de solución de problemas y con esto ayudar a EES para encontrar una solución con

éxito. EES guarda ciertas similitudes con FORTRAN 90 y Pascal, diferenciándose entre estos por ser de un manejo más fácil.

Se realizaron los mismos cálculos manuales y variaban entre ellos por su metodología dependiendo del escenario que se presentará, a continuación se presentan los resultados obtenidos. Se utilizó EES versión 6.804:

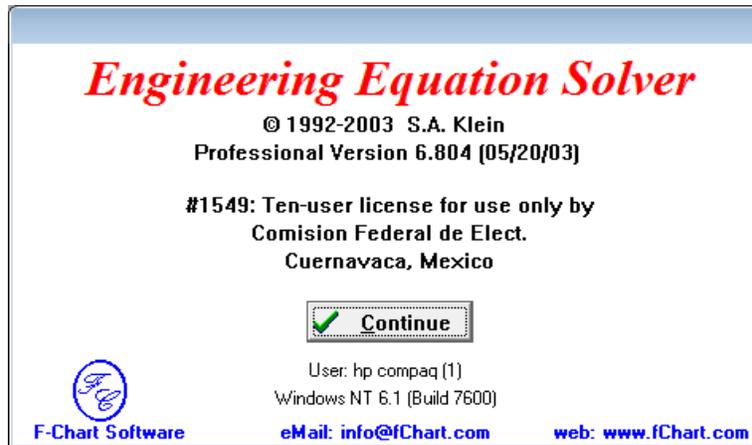


Figura 5.1. EES versión 6.804.

Al hacer click en “continue” es posible crear un nuevo archivo y comenzar a colocar los comandos necesarios respectivos a cada estimación, la pantalla que se muestra a continuación es donde se colocaran las ecuaciones y comandos:

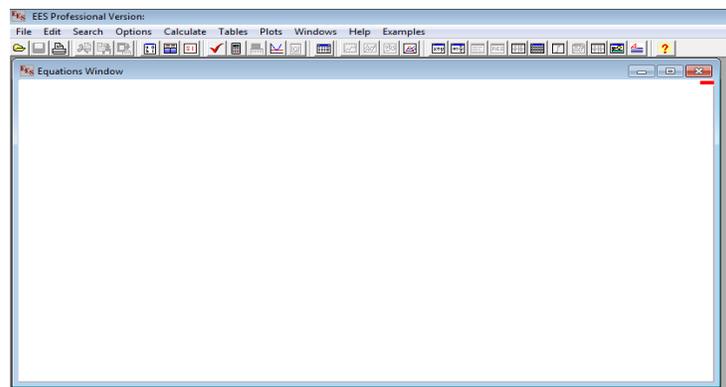
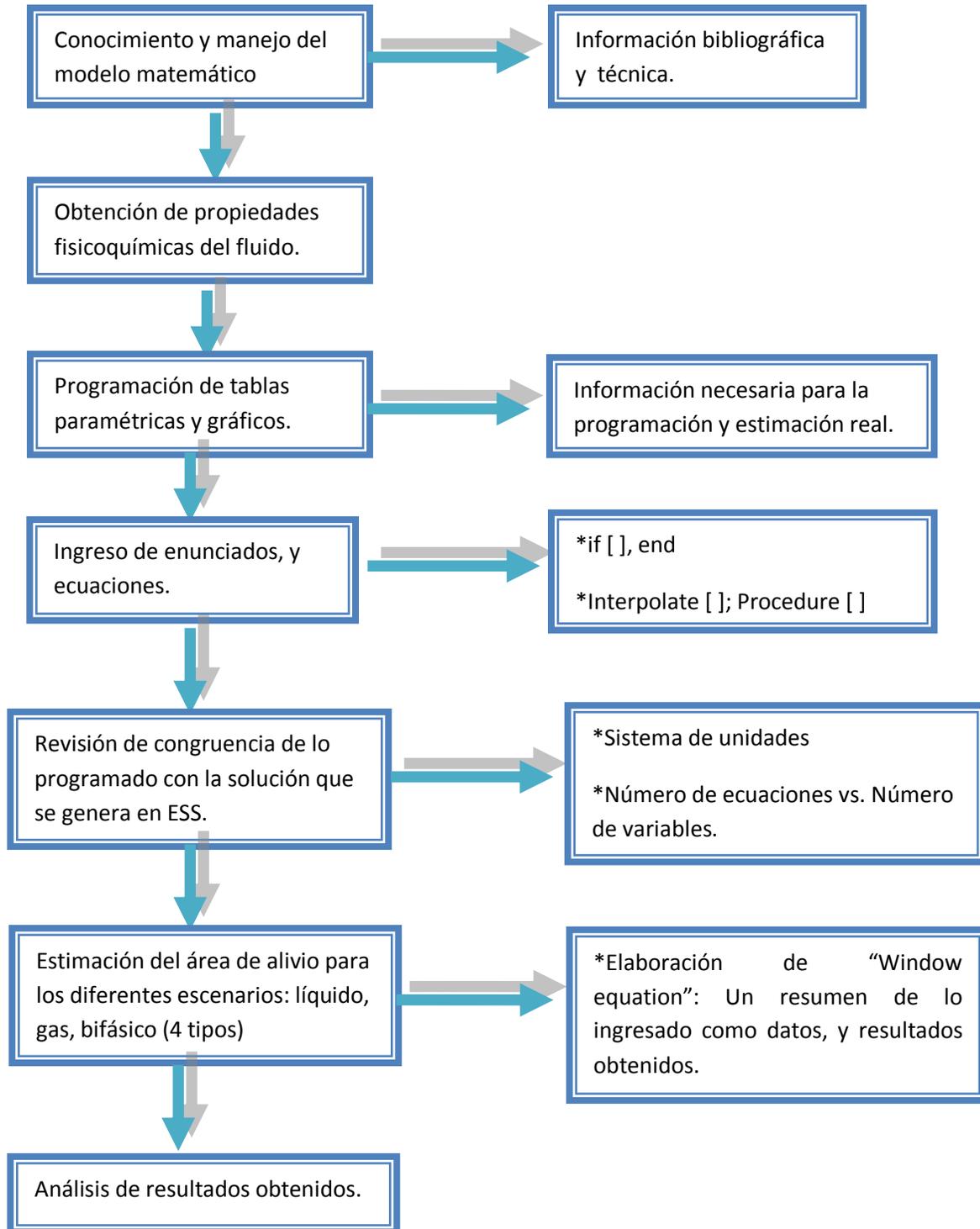


Figura 5.1.2 Pantalla de inicio del software.

Si se trata de generar una metodología acerca del cálculo realizado en este software, ésta puede verse resumida en el siguiente diagrama:

5.1.1 Metodología



Una vez realizado esto se comenzó a introducir los datos necesarios para cada escenario.

5.2 Servicio de líquidos

En este caso se cuenta con algunos datos que necesitan ser obtenidos de gráficos, por ello es necesario introducir ciertas tablas que permitan tenerlas dentro del programa y que sea posible hacer referencia a ellas para obtener los mismos. Se realizaron los gráficos en Excel y en el programa, incluso es posible exportar los datos desde Excel, una facilidad más que ofrece EES:

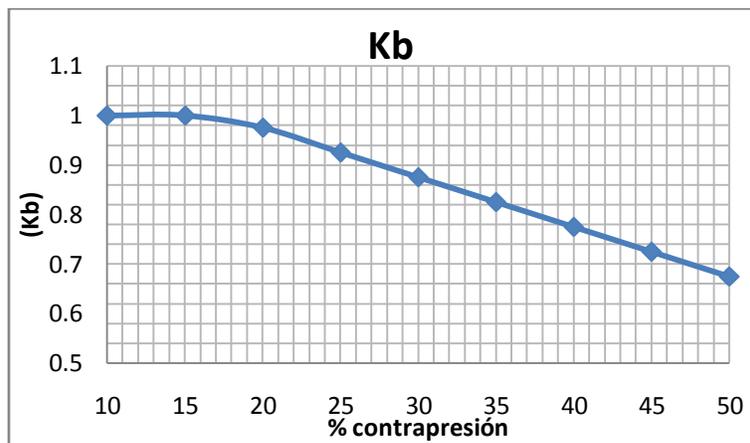
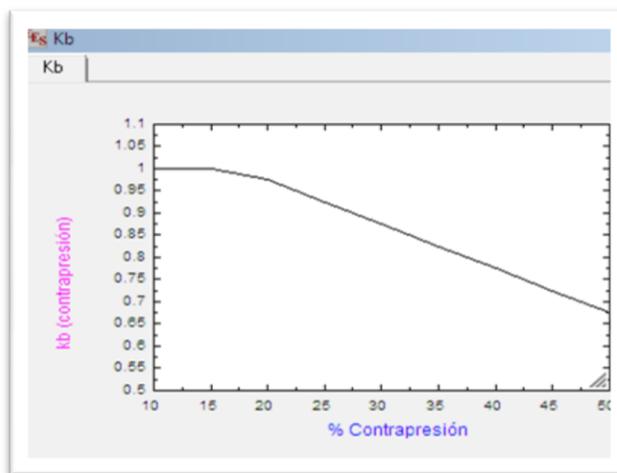


Gráfico 5.2 Gráfico de corrección por contrapresión en Excel.



	Column1	Column2
Row 1	1	0
Row 2	0.9999	5
Row 3	0.999	10
Row 4	0.99	15
Row 5	0.975	20
Row 6	0.925	25
Row 7	0.875	30
Row 8	0.825	35
Row 9	0.775	40
Row 10	0.725	45
Row 11	0.675	50

Gráfico 5.2.1 Gráfico de corrección por contrapresión en ESS y valores

Y con esto fue posible realizar los cálculos programando la hoja para cada escenario de acuerdo a los modelos matemáticos citados en el capítulo anterior:

```

FUNCTION correction(P_2,P_1) "correction factor due to back pressure"
IF (P_2/P_1) < 0.15 THEN
k_b:=1.0
ENDIF
IF ((100*P_2/P_1)>15) AND ((100*P_2/P_1)<20) THEN
k_b:=INTERPOLATE('K_b 15-20','Column1','Column2','Column1'=100*P_2/P_1)
ENDIF
IF (P_2/P_1) >0.2 THEN
k_b:=1.17767857-0.01006642857*(100*P_2/P_1)
ENDIF
correction:=k_b
END

```

Figura 5.2 Inicio de programación para que se haga uso del gráfico 5.2.

Además es posible visualizar estas ecuaciones en un formato más comprensible como puede verse en la siguiente imagen:

The screenshot shows the EES Professional software interface. The title bar reads "EES Professional Version: C:\Users\hp compaq\Documents\PRV.LIQ (1).EES - [Formatted Equations]". The menu bar includes "File", "Edit", "Search", "Options", "Calculate", "Tables", "Plots", "Windows", "Help", and "Examples". The toolbar contains various icons for file operations and calculations. The main window displays the following formatted function definition:

```

Function correction (P2, P1)
correction factor due to back pressure
If  $\left[ \frac{P_2}{P_1} < 0.15 \right]$  Then
    kb := 1
If  $\left[ \left( 100 \cdot \frac{P_2}{P_1} > 15 \right) \text{ and } \left( 100 \cdot \frac{P_2}{P_1} < 20 \right) \right]$  Then
    kb := Interpolate  $\left[ 'K_{b 15-20}', 'Column1', 'Column2', 'Column1' = 100 \cdot \frac{P_2}{P_1} \right]$ 
If  $\left[ \frac{P_2}{P_1} > 0.2 \right]$  Then
    kb := 1.178 - 0.01007 · 100 ·  $\frac{P_2}{P_1}$ 
correction := kb
End correction

```

Figura 5.2.1 Ecuaciones con formato

A continuación se agregaron las ecuaciones necesarias para hacer la estimación, en donde a partir de comillas se indica lo que representa cada ecuación y estas no interfieren en ninguno de los cálculos:

$$A = \frac{11.78 \cdot Q}{K_d \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_v} \cdot \left[\sqrt{\frac{G}{P_1 - P_2}} \right] \text{ \textit{área requerida}}$$

$$Q = \frac{1}{60} \cdot \frac{\dot{m}}{G} \text{ \textit{gasto volumétrico}}$$

$$K_v = \left[0.9935 + \frac{2.878}{R^{0.5}} + \frac{342.75}{R^{1.5}} \right]^{-1} \text{ \textit{factor de corrección de viscosidad}}$$

$$A_g = \frac{11.78 \cdot Q}{K_d \cdot K_b \cdot K_c \cdot 1} \cdot \left[\sqrt{\frac{G}{P_1 - P_2}} \right] \text{ \textit{first guess}}$$

$$R = 18800 \cdot Q \cdot \frac{G}{\mu \cdot \sqrt{A}} \text{ \textit{número de Reynolds}}$$

$$\text{row} = \text{Lookup\$Row} ('OS', 'X', \text{tam} (A))$$

$$A_s = \text{Lookup} ('OS', \text{row}, 'S') \text{ \textit{área real}}$$

$$Q_2 = \frac{1}{60} \cdot \frac{\dot{m}_2}{G} \text{ \textit{gasto máximo}}$$

$$A_s = \frac{11.78 \cdot Q_2}{K_d \cdot K_b \cdot K_c \cdot 1} \cdot \left[\sqrt{\frac{G}{P_1 - P_2}} \right]$$

$$K_b = \text{correction} (P_2, P_1) \text{ \textit{llamando a la función}}$$

Figura 5.2.2 Algoritmo de la estimación para el área de alivio

Cabe mencionar que al realizar la estimación del área de venteo no se obtienen valores reales, es decir valores que se puedan encontrar comercialmente, por ello se agregó a la programación una tabla con valores de áreas de venteo comerciales, y se programó de tal forma que se permita una vez estimado el valor del área con los modelos matemáticos antes desarrollados, llamar a la función en donde se establece el área de venteo comercial, está fue la tabla ingresada al programa:

K_b 15-20	OS	Kp
	1	2
	X	S
Row 1	D	0.11
Row 2	E	0.2
Row 3	F	0.31
Row 4	G	0.5
Row 5	H	0.79
Row 6	J	1.29
Row 7	K	1.84
Row 8	L	2.85
Row 9	M	3.6
Row 10	N	4.34
Row 11	P	6.38
Row 12	Q	11.05
Row 13	R	16
Row 14	T	26

Figura 5.2.3 Valores de áreas comerciales.

