



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Máster en Ingeniería Química

## DISPOSITIVOS DE ALIVIO DE PRESIÓN

VERIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE SEGURIDAD ANTE ESCENARIOS DE  
SOBREPRESIÓN EN UNA INSTALACIÓN DE PROCESO



## Memoria y Anexos

**Autor:** Asier Baizán Verdejo  
**Director:** Eulàlia Planas Cuchi  
**Co-Director:** Miguel Muñoz Messineo  
**Convocatoria:** Octubre 2019



## **CONFIDENCIALIDAD**

De acuerdo a políticas de privacidad de la empresa propietaria de los datos utilizados, el nombre de la compañía ha sido retirado del documento y los TAGs e identificadores de los equipos y dispositivos han sido modificados.

De la misma manera no se muestran los diagramas de instrumentación y tuberías utilizados durante el estudio, sino que se muestran esquemas extractos de los mismos.



## **RESUM**

Els elements d'alleujament de pressió representen l'última barrera davant la ruptura catastròfica d'un equip degut a una pressió excessiva al seu interior, en aquests dispositius es confia una gran part de la protecció contra els escenaris de sobrepresió que es poden produir a la instal·lació. En la gran majoria dels casos, les plantes industrials treballen amb substàncies o condicions operatives perilloses, el que suposa un risc tant per a les persones com per al medi ambient.

Per aquest motiu és crític que el disseny i el dimensionament dels dispositius d'alleujament de pressió sigui adequat i estigui en concordança tant amb les normes i la direcció vigent com amb les característiques i bones pràctiques pròpies de cada procés, tant en instal·lacions de nova construcció com en instal·lacions ja existents.

A causa de les modificacions que qualsevol instal·lació industrial realitza al llarg de la vida de la planta és necessari avaluar el funcionament dels dispositius d'alleujament de pressió en les condicions operatives actuals. La verificació de l'acceptabilitat dels elements d'alleujament de pressió en una instal·lació de procés és un estudi bàsic a realitzar durant les diferents avaluacions o auditories de seguretat que es realitzen de manera periòdica en les plantes industrials.

En aquest projecte es descriuen els dispositius d'alleujament de pressió convencionals, així com els escenaris de sobrepresió que poden ocórrer de forma genèrica en una instal·lació de procés. Aquest serà la base de partida per realitzar el procés de verificació de l'acceptabilitat d'una sèrie d'elements de seguretat en una planta industrial en base al seu rol en el procés productiu.

## RESUMEN

Los elementos de alivio de presión representan la última barrera ante la ruptura catastrófica de un equipo debido a un exceso de presión en su interior, en estos dispositivos se confía gran parte de la protección contra los escenarios de sobrepresión que se pueden dar en la instalación. En la gran mayoría de los casos las plantas industriales trabajan con sustancias o condiciones operativas peligrosas, lo que entraña un riesgo tanto para las personas como para el medio ambiente.

Por este motivo es crítico que el diseño y dimensionamiento de los dispositivos de alivio de presión sea adecuado y esté en concordancia tanto con las normas y la directiva vigente como con las características y buenas prácticas propias de cada proceso, tanto en instalaciones de nueva construcción como en instalaciones ya existentes.

Debido a las modificaciones que cualquier instalación industrial realiza a lo largo de la vida de la planta es necesario evaluar el funcionamiento de los dispositivos de alivio de presión en las condiciones operativas actuales. La verificación de la aceptabilidad de los elementos de alivio de presión en una instalación de proceso es un estudio básico a realizar durante las diferentes evaluaciones o auditorías de seguridad que se realizan de manera periódica en las plantas industriales.

En este proyecto se describirán los dispositivos de alivio de presión convencionales, así como los escenarios de sobrepresión que se pueden dar de manera genérica en una instalación de proceso. Ésta será la base de partida para realizar el proceso de verificación de la aceptabilidad de una serie de elementos de seguridad en una planta industrial en base a su rol en el proceso productivo.

## **ABSTRACT**

Pressure relief devices stand as the last protection barrier before the rupture or collapse of some equipment due to an excessive pressure inside them, most of the protection against overpressure in a production plant rely on these devices. Industrial plants worldwide handle hazardous substances as well as dangerous operation conditions, what means a risk to the people and environment.

For this reason, it is critical that the design and sizing of the pressure relief devices be appropriate and in agreement with the current standards and laws and with the characteristics and good practices that characterizes each process, both in new installations and in existing ones.

A lot of changes are made in the production process in any industrial installation along its life cycle, due to these modifications it is necessary to evaluate the correct functioning of pressure-relief devices in the current operative conditions. The acceptance verifying of pressure-relief devices in a process installation is a basic study to carry out in the evaluations and safety audits that are made periodically in industrial plants.

This project, describes the typical and most used pressure relief devices, as well as the overpressure scenarios that can be found in most of the process plants. This is the starting point to carry out the process of verifying the acceptability of a series of safety elements in an industrial plant basing on its role in the production process.



## **AGRADECIMIENTOS**

En lo personal,

A mi familia, que siempre ha confiado en mis decisiones y que siempre han estado conmigo por muy lejos que me haya ido. A los amigos que han estado y ya no están, a los que han estado y siguen ahí y, especialmente, a los que no han estado pero que ahora están y que hacen que estos tres últimos años hayan sido los mejores de mi vida.

En lo profesional,

A Miguel Muñoz, que me ha enseñado prácticamente todo lo que sé sobre el alivio de presión y siempre se ha interesado en mi criterio técnico y profesional, a Juan Antonio Vílchez que me ha tutelado desde el primer momento y me ha permitido aprender a su lado. A TIPs (Trámites, Informes y Proyectos) que me ha dado la oportunidad de introducirme en el sector de la seguridad de procesos y a Applus por permitirme ampliar aún más mi formación en accidentes graves.

Y en último lugar,

A Barcelona, per ser la millor decisió que vaig poder prendre mai, per totes les noves oportunitats, noves experiències, nous amics i gent que he conegut, per ser l'únic lloc al que li puc dir llar que no sigui León. Per molts anys més.



## **GLOSARIO**

AICHE	American Institute of Chemical Engineers
BD	Bursting Disc
CCPS	Center for Chemical Process Safety
CSB	Chemical Safety Board
DIERS	Design Institute for Emergency Relief Systems
HAZID	Hazard Identification Analysis
HAZOP	Hazard and Operability Analysis
MAWP	Maximum Allowable Working Pressure
MNFA	Minimum Net Flow Area
PHA	Process Hazard Analysis
PRV	Pressure Relief Valve
PSV	Pressure Safety Valve
PVRV	Pressure-Vacuum Relief Valve
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
RBI	Risk Based Inspection
RD	Rupture Disc
SECE	Safety and Environmental Critical Element
SIL	Safety Integrity Level
TNO	Netherlands Organization for Applied Scientific Research
TRV	Thermal Relief Valve

## DEFINICIONES

Acumulación: incremento de presión sobre la MAWP o presión de diseño hasta la descarga de un elemento de alivio de presión.

Capacidad: caudal másico o volumétrico de sustancia a aliviar por un dispositivo de seguridad. Puede ser la capacidad requerida por los escenarios de sobrepresión o la capacidad disponible de la válvula.

Contrapresión: presión existente en la descarga de la válvula. Este término está constituido de dos parámetros, la contrapresión de la tubería de descarga (*built-up backpressure*) y la contrapresión superpuesta (*superimposed backpressure*).

Contrapresión de la tubería de descarga (*built-up backpressure*): pérdida de carga ocasionada por el flujo a través de la tubería de descarga en un elemento de alivio de presión. Es uno de los dos componentes de la contrapresión junto con la contrapresión superpuesta.

Contrapresión superpuesta (*superimposed backpressure*): presión estática o variable existente en la línea de descarga de un elemento de alivio de presión en el momento en que se requiere que éste entre en funcionamiento. Es uno de los dos componentes de la contrapresión junto con la contrapresión de la tubería de descarga.

Eliminación de cuellos de botella (*Debottlenecking*): procedimiento por el cual se evalúan cuáles son los puntos de una instalación que limitan su capacidad, para poder modificarlos y así aumentar de manera general la capacidad de la planta.

Máxima presión de operación permitida (MAWP): máxima presión admisible en un equipamiento o línea en su operación normal, debe ser inferior a la presión de diseño del equipo.

Presión asegurada: presión de un sistema asegurada por la presión de tarado del elemento de seguridad que protege el sistema.

Presión de reajuste (*blowdown*): diferencia de presión entre la presión de tarado y la presión de cierre de una válvula de seguridad. Expresado como porcentaje de la presión de tarado.

Presión de ruptura: presión aguas arriba de un disco de ruptura menos la presión aguas abajo del disco en el momento de la ruptura del mismo.

Presión de tarado: presión manométrica en la entrada de la válvula a la que está abriendo cuando se requiera su funcionamiento.

Sobrepresión: incremento de presión sobre la presión de tarado a la cual la válvula tendrá su elevación y capacidad de descarga máximas. Se indica por medio de porcentaje de la presión de tarado de la válvula.



# ÍNDICE

<b>CONFIDENCIALIDAD</b>	<b>I</b>
<b>RESUM</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>VII</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>IX</b>
<b>DEFINICIONES</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XIII</b>
<b>PREÁMBULO</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO	3
1.2. ALCANCE	4
<b>2. ELEMENTOS DE ALIVIO DE PRESIÓN</b>	<b>5</b>
2.1. VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN (PRVs)	5
2.1.1. Válvulas de seguridad de apertura rápida	5
2.1.2. Válvulas de seguridad proporcionales	8
2.1.3. Válvulas de seguridad accionadas por piloto	9
2.1.4. Válvulas de alivio de presión-vacío	10
2.1.5. Válvulas balanceadas por fuelle	11
2.2. DISCOS DE RUPTURA (RDs)	12
2.3. COMBINACIÓN DE ELEMENTOS DE SEGURIDAD	14
<b>3. ESCENARIOS DE SOBREPRESIÓN</b>	<b>17</b>
3.1. SALIDAS BLOQUEADAS	18
3.2. FALLO DE REGULACIÓN, APERTURA O FUGA DE VÁLVULA	19
3.3. ROTURA DE TUBOS	21
3.4. SOBRELLENADO	23
3.5. FALLO DE REFRIGERACIÓN O CONDENSACIÓN	24
3.6. CARGA MÁXIMA DE CALOR	24

3.7.	FUEGO EXTERNO .....	26
3.7.1.	Recipientes presurizados .....	26
3.7.2.	Recipientes atmosféricos .....	27
3.8.	REACCIÓN QUÍMICA .....	28
3.9.	RESPIRACIÓN TÉRMICA Y DESPLAZAMIENTO DE LÍQUIDO .....	29
3.9.1.	Exhalación ( <i>Outbreathing</i> ) .....	30
3.9.2.	Inhalación ( <i>Inbreathing</i> ) .....	31
3.10.	EXPANSIÓN TÉRMICA .....	31
3.11.	COMUNICACIÓN DE EQUIPOS .....	33
<b>4.</b>	<b>CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DISPONIBLE _____</b>	<b>35</b>
4.1.	CAPACIDAD DISPONIBLE EN VÁLVULAS DE SEGURIDAD .....	35
4.2.	CAPACIDAD DISPONIBLE EN DISCOS DE RUPTURA .....	38
4.2.1.	Método del coeficiente de descarga ( $K_D$ ) .....	38
4.2.2.	Método de resistencia al flujo ( $K_R$ ) .....	39
4.2.3.	Método de capacidad combinada .....	40
4.3.	CAPACIDAD DISPONIBLE EN VÁLVULA DE ALIVIO DE PRESIÓN-VACÍO .....	40
<b>5.</b>	<b>CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ESCENARIOS, ESTABILIDAD Y ACEPTABILIDAD_</b>	<b>43</b>
5.1.	ESTABILIDAD .....	44
5.1.1.	Pérdida de carga en la entrada .....	45
5.1.2.	Pérdida de carga en la descarga ( <i>backpressure</i> ) .....	47
5.1.3.	Onda de presión (interacción acústica) .....	48
5.1.4.	Relación área de salida / área de orificio .....	48
5.1.5.	Condensación retrógrada en la entrada .....	49
5.1.6.	Diseño inadecuado .....	49
5.2.	ACEPTABILIDAD .....	50
<b>6.</b>	<b>CÁLCULOS ADICIONALES (<i>PERFORMANCE</i>) _____</b>	<b>53</b>
6.1.	FUERZAS DE REACCIÓN .....	53
6.1.1.	Descarga hacia la atmósfera .....	53
6.1.2.	Descarga en sistema cerrado .....	54
6.2.	RUIDO .....	55
<b>7.</b>	<b>CASOS DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN _____</b>	<b>59</b>
7.1.	PARQUE DE TANQUES .....	60
7.1.1.	B 01 .....	61
7.1.2.	B 1010 .....	62

7.2.	PROCESO .....	63
7.2.1.	K 301 .....	63
7.2.2.	R 800 .....	64
7.2.3.	R 900 .....	65
7.2.4.	B 910 .....	67
7.2.5.	LÍNEA DE VAPOR.....	67
7.3.	GRUPOS DE FRÍO .....	68
7.3.1.	B 515 .....	69
7.3.2.	B 4015 .....	70
7.4.	SISTEMA DE VENTEO.....	70
<b>8.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>73</b>
8.1.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	73
8.2.	ESTADÍSTICAS .....	74
8.3.	DISPOSITIVOS NO ACEPTABLES Y RECOMENDACIONES .....	76
<b>9.</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b> .....	<b>79</b>
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>81</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>83</b>
	<b>ANEXO A. FICHA MODELO PRD</b> .....	<b>1</b>
	<b>ANEXO B. FICHAS DE PRDS CASOS DE ESTUDIO</b> .....	<b>1</b>
	<b>ANEXO C. ESQUEMAS DIAGRAMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y TUBERÍAS (P&amp;IDS)</b> .....	<b>1</b>



## **PREÁMBULO**

A lo largo de la historia han acontecido diferentes accidentes en las instalaciones industriales con graves consecuencias tanto para las personas, la salud pública como para el medio ambiente. En gran medida estos accidentes han sido causados por situaciones de aumento de presión en alguna de las partes del proceso productivo o durante el almacenamiento de diferentes sustancias utilizadas por las plantas industriales.

Ejemplos de accidentes de este tipo se encuentran en diversos históricos de accidentes industriales. Cabe destacar, por la deficiencia en la operación de las válvulas de alivio de presión, el accidente ocurrido en la planta petroquímica de producción de olefinas de Williams in Luisiana en 2013 en el que un intercambiador de calor explotó debido a que, durante operaciones no rutinarias, se aisló este equipo de sus dispositivos de alivio de presión. Esta incidencia resultó en la muerte de dos personas y numerosos heridos de gravedad (CSB, 2013).

Más crítico fue el accidente ocurrido en la refinería de BP en Texas en 2005. Las válvulas de seguridad abrieron para aliviar la sobrepresión ocasionada por la inundación de la torre de la unidad de isomerización, el alivio se realizó hacia el sistema de despresurización que constaba de un colector, separador, un tambor de reflujo y un venteo abierto a la atmósfera. Este diseño del sistema de alivio era anticuado y poco seguro ya que no disponía de una antorcha para aliviar de manera segura los gases o líquidos que se pudieran generar, además cambios en la presión de tarado de las válvulas redujeron la eficacia de las mismas en la protección de la sobrepresión, incluso la contrapresión en el sistema de despresurización en las condiciones de operación no fue correctamente evaluada para el dimensionamiento de las válvulas y del colector. Finalmente se produjo un géiser de material inflamable a través del venteo resultando en la muerte de 15 personas y 180 heridos (CSB, 2007).

Los dispositivos de alivio de presión son un elemento básico en la seguridad de procesos, siendo además elementos críticos en los que se confía una gran parte de la protección de un equipo ante la sobrepresión, en conjunto con el resto de salvaguardadas que puedan existir (funciones instrumentadas, alarmas, etc.). Teniendo en cuenta esto resulta impactante estudiar los resultados de informes que sentencian que una gran proporción de estos dispositivos no cumplen su función como deberían. Informes como el realizado por Berwanger et al. (Berwanger, 2000), sitúan en cerca de un 40% los elementos de seguridad estudiados con algún tipo de deficiencia en su diseño, instalación u operación, estudios posteriores llegan a resultados similares como el publicado por Kumana y Aldeeb en 2014.

Es por estas premisas que la motivación que impulsa la realización de este trabajo es la mejora de la implementación de estos dispositivos de seguridad críticos, ya sea en su fase de diseño o, en el caso de

los ya existentes, evaluando su aceptabilidad en las condiciones de proceso actuales en conjunto con todos los sistemas implicados en su correcto funcionamiento para la protección contra los escenarios de sobrepresión tanto en instalaciones de proceso como de almacenamiento.

# 1. INTRODUCCIÓN

Los elementos de alivio de presión, por sus siglas en inglés PRDs (*Pressure Relief Devices*), desempeñan un rol crítico en la seguridad de cualquier instalación de proceso que trabaje a presiones diferentes a la atmosférica (tanto superior como inferior), esto se acentúa cuando dichas instalaciones además trabajan con sustancias peligrosas como sustancias inflamables, tóxicas o nocivas. Por elementos de alivio de presión se entienden diferentes tipos de dispositivos como válvulas de seguridad, válvulas de alivio de presión – vacío, discos de ruptura, etc., que serán descritos más adelante.

El equipamiento a presión y los elementos de alivio de presión como accesorios de seguridad están sujetos al cumplimiento de la Directiva 2014/68/UE relativa a los equipos a presión (anterior Directiva de Equipos a Presión 97/23/EC PED). Los estándares norteamericanos se rigen por el código ASME Sección VIII de la asociación americana de ingenieros mecánicos. Cabe destacar que ambas normativas son muy similares y esto ayuda a una mayor armonía en cuanto a técnicas y procedimientos de diseño e implementación.

Los dispositivos de alivio de presión comprenden tanto los que evitan escenarios de sobrepresión como los que evitan escenarios de depresión. Aunque ambos escenarios son críticos para la seguridad de una instalación, por regla general, se hablará de las consecuencias de las situaciones de sobrepresión, cuando el análisis competa al caso de depresión se especificará en el texto.

Los elementos de alivio de presión representan la última barrera ante la rotura o colapso del equipamiento o líneas de proceso por el hecho de trabajar por encima de la máxima presión de operación permitida (en inglés *Maximum Allowable Working Pressure, MAWP*). Si el proceso comienza a trabajar por encima de esta presión y no existe ninguna salvaguarda que lo proteja se podría producir la ruptura del equipo o línea de tubería y la liberación de su contenido con la posibilidad de formación de un incendio o una explosión, la formación de una nube tóxica o diversos peligros de distinta índole. Por lo tanto, estos elementos de seguridad sólo deberían funcionar ante la imposibilidad de controlar las fluctuaciones en el proceso por los medios ordinarios como el sistema de control.

Estos dispositivos son considerados elementos críticos de seguridad, más conocidos por su término en inglés SECEs (*Safety and Environmental Critical Elements*), según los criterios de grandes empresas del sector químico y petroquímico. Esto implica que tienen que superar rigurosos requisitos de funcionamiento o *performance standards* dada su importancia en la seguridad del proceso.

Debido a la importancia de estos dispositivos se han creado numerosos estándares y guías, en especial el Instituto Americano del Petróleo, en inglés API (*American Petroleum Institute*) ha desarrollado guías de referencia como las API 520 y API 521 que detallan muchos de los requerimientos, métodos de

cálculo y pautas de instalación e implantación a través de las cuales se pueden conseguir diseños de ingeniería adecuados que garanticen el buen funcionamiento de estos elementos en las situaciones que sea necesario.

Además de éstas existen otras normas más específicas como la ISO 4126 en la que es necesario apoyarse para evaluar las capacidades de alivio de los dispositivos de seguridad y su dimensionamiento. Así como las normas europeas análogas a la API, la ISO 28300 que tiene como campo de aplicación la protección de los recipientes atmosféricos y es análoga a la API 2000, la ISO 23251 que se centra en los sistemas de alivio de presión en las instalaciones de proceso, análoga a la API 521, o la AD-Merkblatt alemana que ha servido como base para muchas de las desarrolladas posteriormente. Incluso empresas químicas de elevado reconocimiento han optado por desarrollar normativa y buenas prácticas específicas para ser aplicadas en sus instalaciones.

En la Tabla 1.1 se muestra una relación entre las principales guías utilizadas para el diseño y verificación de los elementos de seguridad de alivio de presión.

**Tabla 1.1. Normativa relativa a dispositivos de alivio de presión**

Estándar	Título	Edición
API 520 Part I	Sizing, Selection and Installation of Pressure-relieving Devices, Part I- Sizing and Selection	8 <sup>th</sup> Edition (2008)
API 520 Part II	Sizing, Selection and Installation of Pressure-relieving Devices, Part II- Installation	5 <sup>th</sup> Edition (2011)
API 521 ISO 23251	Pressure-relieving and Depressuring Systems	5 <sup>th</sup> Edition (2008)
API 526	Flanged Steel Pressure Relief Valves	(2009)
API 2000 EN ISO 28300	Venting Atmospheric and Low-pressure Storage Tanks	6 <sup>th</sup> Edition (2008)
AD 2000 Merkblatt A2	Safety devices against excess pressure-safety valves	(2006 - 2010)
EN ISO 4126	Safety devices for protection against excessive pressure, All Parts	(2008)

La ingeniería de los elementos de alivio de presión comprende varias fases:

- Identificación de los escenarios de sobrepresión que pueden afectar al proceso por medio de técnicas PHA, análisis histórico, personas conocedoras del proceso, etc.
- Diseño y dimensionamiento de los elementos de alivio de presión y de los sistemas de venteo de acuerdo a las necesidades de los escenarios de sobrepresión planteados y a los estándares y buenas prácticas habituales para este tipo de dispositivos.
- Instalación del elemento de seguridad de manera que su buen funcionamiento en caso de necesidad esté garantizado.
- Operación y mantenimiento del elemento de alivio de presión de manera segura. Esto incluye una operación y funcionamiento en caso de necesidad estable a prueba de fugas y vibraciones entre otros parámetros.

Junto con los dispositivos de seguridad en sí mismos y de manera individual, el sistema de venteo también tiene radical importancia en la seguridad de la instalación, este sistema acostumbra a incluir de manera general colectores, recipientes de recogida o separación y elementos finales como antorchas, unidades de tratamiento o chimeneas. Las deficiencias en el diseño u operación del sistema de venteo afectan de manera directa al funcionamiento de los dispositivos de alivio de presión y por lo tanto deben ser diseñados y verificados de manera conjunta.

Tanto los dispositivos como el sistema de despresurización se espera que trabajen únicamente en situaciones de emergencia, en caso de ocurrencia de problemas en el proceso o accidentes que desencadenen un exceso de presión que el sistema de control no puede subsanar. En esta situación el exceso de presión se aliviaría de manera segura de tal modo que los trabajadores de la planta y la instalación en sí no se verían afectados, de igual manera este alivio de presión debe realizarse teniendo en cuenta las consideraciones medioambientales de emitir determinadas sustancias al medio.

En el presente trabajo se describirán los elementos de seguridad más utilizados para la protección contra la sobrepresión en las plantas de proceso, también se detallarán los tipos de escenarios de sobrepresión o depresión que se pueden dar en dichas instalaciones y los cálculos necesarios para determinar los requerimientos a la hora de diseñar un dispositivo de seguridad, estos requerimientos incluyen caudales requeridos y disponibles de los escenarios y criterios de estabilidad y operatividad de los elementos de alivio de presión.

## **1.1. OBJETIVO**

El objeto de este proyecto es realizar la verificación de ciertos PRDs en una instalación de proceso de una conocida empresa del sector químico y, en los casos en los que competa, proponer acciones a realizar a fin de garantizar el buen funcionamiento en caso de necesidad de dichos dispositivos, así como del sistema de venteo.

La aceptabilidad de los dispositivos de alivio de presión se determina en base a la situación de dichos dispositivos dentro del proceso productivo y los tipos de escenarios de sobrepresión que se puedan presentar. De esta manera el procedimiento para realizar la verificación de la aceptabilidad de los elementos de seguridad se realizará de acuerdo a las siguientes fases:

- Recopilación y documentación de información general de cada dispositivo de alivio de presión, así como del equipamiento relacionado con este.
- Determinación de los escenarios de sobrepresión o depresión.
- Evaluación de la aceptabilidad del elemento de seguridad para cada escenario determinado.
- Evaluación de la estabilidad del dispositivo, en el caso de válvulas de seguridad.
- Proposición de acciones de mejora si fueran necesarios para garantizar la aceptabilidad del dispositivo.

Esta información se documenta en fichas para cada dispositivo siguiendo la filosofía propuesta en la API 520 (API 520, Part I, 2008). El modelo de ficha se ha adaptado a la información adicional considerada relevante para el estudio de verificación, dicho modelo se muestra en ANEXO A. FICHA MODELO PRD.

## **1.2. ALCANCE**

El alcance del proyecto de verificación engloba todos los dispositivos de seguridad de la instalación no considerados dentro de las unidades tipo paquete. Estos dispositivos pueden formar parte del proceso productivo o estar instalados en los equipos destinados a almacenamiento de producto.

Los PRDs en los que durante su verificación se determine que no tienen escenarios aparecerán reflejados en el estudio, pero con la correspondiente anotación indicando esta característica.

En los casos en los que ciertos elementos de seguridad presenten la misma función de protección dentro de la instalación, ya sea por similitud de equipos protegidos o por partes gemelas del proceso únicamente se incluirá un dispositivo de manera representativa del conjunto.

## 2. ELEMENTOS DE ALIVIO DE PRESIÓN

Los dispositivos de alivio de presión pueden ser de varios tipos dependiendo de sus características, principios básicos, operatividad y aplicaciones. Se pueden distinguir dos grandes grupos de dispositivos en función de su principio de funcionamiento: válvulas de alivio de presión, en inglés PRVs (*Pressure Relief Valves*) y discos de ruptura, en inglés RD o BD (*Rupture/Bursting Discs*). En este capítulo se describen los tipos más representativos de dichos dispositivos de acuerdo al estándar API 520, a excepción de las válvulas pilotadas todos los dispositivos descritos en este capítulo son evaluados en la instalación sujeta a estudio.

Esta clasificación se ha adaptado en función de las necesidades del proceso de verificación a la instalación analizada, aunque se ha realizado de manera generalista es posible que en otro tipo de instalaciones fuese conveniente clasificar los dispositivos de alivio de otro modo.

### 2.1. VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN (PRVs)

Las válvulas de alivio de presión son dispositivos que abren o disparan en el momento en que la presión sobrepasa el valor de tarado de la válvula aliviando el exceso de presión por medio de la liberación de un caudal determinado de producto, cuando la presión se reestablece a los valores de trabajo la válvula cierra. Son dispositivos de apertura y funcionamiento de presión diferencial, es decir, su presión de apertura y caudal de alivio varían en función de la presión en la descarga de la válvula.

Los modos de funcionamiento que pueden presentar las válvulas de alivio de presión son dos:

- **Apertura rápida o *pop action*:** se caracteriza por una velocidad de apertura rápida hasta conseguir la apertura completa de la válvula y, por lo tanto, la máxima capacidad de alivio. La apertura completa de la válvula se puede dar antes de llegar al valor de sobrepresión de la misma.
- **Apertura modulante o proporcional:** la apertura de la válvula se realiza de manera proporcional al incremento de presión, la máxima apertura se consigue cuando se alcanza el valor de la sobrepresión.

#### 2.1.1. Válvulas de seguridad de apertura rápida

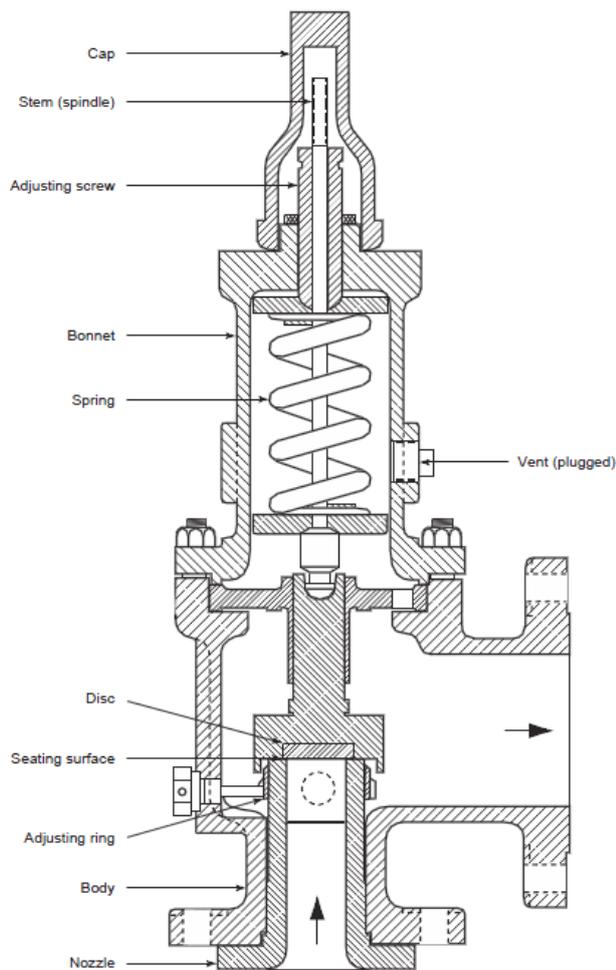
Más conocidas por sus siglas en inglés PSVs (*Pressure Safety Valves*), son válvulas de seguridad taradas a una presión determinada por medio de la fuerza de un resorte. Este tipo de válvulas pueden

funcionar para servicio gas/vapor o líquido, aunque comúnmente su utilización se centra en el caso de fluidos compresibles.

Los elementos básicos de los que consta una válvula de seguridad son: el orificio de entrada, conectado al sistema a proteger; un disco móvil que controla el caudal a través del orificio; y un resorte que controla la posición del disco.

El principio de funcionamiento de este tipo de válvulas se basa en un balance de fuerzas, el resorte se ajusta de manera que la fuerza que ejerce contra el disco es la misma que la que experimentaría el disco en el momento en que la presión en el sistema alcanzase la presión de tarado. En la Figura 2.2 se muestra un esquema de una válvula de seguridad típica.

Cuando desempeñan servicio gas o vapor son un tipo de válvulas que se caracterizan por su apertura rápida, más conocida como *pop*, en la que en unos milisegundos la válvula alcanza su máxima apertura, esto se debe en la diferencia entre las fuerzas que actúan sobre el disco a medida que éste se va levantando, el área expuesta del disco al fluido y las fuerzas de expansión del gas juegan un papel importante en este fenómeno. La máxima apertura y por tanto el punto en el que la descarga de la válvula es máxima se produce en el momento en que la presión del sistema alcanza el valor de la presión de tarado más la sobrepresión (*overpressure*), un valor típico de sobrepresión en válvulas de este tipo es el 10% de la presión de tarado. El cierre de la válvula, sin embargo, se produce en el punto en el que el sistema ve reducida su presión en un valor por debajo de la presión de tarado, este valor es la presión de reajuste (*blowdown*). Un gráfico explicativo de este comportamiento se puede observar en la Figura 2.2.



**Figura 2.1. Válvula de seguridad con resorte (API 520, Part I, 2008)**

Es importante tener en cuenta la presión de reajuste de la válvula ya que de esta depende el cierre completo de la misma y la vuelta a las condiciones normales de proceso. Una vez que la presión normal de proceso se ha reestablecido es necesario que la válvula cierre, pero esto no sucede exactamente a la presión de tarado de la misma ya que un área mayor en el disco queda expuesta, en relación al área que presenta el disco cuando la válvula está completamente cerrada. Para fluidos compresibles, la presión de reajuste se encuentra alrededor del 10% de la presión de tarado, aunque esto depende radicalmente de la geometría de la válvula y por lo tanto de cada modelo en particular.

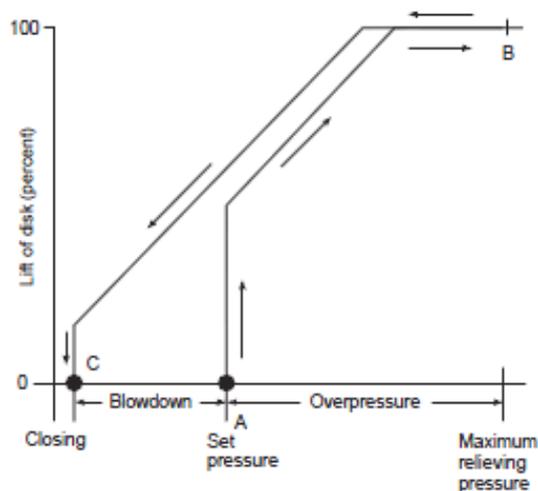


Figura 2.2. Evolución de la apertura de la válvula en función de la presión del sistema (API 520, Part I, 2008)

Las válvulas de seguridad son el elemento básico de protección contra la sobrepresión en sistemas gaseosos y son utilizadas ampliamente en todo tipo de refinerías e instalaciones de proceso.

### 2.1.2. Válvulas de seguridad proporcionales

Las válvulas de alivio son elementos muy similares a las válvulas de seguridad de apertura rápida, al igual que las primeras también constan de un orificio de paso, un resorte cargado y un disco que regula la apertura. Estas válvulas sin embargo están más indicadas para trabajar en servicio líquido debido a su tipo de apertura proporcional y a su baja capacidad.

Una de las principales aplicaciones de las válvulas de alivio es la protección contra los escenarios de sobrepresión por expansión térmica, en estos casos la nomenclatura de estas válvulas puede ser la de válvulas de alivio térmico, o por sus siglas en inglés TRV (*Thermal Relief Valves*).

En este tipo de válvulas la máxima elevación del disco se obtiene a valores iguales o menores al 10% de sobrepresión, pero esta elevación se produce de manera progresiva a medida que la sobrepresión aumenta ya que, a diferencia de lo que ocurre con las válvulas emplazadas en medios compresibles, no existen esas fuerzas de expansión tan determinantes.

La presión de reajuste en el caso de las válvulas de alivio puede ser mucho mayor que las de las válvulas de seguridad, en casos llegando hasta el 20% de la presión de tarado. Los elementos de alivio deberían diseñarse para servicio gas o para líquido en función del medio al que están expuestos normalmente.

### 2.1.3. Válvulas de seguridad accionadas por piloto

Son válvulas en las que el principal elemento de alivio (válvula principal) está combinado y actuado por otra válvula de seguridad auxiliar que funciona a modo de piloto. En la Figura 2.3 se puede observar un esquema del diseño y geometría de una válvula de este tipo.

La válvula de seguridad piloto está tarada a la presión que se desea como presión de disparo, cuando dicha presión se alcanza, la válvula piloto abre y evacúa el fluido en la parte superior del pistón, de modo que el equilibrio de fuerzas se descompensa y la válvula principal abre. En condiciones normales, la válvula permanece cerrada debido que el área superior del pistón es mayor que el área inferior del mismo.

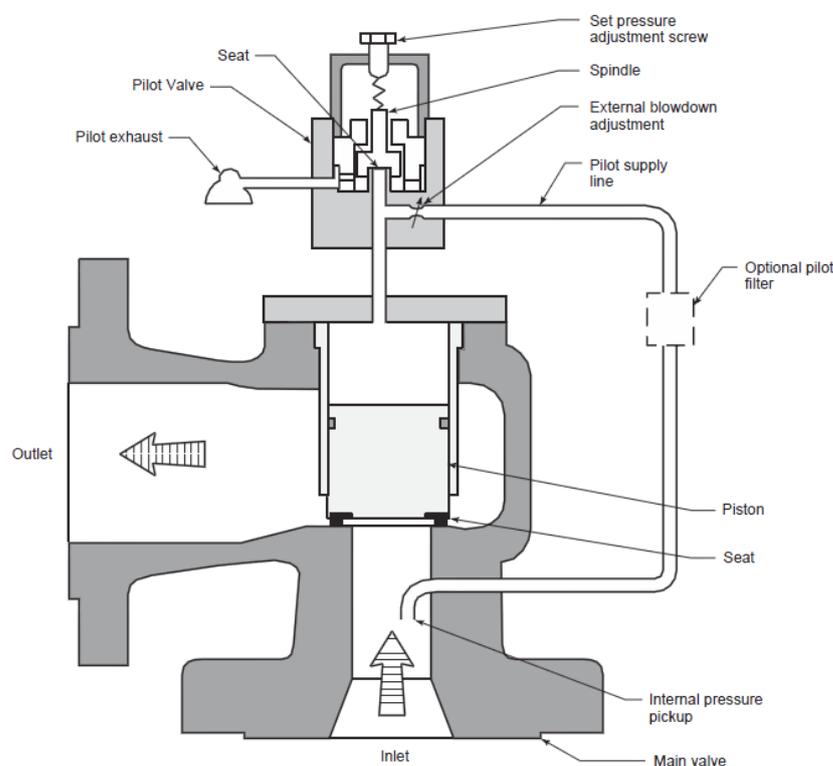


Figura 2.3. Válvula de seguridad pilotada (API 520, Part 1, 2008)

El funcionamiento de estas válvulas se ve modificado también por el tipo y características de la válvula piloto, si ésta es una válvula de apertura rápida la válvula principal abrirá también en un intervalo de tiempo corto (situación no recomendable en el caso de servicio líquido ya que puede afectar a la estabilidad de la válvula). En cambio, si la válvula piloto es modulante o proporcional la principal sólo abrirá lo suficiente como para satisfacer las necesidades de alivio.

Existen variedad de configuraciones distintas, por ejemplo, en el caso de que el servicio no sea limpio es posible instalar filtros en la línea de pilotaje, se puede disponer de diseños que empleen un diafragma en vez de un pistón para la apertura de la válvula principal, es posible que exista flujo a través de la válvula piloto, etc.

Otros diseños menos comunes incluyen aquellos en los que el resorte de la válvula piloto representa un porcentaje de la fuerza total de cierre de la misma (alrededor de un 75%), que se traduce en la presión de tarado, el resto lo proporciona la presión del sistema a través de la válvula piloto. En el caso en que la válvula piloto falle en la apertura la válvula principal actuaría como una válvula de seguridad normal, pero a una presión de tarado más elevada.

La ventaja principal de las válvulas de seguridad pilotadas es el poco margen que estas válvulas requieren entre la presión de trabajo y la presión de disparo para su buen funcionamiento, además la contrapresión no afecta a la presión de tarado ni genera fenómenos de inestabilidad como el *chattering*, estos fenómenos de inestabilidad se describirán más adelante (NTP 510, 1999). También es necesario destacar que debido a la complejidad de estos dispositivos están sujetas a más focos de fallos que elementos más simples.

#### **2.1.4. Válvulas de alivio de presión-vacío**

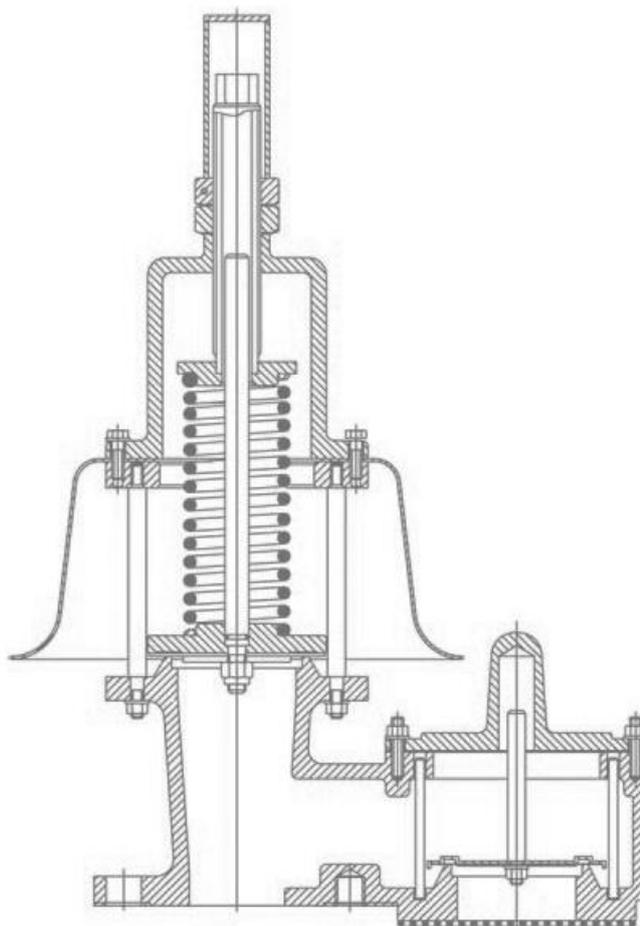
Las válvulas de alivio de presión vacío, o por sus siglas en inglés PVRV (*Pressure Vacuum Relief Valves*), son dispositivos de protección que se utilizan típicamente para la protección de tanques de almacenamiento u otros equipos atmosféricos cuya presión de trabajo está por debajo de 0,5 bar, esta categoría de válvulas incluye las válvulas únicamente de presión, únicamente de vacío y presión-vacío combinados.

Su principal propósito es proteger el tanque frente a escenarios de sobrepresión y depresión que se explicarán en el apartado 3.9, ejemplos de estos escenarios son la sobrepresión debida al llenado/vaciado del tanque con producto líquido a través de bomba, fallo en la regulación del *blanketing* del tanque, efectos térmicos en la fase gas del depósito, etc.

Es un tipo de válvulas que consta de un diseño que permite la entrada de aire frente a un descenso en la presión interior del tanque y, de la misma manera, permite la salida de gas del interior del recipiente ante un incremento en la presión en el interior del mismo. Es por esta característica que también se conoce a estas válvulas como “válvulas de respiración”.

Comúnmente estas válvulas, a diferencia de las de resorte, utilizan pesos para ajustar la presión de tarado de las mismas, aunque también son comunes diseños que utilizan resortes para el dispositivo de alivio de presión y pesos para el de alivio de vacío. En la Figura 2.4 se puede ver a modo esquemático

un ejemplo de PVRV, con el muelle bien diferenciado ajustando la presión de tarado en caso de sobrepresión y un pistón posibilidad de cargar pesos para ajustar la presión de alivio de vacío.



**Figura 2.4. Válvula de alivio de presión vacío (Groth Corporation, Model 1201B)**

La instalación de estas válvulas en tanques de almacenamiento es una opción interesante cuando las pérdidas de producto por evaporación son elevadas, o también en el caso de que no interese emitir vapores de ciertas características de manera continuada, como pasaría en el caso en que el depósito tuviese únicamente un venteo libre abierto a la atmósfera.

### **2.1.5. Válvulas balanceadas por fuelle**

La presión que existe en la descarga de una PSV afecta de manera directa tanto a la capacidad de alivio de la válvula en caso de necesidad como a la presión de apertura de la misma, esta presión en la descarga se conoce comúnmente como contrapresión. La contrapresión total está compuesta por dos factores, la contrapresión debida a la pérdida de carga del colector de descarga de la válvula y la presión

variable que existe de por sí en ese colector, estos términos se reconocen más por sus términos en inglés, *built-up backpressure* y *superimposed backpressure* respectivamente.

Una manera de paliar los efectos de la contrapresión es mediante el ajuste del resorte de la válvula de acuerdo a los valores calculados de contrapresión. Aunque la pérdida de carga de la descarga es un valor constante, existe la posibilidad que la *superimposed backpressure* o contrapresión superpuesta sea variable, por lo que en estos casos el ajuste del resorte no sería efectivo y habría que recurrir a otras soluciones.

Las válvulas balanceadas son válvulas de seguridad al uso en las que, para minimizar el efecto de la contrapresión, se instalan accesorios como pueden ser fuelles o similares. En los diseños corrientes y a razón de las recomendaciones de la API, el fuelle debe ocupar un área igual o superior al área del disco para que el efecto de la contrapresión no tenga efecto en el funcionamiento de la válvula. Es importante que la parte interna del fuelle esté conectada al sombrerete de la misma e igualada a presión atmosférica para su correcto funcionamiento, en caso contrario se debe reconducir hacia una toma atmosférica.

## **2.2. DISCOS DE RUPTURA (RDs)**

Al igual que las válvulas de alivio de presión, los discos de ruptura abren cuando se alcanza una presión determinada en el sistema. Sin embargo, tienen multitud de diferencias con respecto a las primeras, entre ellas las siguientes:

- Los discos de ruptura no permiten el cierre una vez la presión se ha reestablecido a valores normales.
- Diseño más simple y confiable al no contener partes móviles.
- La apertura es instantánea y completa.
- Generalmente tienen un coste menor y no requieren prácticamente de mantenimiento.
- La estanqueidad del disco a diferencia de la de las válvulas es total.
- Mayor rango de aplicación en cuanto a fluidos corrosivos, que polimericen, etc.
- Sensibles a la temperatura.

Estas características entre muchas otras hacen que la elección del dispositivo de alivio de presión no sea una cuestión trivial y se tenga que adaptar a las necesidades exclusivas del proceso.

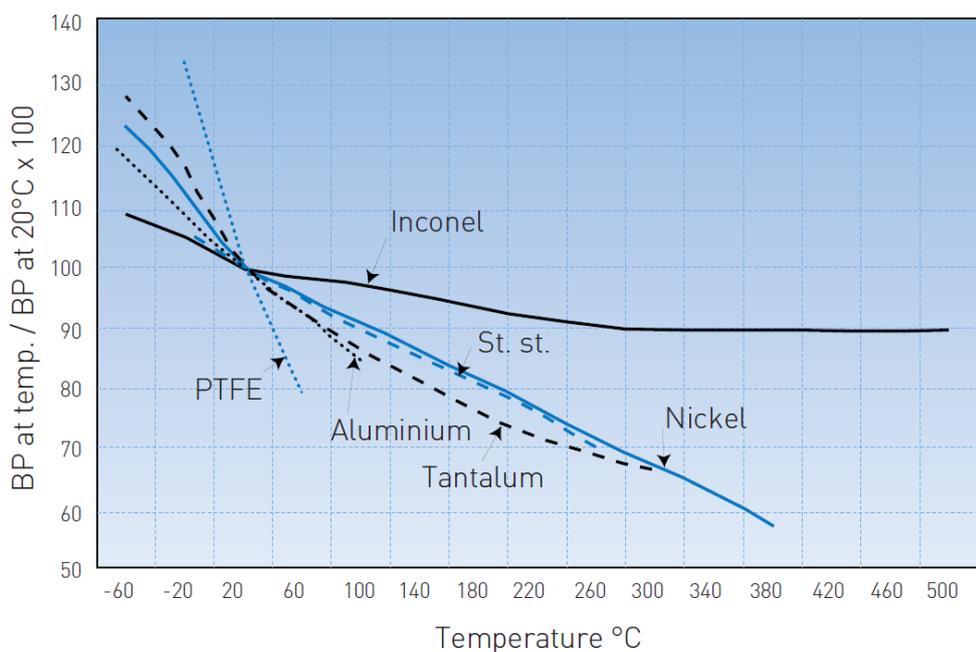
Es especialmente importante conocer la temperatura máxima que se puede dar en el equipo protegido ya que la presión de ruptura del disco disminuye frente a un aumento de temperatura, este

comportamiento se puede ver claramente en la gráfica de la Figura 2.5 para discos fabricados con distintos tipos de materiales.

Es importante tener en cuenta que en el caso de que el disco actúe es necesario detener el proceso para sustituirlo, esto es una cuestión fundamental de cara a la utilización que se le puede dar. Es por esto que es posible su utilización de manera conjunta con una válvula de seguridad, como se detallará en el apartado 2.3, o la utilización de dos discos en paralelo con una válvula de 3 vías, de manera que siempre haya un disco en servicio.

Además, frente a variaciones transitorias de la presión en el sistema el disco puede actuar de manera prematura, esta situación se da en los casos en los que la presión de ruptura es próxima a la presión de trabajo del proceso. En la Figura 2.5 se puede observar un esquema de un disco de ruptura en dirección del flujo extracto de la API 520.

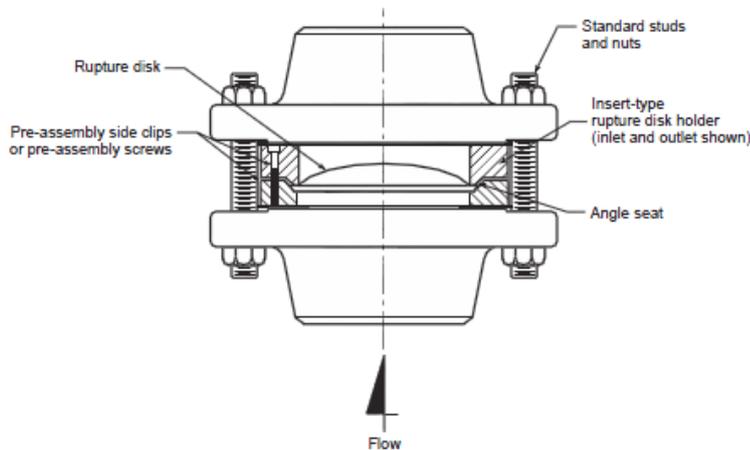
#### TEMPERATURE EFFECT FOR CONVENTIONAL TYPE DISCS



**Figura 2.5. Evolución de la presión de ruptura de un disco en función de la temperatura de operación (Emerson, Marston Bursting Discs, 2017)**

A la hora de diseñar un disco de ruptura es importante tener en cuenta que son elementos que rompen por presión diferencial, es decir, están afectados fuertemente por la contrapresión que puede haber en la descarga. También es necesario conocer los valores de presión de ruptura y los márgenes proporcionados por el fabricante, habitualmente se indica la presión de rotura media de un lote de

pruebas de discos, así como el límite superior e inferior y la desviación, en base a estos parámetros se debe escoger el disco más adecuado para las presiones del sistema a proteger.



**Figura 2.6. Disco de ruptura sólido acción en dirección del flujo (API 520, Part I, 2008)**

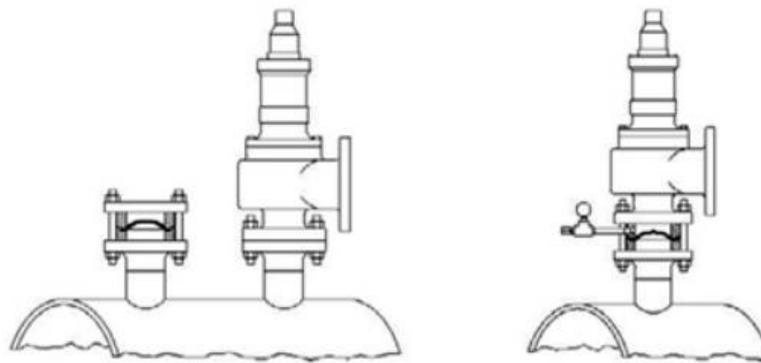
Los discos de ruptura habitualmente están instalados sobre soportes (*holders*), la instalación del disco es un aspecto clave para su buen funcionamiento ya que dependiendo de las características de cada disco estos deben de ir instalados en una dirección u otra, según especifique el fabricante. Si las condiciones del sistema implican que pueda existir vacío en el mismo es posible la instalación de soportes para que el disco resista esta condición. De la misma manera se pueden instalar otros accesorios como indicadores de ruptura, alarmas, etc.

### 2.3. COMBINACIÓN DE ELEMENTOS DE SEGURIDAD

Dependiendo del equipo a proteger y los requisitos del sistema de seguridad, los discos de ruptura y las válvulas de seguridad son complementarios y cada uno de ellos ofrece ventajas e inconvenientes específicos. A menudo, usar discos de ruptura en combinación con válvulas de seguridad es una buena solución, estas combinaciones pueden ser en serie o en paralelo (R. Bours, 2013). En la Figura 2.7 se muestran ejemplos gráficos de estas combinaciones.

- En paralelo: normalmente se utiliza en el caso de que la capacidad disponible por la válvula no sea suficiente para hacer frente a los escenarios de sobrepresión que más capacidad demanden, usualmente los casos de emergencia. De esta manera, la válvula funcionaría frente a los escenarios de sobrepresión más probables y, en el caso de un escenario menos frecuente pero con mayor demanda, el disco de ruptura complementaría la capacidad disponible. La válvula debe estar tarada a una presión ligeramente inferior a la presión de ruptura del disco.

- En serie: se distinguen dos posibilidades en la instalación,
  - situando el disco aguas arriba de la válvula: la instalación del disco aguas arriba de la válvula viene de la necesidad de prevenir posibles fugas a través de la válvula o bien de proteger la válvula frente a fluidos corrosivos o abrasivos del sistema protegido, en estos casos el disco tiene que ser de no fragmentación a fin de no afectar el funcionamiento de la válvula
  - situando el disco aguas abajo de la válvula: con el fin de protegerla de los fluidos de la tubería de descarga, al igual que en la configuración anterior, el disco debe de ser de no fragmentación.



**Figura 2.7. Combinaciones de PSV y RD en paralelo y en serie (R. Bours, Interempresas, 2013)**

Es necesario destacar que la instalación combinada de válvulas de alivio y discos de ruptura en serie puede ocasionar inconvenientes con la estabilidad de la válvula en su funcionamiento, estos fenómenos de inestabilidad se explicarán más adelante en el capítulo 5.

En los casos en los que se combinen válvulas de seguridad y discos de ruptura en serie es necesaria la instalación de una purga, un manómetro o algún elemento que permita controlar la presión entre ambos dispositivos, sin un manómetro en este espacio intermedio no se puede tener un control sobre las fugas que puedan estar ocurriendo en la válvula o de una posible rotura del disco.

También se puede recurrir a la utilización de dos válvulas en paralelo para complementar la capacidad de descarga en caso en que la capacidad requerida por los escenarios de sobrepresión sea elevada y la selección de una válvula de grandes dimensiones no sea práctica.



### 3. ESCENARIOS DE SOBREPRESIÓN

La identificación de escenarios es el primer y más importante paso en el diseño de un sistema de despresurización efectivo, esta tarea debe hacerse por medio de estudios de identificación de peligros rigurosos como pueden ser las técnicas PHA (HAZOP, HAZID...), por revisión de históricos de accidente en instalaciones similares o por personas conocedoras del proceso. El sistema de alivio debe estar diseñado para el escenario que más demanda de capacidad de alivio requiera, el escenario limitante.

Los escenarios de sobrepresión son característicos para cada instalación en particular y es difícil hacer una agrupación genérica de todos los casos posibles. El conocimiento del proceso, reacciones químicas involucradas, tipo de flujo del alivio, características del fluido y posibles condiciones de operatividad determinan si el sistema de alivio actual es aceptable o, en el caso de la fase de diseño, cuáles son los requerimientos para conseguir un sistema eficaz. A continuación, se detallarán los tipos de escenarios considerados, así como los procedimientos para el cálculo de la capacidad requerida para dichos escenarios.

Cabe destacar que hay diferentes maneras para calcular la carga de los escenarios de sobrepresión, los métodos planteados en este proyecto son los escogidos en función de las características de la instalación y del proceso de verificación.

A continuación, en la Figura 3.1 se muestra un esquema a modo de ejemplo con algunos de los posibles escenarios en una instalación típica.

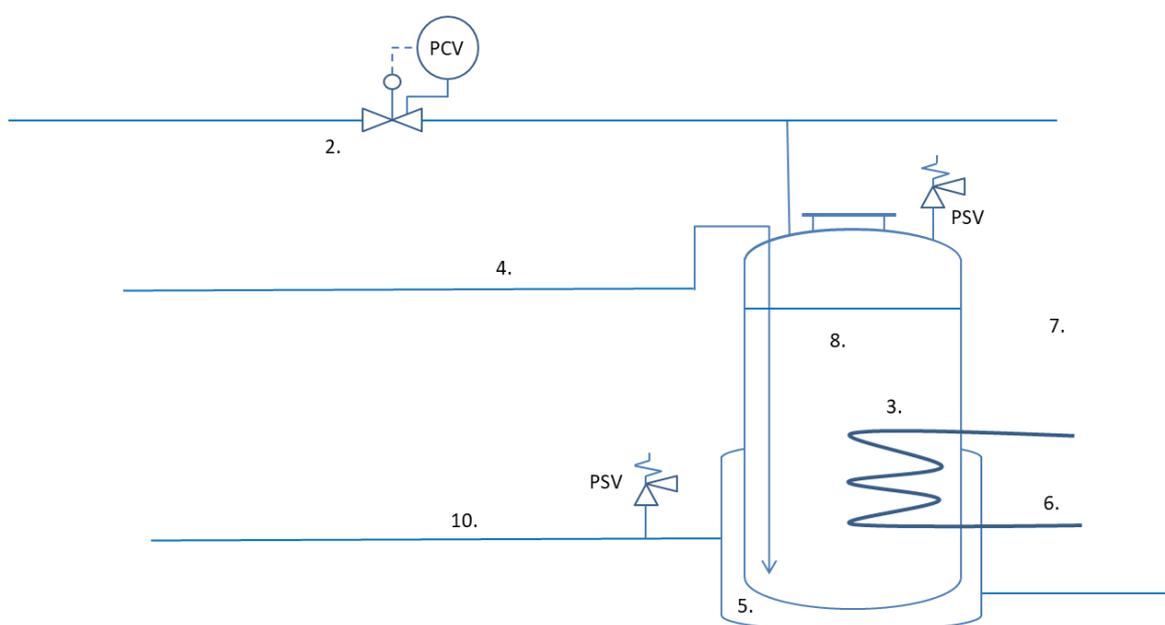


Figura 3.1. Esquema de posibles escenarios de sobrepresión

- 2.- Fallo de regulación en válvula de *blanketing*.
- 3.- Rotura de tubos en serpentín.
- 4.- Sobrellenado por bomba de carga de producto líquido.
- 5.- Fallo de refrigeración en camisa de enfriamiento de reactor.
- 6.- Carga máxima de calor por fallo en la regulación de vapor.
- 7.- Fuego externo al depósito.
- 8.- Reacción descontrolada.
- 10.- Expansión térmica en la línea de agua de refrigeración.

En los próximos apartados se describen estos escenarios junto con algunos más que se pueden dar comúnmente en instalaciones de proceso.

### **3.1. SALIDAS BLOQUEADAS**

La sobrepresión por salidas bloqueadas se produce en los casos en que un equipo resulta aislado por medio del cierre de válvulas cuando este está en servicio en el proceso. Para estos casos es necesario disponer de dispositivos de alivio de presión en el caso en que la presión de diseño del equipamiento no pueda resistir la producida por la fuente de sobrepresión.

Este tipo de escenarios se da comúnmente en sistemas alimentados por una bomba o un compresor en los que se produce el cierre de la línea de proceso sin el paro de la bomba o compresor. Para evaluar la capacidad de una bomba o compresor centrífugo para presurizar un equipo es necesario conocer la presión a impulsión cerrada, más conocida por su término en inglés *shut-off*.

La capacidad requerida por este escenario se calcula como la suma de todos los caudales de alimentación al sistema que puedan dar presiones iguales o superiores que la presión de disparo del elemento de seguridad.

$$W_r = \sum W_f \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Donde:

$W_f$  son los caudales individuales de cada una de las alimentaciones del sistema con presión igual o superior a la presión de tarado del PRD (kg/h)

$W_r$  es la capacidad requerida por el escenario de sobrepresión (kg/h)

### 3.2. FALLO DE REGULACIÓN, APERTURA O FUGA DE VÁLVULA

Frente al fallo de servicios de una planta (fallo de aire, eléctrico...) las válvulas de control cambian su posición a la seleccionada como posición de fallo. Generalmente la posición segura de estas válvulas se ha identificado en otros estudios de identificación de peligros, pero es posible que en algunos casos la posición provoque la apertura de una válvula siendo esta una posible fuente de sobrepresión.

Además, las válvulas de control tienen una probabilidad de fallo asociada al lazo de control completo, basándose en esta premisa siempre se debe considerar la posibilidad de una apertura espuria de estas válvulas de control. También existe la posibilidad de fuga a través de la valvulería de la instalación, especialmente en válvulas antirretorno únicas que cumplen un servicio gas.

El cálculo de la capacidad requerida se ha basado en las ecuaciones de flujo a través de válvulas recogidas en el manual del fabricante de válvulas de control SAMSON (2012) Las ecuaciones se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1. Ecuaciones flujo a través de válvulas**

Relación de presiones	Ecuación	Referencia
<b>SERVICIO GAS</b>		
$P_2 > \frac{P_1}{2}$	$K_{Vs} = \frac{W}{519} \sqrt{\frac{T_1}{\rho_G \Delta P P_2}}$	(Eq. 3.2)
$P_2 < \frac{P_1}{2}$	$K_{Vs} = \frac{W}{259,5 P_1} \sqrt{\frac{T_1}{\rho_G}}$	(Eq. 3.3)

Relación de presiones	Ecuación	Referencia
<b>SERVICIO LÍQUIDO</b>		
	$K_{Vs} = \frac{W}{\sqrt{1000 \rho \Delta P}}$	(Eq. 3.4)
<b>SERVICIO VAPOR</b>		
$P_2 > \frac{P_1}{2}$	$K_{Vs} = \frac{W}{31,62} \sqrt{\frac{v_2}{\Delta P}}$	(Eq. 3.5)
$P_2 < \frac{P_1}{2}$	$K_{Vs} = \frac{W}{31,62} \sqrt{\frac{2 v^*}{P_1}}$	(Eq. 3.6)

Donde:

$K_{Vs}$  es el coeficiente de flujo de seguridad o flujo máximo de la válvula ( $m^3/h$ )

$P_1$  es la presión absoluta aguas arriba de la válvula (bara)

$P_2$  es la presión absoluta aguas abajo de la válvula (bara)

$T_1$  es la temperatura aguas arriba de la válvula (K)

$v_2$  es el volumen específico del vapor a las condiciones  $P_2$  y  $T_1$  ( $m^3/kg$ )

$v^*$  es el volumen específico del vapor a las condiciones  $P_1/2$  y  $T_1$  ( $m^3/kg$ )

$W$  es el caudal másico a través de la válvula ( $kg/h$ )

$\Delta P$  es la diferencia de presiones absolutas ( $P_1-P_2$ ) (bara)

$\rho$  es la densidad del líquido ( $kg/m^3$ )

$\rho_G$  es la densidad del gas a  $0^\circ C$  y 1013 mbar ( $kg/m^3$ )

Estas fórmulas son las utilizadas en el presente proyecto para calcular la capacidad requerida por el escenario de apertura de válvula. En muchos casos la instalación no dispone de la información de los valores de  $K_{Vs}$  de todas las reguladoras a calcular, por este motivo se empleará en los casos en los que

competa el cálculo a través del orificio de la válvula o, en caso de que tampoco se tenga información del orificio de la válvula, se calculará el caudal máximo a través de la tubería teniendo en cuenta la longitud de la misma los accesorios y el resto de factores que influyen en el cálculo hidráulico.

Las fugas a través de válvulas se pueden considerar en base a un porcentaje de su coeficiente de caudal  $K_v$  o en base a una porción del orificio de la válvula cuando el primer valor no esté disponible.

### 3.3. ROTURA DE TUBOS

En evaporadores, intercambiadores de calor u otro tipo de equipamiento en el que dos sistemas que trabajan a diferente presión estén en contacto, la posibilidad de fugas o, incluso la rotura completa de los tubos del equipo, supone una posible fuente de sobrepresión. En los casos en los que la presión de uno de los dos sistemas sea superior a la del otro y de que exista la suficiente cantidad de materia como para causar una sobrepresión este escenario ha de ser analizado.

De acuerdo a API 521 se debe considerar la rotura completa de tubos, sin embargo, en casos en los que se pueda justificar la fuga detectable antes que la rotura completa se puede realizar el cálculo en base a dicha fuga a través de poros o grietas.