Finalmente, ESS permite obtener los resultados en una forma más organizada, de tal manera que si alguien más revisa lo realizado sea de fácil comprensión, y a través de un comando llamado “Window Equation” es posible tener una visualización de los datos necesarios para obtener la estimación, así como los resultados obtenidos de esta misma, en donde si se quiere cambiar de fluido o condiciones sólo se deben introducir los nuevos valores y la estimación se realiza de igual forma.

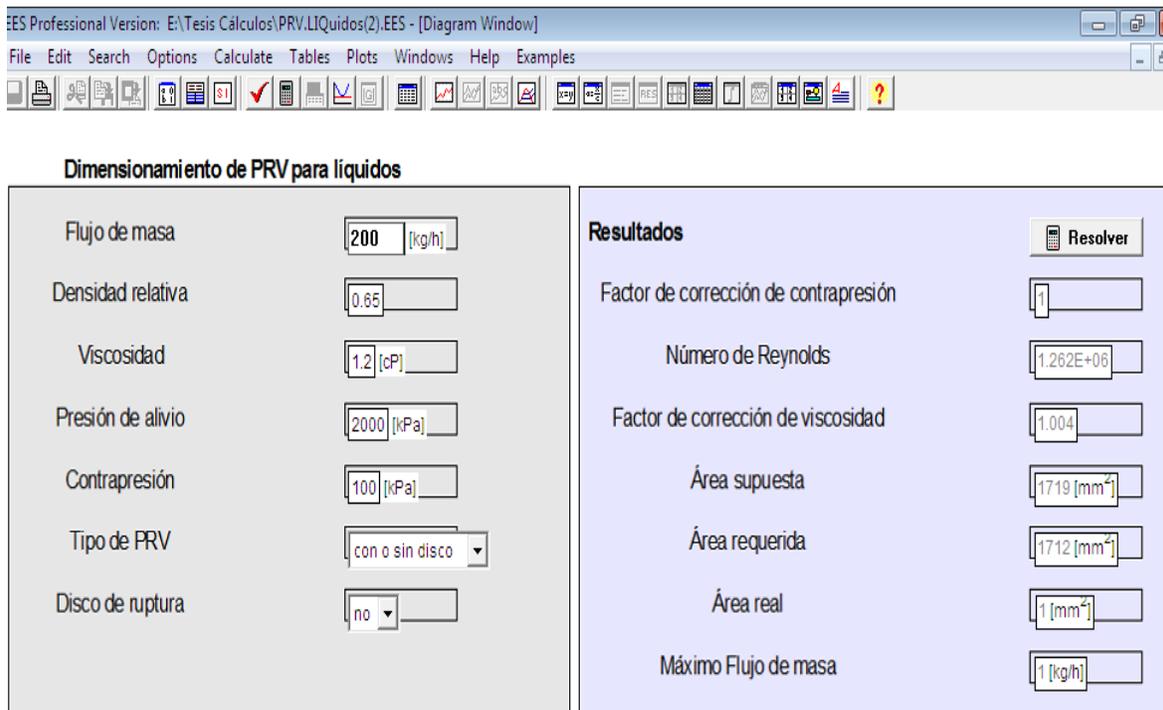


Figura 5.2.4 Resultados obtenidos

Cabe mencionar que dentro de la estimación en un sólo programa es posible definir el tipo de relevo (fuelle o convencional), además si se usará disco de ruptura o no, se agregan unos “botones” en donde se puede seleccionar esta opción, lo que facilita la estimación de diferentes casos.

En el Anexo IV, se puede ver a detalle la programación, resumido en un reporte que da la opción el programa de obtener en formato PDF, en donde es posible

ver cada una de las ecuaciones empleadas, así como tablas y resultados obtenidos.

5.3 Servicio vapores o gases

De igual forma se realizó la estimación para el servicio de vapores y gases, se ingresó primeramente la función para que el programa pudiera llamar al valor del tamaño comercial de orificio antes mencionado:

```
FUNCTION tam(A)      "tamaño comercial del orificio"  
i:=1  
REPEAT  
i:=i+1  
x:=Lookup('OS',i,'S')  
z:=Lookup('OS',i+1,'S')  
DELTA:=(z-x)/2  
IF ((x+DELTA)<A) AND (A<z) THEN  
x$:=Lookup$('OS',i+1,'X')  
ENDIF  
IF (x<A) AND (A<(x+DELTA)) THEN  
x$:=Lookup$('OS',i,'X')  
ENDIF  
UNTIL (i=14)  
tam:=x$  
END b
```

Figura 5.3. Programación para obtener el valor de áreas comerciales.

Y se ingresaron los modelos matemáticos antes desarrollados:

```

Procedure crit(k, m, P0, P1, P2, W, T, Z : A, Kd, Kc, Kb)
  If  $\left[ \frac{P_0}{P_1} < \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\left( \frac{k}{k-1} \right)} \right]$  Then
    Kc := 1
    Kd := 0.975
    If  $\left[ \frac{P_2}{P_1} > 0.3 \right]$  Then
      Kb := Interpolate ['overpressure10', 'fracc', 'Kb', 'fracc' = 100 ·  $\frac{P_2}{P_1}$ ]
    Else
      Kb := 1
  A :=  $\frac{13160 \cdot \dot{m} \cdot \sqrt{(T + 273)} \cdot Z}{520 \cdot \sqrt{k \cdot \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\left( \frac{k+1}{k-1} \right)} \right]} \cdot K_d \cdot P_1 \cdot K_b \cdot K_c \cdot \sqrt{W}}$ 
  If  $\left[ \frac{P_0}{P_1} > \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\left( \frac{k}{k-1} \right)} \right]$  Then
    Kc := 0.9
    Kd := 0.975
    Kb := 1

```

Figura 5.3.1 Programación para la estimación del área de alivio para gases.

```

Kb := 1
A :=  $\frac{17.9 \cdot \dot{m} \cdot \sqrt{Z \cdot (T + 273)}}{\sqrt{k \cdot \left( \frac{k}{k+1} \right) \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\left( \frac{2}{k} \right)} \cdot \left( \frac{1 - \left[ \frac{P_2}{P_1} \right]^{\left( \frac{k-1}{k} \right)}}{1 - \frac{P_2}{P_1}} \right)} \cdot K_c \cdot K_d \cdot \sqrt{W \cdot P_1 \cdot (P_1 - P_2)}}$ 
  If  $\left[ \frac{P_2}{P_1} > 0.3 \right]$  Then
    Kb := Interpolate ['overpressure10', 'fracc', 'Kb', 'fracc' = 100 ·  $\frac{P_2}{P_1}$ ]
  Else
    Kb := 1
Endif
Kc := 1
Kd := 0.975
A :=  $\frac{13160 \cdot \dot{m} \cdot \sqrt{(T + 273)} \cdot Z}{520 \cdot \sqrt{k \cdot \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\left( \frac{k+1}{k-1} \right)} \right]} \cdot K_d \cdot P_1 \cdot K_b \cdot K_c \cdot \sqrt{W}}$ 
End crit
Call crit(k, m, P0, P1, P2, W, T, Z : A, Kd, Kc, Kb)
row=LOOKUP$ROW(OS,'X',tam(A))
A3=LOOKUP(OS,row,'S')
! Incompiled equations within SIF conditional statements

```

Figura 5.3.2 Programación para la estimación del área de alivio para gases.

En este caso, también se realizaron los gráficos correspondientes en el programa para que al resolver el algoritmo bastara llamar a la función y este automáticamente tomará los valores de la tabla previamente programada:

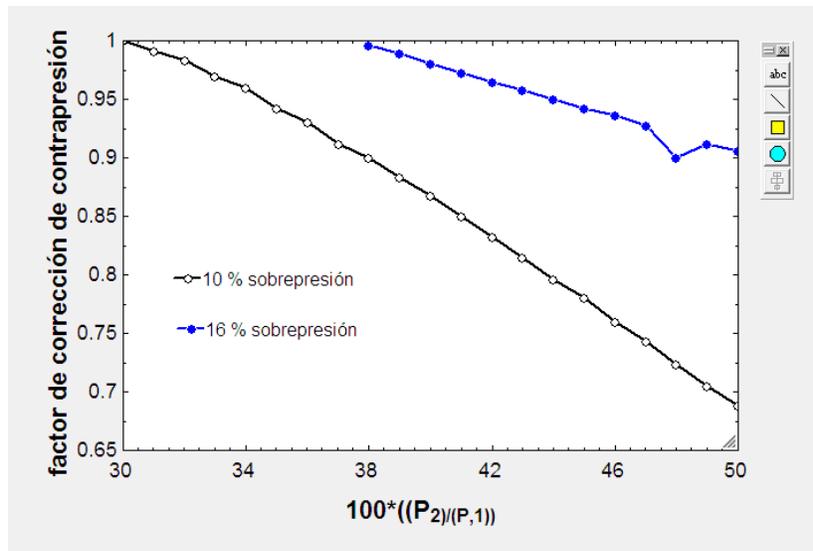


Figura 5.3.3 Programación para la estimación del área de alivio para gases

Después de ingresar el algoritmo necesario y aplicar resolver se genera la siguiente pantalla, en donde se pueden ver los resultados y el valor del orificio obtenido:

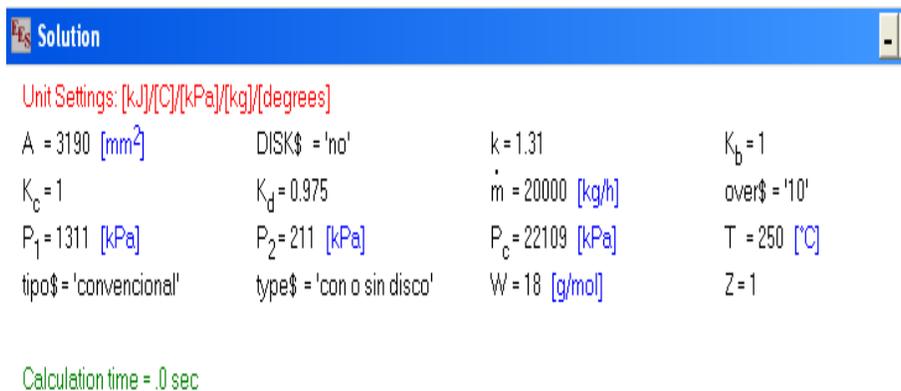


Figura 5.3.4 Resultado de la programación

De igual manera a como se procedió en el servicio de líquidos al ya contar con la programación de los modelos se realizó en “Diagram Window” el resumen correspondiente para obtener los valores que se estaban buscando desde el inicio. En la siguiente imagen se muestran en azul los valores que se calcularon y en

blanco los datos que se deben introducir. Con esto se simplifica el trabajo, ya que dependiendo del fluido pueden cambiarse los datos de entrada para diferentes situaciones y las condiciones de proceso:

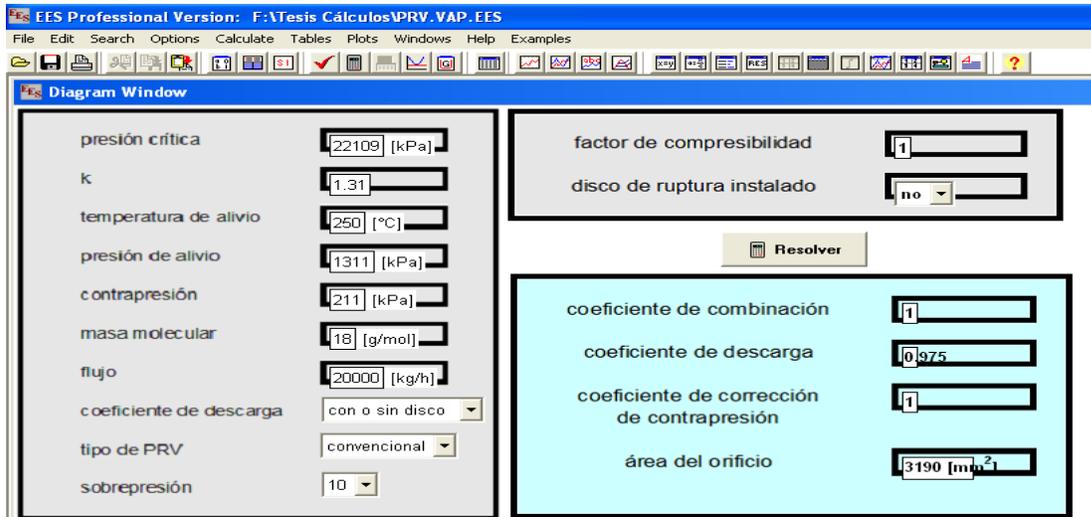


Figura 5.3.5 Resultados obtenidos para la estimación del área de alivio para gases.