Las fugas en el equipamiento se calculan en base a un orificio de un tamaño típico de 5 milímetros, como recomiendan los estándares internos de grandes empresas del sector. En el caso de considerar rotura completa de tubos se utilizará el diámetro interior del tubo del intercambiador. El cálculo de la capacidad requerida a través de un orificio se realiza de como definen las ecuaciones recogidas en la Tabla 3.2. En primer lugar, es necesario identificar si el flujo es crítico o no (*choked flow*), si el flujo es crítico se cumple la siguiente relación (Yellow Book, 2005).

$$\frac{P_1}{P_2} \geq \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Tabla 3.2. Ecuaciones flujo a través de orificio

#### SERVICIO GAS

$$W = C_D A_h \varphi \sqrt{\rho_1 P_1 \gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

SERVICIO LÍQUIDO

$$W = C_D A_h \sqrt{2 \rho_1 (P_1 - P)} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

El coeficiente  $\varphi$  tiene diferentes valores en caso de que sea flujo crítico o no, si el flujo es crítico si valor es 1, sino se calcula como sigue:

**Flujo crítico**  $\varphi^2 = 1$

**Flujo sub-crítico**  $\varphi^2 = \frac{2}{\gamma - 1} \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \frac{P_2^{2/\gamma}}{P_1} \left( 1 - \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$  **(Eq. 3.10)**

Donde:

$A_h$  es el área de paso del orificio ( $m^2$ )

$P_1$  es la presión absoluta aguas arriba del orificio (Pa)

$P_2$  es la presión absoluta aguas abajo del orificio (Pa)

$W$  es el caudal másico a través del orificio (kg/s)

$\rho_1$  es la densidad del gas en las condiciones aguas arriba del orificio ( $kg/m^3$ )

$\varphi$  es el coeficiente de salida (*outflow coefficient*)

$\gamma$  es el coeficiente de expansión isentrópico para gas ideal (usualmente en gases  $1,1 < \gamma < 1,4$ )

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Donde:

$C_D$  es el coeficiente de descarga del orificio

$C_p$  es la capacidad calorífica a presión constante

$C_v$  es la capacidad calorífica a volumen constante

El valor del coeficiente de descarga varía en función de la geometría del orificio, siendo valores de 0,62 para orificios con bordes agudos o irregulares y valores próximos a 1 para orificios circulares y

redondeados (Beek, 1974). Para los cálculos de este proyecto se utilizará un valor de 1 para el coeficiente de descarga por significar un planteamiento más conservador.

Cabe destacar que el coeficiente de expansión isentrópico puede aparecer de dos maneras distintas,  $k$  y  $\gamma$  como se verá más adelante, siendo el primero referido a gas real y el segundo a gas ideal. Como regla general siempre que se disponga de datos se utilizarán los valores de  $k$ , referido a gas real, si no se utilizará la relación de Mayer (Eq. 3.12) para estimar el valor de  $\gamma$ .

$$C_p - C_v = R \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Siendo  $R$  la constante de los gases ideales.

En el caso de la rotura completa de tubos en intercambiadores de calor de carcasa y tubos la capacidad de alivio debe calcularse teniendo en cuenta el caudal a través de los dos extremos de la rotura del tubo ya que ambos cabezales del intercambiador están presurizados, es decir, en caso de rotura de un tubo el caudal requerido es el doble del caudal que fuga a través de un tubo.

### 3.4. SOBRELLENADO

El sobrellenado de recipientes de proceso o almacenamiento es una situación que se da con relativa frecuencia en la industria química o petroquímica. En los casos en los que se produzca un desbalance entre la entrada y la salida de producto líquido y que el llenado se realice por bombas u otros medios que aporten una presión igual o superior a la presión de diseño del depósito se debe considerar este escenario en el diseño del elemento de alivio, la capacidad requerida se calcularía de manera similar al escenario de salidas bloqueadas (Eq. 3.1). Este desbalance se puede producir tanto por el llenado excesivo con las bombas de carga, por una fuga a través de una válvula en un sistema que trabaje a más presión o incluso por una rotura en los tubos de un intercambiador de calor que utilice un fluido a más presión que el sistema objeto de estudio, todos estos supuestos aportarían un caudal de líquido suficiente que, eventualmente, presurizaría el equipo por encima de sus valores límite.

Para evaluar este escenario es necesario conocer con detalle la geometría y la operativa posible en el sistema. Si el venteo está cerrado y las bombas de alimentación tienen una presión de *shut-off* superior a la presión de diseño del depósito, la sobrepresión creada podría provocar la ruptura del mismo.

En el caso de depósitos atmosféricos es posible que, aun estando el venteo abierto, la presión hidrostática del venteo inundado por causa del sobrellenado supere la presión de diseño del depósito y sea directamente inadmisibles este escenario, también puede darse que dicha presión hidrostática no sea suficiente para romper el depósito, pero el flujo del fluido a través del venteo y la pérdida de carga asociada a ello sí que haga comprometer su integridad mecánica.

La protección de este escenario, dadas sus características, puede realizarse por ejemplo a través de una función instrumentada que prevenga el sobrellenado, como especifica API 521.

### 3.5. FALLO DE REFRIGERACIÓN O CONDENSACIÓN

El fallo de refrigeración, que se puede producir por un simple fallo eléctrico y paro de las bombas de impulsión de agua de refrigeración, da lugar a situaciones de sobrepresión. En el caso de que afecte a un condensador el caudal de gases no condensados puede acumularse presurizando el sistema, en el caso de que falle la refrigeración en un reactor se pueden propiciar situaciones de reacción descontrolada con el consiguiente aumento de presión en el recipiente.

La capacidad requerida por el escenario se calcula con un balance de masa y energía, la misma cantidad que no se puede evacuar por el condensador será la cantidad que requiera aliviar el elemento de seguridad. Nótese que siempre se considera vapor en equilibrio con la fase líquida en el sistema.

$$W = \frac{Q_{cond}}{\lambda_{vap}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Donde:

$Q_{cond}$  es la potencia frigorífica del condensador fallado (kJ/s)

$W$  es el flujo másico de gases que se ha dejado de condensar (kg/s)

$\lambda_{vap}$  es la entalpía de vaporización de los gases o de la mezcla de gases (kJ/kg)

En el caso de que el fallo afecte a un aerofriador o aerorefrigerador se tendrá en cuenta una capacidad de condensación parcial en torno al 20% (10% para casos conservadores) remanente como indica API 521.

### 3.6. CARGA MÁXIMA DE CALOR

El escenario de carga máxima de calor se produce en los casos en los que el calentamiento es excesivo debido a un fallo en el sistema básico de control. Generalmente, en industrias de procesos como la estudiada, el calentamiento se realiza por medio de vapor, gases de combustión o utilizando un fluido térmico.

El cálculo de la capacidad requerida por el escenario se realiza en base al flujo máximo de calor. Este flujo se puede calcular considerando la condensación de todo el vapor que calefacciona el sistema, en

base al caudal máximo a través de las válvulas reguladoras y la entalpía de condensación del vapor, o bien considerando un aporte de calor en base a la temperatura del vapor saturado en las condiciones aseguradas. Algunas guías del sector recomiendan escoger el flujo de calor menor de los dos métodos, por regla general se utiliza la segunda técnica ya que la primera se considera demasiado conservadora en la mayoría de los casos.

$$Q_{heat} = U A \Delta T_{max} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Donde:

A es el área del intercambiador o evaporador ( $m^2$ )

$Q_{heat}$  es el flujo máximo de calor (kJ/s)

U es el coeficiente global de transmisión de calor ( $kW/m^2 \cdot K$ )

$\Delta T_{max}$  es la diferencia entre la temperatura del vapor saturado a la presión asegurada y la temperatura de ebullición del producto a la presión de alivio (K)

En base a esta ecuación y de manera similar a la (Eq. 3.13), se calcula la capacidad requerida por el escenario de sobrepresión teniendo en cuenta que la condensación o refrigeración del sistema funciona de manera normal.

$$W = \frac{Q_{heat} + \sum Q_{hf} - \sum Q_{cool}}{\lambda_{vap}} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Donde

$Q_{cool}$  es el flujo de calor retirado del sistema por sistemas de condensación, refrigeración (kJ/s)

$Q_{heat}$  es el flujo máximo de calefacción (kJ/s)

$Q_{hf}$  es el flujo de calor aportada por otras fuentes al sistema (kJ/s)

W es el caudal másico generado por el calentamiento excesivo (kg/s)

$\lambda_{vap}$  es la entalpía de vaporización de los gases o de la mezcla de gases (kJ/kg)

En el caso de sistemas más complicados como destilaciones en serie o rectificaciones debe emplearse software especializado de cálculo ya que la influencia del aporte máximo de calor o la pérdida de condensación en una de las etapas puede desembocar en grandes variaciones de presión y de caudal a aliviar en las otras. Por ejemplo, la pérdida de condensación en la primera etapa de una serie de

destiladoras provocaría que las fracciones ligeras que deberían haberse separado en la primera etapa pasen a la segunda haciendo que el segundo destilador se presurice por la influencia de estas fracciones ligeras de primera etapa a mayores de las de la segunda etapa.

### 3.7. FUEGO EXTERNO

En muchos casos el escenario de sobrepresión provocado por un fuego externo en la planta que afecta y presuriza a un equipamiento en concreto es el que más capacidad de alivio requiere, por ese motivo existen distintos estándares para calcularlo. En este proyecto se analizará el cálculo según el equipamiento sea presurizado o atmosférico. En cualquiera de los dos casos hay una serie de condiciones que se tienen que dar para escoger el equipamiento sujeto a este escenario de sobrepresión:

- Se considera el equipamiento si está en una zona a una altura máxima de 7,6 m sobre la base del incendio (se considera la altura típica de las llamas) (API 521, 2008).
- Se consideran los recipientes o equipamientos que tienen una capacidad (*hold-up*) mayor que 1 m<sup>3</sup>.
- Se considera el equipamiento en el que su contenido se puede asimilar a un gas licuado.

El cálculo de la carga del escenario de fuego externo se realiza en base a la guía API 521 si el equipamiento está presurizado y es parte del proceso o, en base a la norma ISO 28300 si el equipamiento es atmosférico o destinado al almacenamiento. En cualquiera de los casos la capacidad requerida es únicamente fase gas y el alivio se produce a la temperatura de burbuja a la presión de tarado del dispositivo de alivio.

Algunos autores especifican que en los cálculos propuestos por estos estándares de referencia no se tienen en consideración algunos factores como puede ser la expansión del fluido previa a la evaporación, aumentando de esta manera la superficie húmeda del recipiente, así como en muchos casos la ausencia de comprobación de la posibilidad de fluido bifásico en la entrada del dispositivo de seguridad (Basco et al, 2012).

#### 3.7.1. Recipientes presurizados

La carga del escenario de fuego externo en caso de recipientes presurizados se calcula según la transmisión de calor en el área líquida del recipiente, este cálculo se describe en API 521 o su equivalente ISO 23251, se basa en un método empírico y se expone a continuación.

$$Q = C_1 F A_{ws}^{0.82} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Donde:

$A_{ws}$  es la superficie húmeda del recipiente expuesta a las llamas ( $m^2$ )

C es una constante que depende de la protección contra incendios. Si existen equipos de extinción y drenajes de material inflamable ( $C = 43200$ ) si, por el contrario, no se pueden considerar estas protecciones ( $C = 70900$ )

F es el factor de ambiente (tabulado)

Q es la cantidad total de calor absorbida por el recipiente (W)

Los valores de F tabulados en función de las características del equipo se pueden encontrar en la tabla 6 del punto 5.12.2.2.1 de API 521 (2008) quinta edición. Cabe destacar que la decisión de qué características considerar en el caso de la elección del factor F es en parte subjetiva y debe realizarse en caso de duda desde el punto de vista más conservador.

El cálculo de la capacidad del escenario se realiza en base al flujo de calor y según la ecuación (Eq. 3.13).

### 3.7.2. Recipientes atmosféricos

En el caso de recipientes atmosféricos regidos por la ISO 28300 o API 2000 relativa a depósitos atmosféricos el cálculo es similar, aunque las ecuaciones para obtener el flujo de calor tienen expresiones diferentes. Dichas ecuaciones se clasifican en función del área húmeda del equipamiento en 5 ecuaciones que se presenta en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Ecuaciones flujo de calor absorbido en caso de fuego externo (recipientes atmosféricos)**

$A_{ws}$ ( $m^2$ )	Q (W)	Referencia
$1,86 \leq A_{ws} < 18,6$	$Q = 63150 A_{ws}$	(Eq. 3.17)
$18,6 \leq A_{ws} < 92,9$	$Q = 224200 A_{ws}^{0.566}$	(Eq. 3.18)
$92,9 \leq A_{ws} < 260$	$Q = 630400 A_{ws}^{0.338}$	(Eq. 3.19)
	$Q = 43200 A_{ws}^{0.82}$	(Eq. 3.20)
$260 \leq A_{ws}$	$Q = 4129700$	(Eq. 3.21)

El cálculo de la carga del escenario de fuego se realizaría de manera similar al caso anterior, a través de la ecuación (Eq. 3.13). En la norma se puede encontrar una fórmula que reorganiza la ecuación mencionada para obtener el cálculo directo del caudal volumétrico normal de aire, esto puede ser útil ya que, en muchos casos, los fabricantes proporcionan información acerca de la capacidad disponible de los dispositivos de seguridad en función de este caudal.

La carga del escenario de fuego externo se calcula, en base a los flujos caloríficos anteriores, como indica la fórmula empírica de la API 2000.

$$q = 906,6 \frac{Q F}{\lambda} \left( \frac{T}{M} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

Donde:

M es la masa molecular relativa del vapor

Q es el flujo de calor absorbido por el recipiente (W)

q es el caudal volumétrico requerido equivalente de aire (Nm<sup>3</sup>/h)

T es la temperatura absoluta del gas aliviado (K)

λ es el calor de vaporización en las condiciones de alivio (J/kg)

Cabe destacar que, para depósitos con ciertas características, como aquellos no refrigerados con presiones manométricas bajas (por debajo de 70 mbar) y superficie húmeda mayor que 260 m<sup>2</sup>, el aumento en la capacidad del venteo por encima del necesario para el calor correspondiente a esa superficie se considera no efectiva (API 2000, 2014).

### 3.8. REACCIÓN QUÍMICA

El escenario de sobrepresión provocado por la ocurrencia de una reacción química exotérmica descontrolada es quizás, por lo dificultad de estimar la cinética de reacción en el caso de *runaway* y el comportamiento de la misma (autocatálisis, reacción con contaminantes u otros materiales en el medio, etc.), el más complicado de evaluar. Además, es probable que se dé flujo bifásico en la reacción y, por la tanto, el dispositivo de alivio deberá estar dimensionado para estas características del flujo.

Es importante ser conscientes de la complejidad del cálculo del escenario de reacción química descontrolada, así como de los procedimientos para dimensionar los elementos de seguridad que lo protegen. En 2007, en Jacksonville (Florida) se produjo una explosión en la que murieron 4 personas

fruto de una reacción descontrolada no identificada en una de las etapas de reacción ante la pérdida del refrigerante, el dispositivo de alivio de presión era un disco de ruptura que rompió a la presión querida pero que no estaba dimensionado para aliviar el flujo bifásico producto de la reacción (CSB, 2009).

Es común que el escenario de reacción *runaway* se dé simultáneamente con otras situaciones que comprometen la seguridad del equipo como el fuego externo, fallo de refrigeración, carga máxima de calor, pérdida de agitación, incidencia en la composición de la carga, etc. Por lo general, el caso de reacción química fuera de control requiere un área de venteo mayor que el necesario en caso de exposición a fuego externo en el depósito, por este motivo puede ser una buena solución la utilización combinada de discos de ruptura y válvulas de seguridad así como un buen sistema de recogida y venteo, también existe la posibilidad de salvaguardar el proceso por medio de otras medidas o instrumentaciones que eviten directamente la posibilidad del *runaway* (Middle et al, 2018).

API 521 recomienda utilizar las técnicas establecidas y consideraciones de DIERS, una subdivisión del AIChE especializada en los sistemas de alivio bifásico, debido a la elevada complejidad que presenta este caso. Usualmente es necesario llevar a cabo simulaciones en base a las fluctuaciones iniciales del proceso que puedan causar la reacción para poder determinar las cinéticas de reacción y las características del sistema. DIERS, ha desarrollado una herramienta informática que puede servir de base para el cálculo de estos escenarios, SuperChems™ *for DIERS*.

Dada la complejidad del cálculo el análisis de este escenario en el presente documento se hace en base a la información proporcionada por los operadores de la planta. El explotador de la instalación ha determinado el caudal requerido por el escenario y se procede a la evaluación de la aceptabilidad del PRD en base a flujo no bifásico.

### **3.9. RESPIRACIÓN TÉRMICA Y DESPLAZAMIENTO DE LÍQUIDO**

En el caso de depósitos atmosféricos, con una presión asegurada menor a 0,5 bar, los fenómenos de respiración térmica y desplazamiento de líquido se vuelven importantes ya que estos recipientes trabajan a bajas presiones (normalmente de pocos milibares) y se pueden dar situaciones tanto de sobrepresión como de depresión con relativa facilidad.

El trasiego líquido del tanque genera escenarios de sobrepresión ya que el volumen de líquido desplazado en el depósito, si el venteo del mismo está cerrado o atascado, tiene que ser compensado con la entrada o salida de gas para evitar el colapso del equipo. Se crean situaciones de sobrepresión en el caso de bombeo de líquido en el interior del tanque y situaciones de vacío en el caso de vaciado del mismo.

Los cambios en la temperatura ambiente pueden dar lugar a cambios en el volumen de la fase gas de un tanque atmosférico. Un enfriamiento súbito producido por una tormenta o lluvia intensa sobre el tanque produce que la fase gas en el interior del depósito se contraiga generando un vacío parcial que debe ser compensado con la entrada de aire (o gas inerte en el caso de un tanque con *blanketing*), por el contrario, las temperaturas altas generan el fenómeno opuesto, una expansión de la fase gas debido a su descenso de densidad y la consiguiente situación de sobrepresión en el recipiente.

En adelante se utilizará el término exhalación para referirse al escenario de sobrepresión producido por el desplazamiento de la fase gas de un recipiente durante el llenado del mismo con producto líquido en combinación con los efectos térmicos descritos en el párrafo anterior. Por el contrario, se utilizará el término inhalación para describir el escenario de depresión durante el vaciado de un recipiente junto con efectos térmicos de enfriamiento de la fase gas del depósito.

Estos fenómenos se calculan según las directrices para recipientes atmosféricos recogidas en la ISO 28300. Los cálculos que se presentan están referidos a caudal de aire, en los casos en los que el escenario de sobrepresión esté producido por otro fluido que no sea aire se requiere de la conversión de un caudal en otro a efectos de comparación de la capacidad requerida y disponible, las expresiones que permiten estas conversiones se extraen de ISO 28300 (Eq. 4.9).

### **3.9.1. Exhalación (*Outbreathing*)**

La capacidad requerida por el escenario de exhalación se calcula en base al desplazamiento del líquido a través de las bombas de alimentación del tanque y además a la variación en la temperatura de la fase gas del interior del recipiente.

$$\dot{V}_{out} = Y V_{tank}^{0.9} R_i \quad (\text{Eq. 3.23})$$

Donde:

$R_i$  es el factor de reducción para tanques con aislamiento, calculado en función del tipo de aislamiento del tanque

$V_{out}$  es la capacidad requerida por el escenario de exhalación ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )

$V_{tank}$  es el volumen del recipiente ( $\text{m}^3$ )

$Y$  es el factor de latitud (tabulado)

ISO 28300 especifica distintas ecuaciones para calcular el factor de reducción ( $R_i$ ) en función del aislamiento del tanque, si este es completo, parcial, tanque con doble pared o si el tanque es

subterráneo o no. En este proyecto los depósitos que constan de aislamiento presentan un aislamiento completo. El factor de reducción para este tipo de aislamiento se calcula como sigue.

$$R_{in} = \frac{1}{1 + \frac{h l_{in}}{\lambda_{in}}} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

Donde:

$h$  es el coeficiente de transmisión de calor ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ )

$l_{in}$  es el grosor del aislamiento (m)

$\lambda_{in}$  es la conductividad térmica del aislamiento ( $\text{W}/\text{m K}$ )

### 3.9.2. Inhalación (*Inbreathing*)

El caso contrario al anteriormente comentado es la inhalación debida a la depresión creada en el tanque por el vaciado del contenido del recipiente a través de las bombas de descarga y al descenso térmico en la fase gas del interior del depósito. El cálculo es muy similar al que se plantea en ISO 28300 (Eq. 3.23). De la misma manera el caudal de vaciado de la bomba, el volumen del tanque y el aislamiento cobran especial importancia,

$$\dot{V}_{in} = C V_{tank}^{0.7} R_i \quad (\text{Eq. 3.25})$$

Donde:

$C$  es un coeficiente que depende de la presión de vapor, la latitud y la temperatura de almacenamiento, tabulado

$V_{in}$  es el caudal volumétrico de aire requerido por el escenario de inhalación ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )

Este escenario se debe cubrir por medio de dispositivos de alivio de vacío como pueden ser las válvulas de alivio o discos de ruptura que rompan por vacío, todo ello descrito en 2.1.4 y 2.2.

## 3.10. EXPANSIÓN TÉRMICA

La expansión térmica es un fenómeno que afecta a todos los fluidos pero que tiene importancia crítica en el caso de los sistemas líquidos ya que estos son incompresibles y no admiten variación en su volumen. La sobrepresión producida por este escenario se trata de manera diferente en los sistemas líquidos debido a una serie de características (Basco, 2015).

- Los sistemas líquidos tienen una compresibilidad baja, por lo que la respuesta a la sobrepresión es más rápida.
- Las válvulas de alivio líquido tienen sus propias características en diferencia las de gases y vapor.
- Los sistemas líquidos presentan dificultades mayores para el tratamiento de los efluentes.

La expansión térmica o hidráulica se da en sistemas completamente llenos de líquidos en los que el fluido está bloqueado e incrementa su volumen debido a un aumento de temperatura producido por un aporte de calor. Este escenario se da de manera más probable en el lado del refrigerante en intercambiadores de calor, en líneas de tuberías traceadas o aéreas sometidas a la radiación solar.

La selección de la presión de tarado de la válvula debería ser tal que estas válvulas funcionasen únicamente en el caso del escenario de expansión térmica pero que en ningún caso se superase la presión de diseño del elemento más débil protegido. En muchos de los casos el fluido a aliviar es agua, que no tiene implicaciones medioambientales, pero en el caso en que este fluido pueda suponer algún tipo de peligro para las personas o el medio ambiente se debe realizar una evaluación e implementar un sistema de deposición adecuado.

API 521, en base a que en general la capacidad requerida por el escenario es pequeña, acepta el uso de válvulas proporcionales de tamaño DN 20 x DN 25 sin necesidad de verificación. Este tipo de válvulas puede satisfacer muchos de los escenarios producidos por este fenómeno. De cualquier manera, la guía también plantea métodos para realizar un cálculo numérico del escenario en los casos en que pueda ser necesario una verificación más ajustada como largos tramos de tubería

$$q = \frac{\alpha_v \phi}{1000 d c} \quad (\text{Eq. 3.26})$$

Donde:

d es la densidad relativa referida al agua

c es la capacidad calorífica del fluido (J/kg K)

q es el caudal requerido por el escenario de sobrepresión (m<sup>3</sup>/s)

$\alpha_v$  es el coeficiente de expansión cúbica a la temperatura esperada (°C<sup>-1</sup>)

$\phi$  es el flujo de calor transmitido al líquido (W)

En caso de calentamiento producido por radiación solar se asume un flujo de calor máximo de 1,15 kW/m<sup>2</sup> sobre el área correspondiente a la mitad superior de la tubería.

### 3.11. COMUNICACIÓN DE EQUIPOS

De manera general se incluye el escenario de comunicación de equipos, en el que se recogen multitud de situaciones que se dan en la industria de procesos, especialmente en la petroquímica, en las que un sistema a mayor presión se comunica con uno a baja presión de manera accidental o no intencionada.

Esto se produce en los casos de pérdida de sello líquido o *gas blow-by* en los que a través de la línea de líquido se comunica la fase gas en un equipo a alta presión con los equipos inmediatamente aguas abajo. En los sistemas de separación gas – líquido por una falla en el lazo de regulación de nivel de líquido se puede producir la apertura completa de la válvula de fondo con el consecuente descenso de líquido en el recipiente y posterior pérdida de sello líquido.

El cálculo de la capacidad requerida por este escenario se realizaría por medio de cálculos hidráulicos a través de la tubería, flujo a través de válvula (comentado en Tabla 3.1) o, en los casos en los que el escenario esté salvaguardado por algún elemento de restricción, calculando el flujo a través del mismo como se expone en la Tabla 3.2.



## 4. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DISPONIBLE

En este capítulo se describen los métodos de cálculo y criterios para el cálculo de la capacidad de alivio disponible para los elementos de alivio de presión. El diseño de un elemento de seguridad se suele realizar mediante el cálculo del área necesaria para aliviar la capacidad requerida por el escenario de sobrepresión que más demanda de área plantea, en el caso de la verificación de dispositivos ya existentes se calcula la capacidad máxima disponible de dicho dispositivo (apertura completa) y se compara con la capacidad de los escenarios.

Las ecuaciones utilizadas para realizar el cálculo de capacidades están extraídas de la norma ISO 4126 y reordenadas de acuerdo a las necesidades del proceso de verificación. Se distinguen los métodos para el cálculo de la capacidad disponible en función del tipo de dispositivo, válvulas o discos.

Es necesario mencionar que en todos los casos se considera flujo monofásico y no reactivo, si el escenario requiriese un cálculo de flujo bifásico se debería hacer mediante herramientas específicas como las propuestas por DIERS o CCPS o mediante métodos más sofisticados, cabe destacar que, en la mayoría de los casos, si bien puede haber excepciones, resulta conservador considerar alivio en fase gas cuando el flujo es bifásico. También se han de considerar las condiciones de alivio de la válvula a un valor igual a la presión de tarado más la sobrepresión admisible.

### 4.1. CAPACIDAD DISPONIBLE EN VÁLVULAS DE SEGURIDAD

El término “válvulas de seguridad” en este apartado engloba tanto las válvulas de seguridad convencionales con fuelles o sin ellos, las válvulas de alivio proporcionales y las válvulas accionadas por piloto. Todos estos dispositivos comparten metodología según ISO 4126: Part 1 y las expresiones que determinan su caudal de alivio se muestra en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Ecuaciones para el cálculo de la capacidad disponible en PSVs**

SERVICIO GAS		
$\frac{P_2}{P_1} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	$Q_{av} = A P_1 C K_{dr} K_b \sqrt{\frac{M}{T_1 Z}}$	(Eq. 4.1)
$\frac{P_2}{P_1} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	$Q_{av} = A P_1 C K_{dr} \sqrt{\frac{M}{T_1 Z}}$	(Eq. 4.2)

---

**SERVICIO LÍQUIDO**


---

$$Q_{av} = 1,61 A K_v K_{dr} \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{v}} \quad (\text{Eq. 4.3})$$


---

**SERVICIO VAPOR**


---

SATURADO O SOBRECALENTADO	$Q_{av} = 0,2883 A C K_{dr} \sqrt{\frac{P_1}{v}}$	(Eq. 4.4)
------------------------------	---	-----------

---

HÚMEDO	$Q_{av} = \frac{0,2883 A C K_{dr} \sqrt{\frac{P_1}{v}}}{\sqrt{x}}$	(Eq. 4.5)
--------	--	-----------

---

Donde:

A es el área de la válvula (mm<sup>2</sup>)

C es la función del coeficiente isentrópico

K<sub>b</sub> es el factor de corrección de la capacidad teórica para flujo subcrítico

K<sub>dr</sub> es el coeficiente de descarga certificado de la válvula (en la mayor parte de los casos proporcionado por el fabricante). Este parámetro representa la relación entre el flujo real de la válvula y el flujo teórico máximo que podría pasar a través del orificio de la misma

K<sub>v</sub> es el factor de corrección por viscosidad para servicio líquido

k es el coeficiente de expansión isentrópico del fluido real en las condiciones de alivio

M es la masa molecular de la sustancia a evacuar

P<sub>1</sub> es la presión de disparo de la válvula, P<sub>set</sub> más sobrepresión (bara)

P<sub>2</sub> es la contrapresión (bara)

Q<sub>av</sub> es la capacidad disponible de la válvula (kg/h)

T<sub>1</sub> es la temperatura de alivio (K)

x es el grado de humedad del vapor en tanto por 1

Z es el factor de compresibilidad

v es el volumen específico del fluido en las condiciones de disparo ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

Los coeficientes C,  $K_v$ ,  $K_{dr}$  y  $K_b$  se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$C = 3,948 \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$K_b = \frac{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k+1)/k} \right]}{\sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}}} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$K_{dr} = 0,9 \frac{q_m}{q_m'} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Donde:

$q_m$  es la capacidad de alivio real por unidad de superficie, determinada mediante pruebas ( $\text{kg}/\text{h mm}^2$ )

$q_m'$  es la capacidad de alivio teórica por unidad de superficie ( $\text{kg}/\text{h mm}^2$ )

El valor de  $K_v$  se obtiene de la gráfica mostrada en Figura 4.1 en la que se relacionan valores de  $K_v$  en función del número de Reynolds en las condiciones de disparo, dicha gráfica se extrae de ISO 4126: Part 7.

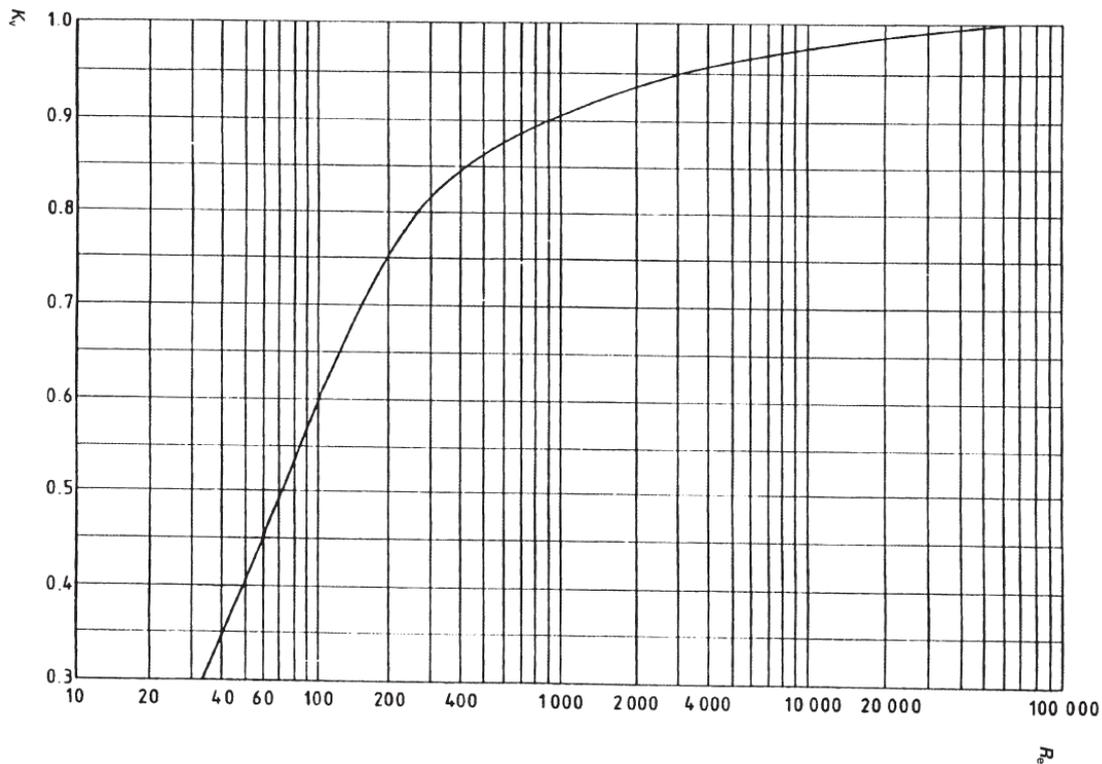


Figura 4.1. Gráfica del coeficiente  $K_v$  en función del Reynolds

En el caso de las válvulas que realizan servicio vapor, el cálculo para flujo subcrítico se realiza con la misma expresión que para gases (Eq. 4.1).

## 4.2. CAPACIDAD DISPONIBLE EN DISCOS DE RUPTURA

El cálculo de la capacidad disponible de los discos de ruptura se puede hacer de tres maneras diferentes: mediante el método del coeficiente de descarga ( $K_D$ ), mediante el método de resistencia al flujo ( $K_R$ ) o mediante el método de capacidad combinada si el disco está en combinación con una válvula de seguridad.

### 4.2.1. Método del coeficiente de descarga ( $K_D$ )

Aunque antiguamente este método era el normalmente utilizado para calcular la capacidad disponible de los discos de ruptura, actualmente está en decremento debido a las limitaciones que plantea.