De esta manera la estimación se facilita ya que como puede verse dentro de la misma programación se incluyó el tipo de válvula: fuelle, convencional y con o sin disco de ruptura, lo cual hace que este resulte un programa útil y que disminuye el tiempo invertido en la estimación, lo contrario si se realizará manualmente.

En el Anexo V, se puede ver a detalle la programación, resumido en un reporte para servicio de gases.

5.4 Flujo Bifásico

5.4.1 Tipo I & tipo II

Para la programación fue posible realizar en un solo paquete el tipo I y el tipo II antes descrito donde lo que varía es la definición del parámetro ω , y de igual manera como en los casos anteriores se procedió a introducir tablas con valores para calcular k_b , el valor del orificio comercial:

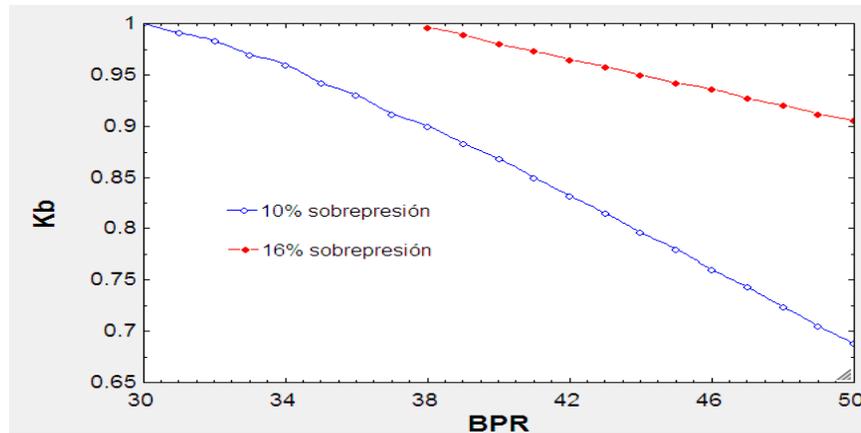


Figura 5.4 Gráfico de K_b (sobrepresión).

Los resultados obtenidos pueden verse en la siguiente figura, de lado izquierdo se encuentran todos los valores que deben indicársele al programa, y este nos proporciona los valores de la derecha, que en sí lo que se busca es el área de venteo; este es un cálculo mucho más complejo ya que como se mencionó en el realizado analíticamente se requiere el apoyo de HYSYS para obtener propiedades de los fluidos de acuerdo a su composición, aunque estos valores también pueden obtenerse de tablas y a partir de relaciones, pero para mayor exactitud y de acuerdo a la complejidad de las iteraciones resulta de mayor utilidad HYSYS.

Considerando que se debe tener cuidado de los valores que se introduzcan en el software, ya que las propiedades de los fluidos que intervienen son importantes para el cálculo y definen este:

Válvula de Alivio de Presión Tipo 1&2

NBR = 82 nominal boiling range

$C_p = 2.555$ capacidad térmica específica

$T_0 = 333$ temperatura de alivio

$K = 1.113$ razón de calores específicos

$P_a = 121$ contrapresión kPa abs

$P_0 = 431$ presión de alivio kPa abs

$K_d = 0.85$ coeficiente de descarga

$W = 20000$ flujo kg/h

$x_0 = 0.409$ fracción de vapor/vapor y gas

$v_0 = 0.0382$ volumen específico del sistema

$v_{v0} = 0.0908$ volumen específico de vapor/vapor y gas

$v_{v10} = 0.089$ diferencia volúmenes entre líquido y vapor

$v_9 = 0.043$ volumen específico del sistema a 90% de P_0

$h_{v10} = 277$ calor latente de vaporización

$v_{vg0} = 0.1$ volumen específico combinado de vapor y gas (tipo 2)

tipo1 tipo de fluido

convencional tipo de válvula

no disco de ruptura

10 sobrepresión

Resolver

$P_c = 275.2$ presión crítica

$\eta_c = 0.6386$ razón de presión crítica

1572 flujo de masa $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$

1.864 parámetro omega

$A = 4159$ área requerida

$A_a = 4116$ área de orificio estándar

Designación	mm*mm
D	70.97
E	126.5
F	198.1
G	324.5
H	506.5
J	830.3
K	1186
L	1841
M	2323
N	2800
P	4116
Q	7129
R	10323
T	16774

ORIFICIO: P

flujo crítico

Figura 5.4.1 Resultados tipo I & tipo II

Es preciso señalar que de igual manera se agregan “botones” con la opción de elegir el tipo de PRV, así como si es tipo I o tipo II, y en este caso se colocó un botón para elegir la sobrepresión (10% o 16%).

Cabe mencionar que el tipo I depende de su punto nominal de ebullición del fluido por lo que también se debe considerar el gráfico 4.6 mostrado en el capítulo anterior. Mientras que el tipo II es un sistema que no flashea, el parámetro omega se estima de manera diferente, pero una vez obtenido se procede con el resto de las ecuaciones tal como se hizo en el tipo 1, por lo que fue posible programarlos juntos, y sólo indicar en la programación la diferencia entre estos dos con un “botón” adicional.

En el Anexo VI, se puede ver a detalle la programación, resumido en un reporte para servicio tipo I y tipo II

5.4.2 Tipo III

Para este caso, se necesitaban datos de razón de presión crítica, los cuales se incorporaron al software, en el caso de zona de alto subenfriamiento, es igual a la razón de presión de saturación. En la zona de bajo subenfriamiento, la obtención de la variable ya mencionada es más difícil de estimar.

El gráfico se incorporó al programa:

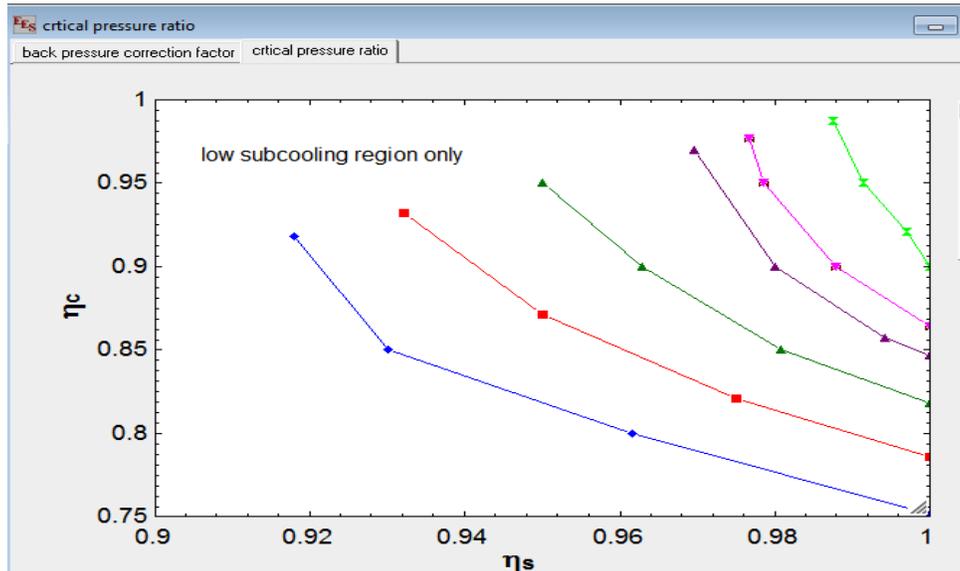


Figura 5.4.2 Correlación para obtener la relación de presión crítica para líquidos subenfriados, ingresada en ESS.

Se introdujeron las ecuaciones necesarias para la realización de la estimación, que cada vez se volvía más compleja, puesto que se requerían más datos:

Diagram Window

Válvula de Alivio de Presión Tipo 3

menos de 83 nominal boiling range

Resolver

alto subenfriamiento

$\omega = 19.37$ parámetro omega
 $\eta_{st} = 0.9748$ razón de transición de presión de sat.
 $\eta_s = 0.7442$ razón de sat. de presión
 $\eta_{c,aux} = 0.7442$ razón de presión crítica
 $\eta_a = 0.1551$ razón de contrapresión
 $G = 13569$ flujo de masa $kg/s \cdot m^2$
 $K_{b,aux} = 1$ factor de corrección de contrapresión
 $A = 629.9$ área requerida
 $A_a = 506.5$ área estándar disponible

$C_p = 2.576$ capacidad térmica específica
 $T_0 = 333$ temperatura de alivio
 $P_a = 101$ contrapresión kPa
 $P_0 = 651$ presión de alivio kPa
 $K_d = 0.65$ coeficiente de descarga
 $W = 20000$ flujo kg/h
 $\rho_{l0} = 552.3$ densidad del líquido
 $P_s = 484.5$ presión de saturación
 $v_{vis} = 0.0796$ diferencia volúmenes entre líquido y vapor
 $\rho_g = 542.6$ densidad del sistema a 90% de P_0
 $h_{vis} = 274$ calor latente de vaporización

convencional tipo de válvula
 no disco de ruptura
 10 sobrepresión

Designación	mm*mm
D	70.97
E	126.5
F	198.1
G	324.5
H	506.5
J	830.3
K	1186
L	1841
M	2323
N	2800
P	4116
Q	7129
R	10323
T	16774

ORIFICIO: H
 flujo crítico

Figura 5.4.3 Resultados obtenidos para el tipo III.

5.4.3 Tipo IV

Este tipo como ya se mencionó anteriormente comprende un gas no condensable o bien, vapor condensable y gas no condensable y también líquido sub-enfriado o saturado entran a la válvula y hacen flash o dicho de otra forma se evaporan. El gas no condensable siempre está presente. En este caso se presentan dos escenarios

Escenario 1 (si se satisfacen todas las condiciones):

1. Contiene menos de 0.1% (w/w) de hidrógeno
2. El intervalo nominal de ebullición es menor que 83°C
3. Cualquier sistema en donde $P_{V0} < P_0$ es menor que 0.9 o $P_{g0} < P_0$ es más grande que 0.1
4. Lejos de su punto crítico termodinámico ($T_r \leq 0.9$ o $P_r \leq 0.5$)

Escenario 2 (si se satisface al menos una de las condiciones)

1. Contiene menos de 0.1% (w/w) de hidrógeno
2. El intervalo nominal de ebullición es menor que 83°C
3. Cualquier sistema en donde $P_{V0} < P_0$ es menor que 0.9 o $P_{g0} < P_0$ es más grande que 0.1
4. Lejos de su punto crítico termodinámico ($T_r \leq 0.9$ o $P_r \leq 0.5$)

Se realizaron de igual manera los gráficos pertinentes, y se ingresaron al programa los dos escenarios, indicándole al mismo que variara de acuerdo a las condiciones antes mencionadas.

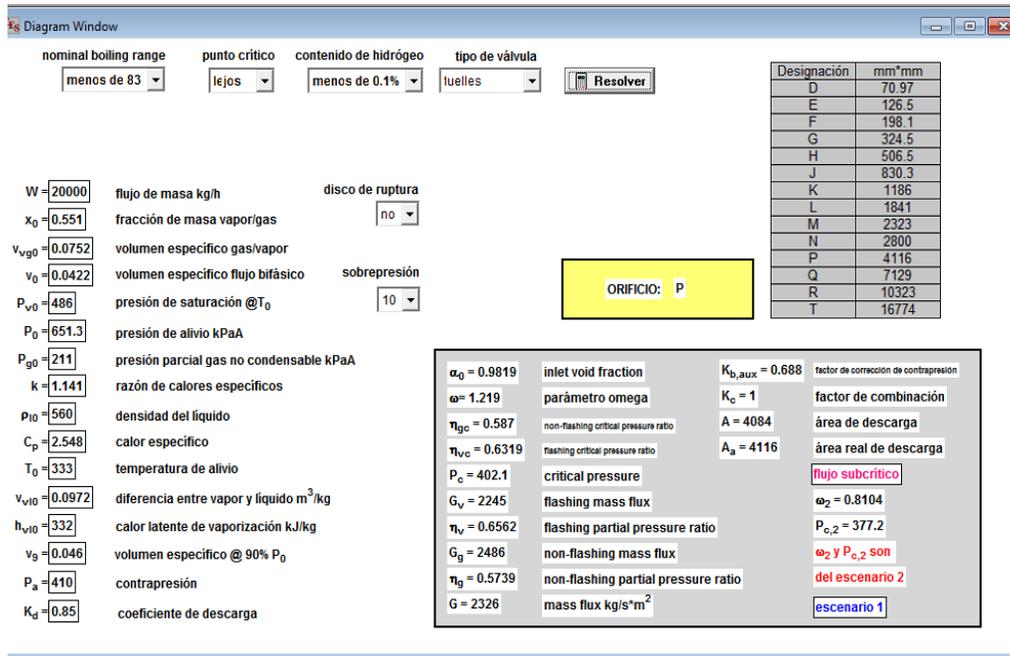


Figura 5.4.4 Resultados obtenidos para el tipo IV.

La realización de la programación requirió de conocimiento en el software además de comandos especiales para llamar a las funciones las cuales se implementaron en el programa y que resulta ser una herramienta que puede emplearse para cualquier cálculo, siempre y cuando se introduzcan las propiedades adecuadamente.

En el Anexo VI, se puede ver a detalle la programación, resumido en un reporte para estos escenarios.