ASME Section VIII, Division I establece unos criterios para el uso de este método:

- El disco de ruptura tiene que descargar directamente a la atmósfera.

- El disco debe estar instalado a una longitud máxima de 8 diámetros de tubería desde la conexión del recipiente.
- La longitud de la tubería de descarga no puede superar los 5 diámetros nominales.
- El diámetro nominal de las líneas de entrada y la descarga deben ser equivalentes o superiores que el diámetro nominal del disco.

Este modelo calcula la capacidad de descarga del dispositivo basándose en el área neta de flujo, en inglés *Minimum Net Flow Area (MNFA)*, para posteriormente limitar la capacidad por medio de un coeficiente de descarga ( $K_D$ ) con un valor constante igual a 0,62.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de la capacidad de discos de ruptura basándose en este método serían similares a las de las válvulas de seguridad (Tabla 4.1) pero utilizando el coeficiente de descarga  $K_D$ .

#### **4.2.2. Método de resistencia al flujo ( $K_R$ )**

Este método ha sido incluido en el código ASME para el dimensionamiento y cálculo de la capacidad de discos de ruptura en casos en los que no sea posible aplicar otros métodos, aunque es perfectamente válido en cualquier situación.

Este método consiste en evaluar el sistema de alivio como un conjunto en vez de hacerlo individualmente con el RD, es decir, incluir el RD como un elemento más que ofrece resistencia al flujo del fluido de alivio a través del sistema de despresurización. La manera de cuantificar el valor de resistencia al flujo por parte del disco de ruptura es mediante el coeficiente  $K_R$ , que se incluirá como un coeficiente de resistencia más en el global de pérdida de carga. Adicionalmente, ASME establece un factor de 0,9 de margen de seguridad para evitar desviaciones asociadas con la incertidumbre propia de este método.

Dado las diferentes aperturas posibles de los discos y las características de su ruptura se establecen los coeficientes de resistencia al flujo en función del medio a aliviar, ya sea éste compresible ( $K_{RG}$  para gases/vapor), incompresible ( $K_{RL}$  para líquidos) o bifásicos ( $K_{RGL}$ ). Dado que la resistencia al flujo está controlada principalmente por la ruptura del disco es conveniente que el valor utilizado sea el del fluido en contacto inicialmente con el disco (Fike 2010).

Los valores de  $K_R$  son proporcionados por el fabricante en la mayor parte de los casos, en los casos en los que no sea posible obtener dicho valor ASME recomienda utilizar un valor por defecto de 2,4.

### 4.2.3. Método de capacidad combinada

El método de capacidad combinada se utiliza en el caso de sistemas en los que un disco de ruptura se instala aguas arriba de una válvula de seguridad. La capacidad de la válvula se evalúa con los procedimientos normales descritos en el apartado 4.1, para posteriormente limitar su capacidad mediante un factor del 90% (API 520 Part I, 2008). El disco de ruptura debe ser de un diámetro nominal igual o mayor que el de la tubería de entrada de la válvula de seguridad.

Aspectos acerca de las características de la instalación de discos de ruptura en combinación con válvulas de seguridad y las necesidades que plantea esta configuración se pueden encontrar en el apartado 2.3.

## 4.3. CAPACIDAD DISPONIBLE EN VÁLVULA DE ALIVIO DE PRESIÓN-VACÍO

Las válvulas utilizadas en la protección de sistemas atmosféricos, ya sea parques de tanques de almacenamiento o colectores de venteo a baja presión, son usualmente válvulas de alivio de presión vacío como las descritas en 2.1.4. Estas válvulas suelen proteger escenarios de respiración térmica o apertura de válvulas de *blanketing* como es común en este tipo de sistemas. No obstante, en ciertos casos y en función de las características de la instalación, también puede estar presente la posibilidad de un sobrellenado del sistema.

El cálculo de la capacidad de este tipo de válvulas se puede realizar de manera similar a las válvulas de seguridad (Tabla 4.1) siempre que se disponga del valor del coeficiente de descarga de la válvula, tanto para el alivio de presión como para el alivio de vacío. Debido a las características de estas válvulas y su servicio a baja presión, donde la densidad del gas se puede considerar constante, es común dimensionar los dispositivos a través de gráficas de caudal volumétrico de alivio en función de presión de disparo y tamaño del dispositivo, este es el método elegido para realizar la verificación de dichos dispositivos.

A modo de ejemplo en la Figura 4.2 y Figura 4.3 se muestran dos gráficas de la capacidad disponible de un modelo de válvula del fabricante Protego® en función de la presión de tarado.

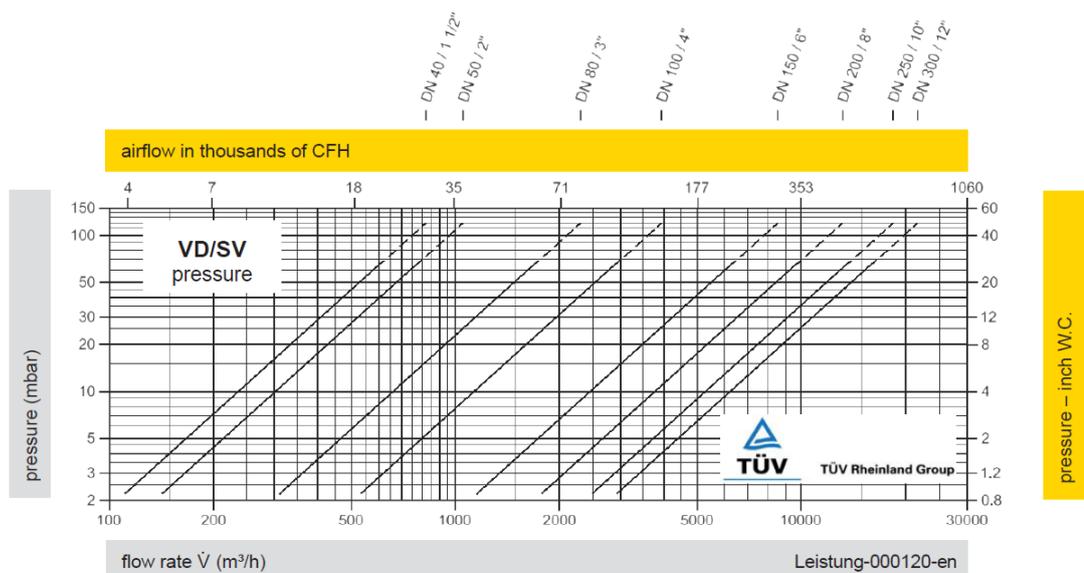


Figura 4.2. Gráfica de capacidad disponible en caso de sobrepresión (modelo Protego VD/SV, 2018/19)

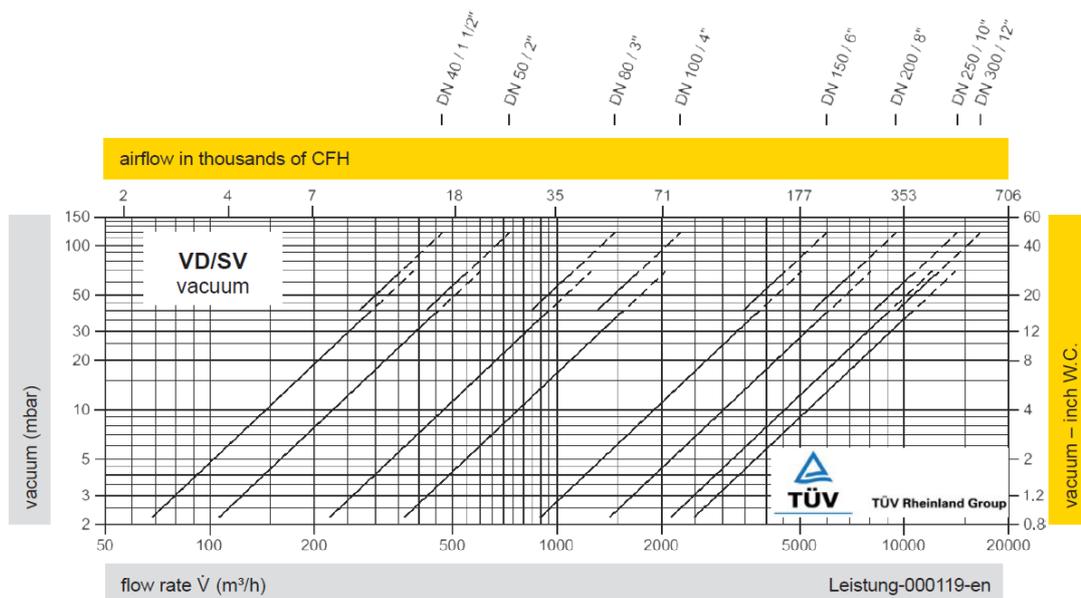


Figura 4.3. Gráfica de capacidad disponible en caso de vacío (modelo Protego VD/SV, 2018/19)

Normalmente los caudales de alivio se presentan en metros cúbicos normales de aire (0°C y 1 atm), pero también se pueden presentar en condiciones como las de las figuras (20°C y 1 atm). En los escenarios de respiración térmica este caudal se puede comparar directamente con el caudal requerido por el escenario. En los casos en los que competa se deben realizar conversiones a la sustancia que conforma el fluido del escenario de sobrepresión. La norma ISO 28300 proporciona

expresiones para realizar esta conversión teniendo en cuenta una serie de suposiciones que son perfectamente válidas en el caso de bajas presiones.

$$W_{air} = W_{fl} \sqrt{\frac{M_{air}}{T_{air}}} \sqrt{\frac{T_i}{M}} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Donde:

M es la masa molecular de la otra sustancia (kg/kmol)

$M_{air}$  es el peso molecular del aire (kg/kmol)

$T_{air}$  es la temperatura absoluta del aire (K)

$T_i$  es la temperatura absoluta de la otra sustancia (K)

$W_{air}$  es el caudal másico de aire (kg/h)

$W_{fl}$  es el caudal másico de la otra sustancia (kg/h)

Comúnmente esta expresión se utilizará para realizar la conversión a caudal másico o volumétrico normal de aire.

## 5. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ESCENARIOS, ESTABILIDAD Y ACEPTABILIDAD

La selección de escenarios de sobrepresión se realiza en base a una serie de criterios que permiten descartar aquellos que sean menos creíbles dentro del funcionamiento normal o de emergencia de la instalación.

En análisis de riesgos es una práctica común seguir el principio de fallo único (*single jeopardy*), este criterio se basa en considerar únicamente fallos individuales e independientes. Este principio se puede aplicar basándose en tres premisas relativas a las características de las causas que generan los escenarios de sobrepresión:

- Los fallos son realmente independientes y no tiene relación entre sí. Por ejemplo, en el caso de un fallo de aire de instrumentos no tendría sentido considerar el paro de bombas y compresores.
- Son relativamente poco frecuentes, es decir, no se espera que ocurran durante el funcionamiento normal y programado de la planta.
- Los fallos ocurren de manera aleatoria o imprevista.

La coincidencia simultánea de dos o más causas de sobrepresión no relacionadas no se considera una base para el análisis. Los sistemas instrumentados, arranque o paro automático no deberían utilizarse como salvaguardas únicas frente a los escenarios de sobrepresión considerados mediante el criterio fallo único como indica API 521, aunque puede justificarse su uso cuando la utilización de un PRD no sea lo más favorable para la instalación.

Adicionalmente del principio de fallo único, que se aplica de manera general a la hora de considerar cualquier escenario de sobrepresión, también existen otros criterios para casos concretos. La aplicación de algún criterio adicional en alguna situación específica puede estar justificada por el análisis histórico de fallos o incidentes en la instalación.

### **Intercambiadores de calor**

Con criterio conservador se considera siempre rotura completa de un tubo del intercambiador a no ser que se pueda justificar la consideración de fuga a través de un orificio de 5 milímetros. Las condiciones para poder considerar fuga a través de orificio se basan en que el material sea dúctil, el cambiador esté diseñado para fugar antes que romperse, la fuga tenga un crecimiento lento y la fuga sea detectable.

### **Válvulas antirretorno (*checkvalves*)**

No se consideran las fugas a través de válvulas antirretorno únicas en caso de servicio líquido ni de dos válvulas consecutivas en el caso de servicio gas, en el resto de casos se considera una fuga como se describe en 3.2.

### **Recipientes sometidos a fuego externo**

A parte de los criterios propios de consideración del escenario de fuego externo, explicados en 3.7, la carga del escenario de fuego externo se puede reducir por medio de la reducción del aporte de calor a través del coeficiente denominado factor de ambiente (F), que tiene en cuenta la protección pasiva contra el fuego. Por lo general, la aceptabilidad de los PRDs a este escenario se evaluará considerando el depósito sin ningún tipo de protección contra el fuego, las condiciones para darle crédito a este factor son variadas. El ignifugado del equipo debe resistir la actuación de los equipos contra incendios por un tiempo mínimo de 20 min (Wong, 2000).

### **Recipientes con función instrumentada por muy alto nivel (LSHH)**

El escenario de sobrellenado por trasiego con bomba se puede descartar siempre y cuando esté salvaguardado por la acción de una función instrumentada de alta robustez (SIL 1, SIL 2 o superior).

## **5.1. ESTABILIDAD**

La estabilidad de una válvula de seguridad hace referencia a su buen funcionamiento y a cierto tipo de fenómenos que se pueden dar durante el accionamiento de estos dispositivos que no sólo pueden afectar a su rendimiento y eficiencia, sino que pueden desembocar en problemas reales de seguridad. Estos fenómenos están relacionados con la frecuencia de apertura y cierre de la válvula ante las condiciones del escenario de sobrepresión, generalmente se clasifican en tres categorías (Hos, 2015).

- **Cycling:** el fenómeno de *cycling* hace referencia a válvulas que abren y cierran varias veces a lo largo de la duración del escenario de sobrepresión. Este comportamiento suele tener asociadas unas frecuencias bajas, por debajo de 1 Hz, y puede darse bien por un sobredimensionamiento de la válvula como por una caída de presión alta en la entrada, que provoca que la presión del sistema caiga de manera transitoria y la válvula cierre. Cuando la presión se vuelve a incrementar la válvula abre de nuevo, de esta manera se provocan las oscilaciones. Este fenómeno no suele resultar en daños físicos a la válvula, pero sí que puede afectar al cierre de la válvula en el futuro o desgastar ciertos elementos de la misma.
- **Fluttering:** por el contrario, el *fluttering* es un fenómeno de más alta frecuencia, por encima de 10 Hz, que desemboca en que la válvula no llegue a cerrar completamente, sino que se

mantiene constantemente abierta. Si este fenómeno se mantiene en el tiempo puede producir que la válvula quede atascada abierta.

- **Chattering:** el *chattering* consiste en oscilaciones a alta frecuencia y amplitud, en ocasiones llegando a variar entre la apertura completa y el cierre de la válvula. Esta es la inestabilidad más destructiva de todas ya que se produce a frecuencias superiores a 100 Hz, a diferencia de las otras inestabilidades durante el *chattering* se puede producir una pérdida de contención y daños graves tanto al asiento de la válvula como a los elementos móviles con los riesgos que ello genera. A parte de los daños a la válvula, este tipo de funcionamiento puede causar unas fluctuaciones graves en el sistema al que está conectado (Borg et al, 2014).

La inestabilidad se origina principalmente por la excesiva pérdida de carga en la entrada y/o descarga junto con el sobredimensionamiento de la válvula. Además, hay otros factores que también influyen en la inestabilidad como, por ejemplo, el efecto de onda acústica.

Algunos autores puntualizan que hay ciertos tipos de válvulas en las que no es necesario realizar el proceso de verificación de la estabilidad:

- Las válvulas de alivio térmico (TRVs), normalmente están sobredimensionadas debido a la baja capacidad que requiere el escenario de expansión térmica, esto podría propiciar fenómenos de *cycling* pero, dado que este escenario sólo se da en el caso de equipamiento aislado la cantidad de masa a evacuar es limitada, no se esperan fenómenos de *chattering* en este caso
- Las válvulas pilotadas con piloto remoto, dado que el piloto está localizado prácticamente en la fuente de presión o muy cercano a ella la válvula no cerrará de nuevo debido a que las pérdidas de carga irreversibles en la entrada son bajas.

A continuación, se describen algunas de las causas que pueden generar inestabilidad en las válvulas de seguridad, aunque se describan varios tipos de fuentes de inestabilidad sólo se consideran en el proceso de verificación las descritas en 5.1.1 y 5.1.2, por ser las que tienen una mayor evidencia consolidada y las que presentan claros valores límite en estándares de referencia.

Adicionalmente a las causas descritas existen otras, como la condensación retrograda en el caso de fluidos supercríticos o el mal diseño de los dispositivos, que no se incluyen en el estudio bien por no ser aplicables en el proyecto de verificación actual o por no ser tan representativas o no estar tan descritas como las causas principales.

### **5.1.1. Pérdida de carga en la entrada**

Conocer la pérdida de carga en la línea de entrada de la válvula es necesario para predecir el funcionamiento de la misma, si la caída de presión hidráulica en la entrada es demasiado grande puede

ocurrir que la presión en el dispositivo caiga por debajo de la presión de cierre provocando que el dispositivo cierre aun cuando la presión del equipo no ha bajado por debajo de la presión de disparo, haciendo que vuelva a abrir por efecto de la presión estática, contribuyendo a la inestabilidad estática.

API 520 establece que el límite seguro para asegurar un buen funcionamiento de la válvula es un 3% de la presión de tarado de la misma, este valor se ha elegido en base a considerar un 5% de *blowdown* o presión de reajuste y mantener un 2% de diferencia como margen de seguridad. En este caso se debería asegurar que el *blowdown* de la válvula es mayor al 5%. ISO 4126 Part 9 añade que se debe verificar también que la pérdida de carga en la entrada no supere un tercio del *blowdown* de la válvula, en el caso de válvulas con un valor de presión de reajuste igual al 10% se consideran similares los criterios, en caso contrario se debe escoger el más restrictivo.

Cabe destacar que estos criterios están sujetos a una evaluación ingenieril de cada válvula en particular, si un modelo de válvula en concreto tiene un *blowdown* mayor al 10% se puede justificar una caída de presión en la entrada de la válvula superior al 3% sin que afecte a la estabilidad de la misma.

API 520 especifica que la pérdida de carga en la entrada se debe calcular teniendo en cuenta la máxima capacidad disponible por la válvula en apertura completa. En dispositivos en los cuales exista una diferencia importante entre la capacidad requerida por el escenario limitante y la capacidad disponible de la válvula no resulta adecuado realizar el cálculo en base a esta última ya que además el criterio del 3% en la entrada se considera conservador en caso de desconocimiento del *blowdown* de la válvula. Algunos autores establecen que se debe utilizar un 50% de la capacidad máxima de la válvula en los casos en los que la capacidad requerida por el escenario dominante sea menor que la capacidad disponible (Basco 2015).

En el caso de uso conjunto de válvulas de seguridad y discos de ruptura el valor del coeficiente de resistencia al flujo del disco debe tenerse en cuenta a la hora de calcular la pérdida de carga en la entrada de la válvula.

Para reducir la pérdida de carga en la entrada se puede recurrir a aumentar el diámetro de la tubería de entrada o a acercar la válvula más cerca del equipo presurizado. En los casos en los que no sea posible realizar ninguna medida para evitar la inestabilidad de la válvula se debe terminar sustituyéndola por válvulas que no sufran alteraciones de este tipo (2.1.5).

Además, en los casos que exista una gran diferencia entre el caudal requerido y el disponible se puede recurrir a disminuir el caudal disponible limitando el recorrido del disco de la válvula (*lift*).

### 5.1.2. Pérdida de carga en la descarga (*backpressure*)

En el momento en el que se activa una válvula de seguridad es importante conocer la contrapresión que existe en la tubería de descarga, como se ha explicado anteriormente. La pérdida de carga que produce la resistencia al flujo en la tubería de descarga cuando se produce el accionamiento de la válvula de seguridad puede producir que se cierre el disco generando escenarios de inestabilidad y afectando tanto a la presión de apertura de la válvula como a la capacidad de descarga. Es importante conocer también el valor de la contrapresión superpuesta pero que en muchos casos debido a su variabilidad puede no ser posible de determinar.

Las soluciones que se suelen emplear en los casos en los que la pérdida de carga en la descarga sea demasiado grande es el uso de válvulas balanceadas (2.1.5) o la modificación de la geometría de la tubería de descarga.

En una válvula convencional la contrapresión máxima debe estar por debajo del 10% de la presión de tarado de la válvula. En el caso de las válvulas balanceadas por fuelle se toleran valores más altos de contrapresión que pueden llegar hasta el 50% (API 520 Part I).

Cabe destacar que tanto la pérdida de carga en la descarga como la pérdida de carga en la entrada se calculan hasta las bridas de la válvula, como se indica en la Figura 5.1, obtenida del manual de válvula de seguridad de Pentair (Pentair, 2012).

El diagrama muestra una sección transversal de una válvula de seguridad. En la parte superior, se indica 'Total back pressure at nozzle outlet ( $P_2'$ )'. En la parte inferior, se indica 'Calculated superimposed and built-up back pressure ( $P_2$ )'. El fluido que fluye hacia abajo está representado en color rojo.

Figura 5.1. Límites cálculo de estabilidad sobre diagrama de válvula (Pentair, 2012)

47

La evaluación la pérdida de carga debe realizarse teniendo en cuenta la capacidad requerida por el escenario de sobrepresión limitante de la válvula, de acuerdo a API 520, y teniendo en cuenta todos los elementos que conforman la geometría de la tubería de descarga, codos, ensanchamientos y estrechamientos, *fittings*, etc. Evidentemente, en los casos en los que se usen discos de ruptura en combinación con válvulas de seguridad estos también deben ser considerados para realizar el cálculo hidráulico.

Hay que tener especial consideración en los casos en los que el fluido aliviado sea un gas condensable, en estas ocasiones se debe estudiar la variación de la temperatura y del estado del gas a lo largo de la tubería de descarga y, si existiese posibilidad de condensación del gas, asegurar pendientes y purga a lo largo del sistema de colección.

### **5.1.3. Onda de presión (interacción acústica)**

En el momento del accionamiento de la válvula de seguridad la presión estática en el orificio disminuye, pero a su vez aumenta la velocidad a través del mismo, esto crea una onda de expansión a través del fluido hacia atrás a lo largo de la tubería de entrada. El gradiente de presión creado por la onda propicia la aceleración del fluido en la dirección contraria a la de la onda de presión. La onda de presión se reflejará en el equipo y retornará finalmente a la válvula, esta permanecerá abierta si el tiempo que tarda la onda en llegar de nuevo a la válvula es más corto que el tiempo de reacción de la válvula a las fuerzas en el fluido, consecuentemente si la válvula está en proceso de cierre en el momento en que llega la onda esta forzará al disco a cambiar su dirección y volver a abrir. Esto a su vez genera una compresión sobre el disco y consecuentemente una nueva expansión produciéndose de esta manera las oscilaciones en el funcionamiento de la válvula.

Al contrario que la inestabilidad estática producida por excesiva pérdida de carga en la entrada o en la descarga de la válvula, que puede ser contrarrestada por medio de la reducción de la tubería de entrada y descarga, la inestabilidad dinámica producida por el fenómeno de interacción acústica parece responder mejor en tuberías de entrada más largas. Los resultados del experimento llevado a cabo por Chiyoda Corporation (Izuchi 2011) apuntan a que el efecto de atenuación de onda producido por la fricción con la tubería de entrada contribuye a estabilizar la válvula y que esta causa de inestabilidad tiene más peso en el mal funcionamiento de la válvula que la pérdida de carga en la entrada de la válvula.

### **5.1.4. Relación área de salida / área de orificio**

En válvulas en las que la relación entre el área de salida de la válvula y el área del orificio tiene un valor pequeño, el efecto de la contrapresión puede ganar importancia debido a que las fuerzas que

favorecen el cierre del disco una vez la válvula está en funcionamiento actúan sobre un área mayor que en válvulas más pequeñas que no sufren de inestabilidades.

En el mismo estudio llevado a cabo por Chiyoda Corporation, se determina que las válvulas con una relación inferior a 6.0 pueden sufrir inestabilidad, este estudio está apoyado en los datos de un experimento realizado por Sallet y Somers para válvulas en servicio líquido (Sallet 1985).

#### **5.1.5. Condensación retrógrada en la entrada**

La condensación retrógrada se produce en el alivio de fluidos en condiciones supercríticas, en el momento en que la válvula se acciona disminuye la presión estática en la entrada de la válvula y el fluido puede condensar aguas arriba de la válvula. Esta condensación provoca que el fluido se contraiga y la válvula cierre, en el momento en que la válvula esté cerrada la presión estática se volverá a reestablecer y el condensado vaporizará volviendo a la situación inicial, si el fenómeno se produce en ciclos es una fuente de inestabilidad más (Basco 2015).

#### **5.1.6. Diseño inadecuado**

El sobredimensionamiento de las válvulas de seguridad puede inducir fenómenos de inestabilidad en los casos en los que la capacidad disponible por la válvula sobrepasa excesivamente la capacidad requerida por los escenarios de sobrepresión. Esto ocurre frecuentemente en válvulas que protegen de múltiples escenarios de sobrepresión y están dimensionados, adecuadamente, para el de mayor capacidad. En los casos en los que la válvula requiera accionarse para aliviar las cargas de los escenarios menos demandantes ésta puede funcionar de manera inestable.

Para estos casos puede ser interesante la opción de disponer de varias válvulas de seguridad taradas a diferentes presiones en función del escenario que protejan y la frecuencia de ocurrencia de dichos escenarios, si bien en los casos en los que no sea posible se debe realizar el diseño de acuerdo al escenario dominante. Seguir una filosofía de diseño demasiado conservadora también puede desembocar en problemas de funcionamiento futuro de la válvula como el comentado.

La selección de las válvulas de seguridad también puede ser errónea en el caso en el que se elijan válvulas certificadas únicamente para un tipo de servicio mientras que algunos escenarios correspondan a un alivio diferente que el inicialmente pensado. Por ejemplo, el uso de válvulas certificadas para vapor en servicio líquido puede dar lugar a una apertura excesiva de la válvula para el alivio de caudales pequeños al contrario del tipo de apertura proporcional que se conseguiría con la elección de una válvula de acción modulante (Trotta 2017).

## 5.2. ACEPTABILIDAD

El proceso de verificación termina con la evaluación de la aceptabilidad de cada dispositivo en función de una serie de características.

- La presión de tarado de la válvula o presión de ruptura del disco debe ser menor que la presión de diseño del elemento más débil del sistema protegido.
- La capacidad de alivio máximo del PRD a una sobrepresión del 10% de la presión de tarado, o 0,1 bar en el caso de los elementos de seguridad de baja presión, debe ser suficiente para cubrir la demanda del escenario dominante.
  - En el caso de que haya múltiples dispositivos de alivio de presión la capacidad combinada de todos ellos debe satisfacer la carga del escenario limitante.
- Cuando se requiera por motivos de mantenimiento u operativos instalar válvulas de aislamiento que afecten al funcionamiento del dispositivo de seguridad se deben seguir una serie de requerimientos, en la Figura 5.2 se puede apreciar el esquema de una instalación con válvulas de aislamiento;
  - Las válvulas de aislamiento deben ser de paso total (*full bore*).
  - Las válvulas de aislamiento deben tener la posibilidad de ser bloqueadas abiertas.
  - Deben instalarse purgas entre las válvulas de aislamiento y la de seguridad para poder realizarse la despresurización antes de las tareas de mantenimiento.

Los criterios específicos que aplican en el caso de uso de válvulas de seguridad son los siguientes:

- El criterio de estabilidad de la pérdida de carga en la entrada se ha de cumplir ( $\Delta P_{inlet} < 3\% P_{set}$ ), o se debe justificar el no cumplimiento del mismo.
- El criterio de estabilidad de la pérdida de carga en la descarga se tiene que cumplir ( $\Delta P_{outlet} < 10\% P_{set}$ ).
- En los casos en los que se instale la válvula en una localización cercana a algún elemento de restricción o que provoque turbulencias en el flujo, éste debería situarse en un punto tal que el flujo esté estabilizado.

A parte de los mencionados hay otros criterios que se tienen que cumplir en función del caso de estudio, con respecto al almacenamiento de sustancias inflamables hay requerimientos especiales:

- Los venteos normales deben contar con dispositivos del tipo apagallamas para evitar el ingreso de la llama al depósito.

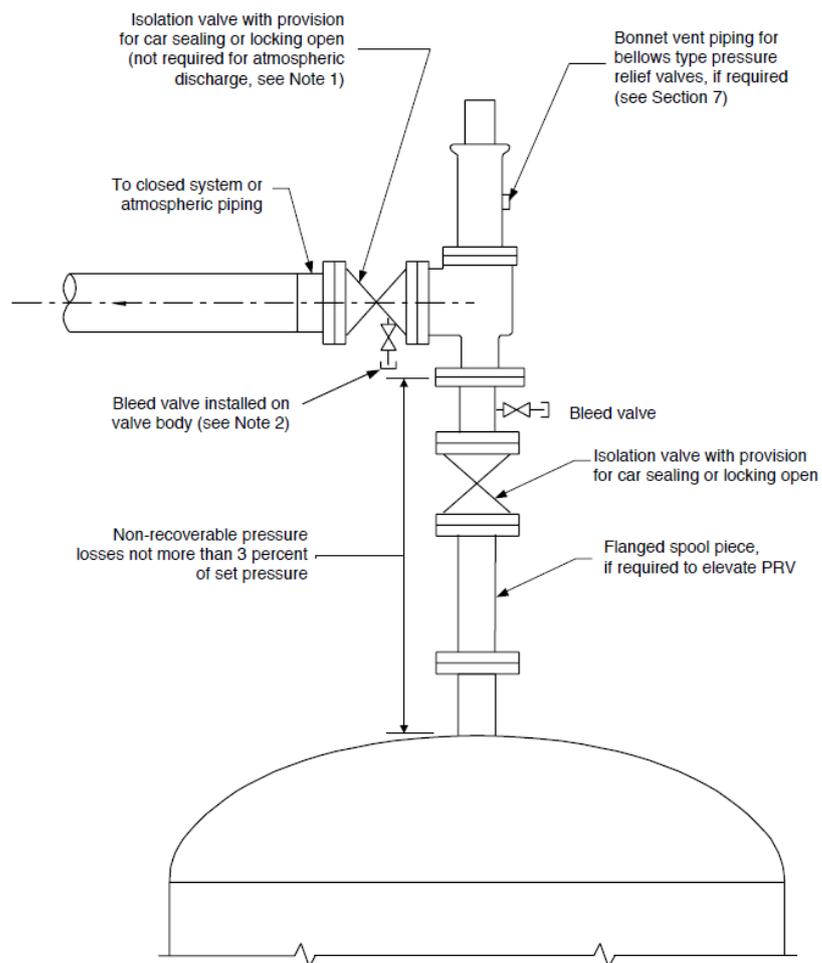


Figura 5.2. Esquema de una instalación de PSVs en conjunto con válvulas de aislamiento (API 520 Part 2)



## 6. CÁLCULOS ADICIONALES (*PERFORMANCE*)

En el accionamiento de las válvulas de seguridad también se producen otros fenómenos que conviene analizar, estos parámetros corresponden únicamente al disparo de válvulas de seguridad, el accionamiento de los discos de ruptura afecta al global de la pérdida de carga durante el alivio. Los esfuerzos y momentos mecánicos en la tubería y en el propio elemento que se producen fruto del accionamiento de la válvula son tales que, en algunos casos, si no están previstos, pueden comprometer la integridad del sistema. A su vez el ruido o las vibraciones también plantean problemas tanto a nivel ocupacional como a nivel de integridad de la estructura.

Todos estos parámetros a su vez pueden ser utilizados para establecer el periodo de inspecciones y mantenimiento. API 576 establece un intervalo de inspecciones en los dispositivos de despresurización máximo de 10 años a no ser que se lleve a cabo una evaluación de las inspecciones basadas en el riesgo, en inglés *Risk Based Inspection (RBI)* (Trotta, 2017).

Adicionalmente, se pueden evaluar otros aspectos como la vibración inducida de manera acústica, producida por la energía acústica en elementos de reducción de presión con una gran caída de presión en servicio gas mayoritariamente. Las ondas sónicas de alta frecuencia pueden causar fatiga en los elementos del sistema, en líquidos la amortiguación de estas ondas de presión es mayor.

### 6.1. FUERZAS DE REACCIÓN

En el momento de la apertura las fuerzas de reacción en la salida del elemento de alivio actúan en la dirección opuesta de descarga del fluido. En base a estas fuerzas se pueden calcular los elementos de apoyo necesarios en las partes concretas del sistema que necesiten refuerzo. En el caso en que la descarga sea conducida a través de una tubería esta debe estar soportada independientemente

Las fuerzas que se producen en la tubería son muy diferentes en función de si el sistema es cerrado o abierto.

#### 6.1.1. Descarga hacia la atmósfera

A continuación, se describe la expresión utilizada, basada en la disponible en API 520, a través de la cual se puede calcular la fuerza de reacción de un dispositivo de seguridad que trabaja en servicio gas o vapor que dispara a la atmósfera a través de una tubería vertical con un codo. Dicha ecuación se ha obtenido del manual de ecuaciones y ejemplos de aspenONE®.

Esta ecuación difiere de las planteadas por la norma ISO 4126 Part 9, las ecuaciones presentadas en esta norma utilizan como parámetro la velocidad del fluido en el punto de descarga, este parámetro no es fácil de calcular con la fiabilidad que se requiere para la descripción de dichas fuerzas de reacción en el disparo de las válvulas.

$$F = \frac{1}{27,9} W \sqrt{\frac{k T}{(k + 1)M} + \frac{A P_3}{10}} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Donde:

A es el área de descarga (mm<sup>2</sup>)

F es la fuerza de reacción en el punto de descarga a la atmósfera, incluye la cantidad de movimiento y la presión estática (N)

k es la relación entre los calores específicos

M es la masa molecular relativa de la sustancia del fluido a aliviar (kg/kmol)

P<sub>3</sub> es la presión estática en el punto de descarga (barg)

T es la temperatura absoluta del fluido en la entrada de la válvula (K)

W es el caudal másico del fluido a aliviar (kg/s)

La presión estática en la descarga de la tubería es un parámetro controvertido de calcular y sobre el cual existe diferentes criterios. Según lo descrito en el manual de Aspen se considera la presión estática en el punto de descarga igual a 0 en el caso de que el flujo en la salida no sea *choked* e igual a la presión *choked* en el caso en que sí lo sea (Powers, 2015). La presión *choked* se calcula según la ecuación (Eq. 3.7).

### 6.1.2. Descarga en sistema cerrado

En el caso de los elementos de alivio que disparan a un colector cerrado las fuerzas y los momentos de torsión que se generan en el disparo del elemento de alivio no son de tal magnitud como en el caso de los sistemas de venteo abierto, esto es debido a que los cambios en la presión y la velocidad en el sistema cerrado son pequeños (API 520).

Hay ciertos casos en los que, directamente, no es necesario realizar un cálculo de las fuerzas de reacción en el caso de sistema de venteo cerrado:

- Las válvulas de alivio de presión que protejan únicamente del escenario de fuego externo no necesitan de evaluación de las fuerzas de reacción. El efecto térmico en el cuerpo de la válvula y en la tubería de descarga debido al fuego se considera superior que los esfuerzos producidos por la válvula.
- Las válvulas de alivio que protejan únicamente ese escenario (expansión térmica) no requieren de verificación de las fuerzas de reacción.

## 6.2. RUIDO

El paso del fluido aliviado a través del orificio de la válvula de seguridad genera una cantidad de ruido que, en el caso de altas velocidades de paso, puede llegar a ser significativo, este nivel de ruido se mide en decibelios y debe ser aceptable dentro de las regulaciones de riesgos ocupacionales que competan en cada caso.

En API 521 se incluyen expresiones para el cálculo del nivel de ruido de la válvula a 30 m desde el punto de descarga. Estas expresiones son aplicables para elementos que descargan a la atmósfera, posteriormente también se plantearán ecuaciones a través de las cuales calcular el ruido en cualquier otro punto.

$$L_{30(100)} = L + 10 \log(0,5 q_m c^2) \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Donde:

$c$  es la velocidad del sonido en el gas en las condiciones de disparo de la válvula (m/s)

$L$  es el nivel de ruido en el punto de descarga, tabulado en función de la relación de presiones, ver Figura 6.1 (dB)

$L_{30(100)}$  es el nivel de ruido a 30 m desde el punto de descarga (dB)

$q_m$  es el caudal másico máximo aliviado por la válvula (kg/s)

La gráfica para estimar  $L$  se muestra en la Figura 6.1

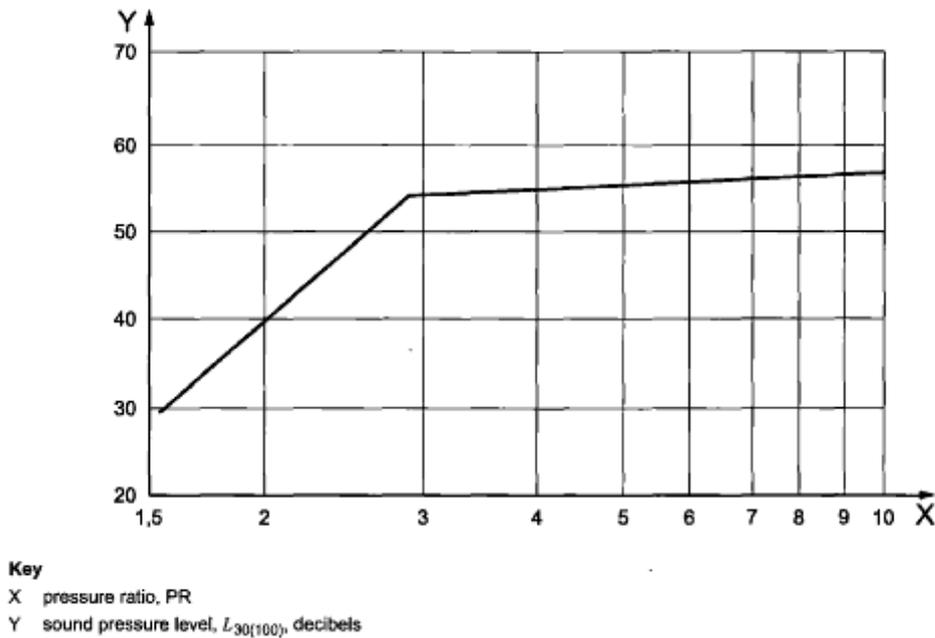


Figura 6.1. Nivel de presión de sonido a 30 m desde el punto de descarga (API 521, 2008)

La velocidad del sonido se calcula a partir de la ecuación de los gases ideales según la siguiente ecuación.

$$c = 91,2 \sqrt{\frac{kT}{M}} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Donde:

k es la relación entre los calores específicos

M es la masa molecular relativa del gas

T es la temperatura del gas (K)

A partir de (Eq. 6.2) se puede calcular el ruido en función de la distancia al punto del nivel de ruido calculado en primer lugar, a 30 m del punto de descarga.

$$L_r = L_{30(100)} - 20 \log\left(\frac{r}{30}\right) \quad (\text{Eq. 6.4})$$

Donde:

$L_r$  es el nivel de ruido a una distancia r del punto de descarga (dB)

r es la distancia hasta el punto de descarga a la atmósfera (m)

Con estas expresiones se puede determinar tanto el nivel de ruido en el punto de descarga de la válvula, como el nivel de ruido en cualquier punto en función de la distancia a dicho punto. Un criterio que se suele seguir en empresas de referencia ante la ausencia de límites establecidos es evitar el sobrepasar 137 dB en áreas con presencia de personas.

ISO 4126-9 también proporciona expresiones para calcular el ruido de la válvula basadas en la velocidad del fluido en la salida, al igual que en el caso anterior con las fuerzas de reacción. Por este motivo el cálculo del ruido se realizará según las ecuaciones de API 520 descritas anteriormente.



## 7. CASOS DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

En la instalación analizada se realizan varios procesos para la obtención de la materia prima destinada a la fabricación de productos químicos, dichos procesos se realizan por cargas y mayoritariamente en procesos de reacción química.

Esta planta produce principios activos para el sector agrícola y realiza formulación de diversos preparados para dicho sector. Con el tiempo la planta ha pasado de fabricar un solo producto a producir diferentes principios activos consumiendo diferentes materias primas, de manera que se trata de una planta multiproducto. Esta tendencia será más acusada en el futuro, por lo que, tanto las materias primas utilizadas en el proceso productivo como los productos acabados de la planta pueden variar con relativa frecuencia.

La distribución de la planta se realiza por zonas, estando el proceso productivo en la zona D-15 de la planta, el parque de tanques está ubicado en la zona D-10 y los compresores en el área D-20.

A parte del proceso productivo principal existen una serie de subprocesos necesarios para la deposición de residuos u obtención de productos auxiliares, dichos subprocesos son:

- Tratamiento de las aguas madres para destrucción térmica y aprovechamiento energético.
- Tratamiento de efluentes gaseosos del parque de tanques y del proceso productivo en una cámara de combustión.
- Sistema de refrigeración, se dispone de circuitos de frío, 28 °C y 5 °C. Empleando amoniaco en alguno de ellos.
- Unidad para la producción de cloruro de hidrógeno gas, la cual utiliza ácido clorhídrico al 35% como materia prima y obtiene ácido al 21% como subproducto.

Para facilitar la identificación de escenarios se utilizan una serie de códigos únicos para cada escenario de sobrepresión estudiado en el capítulo 3, estos códigos se exponen en la Tabla 7.1.

A continuación, se describen las partes y equipamiento analizados en el proceso.

**Tabla 7.1. Códigos de identificación de escenarios**

Tipo de escenario de sobrepresión	Código de identificación
Salidas bloqueadas	CLOSEDOUTPUTS

Tipo de escenario de sobrepresión	Código de identificación
Fallo de regulación, apertura o fuga de válvulas	VALVEOPENING
	LEAKAGE
Rotura de tubos	TUBERUPTURE
Sobrellenado	OVERFILLING
Fallo de refrigeración o condensación	COOLLINGFAILURE
Carga máxima de calor	MAXHEATING
Fuego externo	FIRE
Reacción química descontrolada	CHEMREACTION
Respiración térmica (exhalación)	OUTBREATHING
Respiración térmica (inhalación)	INBREATHING
Expansión térmica	THERMALEXP
Comunicación de equipos	EQUIPCOMM
Otros casos	OTHER

Debido al gran número de elementos de estudio que existen en la planta se eligen unos casos de estudio determinados representativos de los equipos y sistemas que se pueden encontrar en la instalación.

## 7.1. PARQUE DE TANQUES

La zona de almacenamiento D-10, parque de tanques, contiene depósitos para el almacenamiento de materias primas necesarias para la fabricación del producto final.

- B 01; tanque de almacenamiento de metanol.
- B 1010; tanque de almacenamiento de disolvente.

### 7.1.1. B 01

El tanque de almacenamiento de metanol B 01 consta de dos dispositivos de alivio de presión: la válvula de alivio de presión-vacío PVRV 01, que protege los escenarios de respiración térmica (inhalación y exhalación) y apertura de la válvula de regulación de nitrógeno de inertizado (*blanketing*) del tanque; y la válvula de seguridad de resorte convencional PSV 01, que cubre la demanda del escenario de fuego externo al depósito, aunque también puede hacer frente al escenario de fallo de regulación. En la Tabla 7.2 se muestra información acerca de las características y de los elementos de seguridad que protegen este depósito.

**Tabla 7.2. Información de B 01 y PRDs**

TAG	Sustancia	Volumen (m <sup>3</sup> )	P <sub>design</sub> (barg)	T <sub>op</sub> (°C)
B 01	Metanol	50	3 / -0,1	25
TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (barg)	Dimensiones
PVRV 01	Válvula de alivio de presión-vacío	Protego VD/HK	0,2 / -0,02	DN 50 / DN 50
PSV 01	Válvula de seguridad convencional	Bopp & Reuther SI 6302	3	DN 80 / DN 150

El depósito está protegido contra el escenario de sobrellenado con una función instrumentada por alto nivel, además la presión a impulsión cerrada (*shut-off*) de la bomba de carga no es capaz de presurizar por encima de la presión de tarado de PSV 01.

### ESCENARIOS

- **INBREATHING:** se considera un caudal de vaciado del tanque de 6 m<sup>3</sup>/h de acuerdo a la información de la bomba P 01 que figura en el P&ID.
- **OUTBREATHING:** se considera un caudal de llenado del tanque de 30 m<sup>3</sup>/h de acuerdo a la información de la bomba P 02 que figura en el P&ID.
- **VALVEOPENING:** se considera el fallo de regulación de nitrógeno de *blanketing* a través de la reguladora PCV 1001, dado que no se dispone del valor K<sub>v</sub> de la válvula se realiza el cálculo a través de un orificio de 9 mm, valor de orificio de la válvula.
- **FIRE:** no se considera ningún factor de reducción de la carga de calor del escenario de fuego dado que, aunque el equipo está calorifugado, no tiene la resistencia requerida para un ignifugado, es decir, no se puede asegurar que las protecciones del tanque resistan la

actuación de los equipos contraincendios o mantengan su integridad durante el tiempo que dure el incendio.

### **ESTABILIDAD**

Ambos dispositivos de alivio de presión están instalados directamente sobre la cabeza del depósito por lo que no se considera necesario calcular la pérdida de carga en la entrada del mismo.

El venteo de PSV 01 está conducido por medio de una tubería de descarga, este será en el único caso en el que se calculará la pérdida de carga en la salida. Se comprueba que la pérdida de carga que produce el paso del caudal máximo disponible de la válvula a través de la tubería de descarga produce una pérdida de carga menor que el 10% de la presión de tarado.

Es decir, la contrapresión que produce la tubería de descarga está dentro de los valores admisibles para una válvula de seguridad convencional sin fuelles.

### **PERFORMANCE**

Los cálculos relativos a fuerzas de reacción y ruido se muestran en la ficha de la válvula.

#### **7.1.2. B 1010**

El tanque de almacenamiento de disolvente B 1010 está protegido por un disco de ruptura que cumple las funciones de venteo de emergencia, los escenarios de respiración del tanque no se consideran ya que el venteo normal del tanque es un venteo abierto con apagallamas. En caso de la obstrucción del mismo el venteo de emergencia tiene capacidad suficiente para hacer frente a todos los escenarios.

**Tabla 7.3. Información de B 1010 y PRDs**

TAG	Sustancia	Volumen (m <sup>3</sup> )	P <sub>design</sub> (mbarg)	T <sub>op</sub> (°C)
B 1010	Disolvente	25	80 / -80	25
TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (mbarg)	Dimensiones
RD 1010	Disco de ruptura	Marston Grafito	80 / -80	DN 200 / DN 200

El depósito está protegido contra el escenario de sobrellenado con una función instrumentada por alto nivel en el mismo. No se calculan los parámetros relativos a estabilidad o adicionales debido al tipo de dispositivo de alivio de presión.

## ESCENARIOS

- **FIRE:** de acuerdo a la ficha de seguridad se puede asemejar la sustancia del depósito a tolueno. No se considera ningún tipo de reducción en la carga de calor del escenario debido a la protección del depósito.

## 7.2. PROCESO

En el proceso productivo existe multitud de equipamiento protegido con elementos de alivio de presión. A continuación, se lista el equipamiento seleccionado para el estudio.

- K 301 y B 301; columna destilación tolueno y depósito de condensador.
- R 800; reactor.
- R 900; reactor.
- B 910; depósito trasvase R 900 (añadir fuego).
- Línea de vapor.

### 7.2.1. K 301

La columna K 301 destila tolueno, esta columna funciona con un calderín que se calienta con vapor de alta presión y evapora el tolueno en primer lugar, por cabeza se extrae el tolueno más volátil y se almacena en el depósito del condensador B 301, mientras que por fondo se retira y recirculan las sustancias menos volátiles. En la Tabla 7.4 se muestra información acerca del equipamiento y los dispositivos de alivio de presión.

Tabla 7.4. Información de K 301 y B 301

TAG	Sustancia	Volumen (m <sup>3</sup> )	P <sub>design</sub> (barg)	T <sub>op</sub> (°C)
K 301	Mezcla con tolueno	5	6 / -1	140
B 301	Tolueno	4	6 / -1	120
TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (barg)	Dimensiones
PSV 301	Válvula de seguridad convencional	Leser 441	6	DN 50 / DN 80

La columna está protegida por una válvula de seguridad convencional de resorte en cabeza que dispara hacia un colector que finalmente acaba en un recipiente de recogida o *catch tank*.

No se considera escenario de sobrellenado ya que la presión de la bomba de carga a *shut-off* no presuriza el equipo por encima de la presión de tarado de la válvula. Además, tampoco se considera el escenario de fuga en el condensador ya que la presión del agua de refrigeración es inferior a la presión de tarado de la válvula.

La columna y el depósito del condensador están situados a una altura superior a 7 metros sobre cualquier superficie sobre la que se pueda formar un charco inflamable.

### **ESCENARIOS**

- **MAXHEATING:** la presión asegurada del vapor de alta es 20 bar. Se considera un área de intercambio de calor y un coeficiente global de transmisión de calor de  $48 \text{ m}^2$  y  $400 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  respectivamente.
- **TUBERUPTURE:** las condiciones de diseño del evaporador, así como las numerosas alarmas de presión en el equipo dan crédito a la consideración de fuga a través de orificio de 5 mm en lugar de la rotura franca de los tubos del evaporador.
- **COOLLINGFAILURE:** se considera fallo del condensador en cabeza de la torre, la temperatura del agua de refrigeración está obtenida de PID (es un valor tan alto por venir de otra etapa de intercambio de calor anterior). Datos del condensador obtenidos de ficha técnica del fabricante.

### **ESTABILIDAD**

La presión asegurada en el recipiente de recogida es de 30 mbar, este es el valor considerado como contrapresión superpuesta en el disparo de PSV 301. Según el criterio de pérdida de carga en la entrada de la válvula esta no cumple con los requisitos de estabilidad, aunque considerando la poca diferencia respecto al criterio empírico de estabilidad, y lo restrictivo que es, se considera aceptable.

Así mismo evaluando la pérdida de carga en la descarga se considera no aceptable ya que dicha caída de presión es muy superior al valor del 10% de la presión de tarado.

#### **7.2.2. R 800**

En el reactor R 800 se lleva a cabo una de las etapas de reacción de uno de los productos que se fabrican en la instalación. Este equipo está protegido por una válvula convencional de resorte. En este reactor se trabaja con una mezcla de reacción que tiene como disolvente tetrahidrofurano. La información relativa al reactor y a su elemento de seguridad se muestra en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. Información de R 800 y PSV 800

TAG	Sustancia	Volumen (m <sup>3</sup> )	P <sub>design</sub> (barg)	T <sub>op</sub> (°C)
R 800	Mezcla de reacción	12,5	6	--
TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (barg)	Dimensiones
PSV 800	Válvula de seguridad convencional	Leser 441	5,5	DN 50 / DN 80

No se considera la posibilidad de reacción química descontrolada. Además, ninguna de las bombas de carga del reactor es capaz de presurizar por encima de la presión de tarado de la válvula de seguridad, por lo que no se estima necesario evaluar el escenario de sobrellenado.

### ESCENARIOS

- **FIRE:** se considera la vaporización del tetrahidrofurano por ser el componente mayoritario en la mezcla de reacción y el alivio de esta sustancia en fase gas.

### ESTABILIDAD

La pérdida de carga en la descarga se calcula en base a los planos isométricos proporcionados por la instalación desde el reactor R 800 hasta el *catch tank* B 1009., dicho depósito está asegurado por su propio elemento de seguridad a una presión de 50 mbarg, esta presión es la considerada como contrapresión superpuesta.

### **7.2.3. R 900**

En el reactor R 900 se produce la reacción entre uno de los productos de la primera etapa cloruro de tionilo, con distintos catalizadores y tolueno como medio disolvente. Este reactor está protegido por una válvula convencional de resorte en cabeza que protege de varios de escenarios. En la Tabla 7.6 se muestra información de este equipo.

Tabla 7.6. Información de R 900 y PSV 900

TAG	Sustancia	Volumen (m <sup>3</sup> )	P <sub>design</sub> (barg)	T <sub>op</sub> (°C)
R 900	Mezcla de reacción	8	6	--

TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (barg)	Dimensiones
PSV 900	Válvula de seguridad convencional	Richter Chemie-Technik GmbH KSE/F	1	DN 50 / DN 80

### ESCENARIOS

- **FIRE:** se considera la vaporización del tolueno, componente mayoritario en la mezcla de reacción. Se considera un ignifugado de 25 mm de lana de roca para aplicar un factor reducción de carga de calor.
- **VALVEOPENING:** se considera el fallo de la regulación de nitrógeno en el interior del depósito a través de la reguladora PCV 1509. El caudal máximo a través de la reguladora se calcula en función del coeficiente  $K_{vs}$  de la misma y considerando la presión asegurada del colector de nitrógeno de la planta.
- **OVERFILLING:** sobrepresión por sobrellenado por llenado a través de bomba de carga del reactor. Para calcular la capacidad requerida se tiene en cuenta únicamente la densidad del tolueno.
- **CHEMREACTION:** se considera el escenario de reacción descontrolada con liberación de gases de cloruro de hidrógeno y dióxido de azufre. La reacción está limitada por el caudal de alimentación máximo limitado por un orificio de restricción (RO 1590) instalado en la línea de entrada. Como se ha explicado en el apartado 3.8, el cálculo de la carga del escenario de reacción química es demasiado complejo, no se tienen datos de la cinética de la reacción, ni de la entalpía de la misma, así como tampoco se conoce la influencia que tiene en el desarrollo de la reacción la presencia de otros componentes.  
Por este motivo el cálculo de la capacidad requerida por este escenario ha sido llevado a cabo por los ingenieros de la de la instalación estudiada. A efectos de cálculo se considera flujo monofásico gaseoso y constituido mayoritariamente por cloruro de hidrógeno.
- **TUBERUPTURE:** se considera el escenario de sobrepresión por fuga de agua en el condensador y llegada de agua a través de un orificio de 10 mm, en este caso dada la configuración del intercambiador de calor (bloques de grafito) se considera improbable la rotura franca de un tubo.

### ESTABILIDAD

La válvula de seguridad está instalada directamente en el reactor por lo que no se considera necesario calcular la pérdida de carga en la entrada de la misma.

La columna de lavado de gases a la que está conducido el disparo de la válvula de seguridad está asegurado por su propio elemento de protección a 50 mbar por lo que se considera ésta como contrapresión superpuesta. La tubería en la salida de la válvula hasta la columna K 970 cumple el criterio de pérdida de carga en la descarga.

#### 7.2.4. B 910

El depósito B 910 es un depósito de trasiego del reactor R 900. Está protegido por sobrepresión por una válvula de seguridad convencional de resorte en cabeza. En la Tabla 7.7 se muestra información acerca del depósito y de la válvula de seguridad que lo protege.

**Tabla 7.7. Información de B 910 y PSV 910**

TAG	Sustancia	Volumen (m <sup>3</sup> )	P <sub>design</sub> (barg)	T <sub>op</sub> (°C)
B 910	Disolución HCl	4	6	–
TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (barg)	Dimensiones
PSV 910	Válvula de seguridad convencional	Richter Chemie- Technik GmbH KSE/F	2,5	DN 25 / DN 50

#### ESCENARIOS

- **FIRE:** la válvula de seguridad no cumple los criterios de aceptabilidad en el supuesto del escenario de fuego externo al depósito.
- **VALVEOPENING:** llegada de nitrógeno por fallo de reguladora PCV 1510, caudal limitado por orificio de restricción (RO 1509).
- **OVERFILLING:** sobrepresión por sobrellenado con bomba de agua desmineralizada.

#### 7.2.5. LÍNEA DE VAPOR

En la instalación existe una red de regulación de vapor para obtener vapor de alta presión, media y baja. La red está alimentada por el importado de una industria vecina asegurado a 35 bar y por el aporte de vapor producido en una caldera de recuperación de calor. Una de las válvulas que salvaguardan esta red es la válvula de seguridad convencional de resorte PSV 1001. En la Tabla 7.8 se muestra información de dicha válvula.

Tabla 7.8. Información de PSV 1001

TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (barg)	Dimensiones
PSV 1001	Válvula de seguridad convencional	Bopp & Reuther SI 6302	18	DN 25 / DN 40

A efectos de cálculo se considera vapor seco y saturado en todos los casos.

### **ESCENARIOS**

- **VALVEOPENING:** se considera el escenario de sobrepresión por llegada de vapor desde la caldera asegurado a 20 bar. El caudal requerido se calcula como el caudal máximo posible a través de una tubería de DN 50.
- **VALVEOPENING:** sobrepresión por llegada de vapor de importación por fallo de reguladora PCV 1001. El caudal requerido está limitado por el orificio de restricción RO 1001.

### **ESTABILIDAD**

La válvula está instalada directamente en la tubería por lo que no se considera calcular la pérdida de carga en la entrada de la válvula.

La pérdida de carga en la descarga se calcula de acuerdo a la capacidad máxima disponible por la válvula actual.

### **PERFORMANCE**

Las fuerzas de reacción y el nivel de ruido se calculan de acuerdo a la capacidad máxima disponible por la válvula actual.

## **7.3. GRUPOS DE FRÍO**

Para la refrigeración de ciertas partes del proceso se emplea un fluido frigorífico (agua glicolada o agua) que se enfría en un equipo de frío o chiller, el sistema funciona con amoníaco como refrigerante. El circuito contiene los siguientes equipos entre otros:

- B 515; separador de aceite.
- B 4015; vaso de expansión.

### 7.3.1. B 515

El grupo de frío consta de un separador de aceite en la salida del compresor, este separador está protegido por una válvula de seguridad convencional de resorte. En la Tabla 7.9 se puede observar información acerca del depósito de la válvula de seguridad.

**Tabla 7.9. Información de B 515 y PSV 515**

TAG	Sustancia	Volumen (m <sup>3</sup> )	P <sub>design</sub> (barg)	T <sub>op</sub> (°C)
B 515	Amoniaco	0,4	25	-70
TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (barg)	Dimensiones
PSV 515	Válvula de seguridad convencional	AWP 443 31	25	DN 32 / DN 50

#### ESCENARIOS

- **CLOSEDOUTPUTS:** dado que el recipiente protegido se encuentra inmediatamente después de la salida de compresores es posible que se desarrolle el escenario de compresor en marcha y salidas cerradas. La capacidad requerida se calcula en base al caudal máximo del compresor.
- **FIRE:** el recipiente puede ser afectado por el efecto de un fuego externo. Se considera la presurización por aporte de calor externo. La carga del escenario de fuego externo se calcula en base al Reglamento de Seguridad para Plantas e Instalaciones Frigoríficas (MI-IF 009).

Este cálculo se realiza en base a la siguiente expresión.

$$C = f D L \quad (\text{Eq. 7.1})$$

Donde:

C es la capacidad requerida por el escenario de fuego (kg/h aire)

f es un factor que depende del refrigerante (145 para el amoniaco)

D es el diámetro exterior del recipiente (m)

L es la longitud del recipiente (m)

## **ESTABILIDAD**

La válvula de seguridad dispara a la aspiración del compresor, la pérdida de carga en la descarga se calcula en base a la longitud de este tramo de tubería.

No se considera necesario calcular la pérdida de carga en la entrada de la válvula ya que ésta está instalada directamente en el separador de aceite.

### **7.3.2. B 4015**

El depósito B 4015 es un vaso de expansión que protege el sistema líquido del circuito de refrigeración en el caso de expansión térmica con las líneas completamente llenas de agua, este depósito está protegido con una válvula proporcional de alivio térmico TRV. En la Tabla 7.10

**Tabla 7.10. Información de B 4015 y TRV 4015**

TAG	Sustancia	Volumen (m <sup>3</sup> )	P <sub>design</sub> (barg)	T <sub>op</sub> (°C)
B 4015	Agua	0,2	5,9	25
TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (barg)	Dimensiones
TRV 4015	Válvula de seguridad proporcional	Metalúrgica Zaes, S.L.	5,9	DN 15 / DN 15

Se considera la posibilidad de aislar o bloquear el depósito.

## **ESCENARIOS**

- **THERMALEXPANSION:** se considera el calentamiento del depósito lleno y bloqueado con líquido y calentamiento por efectos de radiación solar o temperatura ambiente. A efectos de cálculo se considera el calor absorbido por el fluido igual a la potencia calorífica del equipo de frío.

## **7.4. SISTEMA DE VENDEO**

La instalación cuenta con un colector en el que están conectados algunas de las descargas de las válvulas de seguridad. Las válvulas que protegen sistemas en los que hay presencia de sustancias peligrosas como inflamables y tóxicas requieren de un sistema de deposición, ya sea mediante una cámara de combustión como mediante una torre de lavado de gases.

- Colector sistema de venteo

El colector del sistema de venteo vehicula los disparos de las SVs hacia la cámara de destrucción térmica, donde se eliminan los componentes peligrosos que puedan llevar estas mezclas de gases. En la Tabla 7.11 se proporciona información acerca de este sistema.

**Tabla 7.11. Información del sistema de venteo**

TAG	Tipo	Marca / Modelo	P <sub>set</sub> (mbarg)	Dimensiones
PRV 9010	Válvula de seguridad convencional	Protego DZ/T	85	DN 50 / DN 50

Al sistema se conectan una parte de los venteos de respiración de los tanques, así como muchas de las descargas de válvulas de seguridad de la planta. Este opera a unos pocos milibares y consta de un sistema de inyección de nitrógeno para barrer los gases hacia la cámara de combustión. Así mismo este sistema está protegido por válvulas de alivio de presión-vacío como la PRV 9010.

### ESCENARIOS

- **COOLLINGFAILURE:** se considera la sobrepresión por fallo de refrigeración en una de las columnas de destilación de la instalación. A efectos de cálculo se considera calentamiento en condiciones normales en el calderín y una potencia residual del aerofriador fallado del 10%.

La potencia del aerofriador es 480 kW de acuerdo a información del fabricante.

- **VALVEOPENING:** se considera fallo de regulación de nitrógeno, caudal calculado en base a  $K_{vs}$  de la reguladora PCV 9010.



## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La empresa solicita la verificación de las válvulas de seguridad de la instalación. Los criterios que deben cumplir los dispositivos para determinar su aceptabilidad satisfacen tanto la legislación vigente en España en el momento del análisis como las guías internas de la compañía propietaria de la instalación, así como las buenas prácticas recomendadas por las guías del campo de aplicación.

Los casos de estudio planteados en el proyecto forman parte de un proyecto de verificación de la aceptabilidad de todos los elementos de alivio de presión de la planta. Esta instalación cuenta con un total de 133 dispositivos de alivio de presión, comprendiendo este número tanto válvulas de seguridad, válvulas de alivio de presión, vacío o presión-vacío, como discos de ruptura.

### 8.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La presentación de resultados se realizará por medio de fichas en las que se identifican cada uno de los dispositivos con la información referente al tipo y modelo de válvula y datos de operación (presión de tarado, tipo de servicio, rango de sobrepresión, etc.).

De la misma manera se recogerán en las fichas cada uno de los escenarios identificados con las condiciones de cálculo establecidas. Los cálculos de estabilidad y *performance* aparecen al final de las fichas. Un ejemplar de este modelo de ficha se puede encontrar en ANEXO A. FICHA MODELO PRD, en este anexo también se incluye una ficha indicando cada uno de los campos generales y su explicación.

A diferencia de otros modelos de fichas más convencionales este se ha desarrollado para incluir los datos de entrada y salida de los modelos de cálculo utilizados evitando, en la medida de lo posible, tener que recurrir a documentación adicional.

Las condiciones de cálculo de los escenarios para cada dispositivo descrito en los casos de estudio se especifican en las fichas de los mismos en el ANEXO B. FICHAS DE PRDs CASOS DE ESTUDIO.

En los casos en los que el dispositivo de alivio de presión estudiado no cumpla los criterios de aceptabilidad se propondrán medidas para conseguir la aceptabilidad del sistema. Cabe destacar que los cálculos relativos a la estabilidad y los cálculos adicionales de actuación (*performance*) sólo se llevarán a cabo en el caso de que la válvula cumpla con los criterios de aceptabilidad o en los casos en los que se pueda lograr la aceptabilidad del escenario con medidas que no impliquen la sustitución de la válvula. Además, los cálculos del nivel de ruido, así como los de fuerza de reacción, se presentan a modo informativo, ya que no se detecta ningún requerimiento especial que limite estos parámetros por parte de la empresa.