5.5 Comparación valores obtenidos analíticamente con los obtenidos mediante ESS

En la siguiente tabla se pueden ver resumidos los resultados obtenidos analíticamente y con el software en donde se puede apreciar una diferencia, en algunos casos mayores que en otros pero esto depende de las consideraciones que se van haciendo a lo largo de la estimación. Sin embargo se puede ver que al escoger entre el área real, es decir el área comercial y el área calculada mediante el software se encuentran dentro del rango, y se escoge la misma para ambos casos.

Considerando que los orificios comerciales son los que se pueden ver en la siguiente tabla:

Nomenclatura	mm²
D	70.97
E	126.5
F	198.1
G	324.5
H	506.5
J	830.3
K	1186
L	1841
M	2323
N	2800
P	4116
Q	7129
R	10323
T	16774

Tabla 5. Orificios comerciales

Escenario	Tipo PRV	Área estimada (mm²)		Área comercial	
		Analíticamente	ESS	Analíticamente	ESS
Líquido	fuelle	599	1795	J	L
Líquido	convencional	1012	1712	J	J
Líquido	disco de ruptura	412	1995	H	L
vapor	fuelle	1332	1568	L	L
vapor	convencional	1958	1988	M	M
vapor	disco de ruptura	2715	2741	N	N
Tipo I	fuelle	3906	3951	P	P
Tipo I	convencional	3830	4159	P	P
Tipo I	disco de ruptura	4302	4406	P	P
Tipo II	fuelle	-	3890	-	P
Tipo II	convencional	3256	3607	P	P
Tipo II	disco de ruptura	4562	4008	Q	P
Tipo III	fuelle	-	3900	-	P
Tipo III	convencional	3950	3845	P	P
Tipo III	disco de ruptura	4876	4020	Q	P

Tipo IV	fuelle	-	4116	-	Q
Tipo IV	convencional	-	4008	-	P
Tipo IV	disco de ruptura	-	4084	-	P

Tabla 5.1 Estimación analítica y mediante ESS del área de venteo para líquidos, gases y un escenario bifásico.

A partir de la tabla 6 es posible observar la diferencia entre las estimaciones realizadas, por un lado las realizadas analíticamente contra las que se estimaron con el software, en donde en algunos casos se observa un valor diferente pero ambos recaen en el mismo orificio comercial requerido. No así, para el servicio de líquidos sin embargo muchas veces esto es debido a redondeos, o cambios en datos.

Para el servicio de líquido el área comercial que se elige es diferente en la estimación manual con la estimación del software, esto debe revisarse cuidadosamente antes de la compra del material ya que se debe garantizar que la válvula cumpla su función y no genere un riesgo. Para los otros casos tanto para gases, servicio tipo I, II, III y IV, a pesar de contar con valores de área diferentes ambas estimaciones caen en la selección del mismo tipo. Esto demuestra que la estimación manual funciona si se realiza considerando todos los datos, sin embargo si se presentan situaciones anormales deberán revisarse con los proveedores para que se proporcione una válvula adecuada para la aplicación, o en su defecto revisar con otro software esta estimación.

La diferencia fundamental entre las estimaciones estriba en la facilidad para realizarlas, si bien es cierto que el empleo del software inicialmente no es fácil, una vez que se tiene la programación solo es cuestión de cambiar valores de acuerdo al fluido y sus propiedades y ello disminuye el trabajo a realizar y con ello se puede hacer una selección de la válvula, tomando en consideración el tamaño del orificio, el material que pasará por la misma (si es corrosivo, inflamable, limpio, etc.) y las condiciones atmosféricas presentes.

Una vez conocido el orificio se puede hacer una selección adecuada de la válvula, un análisis general puede verse resumido en el siguiente esquema:

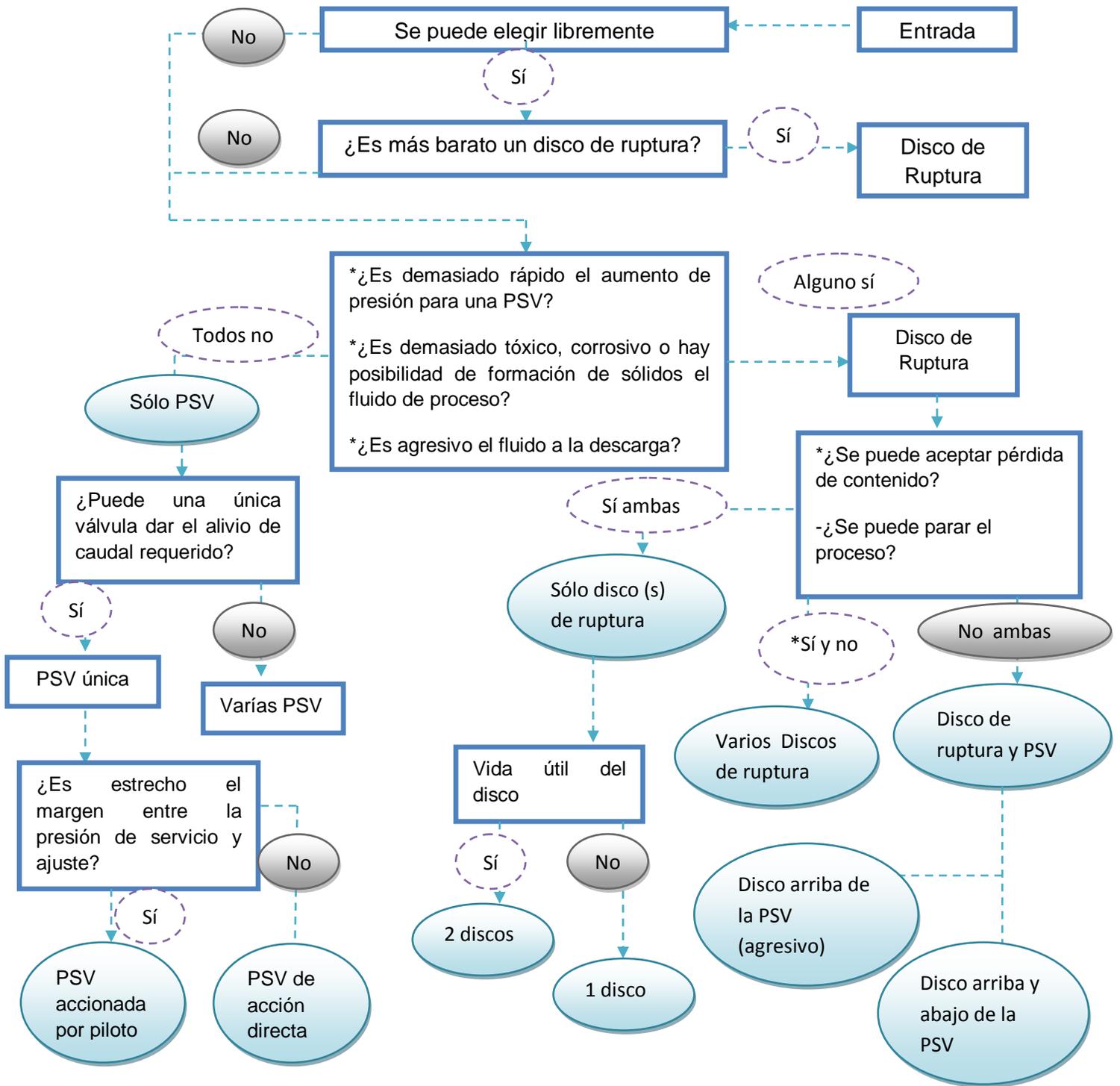


Figura.5 Selección de dispositivos de alivio de presión

Capítulo 6

6.1 Riesgos y estimación de la fuga generada

El realizar las estimaciones anteriormente mostradas es de suma importancia ya que permite conocer un aspecto muy importante, cómo lo es el área del orificio que se requiere para el venteo. Como ya se ha venido mencionando estos dispositivos están destinados a proteger equipos presurizados en los que un error puede tener consecuencias catastróficas, por ello la importancia de un buen diseño y selección.

Como es de esperarse en el manejo de estos equipos, así como de muchos otros, un buen diseño no los exime de exponerse a ciertos riesgos, los cuales varían en magnitud y frecuencia. En general, en todo proceso químico y cual sea el proceso en que se utilicen de este tipo de equipos y otros se debe tener una evaluación continua de riesgos.

Lograr la identificación de los peligros potenciales durante la operación de los equipos es vital para mantener las condiciones de trabajo óptimas, algunas de las situaciones peligrosas que genera el trabajar con equipos presurizados se deben entre otras razones a:

- Errores humanos.
- Errores en las condiciones de operación, (sobrellenado, cierre equivocado de válvulas, etc.).
- Falta de mantenimiento y supervisión del estado de las válvulas de alivio de presión.
- Sobrepressiones a causa de sobrellenados ó características físicas o químicas de la sustancia en cuestión, “runaway reaction”.

Antes de cualquier diseño es preciso analizar los riesgos que se encuentran asociados a dicho, por lo que principalmente se debe:

- Eliminar o reducir los riesgos identificados.

- Incorporar sistemas de protección si los riesgos no pueden ser eliminados.
- Informar al usuario de posibles riesgos residuales.
- Indicar las medidas de protección apropiadas.
- Prevenir el uso incorrecto de los sistemas de seguridad.

Son los ingenieros de proceso los encargados de la evaluación de estos.

En el siguiente diagrama se hace la propuesta de una evaluación sencilla de riesgos para equipos que trabajan a presión. En donde se puede ver que lo primero que se debe hacer es la planificación de riesgos en donde se define a ésta como enfocar, planificar y ejecutar las actividades en caso de presentarse un riesgo.

Posteriormente se hace una identificación de los mismos en donde se determinan los riesgos que pueden afectar, por ejemplo la rotura de una tubería a causa de la sobrepresión, falla de la válvula, etc. Luego viene el análisis cualitativo, en donde una vez que se identificaron los riesgos se priorizan, esto de acuerdo a la probabilidad e impacto que pudieran tener en el proceso.

Después, viene el análisis cuantitativo de los riesgos que es una parte muy importante ya que en éste se analiza numéricamente el efecto de los riesgos identificados. Luego viene la planificación de respuesta a riesgos, que implica que una vez que se analizan los riesgos tanto cuantitativamente como cualitativamente se buscan opciones y acciones para reducir amenazas, es dar solución a lo inicialmente planteado.

Por último, y no por ello menos importante viene el monitoreo y control de los riesgos, en donde se rastrean los riesgos identificados monitoreándolos continuamente. Esta parte también incluye la identificación de nuevos riesgos y la evaluación de la efectividad del proceso. Dado que los riesgos siempre existirán es necesario que este proceso de análisis de riesgo se realice siempre:

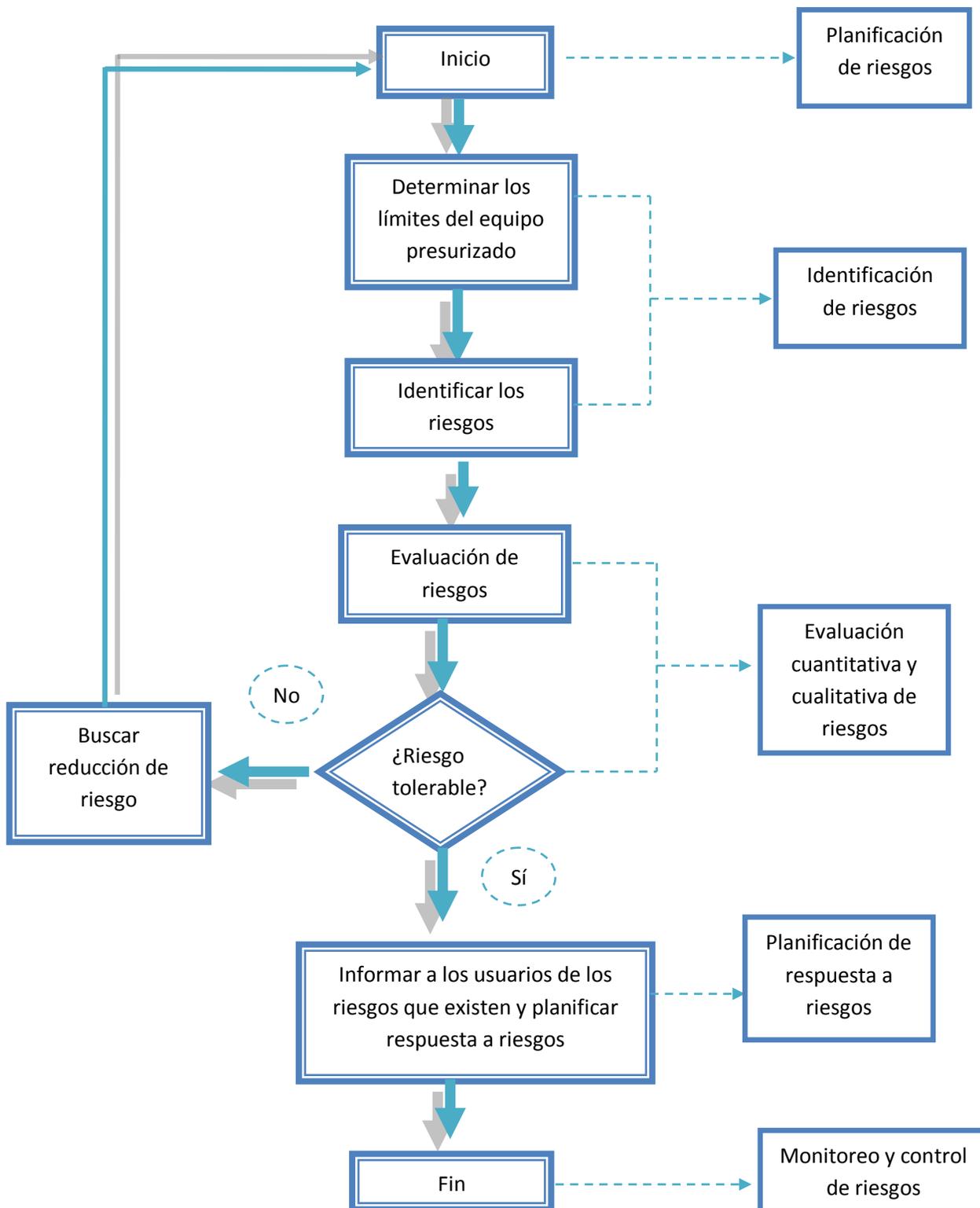


Figura.6 Evaluación de riesgos en equipos presurizados.