## 8.2. ESTADÍSTICAS

Se utilizarán los datos del proyecto completo de verificación para presentar una serie de estadísticas acerca del número de válvulas, número de escenarios, tipo de escenarios más numerosos, etc.

En la siguiente tabla se presenta una primera estadística en la que se muestra una relación de los dispositivos de alivio de presión en función de su aceptabilidad y su número de escenarios (sin tener en cuenta los escenarios de expansión térmica), además también se especifica cuántas y qué porcentaje presentan las válvulas de expansión térmica, que en la mayoría de los casos no requieren de verificación, de acuerdo a lo expuesto en el apartado 3.10.

La aceptabilidad de estos dispositivos únicamente se ha evaluado considerando el criterio por el cual la capacidad requerida por cada escenario debe ser menor que la capacidad máxima disponible por el dispositivo de seguridad.

**Tabla 8.1. Estadística número y proporción de dispositivos aceptables y válvulas de alivio térmico**

<b>Total PRDs</b>	132
<b>Total escenarios</b>	167
<b>PRD aceptables</b>	111
<b>PRD no aceptable</b>	21
<b>PRD no aceptable</b>	16%
<b>Escenarios/PRD</b>	1,27
<b>Exp. Termica</b>	37
<b>Exp. Termica</b>	28%

Un 16% del total de los dispositivos evaluados no es capaz de hacer frente al menos al más demandante de los escenarios de sobrepresión identificados. Esto quiere decir que, en caso de requerirse el funcionamiento de dichos elementos, en las condiciones de cálculo supuestas para los escenarios, la sobrepresión no va a poder ser aliviada y probablemente se produzca la rotura del equipo.

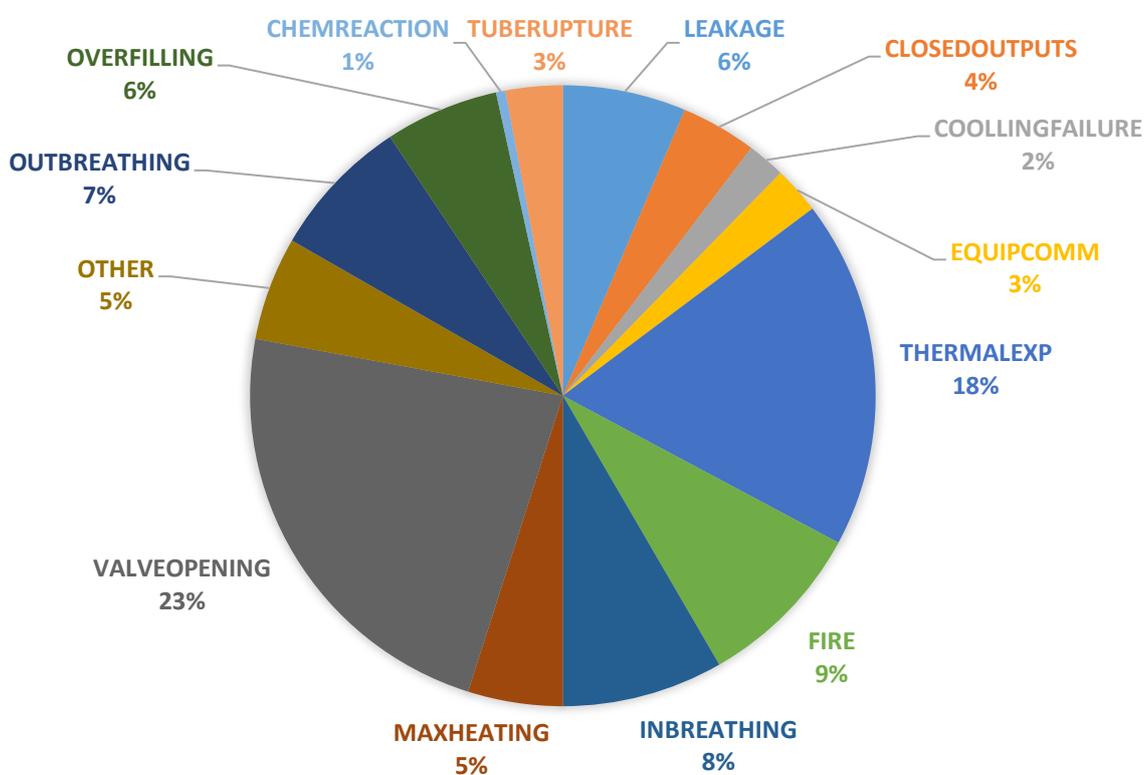
En la Tabla 8.2 se muestra una relación entre cada tipo de escenario y el número total de cada uno de ellos.

**Tabla 8.2. Número de escenario en función de cada tipo**

Tipo de escenario	Nº Escenarios
CLOSEDOUTPUTS	8
VALVEOPENING	47
LEAKAGE	13
OVERFILLING	12
COOLLINGFAILURE	4

Tipo de escenario	Nº Escenarios
MAXHEATING	10
FIRE	18
CHEMREACTION	1
OUTBREATHING	15
INBREATHING	17
THERMALEXP	37
OTHER	11
EQUIPCOMM	5

En la Figura 8.1 se presenta un gráfico con los mismos datos presentados en la figura anterior, pero en forma de diagrama de sectores.



**Figura 8.1. Estadísticas número de escenarios por tipo**

El escenario de apertura de válvula de regulación o fuga a través de ellas es el principal responsable de los escenarios de sobrepresión en la instalación seguido del de expansión térmica en tramos de tubería o equipos que pueden ser bloqueados estando completamente llenos de líquido.

En muchas ocasiones los escenarios que implican situaciones complejas a menudo son los responsables de los accidentes, por este motivo la identificación de los escenarios es un factor clave a la hora de llevar a cabo la verificación de los dispositivos.

### 8.3. DISPOSITIVOS NO ACEPTABLES Y RECOMENDACIONES

Durante el proceso de verificación se han encontrado una serie de dispositivos que no se consideran aceptables de acuerdo a los criterios de aceptabilidad utilizados para el estudio y descritos en el capítulo 5. De manera general se propondrán acciones para llegar a una situación de aceptabilidad, bien sea por la sustitución del dispositivo por uno que sí satisfaga las necesidades de los escenarios de sobrepresión o bien realizando algún tipo de modificación en la instalación.

Cabe destacar que en el caso en el que se deba sustituir una válvula de seguridad, el dimensionamiento de la nueva válvula no se podrá realizar utilizando los caudales de alivio requeridos en escenarios en los que el fluido sea distinta a aire, vapor y agua ya que los fabricantes sólo dan valores de capacidad para estas sustancias.

La nueva válvula se debe seleccionar en base a dos factores, el área del orificio y el  $K_{dr}$ . Por esta razón, y para simplificar la información se incluye en la información del escenario un nuevo parámetro denominado "Área Requerida para ( $K_{dr} = 1$ )", en la ficha se indica como "*Required area (mm<sup>2</sup>) (for  $K_{dr}=1$ )*". Este parámetro indica el área de descarga mínima para una válvula ideal que tenga un  $K_{dr}$  con valor igual a 1, es decir, que evacúe el máximo de capacidad teórica.

Esta información le permite al procesista seleccionar una nueva válvula en base a que el área de la nueva válvula tiene que cumplir la siguiente relación:

$$A_{nueva\ válvula} > \frac{A (K_{dr} = 1)}{K_{dr\ nueva\ válvula}}$$

A continuación, se comentarán los dispositivos no aceptables y las medidas propuestas para garantizar el buen funcionamiento de estos en caso de necesidad.

- RD 1010: el disco de ruptura no es capaz de aliviar el caudal requerido por el escenario de sobrepresión debido a un fuego externo al depósito. Se propone modificar la instalación, se puede modificar el venteo aumentando su diámetro o reduciendo su longitud para incrementar la capacidad disponible. También existe la posibilidad de instalar dos discos de ruptura en paralelo de tal modo que de manera conjunta cubran las necesidades del escenario.

La capacidad disponible está limitada por la conexión de salida del equipo, teniendo en cuenta esto, el segundo disco se deberá instalar en una salida independiente y no en una T

- PSV 301: la válvula de seguridad puede hacer frente a los escenarios de sobrepresión, sin embargo, la válvula no cumple el criterio de la pérdida de carga en la descarga. Se propone utilizar una válvula balanceada o aumentar el diámetro de la tubería de descarga.

Normalmente en estos casos es suficiente con incrementar un diámetro nominal la tubería de descarga, ampliando la misma justo después de la válvula de seguridad.

- PSV 800: de manera similar al anterior se propone utilizar una válvula balanceada o aumentar el diámetro de la tubería de descarga.
- PSV 900: de manera similar al anterior se propone utilizar una válvula balanceada o aumentar el diámetro de la tubería de descarga.
- PSV 910: la válvula no cumple con la demanda del escenario de fuego externo al depósito, escenario dominante. Se recomienda sustituir la válvula por una que cumpla con la demanda requerida.

Se debe sustituir la válvula por una con un área de orificio mínima  $A_{or} \geq 480/kdr$ . A continuación, se citan unos modelos de válvula que pueden satisfacer las necesidades:

- Leser 441; DN 32; dor = 29 mm; kdr = 0,7
- Nacional 33-5500; DN 32; dor = 29 mm; kdr = 0,81
- PSV 1001: la válvula no cumple con la demanda de ninguno de los escenarios de sobrepresión debido al fallo de regulación. Se propone instalar orificios de restricción para limitar el caudal, este caudal debe ser evaluado de manera que no afecte a las necesidades de los consumidores en condiciones de proceso. A continuación, se detallan los orificios calculados para cada una de las líneas en las condiciones aseguradas:
  - En la línea de vapor desde caldera  $\varnothing = 24$  mm;  $Q_m = 1033$  kg/h
  - En la línea de vapor de importación  $\varnothing = 8,5$  mm;  $Q_m = 1012$  kg/h

Además, la válvula no cumple con los criterios de estabilidad por lo que se recomienda utilizar una válvula balanceada o aumentar el diámetro de la tubería de descarga.

- PRV 9010: la válvula no cumple con la demanda del escenario dominante, se recomienda sustituir la válvula por una que cumpla con los escenarios. En este caso se podría sustituir por una válvula Protego DZ/T DN 80.



## 9. ANÁLISIS ECONÓMICO

El coste de realización se calcula en base a las horas dedicadas para la realización del mismo, teniendo en cuenta también el número de sesiones de visita a la instalación para verificar datos y discutir la selección de escenarios con los ingenieros de proceso.

El proyecto es realizado por un técnico, en este caso un ingeniero junior, y supervisado o dirigido por un ingeniero senior con amplia experiencia en estudios de este tipo. El cálculo del grueso del coste del proyecto se realiza en función del precio por hora y las horas dedicadas por cada uno de los dos participantes del proyecto. Los costes del trabajo de estas personas son los siguientes:

- Técnico realizador del proyecto – 37 €/h
- Director de proyecto – 75 €/h

Cabe destacar que a esta cuantía también hay que sumar los costes relativos a los trayectos hasta la instalación para las visitas y las dietas correspondientes a estas estadias fuera de la oficina de trabajo. Si los hubiese también se debería imputar lo relacionado con licencias de software utilizado para la realización del proyecto o acreditaciones específicas necesarias para completar el proyecto.

Debido al elevado número de válvulas del proyecto completo, 132 en total, el tiempo de realización del proyecto se estima en unas 350 horas.

En la Tabla 9.1 se muestra el presupuesto total para la realización del proyecto.

**Tabla 9.1. Presupuesto total del estudio de verificación de la aceptabilidad de PRDs**

Concepto	Horas (h)	Coste (€/h)	Total (€)
Técnico de proyecto	350	37	12950
Director de proyecto	10	75	750
Concepto			Total (€)
Visitas, desplazamientos y dietas		200	200
<b>Coste total del proyecto (€)</b>			<b>13900</b>

Debido a la gran cantidad de información y documentación que hay que revisar, los conocimientos técnicos y normativos y la atención que se debe prestar para controlar cada uno de los parámetros en este tipo de proyectos el tiempo de trabajo y, consecuentemente, el coste del proyecto es elevado.

En este precio se incluyen garantías y cálculos adicionales que puedan surgir fruto de modificaciones en la instalación en un tiempo razonable posterior a la realización del proyecto. Este periodo de garantías se justifica para que la instalación disponga de la información de manera actualizada incluso con los cambios que se realicen en la misma debido a las, cada vez más extendidas, filosofías de mejora continua.

## CONCLUSIONES

En cualquier instalación en función de las necesidades del momento y futura se realizan modificaciones que pueden variar las condiciones operativas de la planta, instaurar nuevos procedimientos o incluso realizar nuevos. Dentro del sector químico y petroquímico cada vez es más común llevar a cabo procesos de eliminación de cuellos de botella, más conocidos por su término en inglés *debottlenecking*, en los que se aumenta la capacidad de las instalaciones en base a modificaciones en sus puntos más restrictivos lo que cambia directamente las condiciones de proceso.

Los dispositivos de seguridad que protegen el equipamiento para condiciones determinadas que se han considerado durante su fase de diseño pueden no ser aceptables para las nuevas condiciones de operación lo que supone una fuente de peligro. Por este motivo, y sumado al histórico de deficiencias encontradas en otros estudios, es necesario evaluar los dispositivos de alivio de presión de la planta periódicamente en el marco de las auditorías de seguridad.

En muchos casos la documentación para cada elemento de alivio de presión es extensa y no está unificada, sino que necesita de otros archivos para completarse. En este proyecto se presenta un modelo de ficha que, a diferencia de otras más convencionales, incluye mayoritariamente todos los datos necesarios (identificación del dispositivo, escenarios considerados, datos y condiciones de cálculo, etc.) evitando tener que recurrir a otros documentos para comprobar los resultados.

Este método de gestionar la documentación aúna la información de los equipos, los dispositivos de sobrepresión que se pueden dar y los elementos de seguridad que los salvaguardan. Berwanger comenta que relacionar a través de bases de datos la información del equipamiento y de los elementos de seguridad es una manera más efectiva que los métodos convencionales en los que se tienen ficheros independientes y aislados para cada dispositivo de alivio de presión (Berwanger, 1998).

En este proyecto se lleva a cabo la verificación de la aceptabilidad de los dispositivos de alivio de presión de una instalación industrial, la documentación generada en este estudio es un conjunto de fichas (una para cada dispositivo) en las que se recoge toda la información y todos los parámetros necesarios para evaluar los resultados. La evaluación se realiza en base a métodos de cálculo y criterios de aceptabilidad que se recogen en distintas normas y guías de carácter obligatorio en algunos casos.

En las fichas se incluyen la identificación del dispositivo, las condiciones de funcionamiento, la selección de escenarios considerados con los cálculos relativos a la capacidad requerida y disponible, los cálculos de estabilidad de válvulas de seguridad y los cálculos de fuerzas de reacción y ruido.

En los casos de dispositivos no aceptables se proponen medidas o recomendaciones para garantizar el buen funcionamiento de los mismos.

Para facilitar la selección y dimensionamiento de nuevas válvulas de seguridad se incluye el parámetro A ( $K_{dr}=1$ ), que representa el área ideal de una válvula que descargue el caudal máximo teórico y que puede ser comparada con la de la nueva válvula siguiendo la relación:

$$A_{nueva\ válvula} > \frac{A (K_{dr} = 1)}{K_{dr\ nueva\ válvula}}$$

En base a la realización de este proyecto se han identificado ciertos aspectos sobre los que se profundizará en trabajo futuro. Se citan algunos de ellos a continuación:

- Estudio de los escenarios de reacción química descontrolada y su inclusión dentro del proceso de verificación.
- Estudio del flujo bifásico para su implementación en el proceso de cálculo de capacidades.
- Incorporación de las gráficas de capacidad de los dispositivos de alivio de presión-vacío en las fichas de los elementos de seguridad.

## BIBLIOGRAFÍA

API Standard 2000 (2014) Venting of Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks, 7<sup>th</sup> Edition

API Standard 520 (2008) Sizing, Selection and Installation of Pressure-relieving Devices, Part I-Sizing and Selection, 8<sup>th</sup> Edition

API Standard 520 (2003) Sizing, Selection and Installation of Pressure-relieving Devices, Part II-Installation, 5<sup>th</sup> Edition, Reaffirmed (2011)

API Standard 521 (2008) Pressure-relieving and Depressuring Systems, 5<sup>th</sup> Edition

API Standard 576 (2009) Inspection of Pressure-relieving Devices, API Recommended Practice 576, 3<sup>rd</sup> Edition, November 2009

ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section VIII, Division 1, Rules for Construction of Pressure Vessels, 1998 Edition

Basco J., Vilchez J.A., Casal J. (2015) Safety Life Cycle Analysis Applied to the Engineering of Pressure Relief Valves in Process Plants, Center for Technological Risk Studies (CERTEC), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2015

Basco J., Vilchez J.A., Blanco E., Casal J. (2012) Aplicación del ciclo de vida de seguridad funcional al mantenimiento de válvulas de seguridad, Ingeniería Química, 509 (11), 40-47

Borg A., Jakobsson S. (2014) On the Stability of Pressure Relief Valve, A Numerical Study Using CFD, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 2014

CSB (2013) (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board) Williams Geismar Olefins Plant, Reboiler Rupture and Fire, Geismar, Louisiana, Report No. 2013-03-I-LA

CSB (2009) (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board) T2 Laboratories, Inc., Runaway Reaction, Jacksonville, Florida, Report No. 2008-3-I-FL

CSB (2007) (U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board) BP America Refinery Explosion, Texas City, Texas, Report No. 2005-04-I-TX

Directiva 2014/68/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de mayo de 2014 relativa a la armonización de las legislaciones de los estados miembros sobre la comercialización de equipos a presión

Directiva 97/23/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de mayo de 1997, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre equipos a presión

Emerson (2017), Marston Bursting Discs, VCTDS-01882-EN 17/11

Fike Corporation (2010), Technical Bulletin, November 2010, Form No. TB8100-2

Hos C.J., Champneys A.R., Paul K., McNeely M. (2015) Dynamic behavior of direct spring-loaded pressure relief valves in gas service: model development, measurements and instability mechanisms, University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, University of Bristol, Bristol, UK, Pentair Valves and Controls, Stafford, USA

ISO 23251 (2008) Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Pressure-relieving and depressuring systems, Addendum May 2008, (API 521 Identical)

ISO 28300 (2008) Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Venting of atmospheric and low-pressure storage tanks, 2008 Edition (API 2000 Identical)

ISO 4126-1 (2004) Safety devices for protection against excessive pressure, Part 1: Safety valves

ISO 4126-2 (2003) Safety devices for protection against excessive pressure, Part 2: Bursting disc safety devices

ISO 4126-6 (2003) Safety devices for protection against excessive pressure, Part 6: Application, selection and installation of bursting disc safety devices

ISO 4126-7 (2003) Safety devices for protection against excessive pressure, Part 7: Common data

Izuchi H. (2011) Chatter of Safety Valve, PLE Technology Center, Chiyoda Advanced Solutions Corporations, November 2011

Izuchi H. (2010) Stability Analysis of Safety Valve, AIChE Spring Meeting, April 2010

Kumana Z., Aldeeb, A. (2014) Analysis of Pressure Relief System Deficiencies. Mary Kay O`Connor Process Safety Center, Texas, October 28-30, 2014

Middle K., Wincek J.C., de Kart P., Trujillo A. Algunos errores comunes en el diseño de sistemas de Alivio de presión de emergencia, Focus Article, Dekra

NTP 510 (1999) (Notas Técnicas de Prevención) NTP 510: Válvulas de seguridad: selección

P.C. Berwanger, R.A. Kreder (1998) Pressure Relief System Documentation: Equipment Based Relational Database is Key to OSHA 1910.119 Compliance, Berwanger Incorporated, Houston, Texas 77027

P.C. Berwanger, R.A. Kreder, and W.-S. Lee (2000) Analysis identifies deficiencies in existing pressure relief systems, *Process Saf Prog* 19 (2000), 166–172.

Pentair (2012) Pentair Pressure Relief Valve Engineering Handbook, Anderson Greenwood, Crosby and Varec Products. Technical Publication No. TP-V300

Powers C. (2015) Equations and Example Benchmark Calculations with the aspenONE® Engineering Safety Analysis Environment. V8.8: Two-Phase Orifice Sizing, Vapor Noise and Reaction Forces, Craig Powers, Principal Software Developer, Aspen Technology, Inc.

Protego® Catalogue 2018/19

RD 183/2011, BOE-A-2011-4292, Reglamento de Seguridad para Plantas e Instalaciones Frigoríficas (MI-IF 009)

Rogers Bours, Xavier Used, Diego Lecuona (2013) Uso de discos de ruptura en combinación con válvulas de seguridad. Interempresas | Química

Sallet D.W. and Somers D.W. (1985) Flow Capacity and Response of Safety Relief Valves to Saturated Water Flow, *Plant/Operation Progress*, 4-4, 1985, 207-216

SAMSON (2012), Application Notes, AB 05 EN, Edition March 2012

Trotta T., Kashou C., Faulk N. (2017) Pressure Relief Valve Inspection Interval, Siemens Energy Inc., 4615 Southwest Fwy, Houston, Texas

W.J. Beek, K.M.K. Mutzall (1975) *Transport Phenomena*, Willey, New York (1975)

Wong, W.Y. (2000) Fires, vessels and the pressure relief valve, *Chemical Engineering*, 107 (5), 84-92

Yellow Book (2005) Methods for the calculation of physical effects, (TNO) The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, CPR-14E, 3<sup>rd</sup>



## **ANEXO A. FICHA MODELO PRD**

**SAFETY DEVICE DATASHEET**  
**PRD - TAG**

Date: 5-Jun-2019

Revision: 0.0

**General Properties**

TAG		P&ID	
Equipment		Facility/Area	
Equipment type		Situation	
Type		Blow-off location	
Brand name		Model	
No scenarios		Rupture disc	
Out of service		Not belong to the property	
To be installed in the future		ACCEPTABLE	

**Service Conditions**

Substance		Physical State	
-----------	--	----------------	--

**Safety Valve Data / Rupture Disc Data / Pressure/Vacuum Relief Valve Data**

Set pressure (barg)		Overpressure (%)	
Cold differential test pressure (barg)		Superimposed back pressure (barg)	
Built-up back pressure (barg)		Total backpressure (barg)	
Orifice diameter (mm)		Orifice area (mm <sup>2</sup> )	
Kdr (gas)		Kdr (liquid)	
Diameter input		Diameter output	
Pressure rating input		Pressure rating output	

Comments

Action Plan

**Scenarios**

Scenario ID	Type	Description
Explanation		
Comments		
Substance		Physical state
Temp. relieving (°C)		Qm required (kg/h)
Governing case		Qm available (kg/h)
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)		Acceptable
Required capacity calculation ↓		Discharge capacity calculation ↓

**Stability**

Calculation type		Description	
Substance		Physical state	
Temp. relieving (°C)		Qm available (kg/h)	
Pressure drop - ΔP (bar)		15% / 3% Pset (bar)	
Pressure drop calculation ↓			

**Performance**

Calculation Type	REACTION FORCES	Description	
Comments			
Substance		k	
Temp. relieving (°C)		Qm available (kg/h)	
Pressure discharge (barg)		ΔP (bar)	
F (N)			

Calculation Type	NOISE	Description	
Comments			
Substance		k	
Temp. relieving (°C)		Qm available (kg/h)	
c (m/s)		L (dB)	
L <sub>10</sub> (dB)			

SAFETY DEVICE DATASHEET  
PRD - TAG

Date: 5-Jun-2019

Revision: 0.0

General Properties			
TAG		P&ID	
Equipment		Facility/Area	
Equipment type		Situation	
Type		Blow-off location	
Brand name		Model	
No scenarios		Rupture disc	
Out of service		Not belong to the property	
To be installed in the future		ACCEPTABLE	

IDENTIFICACIÓN DEL DISPOSITIVO, MARCA, MODELO, EQUIPO PROTEGIDO Y SUSTANCIAS INVOLUCRADAS, LOCALIZACIÓN DE LA DESCARGA Y ACEPTABILIDAD

Service Conditions	
Substance	Physical State

Safety Valve Data / Rupture Disc Data / Pressure/Vacuum Relief Valve Data			
Set pressure (barg)		Overpressure (%)	
Cold differential test pressure (barg)		Superimposed back pressure (barg)	
Built-up back pressure (barg)		Total backpressure (barg)	
Orifice diameter (mm)		Orifice area (mm <sup>2</sup> )	
Kdr (gas)		Kdr (liquid)	
Diameter input		Diameter output	
Pressure rating input		Pressure rating output	

TIPO DE DISPOSITIVO Y CONDICIONES DE DISPARO, PRESIÓN DE TARADO, TIPO DE ALIVIO, DIMENSIONES, COEFICIENTE DE DESCARGA, ETC.

Comments

Action Plan

Scenarios			
Scenario ID	Type	Description	
Explanation			
Comments			
Substance		Physical state	
Temp. relieving (°C)		Qm required (kg/h)	
Governing case		Qm available (kg/h)	
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)		Acceptable	
Required capacity calculation ↓		Discharge capacity calculation ↓	

ESCENARIOS CONSIDERADOS, TIPOS, SUSTANCIAS, CONDICIONES DE CÁLCULO, CAPACIDAD Y ÁREA REQUERIDA Y DISPONIBLE

Stability			
Calculation type		Description	
Substance		Physical state	
Temp. relieving (°C)		Qm available (kg/h)	
Pressure drop - ΔP (bar)		10% / 3% Pset (bar)	
Pressure drop calculation ↓			

CÁLCULOS DE ESTABILIDAD DE VÁLVULAS, CONDICIONES DE CÁLCULO Y CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD

Performance			
Calculation Type	REACTION FORCES	Description	
Comments			
Substance		k	
Temp. relieving (°C)		Qm available (kg/h)	
Pressure discharge (barg)		ΔP (bar)	
F (N)			
Calculation Type	NOISE	Description	
Comments			
Substance		k	
Temp. relieving (°C)		Qm available (kg/h)	
c (m/s)		L (dB)	
L <sub>10</sub> (100) (dB)			

CÁLCULOS DE FUERZAS DE REACCIÓN Y RUIDO DE VÁLVULA Y CONDICIONES DE CÁLCULO



## **ANEXO B. FICHAS DE PRDs CASOS DE ESTUDIO**

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 01

Revision: 1.0

General Properties				
TAG	PSV 01	P&ID	D10-01 /Hoja 001	
Equipment	B01	Facility/Area	D-10	
Equipment type	STORAGE TANK	Situation	Depósito de almacenamiento B01	
Type	Conventional	Blow-off location	Atm.	
Brand name	Bopp & Reuther	Model	SI 6302	
No scenarios		NO	Rupture disc	NO
Out of service		NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future		NO	ACCEPTABLE	YES

Service Conditions			
Substance	Methanol	Physical State	Gas

Safety Valve Data				
Set pressure (barg)		3,0	Overpressure (%)	10
Cold differential test pressure (barg)		-	Superimposed back pressure (barg)	0
Built-up back pressure (bar)		0,160	Total backpressure (barg)	0,160
Orifice diameter (mm)		63	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	3117,2
Kdr (gas)		0,78	Kdr (liquid)	-

Dimensions				
Diameter input		DN 80	Diameter output	DN 150
Pressure rating input		PN 40	Pressure rating output	PN 10

Comments	- No se considera escenario de sobrellenado ya que el depósito B 01 está protegido por una función instrumentada (Pbomba < Pset)		
Action Plan			

### Scenarios

Scenario ID	114	Type	FIRE	Description	Sobrepresión por fuego externo.
-------------	-----	------	------	-------------	---------------------------------

Explanation	Sobrepresión por fuego externo al depósito				
-------------	--	--	--	--	--

Comments	Se considera la vaporización del metanol de la mezcla				
----------	---	--	--	--	--

Substance	Methanol	Physical state	Gas
-----------	----------	----------------	-----

Temp. relieving (°C)	106	Qm required (kg/h)	5502
----------------------	-----	--------------------	------

Governing case	Yes	Qm available (kg/h)	7558
----------------	-----	---------------------	------

Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	1769,8	Acceptable	Yes
--	--------	------------	-----

Required capacity calculation ↓	Discharge capacity calculation ↓
---------------------------------	----------------------------------

Calculation Method	ISO 23251:2006	Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006
Vessel Type	Cylindrical Vertical (flat ends)	Qr: Required flow (kg/h)	5502
Diameter (m)	3,7	Po: Relieving pressure (bara)	4,313
Length (m)	5,7	Pb: Back pressure (bara)	1,013
Elevation (m)	0,5	Overpressure	10%
Filling degree (%)	100	MW: Molecular Weight (kg/kmol)	32
Effective liquid height (m)	5,7	Z: Compressibility (-)	1,000
Environmental factor type	Bare	k: Isentropic exponent (-)	1,1
F: Environmental factor (-)	1	T: Temperature (°C)	106
Δh <sub>vap</sub> : Latent Heat (kJ/kg)	996	Kdr: Discharge coefficient (-)	0,78
C1: C Factor constant (-)	43200	Pc: Critical Pressure (bara)	2,52
N1: Area exponent (-)	0,82	Subcritical flow	No
Exposed Area (m <sup>2</sup> )	77,0	A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	2269,0
Heat input (kW)	1522,1	Qm: Discharge Capacity (kg/h)	7558
Qr: Required flow (kg/h)	5502		

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 01

Revision: 1.0

## Stability

Calculation type	BACKPRESSURE		Description	Contrapresión en la descarga de la válvula		
Substance	Methanol		Physical state	Gas		
Temp. relieving (°C)	106		Qm actual available (kg/h)	8398		
Pressure drop - ΔP (bar)	0,160		10% Pset (bar)	0,3		
Pressure drop calculation ↓			Acceptable	Yes		
Model	Gas adiabatic flow in pipe					
Reference	Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, 1984					
Description	Estabilidad - Backpressure PSV 01					
Fluid	Methanol					
P0: Upstream stagnation pressure (Bara)	1,173					
P3: Downstream stagnation pressure (Bara)	1,013					
Δp: Pressure drop (Bar)	0,160					
T0: Upstream stagnation temperature (°C)	106					
D: Pipe Ø (mm)	159,3					
L: Pipe length (m)	6					
e: Pipe Roughness (mm)	0,0450					
K: Resistance coefficient additional (-)	0,000					
K: Resistance coefficient fittings (-)	1,450					
ΣK: Total Resistance coefficient (-)	1,450					
μ: Dynamic Viscosity (Cp)	0,55					
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	32					
Tc: Critical Temperature (°C)	240,0					
Pc: Critical Pressure (bara)	81,0					
k: Specific heat ratio (-)	1,26					
ρ0: Upstream stagnation density (kg/m³)	1,207					
W: Mass flow (kg/h)	8405,3					
Re: Reynolds (-)	33930					
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	5887,4					
f: Friction coefficient (-)	0,0236					
v1: Upstream pipe Velocity (m/s)	101,250					
v2: Downstream pipe Velocity (m/s)	119,381					
N: Pipe Resistance (-)	2,340					
Chocked flow	No					
A: Pipe Area (mm²)	19931					
Fitting type	Quantity	Ø Pipeline	Ø Fitting	K	β	K Total
Standard Bend (150 mm - 6")	1	159,3	159,3	0,450	1,000	0,450
Exit to Atmosphere	1	159,3	159,3	1,000	1,000	1,000
ΣK						1,450

## Performance

Calculation Type	REACTION FORCES		Description		
Comments					
Substance	Methanol		k	1,1	
Temp. relieving (°C)	106		Qm available (kg/h)	8398	
Pressure discharge (bara)	4,3		Pchoked (bara)	0,003	
F (N)	749,5		A (mm²)	19931	
Calculation Type	NOISE		Description		
Comments					
Substance	Methanol		k	1,1	
Temp. relieving (°C)	106		Qm available (kg/h)	8398	
c (m/s)	329,2		L (dB)	55	
L <sub>30 (100)</sub> (dB)	106				

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PVRV 01

Revision: 1.0

## General Properties

TAG	PVRV 01	P&ID	D10-01 /Hoja 001	
Equipment	B01	Facility/Area	D-10	
Equipment type	STORAGE TANK	Situation	Depósito de almacenamiento B01	
Type	Pressure Vacuum Release Valve	Blow-off location	Atm.	
Brand name	Protego	Model	VD/HK	
No scenarios		NO	Rupture disc	NO
Out of service		NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future		NO	ACCEPTABLE	YES

## Service Conditions

Substance	Methanol vapors (N2 blanketing)	Physical State	Gas
-----------	---------------------------------	----------------	-----

## Pressure/Vacuum Relief Valve Data

Device type			
Relieving pressure (mbar)	200	Vacuum pressure (mbar)	-20
Overpressure (bar)	0,1	Total backpressure (barg)	0
Orifice diameter (mm)	50	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	1963,5
Kdr (gas)	-	Kdr (liquid)	-

## Dimensions

Diameter input	DN 50	Diameter output	DN 50
Pressure rating input	PN 10	Pressure rating output	PN 10

## Comments

Comments	
----------	--

## Action Plan

Action Plan	
-------------	--

SAFETY VALVE DATASHEET  
PVRV 01

Date: 2-Oct-2019

Revision: 1.0

Scenarios					
Scenario ID	115	Type	VALVEOPENING	Description	Sobrepresión por comunicación de equipos debido a apertura de válvula.
Explanation	Llegada de nitrógeno por fallo de reguladora PCV 1001				
Comments	Calculado como el caudal a través del orificio de la válvula (8 mm)				
Substance	Nitrogen		Physical state	Gas	
Temp. relieving (°C)	25		Qm required (kg/h)	180	
Governing case	N.A.		Qm available (kg/h)	903	
Required area (mm²) (for Kdr=1)	-		Acceptable	Yes	
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Model	Gas release through orifice		Q (Nm³/h)	700	
Reference	Methods for the calculation of physical effects, 'Yellow Book', (TNO) The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 2005		ρ (kg/m³)	1,29	
Description	Nitrógeno a través del orificio de la reguladora PCV0101; Ø = 8 mm		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	903	
Fluid	Nitrogen				
P vessel (bara)	4,313				
P output (Bara)	1,000				
Δp: Pressure drop (Bar)	3,313				
T: Temperature (°C)	25				
d: Orifice diameter (mm)	8				
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	28,013				
Tc: Critical Temperature (°C)	-146,9				
Pc: Critical Pressure (bara)	34,0				
Z: Compressibility (-)	1,000				
κ: Specific heat ratio (-)	1,4				
ρ: Density (kg/m³)	4,88				
Cd: Discharge coefficient (-)	1,00				
W: Mass flow (kg/h)	179,67				
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	143,76				
Chocked flow	Yes				
v: Orifice Velocity (m/s)	203,66				
A: Orifice Area (mm²)	50,3				
Pfc: Flow Critical Pressure (Bara)	2,3				
Comments	Ø orificio = 8 mm				
Scenario ID	116	Type	INBREATHING	Description	Depresión por vaciado y respiración térmica
Explanation	Depresión por respiración térmica y trasiego con bomba				
Comments	Calculado a partir del caudal de bomba de descarga P01				
Substance	Air		Physical state	Gas	
Temp. relieving (°C)	25		Qm required (kg/h)	137,6	
Governing case	N.A.		Qm available (kg/h)	187	
Required area (mm²) (for Kdr=1)	-		Acceptable	Yes	
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Model	ISO 28300:2008		Q (Nm³/h)	145	
Vapor pressure range	> than hexane or unknown		ρ (kg/m³)	1,29	
Process temp. range (°C)	≥ 25		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	187	
Location range	bellow 42º				
Insulation type	uninsulated				
C factor	6,5				
Ri (reduction factor)	1				
Qdischarge (m³/h)	6				
Vessel volume (m³)	50				
Thermal inbreathing (Nm³/h of air)	100,51				
Total inbreathing flow (Nm³/h of air)	106,51				
W: Mass flow (kg/h)	137,6				
Scenario ID	117	Type	OUTBREATHING	Description	Sobrepresión por llenado y respiración térmica
Explanation	Sobrepresión por respiración térmica y trasiego con bomba				
Comments	Calculado a partir de caudal de bomba P02				
Substance	Air		Physical state	Gas	
Temp. relieving (°C)	25		Qm required (kg/h)	59,2	
Governing case	N.A.		Qm available (kg/h)	903	
Required area (mm²) (for Kdr=1)	-		Acceptable	Yes	
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Model	ISO 28300:2008		Q (Nm³/h)	700	
Vapor pressure range	> than hexane or unknown		ρ (kg/m³)	1,29	
Process temp. range (°C)	≥ 25		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	903	
Location range	bellow 42º				
Insulation type	uninsulated				
Y factor	0,32				
Ri (reduction factor)	1				
Qfilling (m³/h)	30				
ρ gas (kg/m³)	1,44				
Outbreathing air flow (Nm³/h of air)	35				
Vessel volume (m³)	50				
Thermal outbreathing (Nm³/h of air)	10,82				
Total outbreathing flow (Nm³/h of air)	45,82				
W: Mass flow (kg/h)	59,2				

SAFETY VALVE DATASHEET  
RD 1010

Date: 2-Oct-2019

Revision: 1.0

General Properties			
TAG	RD 1010	P&ID	D10-05 /Hoja 009
Equipment	B1010	Facility/Area	D-10
Equipment type	STORAGE TANK	Situation	Depósito B1010
Type	Rupture Disc	Blow-off location	Atm.
Brand name	Marston	Model	Grafito
No scenarios	NO	Rupture disc	YES
Out of service	NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future	NO	ACCEPTABLE	NO

Service Conditions			
Substance	Disolvente	Physical State	Gas

Rupture Disk Data			
Type	Graphite		
Maximum bursting Pressure (barg)	0,08	Operating ratio (%)	-
Minimum bursting Pressure (barg)	-0,08	Manufacture range (%)	-
Coincident temperature (°C)	-	Vacuum pressure (mbar)	-80
Set pressure (barg)	0,08	Full vacuum resistant	NO
Non-fragmenting	NO	Liquid service	-
Gas service	YES	Orifice diameter (mm)	200
Burst indicator	YES	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	31415,9
[K <sub>g</sub> ] Resistance coefficient gas	2,4	Vacuum area (mm <sup>2</sup> )	-
[K <sub>l</sub> ] Resistance coefficient liquid	-	[K <sub>drg</sub> ] Discharge coefficient gas	-
[K <sub>gl</sub> ] Resistance coefficient gas/liquid	2,4	[K <sub>dnl</sub> ] Discharge coefficient liquid	-

Dimensions			
Diameter input	DN 200	Diameter output	DN 200
Pressure rating input	-	Pressure rating output	-

Comments	- No se considera escenario de sobrellenado por estar protegido por una función instrumentada
	- No se considera escenario de sobrepresión por llenado y respiración térmica (exhalación) por tratarse de un depósito atmosférico, con un venteo libre con apagallamas. El venteo tiene capacidad suficiente para hacer frente al escenario de respiración térmica y trasiego de líquido
Action Plan	- Se recomienda realizar una modificación en el sistema de venteo de emergencia, bien con la instalación de dos discos de ruptura en paralelo para cubrir de manera conjunta la demanda del escenario o con la ampliación del venteo a un diámetro superior

**Scenarios**

Scenario ID	Type	Description
206	FIRE	Sobrepresión por fuego externo.

Explanation	
Comments	- Se considera la vaporización del volátil en mayor concentración en la mezcla.

Substance	Toluene	Physical state	Gas
-----------	---------	----------------	-----

Temp. relieving (°C)	111	Qm required (kg/h)	18619
----------------------	-----	--------------------	-------

Governing case	N.A.	Qm available (kg/h)	11325
----------------	------	---------------------	-------

Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	-	Acceptable	No
--	---	------------	----

Required capacity calculation ↓	Discharge capacity calculation ↓
---------------------------------	----------------------------------

Calculation Method	API STD. 2000/ISO 28300:2008 (atmospheric storage tanks)	Model	Gas adiabatic flow in pipe
Vessel Type	Cylindrical Vertical (flat ends)	Reference	Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, 1984
Diameter (m)	2,6	Fluid	Toluene
Length (m)	6	P0: Upstream stagnation pressure (Bara)	1,101
Elevation (m)	0,2	P3: Downstream stagnation pressure (Bara)	1,013
Filling degree (%)	75	Δp: Pressure drop (Bar)	0,088
Effective liquid height (m)	4,5	T0: Upstream stagnation temperature (°C)	111
Environmental factor type	Bare	D: Pipe Ø (mm)	207,3
F: Environmental factor (-)	1	L: Pipe length (m)	6
Δh <sub>vap</sub> : Latent Heat (kJ/kg)	363	e: Pipe Roughness (mm)	0,0450
C1: C Factor constant (-)	224200	K: Resistance coefficient additional (-)	0,000
N1: Area exponent (-)	0,566	K: Resistance coefficient fittings (-)	4,340
Exposed Area (m <sup>2</sup> )	42,72	ΣK: Total Resistance coefficient (-)	4,340
Heat input (kW)	1877	μ: Dynamic Viscosity (Cp)	0,61
Q <sub>r</sub> : Required flow (kg/h)	18619	MW: Molecular Weight (kg/kmol)	92,14
Q <sub>m</sub> : Required air flow (Nm <sup>3</sup> /h)	9574	Tc: Critical Temperature (°C)	318,6
		Pc: Critical Pressure (bara)	41,8
		k: Specific heat ratio (-)	1,04
		ρ0: Upstream stagnation density (kg/m <sup>3</sup> )	3,30
		Re: Reynolds (-)	3,519E04
		f: Friction coefficient (-)	0,0233
		v1: Upstream pipe Velocity (m/s)	31,86
		v2: Downstream pipe Velocity (m/s)	34,83
		N: Pipe Resistance (-)	5,013
		Chocked flow	No
		A: Pipe Area (mm <sup>2</sup> )	33751
		qN: Normal Volumetric flow (Nm <sup>3</sup> /h)	3061,1
		W: Mass flow (kg/h)	12583,46

Fitting type	Quantity	Ø Pipeline	Ø Fitting	K	β	K Total
Entry Sharp	1	207,3	207,3	0,500	1,000	0,500
Exit to Atmosphere	1	207,3	207,3	1,000	1,000	1,000
Elbow 45 deg. (200 mm - 8")	2	207,3	207,3	0,220	1,000	0,440
Rupture Disk Generic	1	207,3	207,3	2,400	1,000	2,400
<b>ΣK</b>						<b>4,340</b>

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 301

Revision: 1.0

General Properties				
TAG	PSV 301	P&ID	D15-02 /Hoja 019	
Equipment	K301	Facility/Area	D-15	
Equipment type	COLUMN	Situation	Columna K301	
Type	Conventional	Blow-off location	B1509	
Brand name	Leser	Model	4414.4674	
No scenarios		NO	Rupture disc	NO
Out of service		NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future		NO	ACCEPTABLE	NO
Service Conditions				
Substance	Toluene	Physical State	Gas	
Safety Valve Data				
Set pressure (barg)	6,0	Overpressure (%)	10	
Cold differential test pressure (barg)	-	Superimposed back pressure (barg)	0,030	
Built-up back pressure (bar)	2,407	Total backpressure (barg)	2,437	
Orifice diameter (mm)	46	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	1661,9	
Kdr (gas)	0,7	Kdr (liquid)	-	
Dimensions				
Diameter input	DN 50	Diameter output	DN 80	
Pressure rating input	PN 40	Pressure rating output	PN 16	
Comments	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se considera vapor seco y saturado</li> <li>- No se considera escenario de sobrellenado ya que la presión de la bomba de alimentación no presuriza el equipo por encima de la presión de tarado de la válvula (<math>P_{300} + \Delta H &lt; P_{set}</math>)</li> </ul>			
Action Plan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se recomienda utilizar una válvula balanceada por fuelle o modificar la geometría de la tubería de descarga de la válvula de seguridad ya que esta no cumple con el criterio de estabilidad.</li> </ul>			

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 301

Revision: 1.0

Scenarios					
Scenario ID	149	Type	MAXHEATING	Description	Sobrepresión debida a calentamiento por carga máxima de calor
Explanation					
Comments	- Se considera la vaporización del tolueno - Datos de evaporador obtenidos de ficha técnica de equipo				
Substance	Toluene		Physical state	Gas	
Temp. relieving (°C)	200		Qm required (kg/h)	3539	
Governing case	No		Qm available (kg/h)	10207	
Required area (mm²) (for Kdr=1)	403,3		Acceptable	Yes	
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Área evap (m²)	48	Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006		
T tubos. (°C)	215	Qr: Required flow (kg/h)	3539		
T gas (°C)	200	Po: Relieving pressure (bara)	7,613		
U (kW/m².K)	0,4	Pb: Back pressure (bara)	1,013		
Q (kW)	288	Overpressure	10%		
λ vap (kJ/kg)	293	MW: Molecular Weight (kg/kmol)	92,14		
Qm (kg/h)	3539	Z: Compressibility (-)	0,866		
		k: Isentropic exponent (-)	1,04		
		T: Temperature (°C)	200		
		Kdr: Discharge coefficient (-)	0,70		
		Pc: Critical Pressure (bara)	4,55		
		Subcritical flow	No		
		A: Required Area (mm²)	576,2		
		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	10207		
Scenario ID	200	Type	TUBERUPTURE	Description	Sobrepresión por rotura de tubos de intercambiador de calor
Explanation	Llegada de vapor por rotura de tubos del evaporador W301				
Comments	- Calculado a partir de orificio de 5 mm				
Substance	Steam		Physical state	Steam	
Temp. relieving (°C)	168		Qm required (kg/h)	198	
Governing case	No		Qm available (kg/h)	4627	
Required area (mm²) (for Kdr=1)	49,8		Acceptable	Yes	
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Model	Gas release through orifice		Model	Steam, ISO 4126-1:2006	
Reference	Methods for the calculation of physical effects, 'Yellow Book', (TNO) The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 2005		Qr: Required flow (kg/h)	198	
Description	Vapor por rotura de tubos en K301		Po: Relieving pressure (bara)	7,613	
Fluid	Steam	Overpressure	10%		
P vessel (bara)	19,000	k: Isentropic exponent (-)	1,142		
P output (Bar)	7,600	x: Dryness fraction (-)	1,00		
Δp: Pressure drop (Bar)	11,400	v: Specific volume (Kg/m³)	0,253		
T: Temperature (°C)	215	A: Required Area (mm²)	71		
d: Orifice diameter (mm)	5	Qm: Discharge Capacity (kg/h)	4627		
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	18				
Tc: Critical Temperature (°C)	373,0				
Pc: Critical Pressure (bara)	220,0				
Z: Compressibility (-)	0,924				
k: Specific heat ratio (-)	1,33				
ρ: Density (kg/m³)	9,12				
Cd: Discharge coefficient (-)	1,00				
W: Mass flow (kg/h)	197,96				
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	246,50				
Chocked flow	Yes				
v: Orifice Velocity (m/s)	306,94				
A: Orifice Area (mm²)	19,6				
Pfc: Flow Critical Pressure (Bar)	10,3				
Comments	∅ Tub. = 5 mm P = 18 bar				
Scenario ID	207	Type	COOLLINGFAILURE	Description	Sobrepresión por fallo de refrigeración y/o falta de reflujo.
Explanation					
Comments	- Se considera agua de refrigeración a 28 °C de acuerdo a PID - Datos del condensador obtenidos de ficha técnica de equipo				
Substance	Toluene		Physical state	Gas	
Temp. relieving (°C)	200		Qm required (kg/h)	9510	
Governing case	Yes		Qm available (kg/h)	10207	
Required area (mm²) (for Kdr=1)	1083,9		Acceptable	Yes	
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Área cond (m²)	15	Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006		
U cond (kW/m².K)	0,3	Qr: Required flow (kg/h)	9510		
T agua (°C)	28	Po: Relieving pressure (bara)	7,613		
T gas (°C)	200	Pb: Back pressure (bara)	1,013		
Q cond (kW)	774	Overpressure	10%		
λ vap (kJ/kg)	293	MW: Molecular Weight (kg/kmol)	92,14		
Qm (kg/h)	9510	Z: Compressibility (-)	0,866		
		k: Isentropic exponent (-)	1,04		
		T: Temperature (°C)	200		
		Kdr: Discharge coefficient (-)	0,70		
		Pc: Critical Pressure (bara)	4,55		
		Subcritical flow	No		
		A: Required Area (mm²)	1548,4		
		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	10207		

SAFETY VALVE DATASHEET  
PSV 301

Date: 2-Oct-2019

Revision: 1.0

**Stability**

Calculation type	BACKPRESSURE		Description	Contrapresión en la tubería de descarga		
Substance	Toluene		Physical state	Gas		
Temp. relieving (°C)	200		Qm available (kg/h)	11341		
Pressure drop - ΔP (bar)	2,407		10% Pset (bar)	0,6		
Pressure drop calculation ↓			Acceptable	No		
Model	Gas adiabatic flow in pipe					
Reference	Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, 1984					
Description	Estabilidad - Backpressure PSV 301					
Fluid	Toluene					
P0: Upstream stagnation pressure (Bara)	3,450					
P3: Downstream stagnation pressure (Bara)	1,043					
Δp: Pressure drop (Bar)	2,407					
T0: Upstream stagnation temperature (°C)	200					
D: Pipe Ø (mm)	82,5					
L: Pipe length (m)	9					
e: Pipe Roughness (mm)	0,0450					
K: Resistance coefficient additional (-)	0,000					
K: Resistance coefficient fittings (-)	2,200					
ΣK: Total Resistance coefficient (-)	2,200					
μ: Dynamic Viscosity (Cp)	0,61					
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	92,14					
Tc: Critical Temperature (°C)	318,6					
Pc: Critical Pressure (bara)	41,8					
k: Specific heat ratio (-)	1,04					
ρ0: Upstream stagnation density (kg/m³)	8,604					
W: Mass flow (kg/h)	11347,0					
Re: Reynolds (-)	79745					
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	2760,3					
f: Friction coefficient (-)	0,0211					
v1: Upstream pipe Velocity (m/s)	73,36					
v2: Downstream pipe Velocity (m/s)	210,26					
N: Pipe Resistance (-)	4,51					
Chocked flow	Yes					
A: Pipe Area (mm²)	5346					
Fitting type	Quantity	Ø Pipeline	Ø Fitting	K	β	K Total
Long Bend (80 mm - 3")	3	82,5	82,5	0,280	1,000	0,840
Exit to Container	1	82,5	82,5	1,000	1,000	1,000
Through Tee (80 mm - 3")	1	82,5	82,5	0,360	1,000	0,360
ΣK						2,200

Calculation type	INLET PRESSURE LOSS		Description	Pérdida de carga en la entrada de la válvula		
Substance	Toluene		Physical state	Gas		
Temp. relieving (°C)	200		Qm available (kg/h)	11341		
Pressure drop - ΔP (bar)	0,281		3% Pset (bar)	0,210		
Pressure drop calculation ↓			Acceptable	No		
Model	Gas isothermal flow in pipe					
Reference	Flow of Fluids Through Valves, Fittings & Pipe TP-410 Metric, Crane Valve, 1989					
Description	Estabilidad - Inlet pressure loss PSV 301					
Fluid	Toluene					
P0: Upstream pressure (Bara)	7,881					
P3: Downstream pressure (Bara)	7,600					
Δp: Pressure drop (Bar)	0,281					
T: Temperature (°C)	200					
D: Pipe Ø (mm)	54,5					
L: Pipe length (m)	0,5					
e: Pipe Roughness (mm)	0,0450					
K: Resistance coefficient additional (-)	0,000					
K: Resistance coefficient fittings (-)	0,380					
ΣK: Total Resistance coefficient (-)	0,380					
μ: Dynamic Viscosity (Cp)	0,61					
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	92,14					
Tc: Critical Temperature (°C)	318,6					
Pc: Critical Pressure (bara)	41,8					
Z: Compressibility (-)						
k: Specific heat ratio (-)	1,04					
W: Mass flow (kg/h)	11342,96					
Re: Reynolds (-)	1,207E05					
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	2759,29					
f: Friction coefficient (-)	0,0212					
v1: Upstream pipe Velocity (m/s)	63,00					
v2: Downstream pipe Velocity (m/s)	65,71					
A: Pipe Area (mm²)	2333					
N: Pipe Resistance (-)	0,574					
Fitting type	Quantity	Ø Pipeline	Ø Fitting	K	β	K Total
Through Tee (50 mm - 2")	1	54,5	54,5	0,380	1,000	0,380
ΣK						0,380

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 800

Revision: 1.0

General Properties			
TAG	PSV 800	P&ID	D15-07 /Hoja 023
Equipment	R800	Facility/Area	D-15
Equipment type	TANK MIXER	Situation	Depósito agitador R800
Type	Conventional	Blow-off location	B1009
Brand name	Leser	Model	4414.4642
No scenarios	NO	Rupture disc	NO
Out of service	NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future	NO	ACCEPTABLE	NO

Service Conditions			
Substance	Mezcla de reacción	Physical State	Gas

Safety Valve Data			
Set pressure (barg)	5,5	Overpressure (%)	10
Cold differential test pressure (barg)	-	Superimposed back pressure (barg)	0,050
Built-up back pressure (barg)	1,777	Total backpressure (barg)	1,827
Orifice diameter (mm)	46	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	1661,9
Kdr (gas)	0,7	Kdr (liquid)	0,45

Dimensions			
Diameter input	DN 50	Diameter output	DN 80
Pressure rating input	PN 40	Pressure rating output	PN 16

Comments	- Se considera la vaporización de tetrahidrofurano, componente mayoritario en la mezcla de reacción - No se considera escenario por sobrellenado con agua desmineralizada. Pbomba < 5 bar - No se considera escenario por sobrellenado con THF. PN2 < 4 bar
----------	---

Action Plan	- Se recomienda utilizar una válvula balanceada por fuelle o modificar la geometría de la tubería de descarga de la válvula de seguridad ya que esta no cumple con el criterio de estabilidad.
-------------	--

### Scenarios

Scenario ID	41	Type	FIRE	Description	Sobrepresión por fuego externo.
-------------	----	------	------	-------------	---------------------------------

Explanation	Sobrepresión por fuego externo al depósito				
-------------	--	--	--	--	--

Comments	- Se considera la vaporización del tetrahidrofurano				
----------	---	--	--	--	--

Substance	Tetrahydrofuran			Physical state	Gas
-----------	-----------------	--	--	----------------	-----

Temp. relieving (°C)	141	Qm required (kg/h)	7457
----------------------	-----	--------------------	------

Governing case	Yes	Qm available (kg/h)	9673
----------------	-----	---------------------	------

Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	896,8	Acceptable	Yes
--	-------	------------	-----

Required capacity calculation ↓		Discharge capacity calculation ↓	
---------------------------------	--	----------------------------------	--

Calculation Method	ISO 23251:2006	Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006
Vessel Type	Cylindrical Vertical (flat ends)	Qr: Required flow (kg/h)	7457
Diameter (m)	2,4	Po: Relieving pressure (bara)	7,063
Length (m)	3,75	Pb: Back pressure (bara)	1,013
Elevation (m)	0,5	Overpressure	10%
Filling degree (%)	95	MW: Molecular Weight (kg/kmol)	72
Effective liquid height (m)	3,5625	Z: Compressibility (-)	0,880
Environmental factor type	Bare	k: Isentropic exponent (-)	1,32
F: Environmental factor (-)	1	T: Temperature (°C)	141
Δh <sub>vap</sub> : Latent Heat (kJ/kg)	352	Kdr: Discharge coefficient (-)	0,70
C1: C Factor constant (-)	43200	Pc: Critical Pressure (bara)	3,83
N1: Area exponent (-)	0,82	Subcritical flow	No
Exposed Area (m <sup>2</sup> )	31,4	A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	1281,1
Heat input (kW)	729,1	Qm: Discharge Capacity (kg/h)	9673
Qr: Required flow (kg/h)	7457		

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 800

Revision: 1.0

## Stability

Calculation type	BACKPRESSURE		Description	Contrapresión en la tubería de descarga		
Substance	Tetrahydrofuran		Physical state	Gas		
Temp. relieving (°C)	141		Qm available (kg/h)	10747		
Pressure drop - ΔP (bar)	1,777		10% Pset (bar)	0,55		
Pressure drop calculation ↓			Acceptable	No		
Model	Gas adiabatic flow in pipe					
Reference	Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, 1984					
Description	Estabilidad - Backpressure PSV 800					
Fluid	Tetrahydrofuran					
P0: Upstream stagnation pressure (Bara)	2,840					
P3: Downstream stagnation pressure (Bara)	1,063					
Δp: Pressure drop (Bar)	1,777					
T0: Upstream stagnation temperature (°C)	141					
D: Pipe Ø (mm)	82,5					
L: Pipe length (m)	0,264					
e: Pipe Roughness (mm)	0,0450					
K: Resistance coefficient additional (-)	0,000					
K: Resistance coefficient fittings (-)	2,390					
ΣK: Total Resistance coefficient (-)	2,390					
μ: Dynamic Viscosity (Cp)	0,012					
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	72					
Tc: Critical Temperature (°C)	267,0					
Pc: Critical Pressure (bara)	52,0					
k: Specific heat ratio (-)	1,32					
ρ0: Upstream stagnation density (kg/m³)	6,225					
W: Mass flow (kg/h)	10758,3					
Re: Reynolds (-)	3,843E06					
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	3349,1					
f: Friction coefficient (-)	0,0172					
v1: Upstream pipe Velocity (m/s)	97,35					
v2: Downstream pipe Velocity (m/s)	232,72					
N: Pipe Resistance (-)	2,44					
Chocked flow	Yes					
A: Pipe Area (mm²)	5346					
Fitting type	Quantity	Ø	Ø	K	β	K
		Pipeline	Fitting			Total
Long Bend r/d=1,5, r/d=4 (100 mm - 4")	3	82,5	107,1	0,243	0,770	0,257
Elbow 45 deg. (100 mm - 4")	1	82,5	107,1	0,270	0,770	0,095
Branch Tee (100 mm - 4")	2	82,5	107,1	1,020	0,770	0,718
Exit to Container	1	82,5	107,1	1,000	0,770	0,352
Contraction (α=10°) d1/d2=0,77	1	82,5	107,1	0,028	0,770	0,010
Enlargement (α=10°) d1/d2=0,77	1	82,5	107,1	0,038	0,770	0,013
Pipe Segment (DIN) DN 100 - 4" (PN 10)	17,8	82,5	107,1	0,151	0,770	0,944
ΣK						2,390

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 900

Revision: 1.0

## General Properties

TAG	PSV 900	P&ID	D15-09 /Hoja 029
Equipment	R900	Facility/Area	D-15
Equipment type	TANK MIXER	Situation	Reactor R900
Type	Conventional	Blow-off location	K970
Brand name	Richter Chemie-Technik GmbH	Model	KSE/F
No scenarios	NO	Rupture disc	NO
Out of service	NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future	NO	ACCEPTABLE	NO

## Service Conditions

Substance	Mezcla de reacción	Physical State	Gas
-----------	--------------------	----------------	-----

## Safety Valve Data

Set pressure (barg)	1,0	Overpressure (%)	10
Cold differential test pressure (barg)	-	Superimposed back pressure (barg)	0,05
Built-up back pressure (bar)	0,126	Total backpressure (barg)	0,176
Orifice diameter (mm)	40	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	1256,6
Kdr (gas)	0,72	Kdr (liquid)	-

## Dimensions

Diameter input	DN 50	Diameter output	DN 80
Pressure rating input	PN 16	Pressure rating output	PN 10

## Comments

- Se considera un ignifugado equivalente a 25 mm de lana de roca  
 - Esta válvula no cumple por caso fuego si no se considera el ignifugado

## Action Plan

- Se recomienda utilizar una válvula balanceada por fuelle o modificar la geometría de la tubería de descarga de la válvula de seguridad ya que esta no cumple con el criterio de estabilidad.