Aun tomando en cuenta todas estas situaciones, hay riesgos inherentes al proceso mismo, es decir aquellos que por naturaleza vienen asociados, los principales son los fallos en las válvulas, entre estos fallos los que figuran con mayor frecuencia son:

- a. Que la válvula no abra a la presión de ajuste.
- b. Que no abra completamente a la presión de alivio.
- c. Que no reasienta bien después de la apertura.
- d. Fluctuación y castañeteo de la válvula.
- e. Fuga a través del asiento de la válvula.
- f. Rotura de la válvula.

Los fallos antes mencionados varían de acuerdo a la forma en que se susciten, sin embargo el fallo en el que se debe poner especial atención es en el que ocurre la rotura de la válvula. En este puede llegarse a generar una fuga, la cual si está en condiciones suficientes podría dar origen a una atmósfera explosiva. La fuga puede ocurrir por diferentes circunstancias, pero dependiendo de la cantidad de material fugado y del fluido que se lleve en ésta pueden suscitarse siniestros graves, como ya se vio anteriormente que va desde incendios hasta explosiones, En general algunas de las causas que generan una fuga podrían deberse a:

- Un sobrellenado.
- Atasco de material sólido que no permite el cierre de la válvula.
- Rotura de la válvula por sobrepresión o desgaste ya generado desde antes.

Se han realizado algunas investigaciones en cuestión de las causas de accidentes más comunes en la industria, y los resultados arrojan que en cuestión de elementos seguridad el mayor porcentaje que se tiene en fallos y por lo tanto que han resultado en accidentes es en las válvulas de alivio de presión como puede verse en la siguiente tabla (ver tabla 6):

Tipo	% de Ocurrencia
Válvulas de seguridad	83%
Alarmas	8%
Discos de ruptura	5%
Detectores de gases	4%

Tabla 6. Grado de implicación de elementos de seguridad en accidentes graves de origen químico. Fuente: MHIDAS y MARS⁵⁴

Tener conciencia de la posibilidad de los tipos de fallo que existen en las válvulas de alivio provee de herramientas que pueden ayudar a evitar accidentes, que evidentemente afectarán a las personas cercanas a las instalaciones, pero también a los alrededores, y como ya se mencionó anteriormente las causas de un accidente pueden ser varias, pero si una de ellas se elimina el riesgo de ocurrencia disminuye.

Todo esto beneficia a tanto a las personas como a las industrias, pero indudablemente también al medio ambiente tomando en cuenta que todo accidente generado por una fuga, explosión o incendio dañará también a éste por ello la importancia de conocer y mitigar los riesgos.

⁵⁴ MARS (Major Accident Reporting System) es una base de datos de accidentes mayores establecida por la Comisión Europea como forma de implementar la Directiva Seveso (82/501/CEE). Las autoridades competentes de cada estado miembro notifican al registro establecido los accidentes mayores ocurridos, que a finales de 1997, son aproximadamente 200.

MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service) es una base de datos desarrollada en nombre del Major Hazards Assessment Unit of the United Kingdom Health and Safety Executive (Unidad de Valoración de Riesgos Mayores de la Ejecutiva de Seguridad y Salud del Reino Unido).

Capítulo 7

7.1 Conclusiones

El presente trabajo presenta un panorama en lo que se refiere a la seguridad industrial, considerada actualmente como una condición esencial de cualquier actividad que realice el ser humano quien no está exento de riesgos. Sin lugar a dudas, el conocimiento de estos permite la prevención y con ello se pueden llegar a evitar situaciones catastróficas.

En éste proyecto se hizo énfasis en la importancia de salvaguardar los equipos industriales que trabajan a presión utilizando válvulas de alivio de presión, puesto que han sido muchos las situaciones que han generado controversias y la necesidad de proteger a estos mismos con el fin de evitar daños a los equipos y a las personas que los manejan o están en los alrededores.

El diseño de las válvulas de seguridad se ha ido desarrollando y mejorado a través de los años, pero a pesar de ello siguen suscitándose fallos en éstas, que varían en magnitud y frecuencia, entre ellas como ya se aludió anteriormente se encuentra la fuga generada por la rotura de una válvula. Este fallo pone en peligro la vida de las personas que se encuentran en los alrededores, y dependiendo de la cantidad fugada y el material se mide el daño que causará tanto a personas como al medio ambiente, los cuales deben mitigarse y cuando así sea posible eliminarse.

Todo esto se resume en un buen diseño de las válvulas, aunándole la supervisión continua y mantenimiento ya que el desgaste es inevitable, pero el estar periódicamente revisando el estado de las válvulas podría evitar enfrentarse a situaciones peligrosas, y así mismo mitigar el riesgo de sufrir accidentes, como el caso de uno ocurrido en New Jersey, Estados Unidos en Junio de 1978, donde una válvula de seguridad de alivio de presión en una columna de destilación de éter se rompió y se formó una nube de vapor de éter en la atmósfera. Al contacto

con un foco de ignición se provocó una explosión y subsiguiente incendio con el resultado de siete personas lesionadas y daños materiales.

Las columnas de destilación frecuentemente contienen una cantidad importante de líquidos inflamables a presiones y temperaturas elevadas. Como tales recipientes deben cumplir el Reglamento de Aparatos a Presión y ser fabricados según códigos de diseño de reconocido prestigio. Un aumento de presión puede provenir de fallo de la refrigeración del condensador, calentamiento excesivo en el calderín o incendio.

Otro ejemplo es el ocurrido en Estados Unidos en Septiembre de 1977, en donde un depósito de almacenamiento de gas licuado del petróleo quedó sobrellenado debido a un fallo de instrumentación. La válvula de seguridad no abrió y el depósito se rompió en una costura de soldadura. La explosión resultante e incendio destruyeron otros seis depósitos, causando la muerte de dos personas y daños materiales valorados en 2 millones de dólares.

Estos dos ejemplos muestran la necesidad de comenzar con un diseño y selección adecuado y terminar con una supervisión periódica, en donde sea posible notar el desgaste o también el cambio de condiciones climatológicas que puede llegar a ocurrir.

Las estimaciones mostradas anteriormente, no tienen sentido si no se les da el manejo adecuado, por ello la importancia de primero conocer los tipos de válvulas existentes para elegir la adecuada de acuerdo a las condiciones de temperatura, presión, así como el tipo de fluido a manejar, ya que la correcta selección hace que el diseño sea efectivo y le da la utilidad necesaria al dispositivo.

Al revisar los objetivos planteados inicialmente se puede afirmar que se cumplieron, pues se dio un panorama general de los métodos de selección, en específico el cálculo del área de venteo que representa un paso importante dentro del mismo. Conocer la metodología a partir de modelos matemáticos ya

establecidos (cálculos analíticos) es tan importante como el facilitar la estimación mediante programas que así lo permitan, pero siempre teniendo en cuenta la manera de proceder si no se contase con estos mismos, como pudo verse a lo largo de la realización del trabajo.

Se implementó un programa fácilmente asequible, a partir del software EES ((Engineering Equation Solver); y que puede ser apoyo en diferentes situaciones, siempre teniendo un punto de comparación para su uso, éste permite el cálculo del orificio de venteo para las válvulas de alivio de presión, y resulta ser una herramienta muy útil ya que disminuye el trabajo y se puede emplear para diferentes escenarios, tanto para sustancias en estado líquido, así como para gases y fluidos bifásicos.

Así, el programa puede ser utilizado en la docencia para distintas estimaciones, comprobándose con ello la utilidad del software que se manejó durante las mismas para el cálculo del orificio de válvulas de alivio de presión, no olvidando que las válvulas de alivio de presión son la última defensa antes de que pueda ocurrir una catástrofe por sobrepresión.

A partir de la estimación del orificio es posible hacer una selección de la válvula adecuada dependiendo de la aplicación, pero también se deben tomar en cuenta condiciones del fluido, es decir si es corrosivo, tóxico, etc., así como las condiciones de la instalación por ejemplo si existe riesgo de una atmósfera explosiva. Este análisis debe garantizar la correcta selección del equipo a emplear, pero la supervisión debe realizarse periódicamente ya que las condiciones atmosféricas podrían cambiar, con ello se evitarían situaciones de catástrofe en cualquier proceso químico.

Referencias:

Bibliográficas:

- 1) Control de riesgos de accidentes mayores: Manual práctico, Oficina Internacional del Trabajo (OIT), (1993), Alfaomega, México.
- 2) Crane, (1985), Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, Editorial McGraw-Hill, México, Sección I-8.
- 3) Crow Daniel A, et al. (2002), Chemical Process Safety: Fundamentals with applications, 2da edición, Prentice Hall PTR, U.S.A.
- 4) Datta Arun, (2008), Process engineering and design using visual basic, CRC Press, U.S.A.
- 5) Greene Richard W., (1998), válvulas selección uso y mantenimiento, McGraw-Hill, U.S.A.
- 6) Hellemans, Marc, (2009), The Safety Relief Valve Handbook: Design and Use of Process Safety Valves to ASME and International Codes and Standards, Elsevier, U.S.A
- 7) La prevención de los accidentes: manual de educación obrera, Oficina Internacional del Trabajo (OIT), (1991), Alfaomega, México.
- 8) Ramírez Cavassa, César, (1999), Seguridad Industrial, Editorial Limusa, 2da Edición, México.
- 9) McCabe, W.L., Smith, J.C. y Harriot, P. (2001). "Unit Operations in Chemical Engineering". 6ª edición. McGraw-Hill. New York. Sección 2, capítulos 2-6.
- 10) Ramírez César (2000), Seguridad Industrial: Un enfoque Integral, 2da Edición, Limusa, México.
- 11) Ramos Eusebio, et al., (1988), La teoría del Riesgo del trabajo, Editorial Pac, México.
- 12) Smith, J.M., (1996), Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química, 4ª edición, McGraw-Hill, México.
- 13) Storch de Gracia J.M. y García Marín T., (2008), Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas, Ediciones Díaz de Santos S.A., España.
- 14) Válvulas de seguridad y alivio de bronce, Manual, Walworth, USA.

Electrónicas:

1. Importancia de seguridad industrial: <http://prezi.com/ex1pbio68fmd/red-de-salud-higiene-y-seguridad>, Página consultada por última vez el 9 de Mayo de 2013.
2. Definición de riesgo:
https://docs.google.com/document/d/1g1UFIkk5_RKRjiZU8T7i951k_WhZ5r9

zjlx6DGAp4p4/edit?hl=es&pli=1, página consultada por última vez el 6 de Abril de 2014.

3. Notas Técnicas de prevención 342: Válvulas de seguridad (I): características técnicas:http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_342.pdf, página consultada por última vez el 3 de mayo de 2013.
4. NTP 510: Válvulas de seguridad: selección:
http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_510.pdf, página consultada por última vez el 1 de Abril de 2013.
5. Roger Bours, Diseño de sistemas de alivio de presión, <http://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/22516-Diseno-de-sistemas-de-alivio-de-presion.html>, página consultada por última vez el 20 de Mayo de 2013.
6. Seguridad industrial: <http://definicion.de/seguridad-industrial/>, Página consultada por última vez el 8 de Mayo de 2013
7. Válvulas de alivio de presión y vacío para tanques de almacenamiento,: <http://www.pemex.com/files/content/NRF-172-PEMEX-2007-F.pdf>, página consultada por última vez el 7 de Mayo de 2013

Anexos:

Anexo I

Especificación de una válvula de seguridad

		HOJA DE ESPECIFICACIONES VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN Y VACÍO PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO				HOJA	1	DE	1
		REVISIÓN	No.	POR	FECHA	ESPEC. No.		REV:	
PROYECTO:						CONTRATO		FECHA	
PLANTA:						POR	REVISÓ	APRO.	
LOCALIZACIÓN:									
Datos del Tanque									
1	Identificación								
2	Servicio /Fluido								
3	Presión de Vapor Reid								
4	Capacidad m ³ (Barril)								
5	Espesor del techo								
6	Presión interna de diseño Pa man (onza/pulg ² man)								
7	Presión de operación / Máxima Permisible Pa man (onza/pulg ² man)								
8	Temperatura de operación K/°C								
9	Punto de Inflamación K (°C)								
10	vr / vd m ³ /hora (barril/hora)								
11	Espacio de Gas								
12	Datos de la válvula para alivio de presión y vacío								
13	Identificación								
14	Cantidad								
15	Gr. Esp.: Operación Peso Molecular								
16	Venteo: Atm. o Cabezal Tubos Cerrado								
17	Rango de Alivio de Presión /Vacío Pa man (onza/pulg ² man)								
18	Presión de ajuste en plato para Alivio de Presión (Pa man) (onza/pulg ² man)								
19	Presión de ajuste en plato para Alivio de Vacío (Pa man) (onza/pulg ² man)								
20	Capacidad de flujo Requerida m ³ /hora (pie ³ /hora de gas								
21	Carga: Oper. Resorte/Contrapeso								
22	Conexión Admisión: Bridada								
23	Tamaño mm (Pulg) Clase								
24	Conexión Descarga: Bridada								
25	Tamaño mm (Pulg) Clase								
26	Material Cuerpo Recubrimiento								
27	Asiento Arreglo								
28	Resorte Diafragma								
29	Piloto: Flujo Modulación								
30	Filtro Resorte Piloto								
31	Certif. ISO 15156:2009 (Sí/No)								
32	Código Diseño Base p/Selección								
33	Referencia de Cálculos								
34	ACCESORIOS								
35	Arrestador de flama								
36	Tamaño/Clase								
37									



101202172419022012

Anexo II

Hoja de datos de válvula reguladora de presión.

Estos son los datos que se requieren para poder especificar una válvula de alivio de presión:

General			
1.	Identificación	PCV-1741A	PCV-1741B
2.	Fluido	Crudo amargo	Crudo amargo
3.	No. De línea	20"-P-7013A-C-B03T1-Ac	20"-P-7013A-C-B03T1-Ac
4.	Cédula	40	40
5.	Tipo	Back Pressure/Relief	Back Pressure/Relief
Cuerpo			
6.	Tamaño	6"	6"
7.	Tipo y rating de la conexión	300# RF	300# RF
8.	Acabado de la conexión	300# RF	300# RF
9.	Material	ASTM A216 GR. WCB	ASTM A216 GR. WCB
10.	Tipo de cierre	Lineal	Lineal
11.	Material de interiores	Monel (Nota 1) COTIZA EN INOX 316	Monel (Nota 1) COTIZA EN INOX 316
12.	Material del asiento	Monel (Nota 1) COTIZA EN INOX 316	Monel (Nota 1) COTIZA EN INOX 316
13.	Máximo nivel de ruido db @ 1 m.	85	85
14.	Rango del resorte	Por Proveedor	Por Proveedor
15.	Punto de ajuste	25 kg/cm ²	25 kg/cm ²
16.	Tipo de actuador	Diafragma	Diafragma
Condiciones de operación			
17.	Fluido	Crudo amargo	Crudo amargo

18.	Estado	Líquido		Líquido	
19.	Unidades de ingeniería para flujo	MBPD		MBPD	
20.	Flujo máximo líquido	100		100	
21.	Flujo normal líquido	70		70	
22.	Unidades de ingeniería para presión	Kg/cm² man.		Kg/cm² man.	
23.	Presión crítica kg/cm ²	36.35		36.35	
24.	Presión antes/después de la válvula (a/d)	A	D	A	D
25.	Presión máxima	25	23	25	23
26.	Presión de operación	25	23	25	23
27.	Unidades de ingeniería p/ temperatura	°C		°C	
28.	Temperatura crítica °C	427		427	
29.	Temperatura máxima	60		60	
30.	Temperatura de operación	60		60	
31.	Gravedad específica liq. @ 60°f	0.92		0.92	
32.	Peso molecular liq.	267.9		267.9	
33.	Viscosidad liq. Cp	60		60	
34.	K (C _p /C _v)	----		----	
35.	Marca	Por Proveedor		Por Proveedor	
36.	Modelo	Por Proveedor		Por Proveedor	

Notas:

1. Los materiales en contacto con el fluido de proceso deben apegarse a los requerimientos de la norma NACE MR0175/ISO 15156 más reciente edición.

Anexo II

Balance de energía mecánica

El balance de energía mecánica describe las diversas formas de energía asociados con los fluidos que circulan, y queda definido como:

$$\int \frac{\Delta P}{\rho} + \Delta \left(\frac{u^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = - \frac{W_s}{m}$$

Donde:

P= Es la presión; [fuerza/ área]

ρ = Es la densidad del fluido; [masa/volumen]

u= Es la velocidad instantánea media del fluido, [longitud/ tiempo]

g_c = Es la constante gravitacional; [longitud. Masa/ fuerza tiempo²]

α = Es un factor de corrección para el perfil de velocidades; [adimensional]

$\alpha=0.5$ para flujo laminar; $\alpha=1$ para flujo tapón; $\alpha \rightarrow 1$ para flujo turbulento

g= Es la aceleración debido a la gravedad; [longitud/ tiempo²]

Z= Es la altura, [longitud]

F=Es el término de pérdida neta de fricción

W_s =Representa el trabajo, [Fuerza, longitud]

m = Es la tasa de flujo másico; [masa/tiempo]

La función Δ representa la diferencia entre el estado final menos el estado inicial.

Anexo III

Factor de compresibilidad

C COMPRESSIBILITY FACTORS

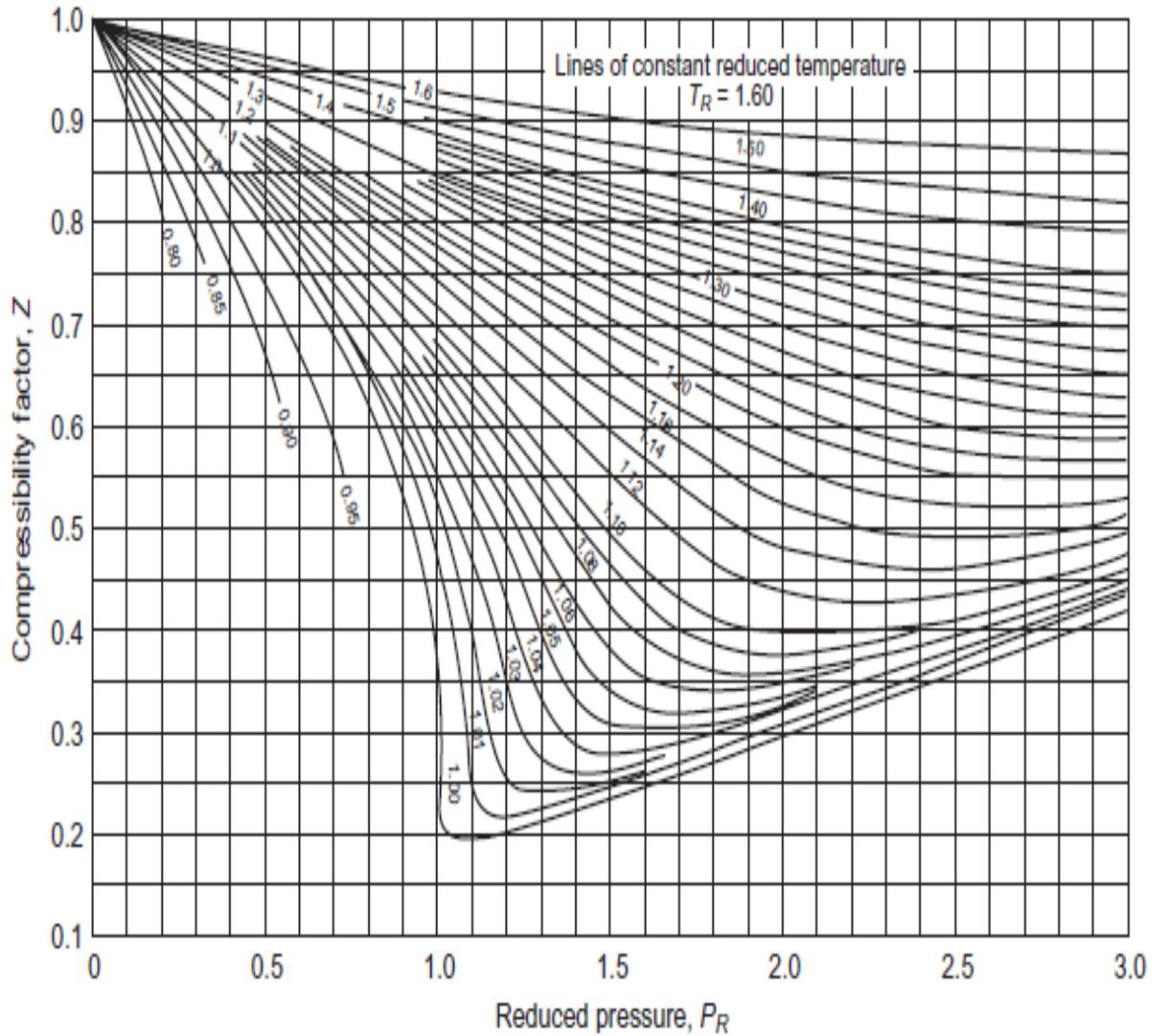


FIGURE C.1

Compressibility factors

Anexo IV

Servicio líquido

Dimensionamiento de PRV para líquidos

Flujo de masa	<input type="text" value="200000 [kg/h]"/>
Densidad relativa	<input type="text" value="0.85"/>
Viscosidad	<input type="text" value="1.2 [cP]"/>
Presión de alivio	<input type="text" value="2000 [kPa]"/>
Contrapresión	<input type="text" value="100 [kPa]"/>
Tipo de PRV	<input type="text" value="con o sin disco"/>
Disco de ruptura	<input type="text" value="no"/>

Resultados

Factor de corrección de contrapresión	<input type="text" value="1"/>
Número de Reynolds	<input type="text" value="1.262E+06"/>
Factor de corrección de viscosidad	<input type="text" value="1.004"/>
Área supuesta	<input type="text" value="1719 [mm²]"/> DISK\$ = no
Área requerida	<input type="text" value="1712 [mm²]"/>
Área real	<input type="text" value="1 [mm²]"/> A = 1712 [mm²]
Máximo Flujo de masa	<input type="text" value="1 [kg/h]"/>

Resolver

Designación	mm²/mm
D	70.97
E	126.5
F	198.1
G	324.5
H	506.5
J	830.3
K	1186
L	1641
M	2323
N	2800
P	4116
Q	7129
R	10323
T	15774

FUNCTION correction(P_2,P_1) "correction factor due to back pressure"

IF (P_2/P_1) < 0.15 THEN

k_w:=1.0

ENDIF

IF ((100*P_2/P_1)>15) AND ((100*P_2/P_1)<20) THEN

k_w:=INTERPOLATE('K_w 15-20','Column1','Column2',Column1=100*P_2/P_1)

ENDIF

IF (P_2/P_1) > 0.2 THEN

k_w:=1.177767857-0.01006642857*(100*P_2/P_1)

ENDIF

correction:=k_w

END

FUNCTION tam(A) "tamaño comercial del orificio"

i:=1

REPEAT

i:=i+1

x:=Lookup('OS',i,'S')

z:=Lookup('OS',i+1,'S')

DELTA:=(z-x)/2

IF ((x+DELTA)<A) AND (A<z) THEN

x\$:=Lookup\$('OS',i+1,'X')

ENDIF

```

IF (x<A) AND (A<(x+DELTA)) THEN
x$:=Lookup$('OS',i,'X')
ENDIF
UNTIL (i=14)
tam:=x$
END b
A=((11.78*Q)/(K_d*K_w*K_c*K_v))*SQRT(G/(P_1-P_2)) "área requerida"
Q=1/60*m_dot/G "gasto volumétrico"
K_v=(0.9935+2.878/R^0.5+342.75/R^1.5)^(-1.0) "factor de corrección de viscosidad"
A_g=((11.78*Q)/(K_d*K_w*K_c*1.0))*SQRT(G/(P_1-P_2)) "first guess"

R=18800*Q*G/(mu*SQRT(A)) "número de Reynolds"
row=LOOKUP$ROW('OS','X',tam(A))
A_a=LOOKUP('OS',row,'S') "área real"
Q_2=1/60*m_dot_2/G "gasto máximo"
A_a=((11.78*Q_2)/(K_d*K_w*K_c*1))*SQRT(G/(P_1-P_2))
K_w=correction(P_2,P_1) "llamando a la función"
$if disk$='no' "disco de ruptura"
K_c=1.0
$else
K_c=0.9
$endif
$if type$='con o sin disco' "tipo de PRV"
K_d=0.65
$else
K_d=0.62
$endif

```

Anexo V

Servicio vapor

presión crítica	<input type="text" value="22080 [kPa]"/>	factor de compresibilidad	<input type="text" value="1"/>
k	<input type="text" value="1.31"/>	disco de ruptura instalado	<input type="text" value="no"/>
temperatura de alivio	<input type="text" value="21.29 [°C]"/>	<input type="button" value="Resolver"/>	
presión de alivio	<input type="text" value="2000 [kPa]"/>	coeficiente de combinación	<input type="text" value="1"/>
contrapresión	<input type="text" value="137.9 [kPa]"/>	coeficiente de descarga	<input type="text" value="0.975"/>
masa molecular	<input type="text" value="18 [g/mol]"/>	coeficiente de corrección de contrapresión	<input type="text" value="1"/>
flujo	<input type="text" value="200000 [kg/h]"/>	área del orificio	<input type="text" value="19887 [mm²]"/>
coeficiente de descarga	<input type="text" value="con o sin disco"/>		
tipo de PRV	<input type="text" value="fuelles"/>		
sobrepresión	<input type="text" value="10"/>		

FUNCTION tam(A) "tamaño comercial del orificio"

i:=1

REPEAT

i:=i+1

x:=Lookup('OS',i,'S')

z:=Lookup('OS',i+1,'S')

DELTA:=(z-x)/2

IF ((x+DELTA)<A) AND (A<z) THEN

x\$:=Lookup\$('OS',i+1,'X')

ENDIF

IF (x<A) AND (A<(x+DELTA)) THEN

x\$:=Lookup\$('OS',i,'X')

ENDIF

UNTIL (i=14)

tam:=x\$

END b

PROCEDURE crit(k,m_dot,P_c,P_1,P_2,W,T,Z:A,K_d,K_c,K_b)

IF ((P_c / P_1) < ((2 / (k + 1)) ^ (k / (k - 1)))) THEN

\$if disk\$='no'

K_c:=1.0

\$else

K_c:=0.9

\$endif

\$if type\$='con o sin disco'

K_d:=0.975

\$else

K_d:=0.62

\$endif

\$if tipo\$='convencional'

K_b:=1

```

$endif
$if tipo$='fuelles'
$if over$='10'
IF ((P_2/P_1)>0.3) THEN
K_b:=INTERPOLATE('overpressure10','fracc','Kb',fracc=(100*P_2/P_1))
ELSE
K_b:=1
ENDIF
$endif
$if over$='16'
IF ((P_2/P_1)>0.38) THEN
K_b:=INTERPOLATE('op16','fracc','Kb',fracc=(100*P_2/P_1))
ELSE
K_b:=1
ENDIF
$endif
$if over$='21'
K_b:=1
$endif
$endif
A:=(13160*m_dot*SQRT((T+273)*Z))/((520*SQRT(k*(2/(k+1))^(k+1)/(k-1))))*K_d*P_1*K_b*K_c*SQRT(W))
ENDIF
IF ((P_c/P_1)>((2/(k+1))^(k/(k-1)))) THEN
$if tipo$='convencional'
$if disk$='no'
K_c:=1.0
$else
K_c:=0.9
$endif
$if type$='con o sin disco'
K_d:=0.975
$else
K_d:=0.62
$endif
K_b:=1
A:=(17.9*m_dot*SQRT(Z*(T+273)))/((SQRT(((k/(k+1))*(P_2/P_1)^(2/k)*((1-(P_2/P_1))^(k-1)/k)/(1-(P_2/P_1)))))*K_c*K_d*SQRT(W)*P_1*(P_1-P_2)))
$if tipo$='fuelles'
$if over$='10'
IF ((P_2/P_1)>0.3) THEN
K_b:=INTERPOLATE('overpressure10','fracc','Kb',fracc=(100*P_2/P_1))
ELSE
K_b:=1
ENDIF
$endif
$if over$='16'

IF ((P_2/P_1)>0.38) THEN
K_b:=INTERPOLATE('op16','fracc','Kb',fracc=(100*P_2/P_1))

```

```

ELSE
K_b:=1
ENDIF
$endif
$if over$='21'
K_b:=1
$endif
$if disk$='no'
K_c:=1.0
$else
K_c:=0.9
$endif
$if type$='con o sin disco'
K_d:=0.975
$else
K_d:=0.62
$endif
A:=(13160*m_dot*SQRT((T+273)*Z))/((520*SQRT(k*(2/(k+1))^(k+1)/(k-1))))*K_d*P_1*K_b*K_c*SQRT(W))
$endif
ENDIF
END
CALL crit(k,m_dot,P_c,P_1,P_2,W,T,Z:A,K_d,K_c,K_b)
"row=LOOKUP$ROW('OS','X',tam(A))
A_a=LOOKUP('OS',row,'S')

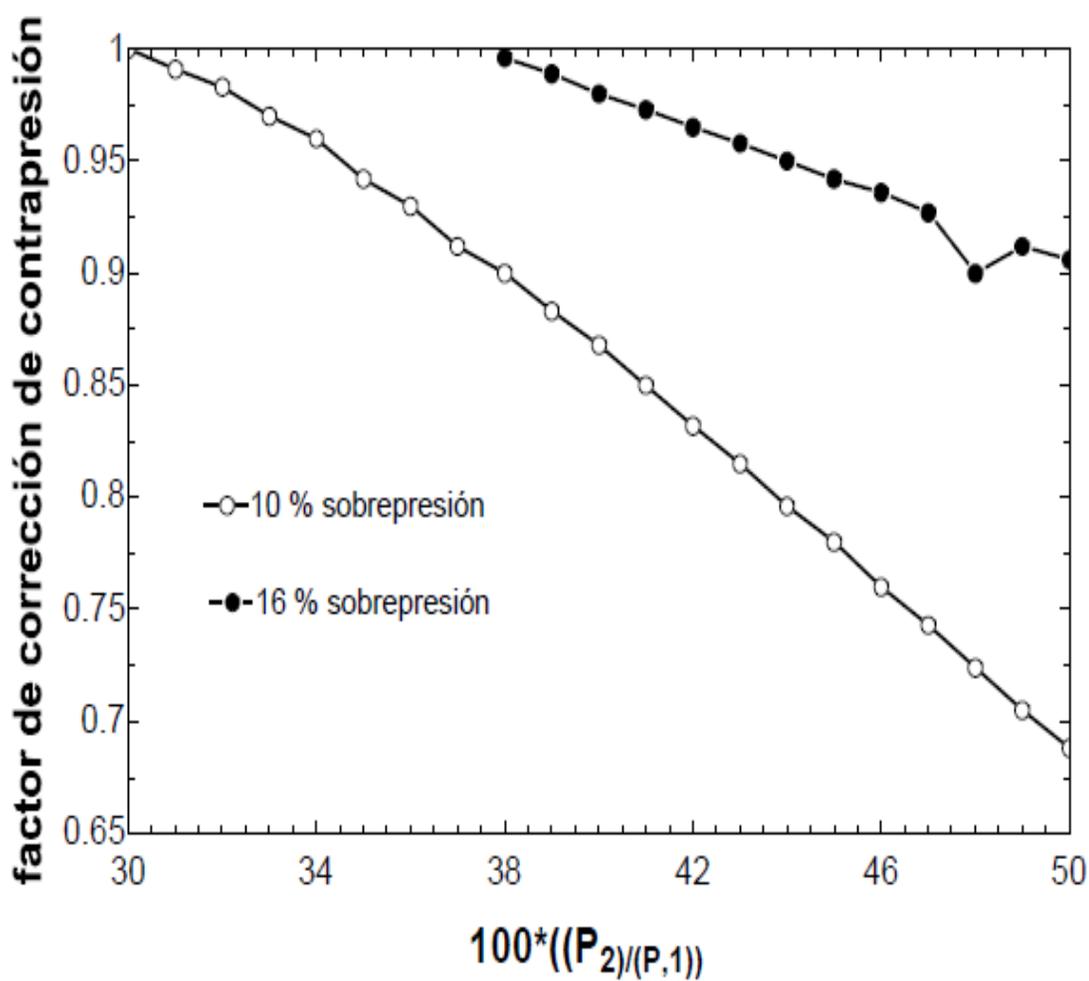
```

Lookup Table: K w 15-20

	Column1	Column2
Row 1	15	1
Row 2	15.33	0.9968
Row 3	15.67	0.9966
Row 4	16	0.9965
Row 5	16.33	0.9937
Row 6	16.67	0.9935
Row 7	17	0.9906

Lookup Table: K w 15-20

	Column1	Column2
Row 8	17.33	0.9906
Row 9	17.67	0.99
Row 10	18	0.99
Row 11	18.33	0.9873
Row 12	18.67	0.9843
Row 13	19	0.9828
Row 14	19.33	0.9812
Row 15	19.67	0.9796
Row 16	20	0.9781



Anexo VI

Servicio tipo I & II

Válvula de Alivio de Presión Tipo 1&2

NBR= nominal boiling range
 $C_p = 2.555$ capacidad térmica específica
 $T_0 = 333$ temperatura de alivio
 $k = 1.113$ razón de calores específicos
 $P_a = 121$ contrapresión kPa abs
 $P_0 = 431$ presión de alivio kPa abs
 $K_d = 0.85$ coeficiente de descarga
 $W = 20000$ flujo kg/h

$x_0 = 0.409$ fracción de vapor/vapor y gas
 $v_0 = 0.0382$ volumen específico del sistema
 $v_{v0} = 0.0908$ volumen específico de vapor/vapor y gas
 $v_{v10} = 0.089$ diferencia volúmenes entre líquido y vapor
 $v_g = 0.043$ volumen específico del sistema a 90% de P_0
 $h_{v10} = 277$ calor latente de vaporización
 $v_{vg0} = 0.1$ volumen específico combinado de vapor y gas (tipo 2)

tipo de fluido
 tipo de válvula
 disco de ruptura
 sobrepresión

 Resolver

$P_c = 275.2$ presión crítica
 $\eta_c = 0.6386$ razón de presión crítica
 flujo de masa $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$
 parámetro omega
 $A = 4159$ área requerida
 $A_a = 1$ área de orificio estándar

Designación	mm*mm
D	70.97
E	126.5
F	198.1
G	324.5
H	506.5
J	830.3
K	1186
L	1841
M	2323
N	2800
P	4116
Q	7129
R	10323
T	16774

ORIFICIO:

```

PROCEDURE ORIF(A_a:HOLE$) "tipo de agujero"
IF (A_a=70.97) THEN
HOLE$=COPY$('D', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=126.5) THEN
HOLE$=COPY$('E', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=198.1) THEN
HOLE$=COPY$('F', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=324.5) THEN
HOLE$=COPY$('G', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=506.5) THEN
HOLE$=COPY$('H', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=830.3) THEN
HOLE$=COPY$('J', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=1186) THEN

```

```

HOLE$=COPY$('K', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=1841) THEN
HOLE$=COPY$('L', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=2323) THEN
HOLE$=COPY$('M', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=2800) THEN
HOLE$=COPY$('N', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=4116) THEN
HOLE$=COPY$('P', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=7129) THEN
HOLE$=COPY$('Q', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=10323) THEN
HOLE$=COPY$('R', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=16774) THEN
HOLE$=COPY$('T', 0, 255)
ENDIF
END
FUNCTION tam(A) "tamaño comercial del orificio"
i:=1
REPEAT
i:=i+1
x:=Lookup('OS',i,'S')
z:=Lookup('OS',i+1,'S')
DELTA:=(z-x)/2
IF ((x+DELTA)<A) AND (A<z) THEN
x$:=Lookup$('OS',i+1,'X')
ENDIF
IF (x<A) AND (A<(x+DELTA)) THEN
x$:=Lookup$('OS',i,'X')
ENDIF
UNTIL (i=14)
tam:=x$
END b
FUNCTION parameter(x_0,v_0,v_v0,P_0,v_vl0,h_vl0,C_p,T_0,k,v_9,v_vg0,NBR)
$if type$='tipo1'
IF (NBR<83) THEN
omega_50:=((x_0*v_v0)/v_0)*(1-
(2*P_0*v_vl0)/(h_vl0))+((C_p*T_0*P_0)/(v_0))*(v_vl0/h_vl0)^2
omega_51:=((x_0*v_v0)/(v_0*k))+((C_p*T_0*P_0)/(v_0))*(v_vl0/h_vl0)^2
omega:=MAX(omega_50,omega_51)
ENDIF
IF (NBR>83) THEN
omega_52:=9*(v_9/v_0-1)
omega:=omega_52

```

```

ENDIF
$else
IF (NBR<83) THEN
omega_61:=(x_0*v_vg0)/(v_0*k)

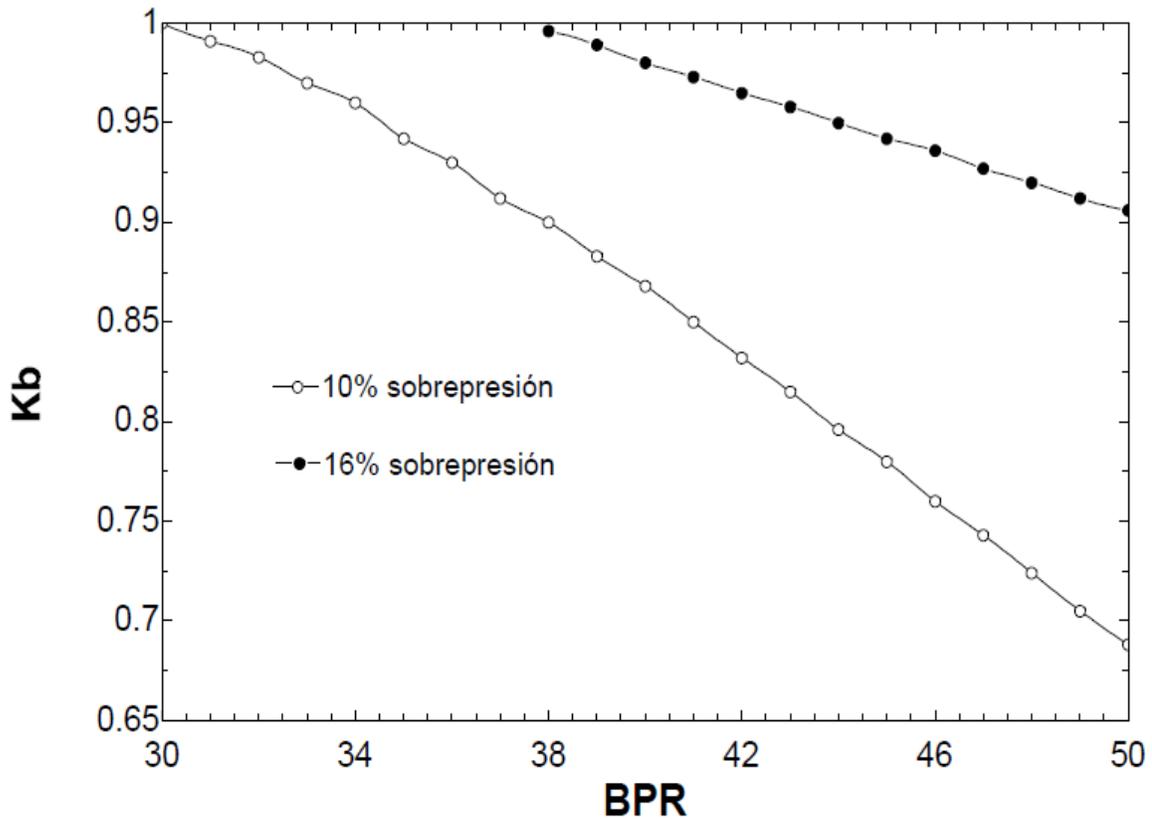
omega:=omega_61
ENDIF
IF (NBR>83) THEN
omega_52:=9*(v_9/v_0-1)
omega:=omega_52
ENDIF
$endif
parameter:=omega
END
FUNCTION BPCF(P_a,P_0)
$if PRV$='convencional'
K_b:=1
$endif
$if PRV$='fuelles'
$if over$='10'
IF ((P_a/P_0)>0.3) THEN
K_b:=INTERPOLATE('op10','BPR','Kb',BPR=(100*P_a/P_0))
ELSE
K_b:=1
ENDIF
$endif
$if over$='16'
IF ((P_a/P_0)>0.38) THEN
K_b:=INTERPOLATE('op16','BPR','Kb',BPR=(100*P_a/P_0))
ELSE
K_b:=1
ENDIF
$endif
$if over$='21'
K_b:=1
$endif
BPCF:=K_b
END
PROCEDURE massflow(P_0,P_c,P_a,v_0,omega_2,eta_c:G,Neat$)
eta_a:=P_a/P_0
IF (P_c>=P_a) THEN
Neat$=COPY$('flujo crítico', 0, 255)
G:=31.637*eta_c*SQRT((P_0)/(v_0*omega_2))
ENDIF
IF (P_c<P_a) THEN
Neat$=COPY$('flujo subcrítico', 0, 255)
G:=(31.637*(-2*(omega_2*LN(eta_a)+(omega_2-1)*(1-eta_a)))^(0.5))/(omega_2*(1/eta_a-1)+1)*SQRT(P_0/v_0)
ENDIF
END
CALL massflow(P_0,P_c,P_a,v_0,omega_2,eta_c:G,Neat$)

```

```

omega_2= parameter(x_0,v_0,v_v0,P_0,v_vl0,h_vl0,C_p,T_0,k,v_9,v_vg0,NBR)
K_b_2= BPCF(P_a,P_0)
$if disk$='no'
K_c=1.0
$else
K_c=0.9
$endif
eta_c+(omega_2^2-2*omega_2)*(1-eta_c)^2+2*omega_2^2*LN(eta_c)+2*omega_2^2*(1-eta_c)=0
P_c=eta_c*P_0
A=(277.777*W)/(K_b_2*K_c*K_d*G)
row=LOOKUP$ROW('OS','X',tam(A))
A_a=LOOKUP('OS',row,'S') "área real"
CALL ORIF(A_a:HOLE$)

```



Anexo VII

Servicio tipo IV

nominal boiling range	punto crítico	contenido de hidrógeno	tipo de válvula	
menos de 83	lejos	menos de 0.1%	fuelles	<input type="button" value="Resolver"/>

W=20000	flujo de masa kg/h	disco de ruptura	
x ₀ =0.551	fracción de masa vapor/gas	<input type="text" value="no"/>	
v _{vg0} =0.0752	volumen específico gas/vapor		
v ₀ =0.0422	volumen específico flujo bifásico	sobrepresión	
P _{v0} =486	presión de saturación @T ₀	<input type="text" value="10"/>	
P ₀ =651.3	presión de alivio kPaA		
P _{g0} =211	presión parcial gas no condensable kPaA		
k=1.141	razón de calores específicos		
ρ _{l0} =560	densidad del líquido		
C _p =2.548	calor específico		
T ₀ =333	temperatura de alivio		
v _{v10} =0.0972	diferencia entre vapor y líquido m ³ /kg		
h _{v10} =332	calor latente de vaporización kJ/kg		
v _g =0.046	volumen específico @ 90% P ₀		
P _a =410	contrapresión		
K _d =0.85	coeficiente de descarga		

ORIFICIO: ??			
--------------	--	--	--

Designación	mm ² /mm
D	70.97
E	126.5
F	198.1
G	324.5
H	506.5
J	830.3
K	1186
L	1841
M	2323
N	2800
P	4116
Q	7129
R	10323
T	16774

α ₀ = 0.9819	inlet void fraction	K _{b,aux} = 0.688	factor de corrección de contrapresión
omega = 1.219	parámetro omega	K _c = 1	factor de combinación
η _{gc} = 0.587	non-flashing critical pressure ratio	A = 4084	área de descarga
η _{vc} = 0.6319	flashing critical pressure ratio	A ₃ = 4116	área real de descarga
P _c = 402.1	critical pressure		??)84
G _v = 2245	flashing mass flux		A = 4084
η _v = 0.6662	flashing partial pressure ratio		P _{c,2} = 377.2
G _g = 2486	non-flashing mass flux		ω ₂ y P _{c,2} son
η _g = 0.5739	non-flashing partial pressure ratio		del escenario 2
G = 2326	mass flux kg/s*m ²		??)84

PROCEDURE ORIF(A_a:HOLE\$) "tipo de agujero"

```

IF (A_a=70.97) THEN
HOLE$=COPY$('D', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=126.5) THEN
HOLE$=COPY$('E', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=198.1) THEN
HOLE$=COPY$('F', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=324.5) THEN
HOLE$=COPY$('G', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=506.5) THEN
HOLE$=COPY$('H', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=830.3) THEN
HOLE$=COPY$('J', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=1186) THEN
HOLE$=COPY$('K', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=1841) THEN
HOLE$=COPY$('L', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=2323) THEN
HOLE$=COPY$('M', 0, 255)
ENDIF
ENDIF

```

```

IF (A_a=2800) THEN
HOLE$=COPY$( 'N', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=4116) THEN
HOLE$=COPY$( 'P', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=7129) THEN
HOLE$=COPY$( 'Q', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=10323) THEN
HOLE$=COPY$( 'R', 0, 255)
ENDIF
IF (A_a=16774) THEN
HOLE$=COPY$( 'T', 0, 255)
ENDIF
END
FUNCTION tam(A) "tamaño comercial del orificio"
i:=1
REPEAT
i:=i+1
x:=Lookup('OS',i,'S')
z:=Lookup('OS',i+1,'S')
DELTA:=(z-x)/2
IF ((x+DELTA)<A) AND (A<z) THEN
x$:=Lookup$( 'OS',i+1,'X')
ENDIF
IF (x<A) AND (A<(x+DELTA)) THEN
x$:=Lookup$( 'OS',i,'X')
ENDIF
UNTIL (i=14)
tam:=x$
END

FUNCTION BPCF(P_a,P_0) "back pressure correction factor"
$if PRV$='convencional'
K_b:=1
$endif
$if PRV$='fuelles'
$if over$='10'
IF ((P_a/P_0)>0.3) THEN
K_b:=INTERPOLATE('op10','BPR','Kb',BPR=(100*P_a/P_0))
ENDIF
IF ((P_a/P_0)<0.3) THEN
K_b:=1
ENDIF
IF ((P_a/P_0)>0.5) THEN
K_b:=0.688
ENDIF
$endif
$if over$='16'
IF ((P_a/P_0)>0.38) THEN
K_b:=INTERPOLATE('op16','BPR','Kb',BPR=(100*P_a/P_0))
ENDIF
IF ((P_a/P_0)<0.38) THEN
K_b:=1

```

```

ENDIF
IF ((P_a/P_0)>0.5) THEN
K_b:=0.906
ENDIF
$endif
$if over$='21'
K_b:=1
$endif
$endif
BPCF:=K_b
END
PROCEDURE
scen(P_0,v_0,y_g0,eta_gc,k,alpha_0,eta_vc,omega,eta_g,eta_v,P_v0,P_g0,P_c,P_a,eta_c,omega
_2,hydro$,NBR$,critical$:G,Neat$,Meat$) "procedimiento para determinar los flujos"
IF(((P_v0/P_0)<0.9) OR ((P_g0/P_0)>0.1)) AND (hydro$='menos de 0.1%') AND (NBR$='menos
de 83') AND (critical$='lejos')) THEN
"escenario 1"
Neat$=COPY$('escenario 1', 0, 255)
IF (P_c>=P_a) THEN
Meat$=COPY$('flujo crítico', 0, 255)
G:=31.637*SQRT((P_0/v_0)*((y_g0*eta_gc^2*k)/alpha_0+((1-y_g0)*(eta_vc^2))/omega))
ENDIF
IF (P_c<P_a) THEN
Meat$=COPY$('flujo subcrítico', 0, 255)
G:=SQRT(y_g0*((31.637*(-2*((alpha_0/k)*LN(eta_g)+((alpha_0/k)-1)*(1-
eta_g)))^(1/2)))/((alpha_0/k)*(1/eta_g-1)+1)*SQRT(P_0/v_0) )
^2+(1-y_g0)*((31.637*(-2*(omega*LN(eta_v)+(omega-1)*(1-eta_v)))^(1/2))/(omega*(1/eta_v-
1)+1)*SQRT(P_0/v_0))^2)
ENDIF
ENDIF
IF(((P_v0/P_0)>0.9) OR ((P_g0/P_0)<0.1)) OR (hydro$='más de 0.1%') OR (NBR$='mas de 83')
OR (critical$='cerca')) THEN
"escenario 2"
Neat$=COPY$('escenario 2', 0, 255)
P_c_2=eta_c*P_0 "P_c_2 es lo mismo que P_c , presión crítica"
eta_a=P_a/P_0
IF (P_c_2>=P_a) THEN
Meat$=COPY$('flujo crítico', 0, 255)
G=31.637*eta_c*SQRT(P_0/(v_0*omega_2))
ENDIF
IF (P_c_2<P_a) THEN
Meat$=COPY$('flujo subcrítico', 0, 255)
G=(31.637*(-2*(omega_2*LN(eta_a)+(omega_2-1)*(1-eta_a)))^(1/2))/(omega_2*(1/eta_a-
1)+1)*SQRT(P_0/v_0)
ENDIF
ENDIF
END
$if disk$='no'
K_c=1.0
$else
K_c=0.9
$endif
CALL
scen(P_0,v_0,y_g0,eta_gc,k,alpha_0,eta_vc,omega,eta_g,eta_v,P_v0,P_g0,P_c,P_a,eta_c,omega
_2,hydro$,NBR$,critical$:G

```

,Neat\$,Meat\$)

"-----"
-----"

$\eta_{gc}^2 + ((\alpha_0/k)^2 - (2*\alpha_0)/k) * (1 - \eta_{gc})^2 + 2 * ((\alpha_0/k)^2 * \ln(\eta_{gc}) + ((\alpha_0/k)^2 * (1 - \eta_{gc})) = 0$
 $\eta_{vc}^2 + (\omega^2 - 2*\omega) * (1 - \eta_{vc})^2 + 2*\omega^2 * \ln(\eta_{vc}) + 2*\omega^2 * (1 - \eta_{vc}) = 0$
 $\alpha_0 = (x_0 * v_{vg0}) / v_0$
 $\omega = \alpha_0 / k + (1 - \alpha_0) * \rho_{l0} * C_p * T_0 * P_{v0} * (v_{vl0} / h_{vl0})^2$
 $y_{g0} = P_{g0} / P_0$
 $P_c = (y_{g0} * \eta_{gc} + (1 - y_{g0}) * \eta_{vc}) * P_0$
 $\eta_a = y_{g0} * \eta_g + (1 - y_{g0}) * \eta_v$
 $(\alpha_0/k) * (1/\eta_g - 1) = \omega * (1/\eta_v - 1)$
 $\eta_a = P_a / P_0$

"-----"
-----"
 $\omega_2 = 9 * (v_9 / v_0 - 1)$ "parámetro omega para el caso 2"
 $\eta_c^2 + (\omega_2^2 - 2*\omega_2) * (1 - \eta_c)^2 + 2*\omega_2^2 * \ln(\eta_c) + 2*\omega_2^2 * (1 - \eta_c) = 0$
 $P_{c2} = \eta_c * P_0$

"-----"
-----"
 $G_g = (31.637 * (-2 * ((\alpha_0/k) * \ln(\eta_g) + ((\alpha_0/k) - 1) * (1 - \eta_g)))^{1/2}) / ((\alpha_0/k) * (1/\eta_g - 1) + 1) * \text{SQRT}(P_0 / v_0)$
 $G_v = (31.637 * (-2 * (\omega * \ln(\eta_v) + (\omega - 1) * (1 - \eta_v)))^{1/2}) / (\omega * (1/\eta_v - 1) + 1) * \text{SQRT}(P_0 / v_0)$

"-----"
-----"
row=LOOKUP\$ROW('OS','X',tam(A))
A_a=LOOKUP('OS',row,'S')
K_b_aux=BPCF(P_a,P_0)
A=277.777*W/(K_b_aux*K_c*K_d*G)
CALL ORIF(A_a:HOLE\$)