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 900

Revision: 1.0

Scenarios					
Scenario ID	52	Type	VALVEOPENING	Description	Sobrepresión por comunicación de equipos debido a apertura de válvula.
Explanation	Llegada de nitrógeno por fallo de reguladora PCV1590				
Comments	- Calculado a partir del Kvs de la reguladora				
Substance	Nitrogen			Physical state	Gas
Temp. relieving (°C)	25			Qm required (kg/h)	54
Governing case	No			Qm available (kg/h)	1584
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	26,3			Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Model	Gas through valve		Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006	
Reference	SANSON, Application Notes, AB 05 EN, Edition March 2012		Qr: Required flow (kg/h)	48	
Description	Nitrógeno por fallo de reguladora PCV1590		Po: Relieving pressure (bara)	2,113	
Fluid	Nitrogen		Pb: Back pressure (bara)	1,013	
P1: Upstream pressure (Bara)	5,000		Overpressure	0,1 barg	
P2: Downstream pressure (Bara)	2,113		MW: Molecular Weight (kg/kmol)	28,013	
Δp: Pressure drop (Bar)	2,887		Z: Compressibility (-)	1,000	
T: Temperature (°C)	25		k: Isentropic exponent (-)	1,4	
Kv (m <sup>3</sup> /h)	0,63		T: Temperature (°C)	25	
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	28,013		Kdr: Discharge coefficient (-)	0,72	
Tc: Critical Temperature (°C)	-146,9		Pc: Critical Pressure (bara)	1,12	
Pc: Critical Pressure (bara)	34,0		Subcritical flow	No	
Z: Compressibility (-)	0,999		A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	38,1	
κ: Specific heat ratio (-)	1,4		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	1584	
W: Mass flow (kg/h)	53,8				
qN: Normal Volumetric flow (Nm <sup>3</sup> /h)	41,7				
Chocked flow	Yes				
ρ: Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,29				
Comments	Kvs = 0,63; Obtenido de hojas de especificaciones P1 = 4 bar; P2 = 1 bar				
Scenario ID	53	Type	CHEMREACT	Description	Sobrepresión por reacción no deseada/no controlada/fuera de control.
Explanation	Sobrepresión por liberación de gases de reacción descontrolada				
Comments	- Caudal de SOCl <sub>2</sub> limitado por orificio de restricción RO1590 ClSO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O -> 2 HCl + SO <sub>2</sub>				
Substance	HCl			Physical state	Gas
Temp. relieving (°C)	70			Qm required (kg/h)	1010
Governing case	No			Qm available (kg/h)	1689
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	541,1			Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Qm SOCl <sub>2</sub> (kg/h)	562		Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006	
Qm toluol (kg/h)	350		Qr: Required flow (kg/h)	1010	
Qm HCl (kg/h)	350		Po: Relieving pressure (bara)	2,113	
Q SO <sub>2</sub> (kg/h)	303		Pb: Back pressure (bara)	1,013	
Qm total (kg/h)	1010		Overpressure	0,1 barg	
			MW: Molecular Weight (kg/kmol)	36,46	
			Z: Compressibility (-)	1,000	
			k: Isentropic exponent (-)	1,41	
			T: Temperature (°C)	70	
			Kdr: Discharge coefficient (-)	0,72	
			Pc: Critical Pressure (bara)	1,11	
			Subcritical flow	No	
			A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	751,5	
			Qm: Discharge Capacity (kg/h)	1689	
Scenario ID	163	Type	OVERFILLING	Description	Sobrepresión por sobrellenado.
Explanation	Sobrepresión por sobrellenado de tolueno a través de bomba				
Comments	- Calculado como el caudal de la bomba P900				
Substance	Toluene			Physical state	Liquid
Temp. relieving (°C)	25			Qm required (kg/h)	10452
Governing case	No			Qm available (kg/h)	30210
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	209,7			Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Q (m <sup>3</sup> /h)	12		Model	Liquid, ISO 4126-1:2006	
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	871		Qr: Required flow (kg/h)	10452	
Qm (kg/h)	10452		Qv: Volumetric flow (m <sup>3</sup> /h)	12,00	
			G: specific gravity (-)	0,871	
			μ: Dynamic Viscosity (Cp)	0,61	
			Kdr: Discharge coefficient (-)	0,482	
			Kdr estimation	(7) Kdr <sub>l</sub> = Kd <sub>g</sub> *0,67	
			Po: Relieving pressure (bara)	2,113	
			Pb: Back pressure (bara)	1,013	
			Overpressure	0,1 barg	
			Re: Reynolds (-)	437891	
			Kv: Viscosity correction factor (-)	1,00	
			A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	435	
			Qm: Discharge Capacity (kg/h)	30210	

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 900

Revision: 1.0

Scenario ID	164	Type	FIRE	Description	Sobrepresión por fuego externo.
Explanation	Sobrepresión por fuego externo al depósito				
Comments	- Se considera la vaporización del tolueno				
Substance	Toluene			Physical state	Gas
Temp. relieving (°C)	138			Qm required (kg/h)	1884
Governing case	Yes			Qm available (kg/h)	2267
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	2506,6			Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Calculation Method	ISO 23251:2006			Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006
Vessel Type	Cylindrical Vertical (flat ends)			Qr: Required flow (kg/h)	1884
Diameter (m)	2,3			Po: Relieving pressure (bara)	2,113
Length (m)	3			Pb: Back pressure (bara)	1,013
Elevation (m)	0,5			Overpressure	0,1 barg
Filling degree (%)	95			MW: Molecular Weight (kg/kmol)	92,14
Effective liquid height (m)	2,85			Z: Compressibility (-)	0,942
Environmental factor type	Insulated vessel conductance 22.7 W/m <sup>2</sup> .K (25 mm)			k: Isentropic exponent (-)	1,04
F: Environmental factor (-)	0,3			T: Temperature (°C)	138
Δh <sub>vap</sub> : Latent Heat (kJ/kg)	344			Kdr: Discharge coefficient (-)	0,72
C1: C Factor constant (-)	43200			Pc: Critical Pressure (bara)	1,26
N1: Area exponent (-)	0,82			Subcritical flow	No
Exposed Area (m <sup>2</sup> )	24,7			A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	3481,4
Heat input (kW)	180,0			Qm: Discharge Capacity (kg/h)	2267
Qr: Required flow (kg/h)	1884				

Scenario ID	165	Type	TUBERUPTURE	Description	Sobrepresión por rotura de tubos de intercambiador de calor.
Explanation	Sobrepresión por llegada de agua por rotura de tubos en intercambiador				
Comments	- Calculado como el caudal de agua a través de un orificio de 10 mm				
Substance	Agua			Physical state	Liquid
Temp. relieving (°C)	25			Qm required (kg/h)	886
Governing case	No			Qm available (kg/h)	32370
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	16,6			Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Model	Liquid release through hole			Model	Liquid, ISO 4126-1:2006
Reference	Methods for the calculation of physical effects, 'Yellow Book', (TNO) The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 2005			Qr: Required flow (kg/h)	886
Description	Agua por rotura de bloques en cambiador W900			Qv: Volumetric flow (m <sup>3</sup> /h)	0,89
Fluid	Water			G: specific gravity (-)	1
P0: Vessel pressure (Bara)	1			μ: Dynamic Viscosity (Cp)	1,1
Liquid height (m)	0,5			Kdr: Discharge coefficient (-)	0,482
P1: Upstream total pressure (Bara)	1,049			Kdr estimation	(7) Kdr <sub>l</sub> = Kd <sub>g</sub> *0.67
P2: Downstream pressure (Bara)	1,000			Po: Relieving pressure (bara)	2,113
Δp: Pressure drop (Bar)	0,049			Pb: Back pressure (bara)	1,013
ρ: Density (kg/m <sup>3</sup> )	1000			Overpressure	0,1 barg
μ: Dynamic Viscosity (Cp)				Re: Reynolds (-)	260192
d: Orifice diameter (mm)	10			Kv: Viscosity correction factor (-)	1,00
Cd: Discharge coefficient (-)	1			A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	34
W: Mass flow (kg/h)	885,58			Qm: Discharge Capacity (kg/h)	32370
Q: Volumetric flow (m <sup>3</sup> /h)	0,89				
v: Velocity (m/s)	3,13				
A: Orifice Area (mm <sup>2</sup> )	78,5				
Comments	∅ Tub. (mm) = 10 mm				

SAFETY VALVE DATASHEET  
PSV 900

Date: 2-Oct-2019

Revision: 1.0

**Stability**

Calculation type	BACKPRESSURE	Description	Contrapresión en la tubería de descarga			
Substance	Toluene	Physical state	Gas			
Temp. relieving (°C)	138	Qm available (kg/h)	2519			
Pressure drop - ΔP (bar)	0,126	10% Pset (bar)	0,1			
Pressure drop calculation ↓		Acceptable	No			
Model	Gas adiabatic flow in pipe					
Reference	Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, 1984					
Description	Estabilidad - Backpressure PSV 900					
Fluid	Toluene					
P0: Upstream stagnation pressure (Bara)	1,189					
P3: Downstream stagnation pressure (Bara)	1,063					
Δp: Pressure drop (Bar)	0,126					
T0: Upstream stagnation temperature (°C)	138					
D: Pipe Ø (mm)	82,5					
L: Pipe length (m)	6					
e: Pipe Roughness (mm)	0,0450					
K: Resistance coefficient additional (-)	0,000					
K: Resistance coefficient fittings (-)	2,352					
ΣK: Total Resistance coefficient (-)	2,352					
μ: Dynamic Viscosity (Cp)	0,61					
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	92,14					
Tc: Critical Temperature (°C)	318,6					
Pc: Critical Pressure (bara)	41,8					
k: Specific heat ratio (-)	1,04					
ρ0: Upstream stagnation density (kg/m³)	3,314					
W: Mass flow (kg/h)	2522,0					
Re: Reynolds (-)	17725					
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	613,5					
f: Friction coefficient (-)	0,0278					
v1: Upstream pipe Velocity (m/s)	40,45					
v2: Downstream pipe Velocity (m/s)	45,68					
N: Pipe Resistance (-)	4,37					
Chocked flow	No					
A: Pipe Area (mm²)	5346					
Fitting type	Quantity	Ø Pipeline	Ø Fitting	K	β	K Total
Long Bend (80 mm - 3")	2	82,5	82,5	0,280	1,000	0,560
Branch Tee (80 mm - 3")	1	82,5	82,5	1,080	1,000	1,080
Exit to Container	1	82,5	107,1	1,000	0,770	0,352
Pipe Segment (DIN) DN 100 - 4" (PN 10)	5	82,5	107,1	0,151	0,770	0,265
Long Bend (100 mm - 4")	1	82,5	107,1	0,270	0,770	0,095
ΣK						2,352

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 910

Revision: 1.0

## General Properties

TAG	PSV 910	P&ID	D15-09 /Hoja 029
Equipment	B910	Facility/Area	D-15
Equipment type	VESSEL / PROCESS TANK	Situation	Depósito B910
Type	Conventional	Blow-off location	B1009
Brand name	Richter Chemie-Technik GmbH	Model	KSE/F
No scenarios	NO	Rupture disc	NO
Out of service	NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future	NO	ACCEPTABLE	NO

## Service Conditions

Substance	Producto de reacción	Physical State	Gas
-----------	----------------------	----------------	-----

## Safety Valve Data

Set pressure (barg)	2,5	Overpressure (%)	10
Cold differential test pressure (barg)	-	Superimposed back pressure (barg)	0,05
Built-up back pressure (bar)	-	Total backpressure (barg)	-
Orifice diameter (mm)	22	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	380,1
Kdr (gas)	0,75	Kdr (liquid)	

## Dimensions

Diameter input	DN 25	Diameter output	DN 50
Pressure rating input	PN 16	Pressure rating output	PN 10

Comments	- No se considera sobrellenado por carga desde R900 ya que la diferencia de altura entre ambos no provoca una presión por encima de la presión de tarado
Action Plan	- Se debe sustituir la válvula por una con un área de orificio mínima $A_{or} \geq 480/kdr$ - A continuación se citan unos modelos de válvula que pueden satisfacer las necesidades: + Leser 441; DN 32; dor = 29 mm; kdr = 0,7 + Nacional 33-5500; DN 32; dor = 29 mm; kdr = 0,81

SAFETY VALVE DATASHEET  
PSV 910

Date: 2-Oct-2019

Revision: 1.0

Scenarios					
Scenario ID	58	Type	VALVEOPENING	Description	Sobrepresión por comunicación de equipos debido a apertura de válvula.
Explanation	Llegada de nitrógeno por fallo de reguladora PCV 1510				
Comments	- Calculado a partir del orificio de restricción RO 1509				
Substance	Nitrogen			Physical state	Gas
Temp. relieving (°C)	25			Qm required (kg/h)	140
Governing case	No			Qm available (kg/h)	889
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	44,9			Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Model	Gas release through orifice			Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006
Reference	Methods for the calculation of physical effects, 'Yellow Book', (TNO) The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 2005			Qr: Required flow (kg/h)	140
Description	Nitrógeno a través de orificio de restricción RO1509			Po: Relieving pressure (bara)	3,763
Fluid	Nitrogen			Pb: Back pressure (bara)	1,013
P vessel (bara)	5,000			Overpressure	10%
P output (Bara)	3,763			MW: Molecular Weight (kg/kmol)	28,013
Δp: Pressure drop (Bar)	1,237			Z: Compressibility (-)	1,000
T: Temperature (°C)	25			κ: Isentropic exponent (-)	1,4
d: Orifice diameter (mm)	7			T: Temperature (°C)	25
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	28,013			Kdr: Discharge coefficient (-)	0,75
Tc: Critical Temperature (°C)	-146,9			Pc: Critical Pressure (bara)	1,99
Pc: Critical Pressure (bara)	34,0			Subcritical flow	No
Z: Compressibility (-)	1,000			A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	59,9
κ: Specific heat ratio (-)	1,4			Qm: Discharge Capacity (kg/h)	889
ρ: Density (kg/m <sup>3</sup> )	5,65				
Cd: Discharge coefficient (-)	1,00				
W: Mass flow (kg/h)	140,47				
qN: Normal Volumetric flow (Nm <sup>3</sup> /h)	112,40				
Chocked flow	No				
v: Orifice Velocity (m/s)	179,39				
A: Orifice Area (mm <sup>2</sup> )	38,5				
Pfc: Flow Critical Pressure (Bara)	2,6				
Comments	∅ orificio (mm) = 7 P1 (bar) = 4				
Scenario ID	159	Type	OVERFILLING	Description	Sobrepresión por sobrellenado.
Explanation	Sobrepresión por sobrellenado con agua desmineralizada				
Comments	- Calculado a través de caudal de bomba P911				
Substance	Agua			Physical state	Liquid
Temp. relieving (°C)	25			Qm required (kg/h)	5600
Governing case	No			Qm available (kg/h)	16127
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	66,3			Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Q (m <sup>3</sup> /h)	5,6			Model	Liquid, ISO 4126-1:2006
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1000			Qr: Required flow (kg/h)	5600
Qm (kg/h)	5600			Qv: Volumetric flow (m <sup>3</sup> /h)	5,60
				G: specific gravity (-)	1
				μ: Dynamic Viscosity (Cp)	1,1
				Kdr: Discharge coefficient (-)	0,503
				Kdr estimation	(7) Kdr1 = Kdg*0,67
				Po: Relieving pressure (bara)	3,763
				Pb: Back pressure (bara)	1,013
				Overpressure	10%
				Re: Reynolds (-)	235698
				Kv: Viscosity correction factor (-)	1,00
				A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	132
				Qm: Discharge Capacity (kg/h)	16127
Scenario ID	168	Type	FIRE	Description	Sobrepresión por fuego externo.
Explanation	Sobrepresión por fuego externo al depósito				
Comments	- Se considera la vaporización del metanol				
Substance	Methanol			Physical state	Gas
Temp. relieving (°C)	102			Qm required (kg/h)	1200
Governing case	Yes			Qm available (kg/h)	836
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	409,5			Acceptable	No
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Calculation Method	ISO 23251:2006			Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006
Vessel Type	Cylindrical Vertical (flat ends)			Qr: Required flow (kg/h)	1200
Diameter (m)	1,6			Po: Relieving pressure (bara)	3,763
Length (m)	2,3			Pb: Back pressure (bara)	1,013
Elevation (m)	0,5			Overpressure	10%
Filling degree (%)	95			MW: Molecular Weight (kg/kmol)	32
Effective liquid height (m)	2,185			Z: Compressibility (-)	0,954
Environmental factor type	Bare			κ: Isentropic exponent (-)	1,26
F: Environmental factor (-)	1			T: Temperature (°C)	102
Δh <sub>vap</sub> : Latent Heat (kJ/kg)	1061			Kdr: Discharge coefficient (-)	0,75
C1: C Factor constant (-)	43200			Pc: Critical Pressure (bara)	2,08
N1: Area exponent (-)	0,82			Subcritical flow	No
Exposed Area (m <sup>2</sup> )	13,0			A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	546,0
Heat input (kW)	353,8			Qm: Discharge Capacity (kg/h)	836
Qr: Required flow (kg/h)	1200				

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 1001

Revision: 1.0

General Properties			
TAG	PSV 1001	P&ID	D15-11 /Hoja 037
Equipment	LÍNEA DE VAPOR	Facility/Area	D-15
Equipment type	PIPELINE	Situation	Red vapor 17 bar
Type	Conventional	Blow-off location	Atm. (21 m)
Brand name	Bopp & Reuther	Model	SI 6302
No scenarios	NO	Rupture disc	NO
Out of service	NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future	NO	ACCEPTABLE	NO
Service Conditions			
Substance	Water	Physical State	Steam
Safety Valve Data			
Set pressure (barg)	18,0	Overpressure (%)	10
Cold differential test pressure (barg)	-	Superimposed back pressure (barg)	1,013
Built-up back pressure (barg)	1	Total backpressure (barg)	
Orifice diameter (mm)	20	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	314,2
Kdr (gas)	0,34	Kdr (liquid)	-
Dimensions			
Diameter input	DN 25	Diameter output	DN 40
Pressure rating input	PN 40	Pressure rating output	PN 10
Comments	- Se considera vapor seco y saturado en todos los casos		
Action Plan	<p>- Estudiar la posibilidad de instalar un orificio de restricción aguas arriba de las reguladoras de manera que limite la capacidad requerida por el escenario a una menor que la disponible de la válvula y no limite el caudal de vapor necesario por los consumidores en condiciones de proceso. A continuación se propone un diámetro de orificio y caudal limitado en condiciones aseguradas:</p> <p>+ En la línea de vapor desde caldera <math>\varnothing = 24</math> mm; <math>Q_m = 1033</math> kg/h</p> <p>+ En la línea de vapor de importación <math>\varnothing = 8,5</math> mm; <math>Q_m = 1012</math> kg/h</p>		

SAFETY VALVE DATASHEET  
PSV 1001

Date: 2-Oct-2019

Revision: 1.0

Scenarios						
Scenario ID	100	Type	VALVEOPENING		Description	Sobrepresión por comunicación de equipos debido a apertura de válvula.
Explanation	Llegada de vapor de red de importación por fallo de reguladora PCV1001					
Comments	- Caudal limitado por orificio de restricción RO1001					
Substance	Water		Physical state		Steam	
Temp. relieving (°C)			244	Qm required (kg/h)	2552	
Governing case			No	Qm available (kg/h)	1136	
Required area (mm²) (for Kdr=1)			240,0	Acceptable	No	
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓			
Model	Gas release through orifice		Model		Steam, ISO 4126-1:2006	
Reference	Methods for the calculation of physical effects, 'Yellow Book', (TNO) The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 2005		Qr: Required flow (kg/h)	2552		
Description	Vapor a través de orificio RO1001		Po: Relieving pressure (bara)	20,813		
Fluid	Steam		Overpressure	10%		
P vessel (bara)	36,000		k: Isentropic exponent (-)	1,129		
P output (Bara)	20,813		x: Dryness fraction (-)	1,00		
Δp: Pressure drop (Bar)	15,187		v: Specific volume (Kg/m³)	0,096		
T: Temperature (°C)	244		A: Required Area (mm²)	706		
d: Orifice diameter (mm)	13,5		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	1136		
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	18					
Tc: Critical Temperature (°C)	373,0					
Pc: Critical Pressure (bara)	220,0					
Z: Compressibility (-)	0,880					
k: Specific heat ratio (-)	1,111					
ρ: Density (kg/m³)	17,13					
Cd: Discharge coefficient (-)	1,00					
W: Mass flow (kg/h)	2552,07					
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	3177,89					
Chocked flow	Yes					
v: Orifice Velocity (m/s)	289,10					
A: Orifice Area (mm²)	143,1					
Pfc: Flow Critical Pressure (Bara)	21,0					
Comments						
Scenario ID	198	Type	VALVEOPENING		Description	Sobrepresión por comunicación de equipos debido a apertura de válvula.
Explanation	Llegada de vapor desde caldera					
Comments	- Calculado como el caudal de vapor a través de una tubería de DN 50					
Substance	Water		Physical state		Steam	
Temp. relieving (°C)			215	Qm required (kg/h)	2820	
Governing case			Yes	Qm available (kg/h)	1136	
Required area (mm²) (for Kdr=1)			265,2	Acceptable	No	
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓			
Model	Gas adiabatic flow in pipe		Model		Steam, ISO 4126-1:2006	
Reference	Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, 1984		Qr: Required flow (kg/h)	2820		
Description	Vapor a través de 3 m de tubería DN 50		Po: Relieving pressure (bara)	20,813		
Fluid	Steam		Overpressure	10%		
P0: Upstream stagnation pressure (Bara)	21,000		k: Isentropic exponent (-)	1,129		
P3: Downstream stagnation pressure (Bara)	20,813		x: Dryness fraction (-)	1,00		
Δp: Pressure drop (Bar)	0,187		v: Specific volume (Kg/m³)	0,096		
T0: Upstream stagnation temperature (°C)	215		A: Required Area (mm²)	780		
D: Pipe Ø (mm)	54,5		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	1136		
L: Pipe length (m)	3					
ε: Pipe Roughness (mm)	0,0450					
K: Resistance coefficient additional (-)	1,000					
K: Resistance coefficient fittings (-)	0,600					
ΣK: Total Resistance coefficient (-)	1,600					
μ: Dynamic Viscosity (Cp)	1,1					
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	18					
Tc: Critical Temperature (°C)	373,0					
Pc: Critical Pressure (bara)	220,0					
k: Specific heat ratio (-)	1,33					
ρ0: Upstream stagnation density (kg/m³)	10,17					
W: Mass flow (kg/h)	2820,35					
Re: Reynolds (-)	1,664E04					
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	3511,95					
f: Friction coefficient (-)	0,0287					
v1: Upstream pipe Velocity (m/s)	33,09					
v2: Downstream pipe Velocity (m/s)	33,40					
N: Pipe Resistance (-)	3,178					
Chocked flow	No					
A: Pipe Area (mm²)	2333					
Comments	3 m de tubería DN 50 2 codos P1 = 21 bar; P2=20 bar					
Fitting type	Quantity	Ø Pipeline	Ø Fitting	K	β	K Total
Long Bend (50 mm - 2")	2	54,5	54,5	0,300	1,000	0,600
ΣK						0,600

SAFETY VALVE DATASHEET  
PSV 1001

Date: 2-Oct-2019

Revision: 1.0

**Stability**

Calculation type	BACKPRESSURE		Description	Contrapresión en la tubería de descarga		
Substance	Water		Physical state	Steam		
Temp. relieving (°C)	215		Qm available (kg/h)	1262		
Pressure drop - ΔP (bar)	7,787		10% Pset (bar)	1,8		
Pressure drop calculation ↓			Acceptable	No		
Model	Gas adiabatic flow in pipe					
Reference	Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, 1984					
Description	Estabilidad - Backpressure PSV 1001					
Fluid	Steam					
P0: Upstream stagnation pressure (Bara)	8,800					
P3: Downstream stagnation pressure (Bara)	1,013					
Δp: Pressure drop (Bar)	7,787					
T0: Upstream stagnation temperature (°C)	215					
D: Pipe Ø (mm)	28,5					
L: Pipe length (m)	4					
e: Pipe Roughness (mm)	0,0450					
K: Resistance coefficient additional (-)	0,000					
K: Resistance coefficient fittings (-)	3,250					
ΣK: Total Resistance coefficient (-)	3,250					
μ: Dynamic Viscosity (Cp)	1,1					
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	18					
Tc: Critical Temperature (°C)	373,0					
Pc: Critical Pressure (bara)	220,0					
k: Specific heat ratio (-)	1,129					
ρ0: Upstream stagnation density (kg/m³)	4,046					
W: Mass flow (kg/h)	1263,2					
Re: Reynolds (-)	14251					
qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)	1573,0					
f: Friction coefficient (-)	0,031					
v1: Upstream pipe Velocity (m/s)	141,79					
v2: Downstream pipe Velocity (m/s)	491,93					
N: Pipe Resistance (-)	7,59					
Chocked flow	Yes					
A: Pipe Area (mm²)	638					
Fitting type	Quantity	Ø Pipeline	Ø Fitting	K	β	K Total
Long Bend (25 mm - 1")	2	28,5	28,5	0,370	1,000	0,740
Through Tee (40 mm - 1-½")	1	28,5	43,1	0,420	0,661	0,080
Exit to Atmosphere	1	28,5	28,5	1,000	1,000	1,000
Pipe Segment (DIN) DN 40 - 1½" (PN 10)	12	28,5	43,1	0,463	0,661	1,062
Long Bend (40 mm - 1-½")	3	28,5	43,1	0,340	0,661	0,195
Contraction (α =40°)	1	28,5	28,5	0,173	1,000	0,173
d1/d2=0,61						
ΣK						3,250

**Performance**

Calculation Type	REACTION FORCES		Description		
Comments					
Substance	Steam		k	1,129	
Temp. relieving (°C)	215		Qm available (kg/h)	1262	
Pressure discharge (bara)	20,8		Pchoked (bar)	0,056	
F (N)	171,5		A (mm²)	1459	
Calculation Type	NOISE		Description		
Comments					
Substance	Steam		k	1,129	
Temp. relieving (°C)	215		Qm available (kg/h)	1262	
c (m/s)	504,6		L (dB)	58	
L <sub>30 (100)</sub> (dB)	104,5				

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PRV 9010

Revision: 1.0

General Properties			
TAG	PRV 9010	P&ID	D15-13 /Hoja 039
Equipment	COLECTOR VENTEO	Facility/Area	D-15
Equipment type	PIPELINE	Situation	Colector venteo
Type	Pressure Safety Valve	Blow-off location	UTT9000
Brand name	Protego	Model	DZ/T
No scenarios	NO	Rupture disc	NO
Out of service	NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future	NO	ACCEPTABLE	NO

Service Conditions			
Substance	Nitrogen	Physical State	Gas

Pressure/Vacuum Relief Valve Data			
Device type	Pressure/Vacuum relief weight loaded		
Relieving pressure (mbar)	85	Vacuum pressure (mbar)	-
Overpressure (bar)	0,1	Total backpressure (barg)	-
Orifice diameter (mm)	50	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	1963,5
Kdr (gas)	-	Kdr (liquid)	-

Dimensions			
Diameter input	DN 50	Diameter output	DN 50
Pressure rating input	PN 10	Pressure rating output	PN 10

Comments	- Capacidad disponible obtenida de gráficas del fabricante		
Action Plan			

## Scenarios

Scenario ID	Type	Description
178	VALVEOPENING	Sobrepresión por comunicación de equipos debido a apertura de válvula.

Explanation	Llegada de nitrógeno por fallo de reguladora PCV9010
-------------	--

Comments	- Calculado en base a Kvs de reguladora
----------	---

Substance	Nitrogen	Physical state	Gas
-----------	----------	----------------	-----

Temp. relieving (°C)	25	Qm required (kg/h)	48
----------------------	----	--------------------	----

Governing case	N.A.	Qm available (kg/h)	420
----------------	------	---------------------	-----

Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	-	Acceptable	Yes
--	---	------------	-----

Required capacity calculation ↓	Discharge capacity calculation ↓
---------------------------------	----------------------------------

Model	Gas through valve	Q (Nm <sup>3</sup> /h air)	325
Reference	SANSON, Application Notes, AB 05 EN, March 2012	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	420
Description	Nitrógeno por fallo de reguladora PCV9010	Qm: Discharge Capacity (kg/h)	420
Fluid	Nitrogen		
P1: Upstream pressure (Bara)	5,000		
P2: Downstream pressure (Bara)	1,107		
Δp: Pressure drop (Bar)	3,894		
T: Temperature (°C)	25		
Kv (m <sup>3</sup> /h)	0,63		
MW: Molecular Weight (kg/kmol)	28,013		
Tc: Critical Temperature (°C)	-146,9		
Pc: Critical Pressure (bara)	34,0		
Z: Compressibility (-)	1,000		
κ: Specific heat ratio (-)	1,4		
W: Mass flow (kg/h)	53,78		
qN: Normal Volumetric flow (Nm <sup>3</sup> /h)	41,69		
Chocked flow	Yes		
ρ: Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,29		
Comments	Kvs = 0,63; obtenido de ficha técnica P1 = 4 bar		

Scenario ID	Type	Description
179	COOLLINGFAILURE	Sobrepresión por fallo de refrigeración y/o falta de reflujó.

Explanation	Sobrepresión por fallo de refrigeración en K700
-------------	---

Comments	- Potencia del aero obtenida de ficha técnica - Se considera que la cantidad de calor que ahora no puede evacuar el aero es el 90% de la normal - Capacidad disponible equivalente de metanol
----------	---

Substance	Methanol	Physical state	Gas
-----------	----------	----------------	-----

Temp. relieving (°C)	65	Qm required (kg/h)	1275
----------------------	----	--------------------	------

Governing case	N.A.	Qm available (kg/h)	872
----------------	------	---------------------	-----

Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	-	Acceptable	No
--	---	------------	----

Required capacity calculation ↓	Discharge capacity calculation ↓
---------------------------------	----------------------------------

Paero (kW)	480	Q (Nm <sup>3</sup> /h air)	325
λ vap (kJ/kg)	1220	MW: Molecular Weight (kg/kmol)	32,04
Qm (kg/h)	1275	Qm: Discharge Capacity (kg/h)	872

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

TRV 4015

Revision: 1.0

General Properties			
TAG	TRV 4015	P&ID	D20-02 /Hoja 040
Equipment	VASO DE EXPANSIÓN B4015	Facility/Area	D-20
Equipment type	VESSEL	Situation	Depósito de expansión B4015
Type	Thermal Relief Valve	Blow-off location	Atm.
Brand name	Metalúrgica Zaes, S.L.	Model	
No scenarios	NO	Rupture disc	NO
Out of service	NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future	NO	ACCEPTABLE	YES

Service Conditions			
Substance	Agua	Physical State	

Safety Valve Data			
Set pressure (barg)	5,9	Overpressure (%)	10
Cold differential test pressure (barg)	-	Superimposed back pressure (barg)	
Built-up back pressure (barg)		Total backpressure (barg)	
Orifice diameter (mm)	11	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	95,0
Kdr (gas)	0,5	Kdr (liquid)	

Dimensions			
Diameter input	DN 15	Diameter output	DN 15
Pressure rating input	PN 30	Pressure rating output	PN 30

Comments	
Action Plan	

Scenarios					
Scenario ID	208	Type	THERMALEXP	Description	Sobrepresión por expansión térmica líquida.
Explanation					
Comments	- Se asume que el depósito se bloquea con líquido y que el agua se calienta por el sol o el ambiente. - De manera conservadora se asume que el calor máximo intercambiado será igual al poder calorífico del equipo de frío.				
Substance	Agua	Physical state	Liquid		
Temp. relieving (°C)	25	Qm required (kg/h)	81		
Governing case	Yes	Qm available (kg/h)	4129		
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	0,6	Acceptable	Yes		
Required capacity calculation ↓			Discharge capacity calculation ↓		
Calculation Method	ISO 23251:2008 (Hydraulic expansion)		Model	Liquid, ISO 4126-1:2006	
Heat input (kW)	438,0		Qr: Required flow (kg/h)	81	
Cubic expansion coeff. (1/°C)	2,14E-04		Qv: Volumetric flow (m <sup>3</sup> /h)	0,08	
Specific heat capacity (J/kg·K)	4190		G: specific gravity (-)	1	
Qr: Required flow (kg/h)	81		μ: Dynamic Viscosity (Cp)	1,1	
			Kdr: Discharge coefficient (-)	0,335	
			Kdr estimation	(7) Kdr_l = Kd_g*0.67	
			Po: Relieving pressure (bara)	7,503	
			Pb: Back pressure (bara)	1,013	
			Overpressure	10%	
			Re: Reynolds (-)	120695	
			Kv: Viscosity correction factor (-)	1,00	
			A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	2	
			Qm: Discharge Capacity (kg/h)	4129	

## SAFETY VALVE DATASHEET

Date: 2-Oct-2019

PSV 515

Revision: 1.0

General Properties			
TAG	PSV 515	P&ID	D20-04 /Hoja 042
Equipment	B 515	Facility/Area	D-20
Equipment type	SEPARADOR	Situation	Oil Separator B515
Type	Conventional	Blow-off location	Aspiración compresor
Brand name	AWP	Model	443 31
No scenarios	NO	Rupture disc	NO
Out of service	NO	Not belong to the property	NO
To be installed in the Future	NO	ACCEPTABLE	YES
Service Conditions			
Substance	Ammonia	Physical State	Gas
Safety Valve Data			
Set pressure (barg)	25,0	Overpressure (%)	10
Cold differential test pressure (barg)	-	Superimposed back pressure (barg)	16
Built-up back pressure (bar)	0,66	Total backpressure (barg)	16,66
Orifice diameter (mm)	24	Orifice area (mm <sup>2</sup> )	452,4
Kdr (gas)	0,6	Kdr (liquid)	-
Dimensions			
Diameter input	DN 32	Diameter output	DN 50
Pressure rating input	PN 25	Pressure rating output	PN 16
Comments	- La capacidad requerida del escenario de fuego externo se determina según el actual Reglamento de Seguridad para Plantas e Instalaciones Frigoríficas (MI-IF 009) - Temperatura de alivio suministrada por la compañía		
Action Plan			
Scenarios			
Scenario ID	92	Type	CLOSEOUTPUTS
Description	Sobrepresión por salidas cerradas.		
Explanation	Sobrepresión por compresor en marcha y salida cerrada		
Comments	- Caudal de compresor obtenido de ficha técnica - Densidad calculada a presión de tarado		
Substance	Ammonia	Physical state	Gas
Temp. relieving (°C)	50	Qm required (kg/h)	4444
Governing case	Yes	Qm available (kg/h)	5206
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	231,7	Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓	Discharge capacity calculation ↓		
Q (m <sup>3</sup> /h)	200	Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	22,22	Qr: Required flow (kg/h)	4444
Qm (kg/h)	4444	Po: Relieving pressure (bara)	28,513
		Pb: Back pressure (bara)	1,013
		Overpressure	10%
		MW: Molecular Weight (kg/kmol)	17
		Z: Compressibility (-)	0,811
		k: Isentropic exponent (-)	1,31
		T: Temperature (°C)	50
		Kdr: Discharge coefficient (-)	0,60
		Pc: Critical Pressure (bara)	15,51
		Subcritical flow	No
		A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	386,2
		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	5206
Scenario ID	93	Type	OTHER
Description	Sobrepresión por otra causa.		
Explanation	Sobrepresión por aporte de calor externo		
Comments	- Calculado en base a MI-IF-009; Qm = f · D · L		
Substance	Ammonia	Physical state	Gas
Temp. relieving (°C)	50	Qm required (kg/h)	174
Governing case	No	Qm available (kg/h)	5206
Required area (mm <sup>2</sup> ) (for Kdr=1)	9,1	Acceptable	Yes
Required capacity calculation ↓	Discharge capacity calculation ↓		
f	145	Model	Gas/Vapour, ISO 4126-1:2006
D	0,6	Qr: Required flow (kg/h)	174
L	2	Po: Relieving pressure (bara)	28,513
Qm (kg/h)	174	Pb: Back pressure (bara)	1,013
		Overpressure	10%
		MW: Molecular Weight (kg/kmol)	17
		Z: Compressibility (-)	0,811
		k: Isentropic exponent (-)	1,31
		T: Temperature (°C)	50
		Kdr: Discharge coefficient (-)	0,60
		Pc: Critical Pressure (bara)	15,51
		Subcritical flow	No
		A: Required Area (mm <sup>2</sup> )	15,1
		Qm: Discharge Capacity (kg/h)	5206

SAFETY VALVE DATASHEET  
PSV 515

Date: 2-Oct-2019

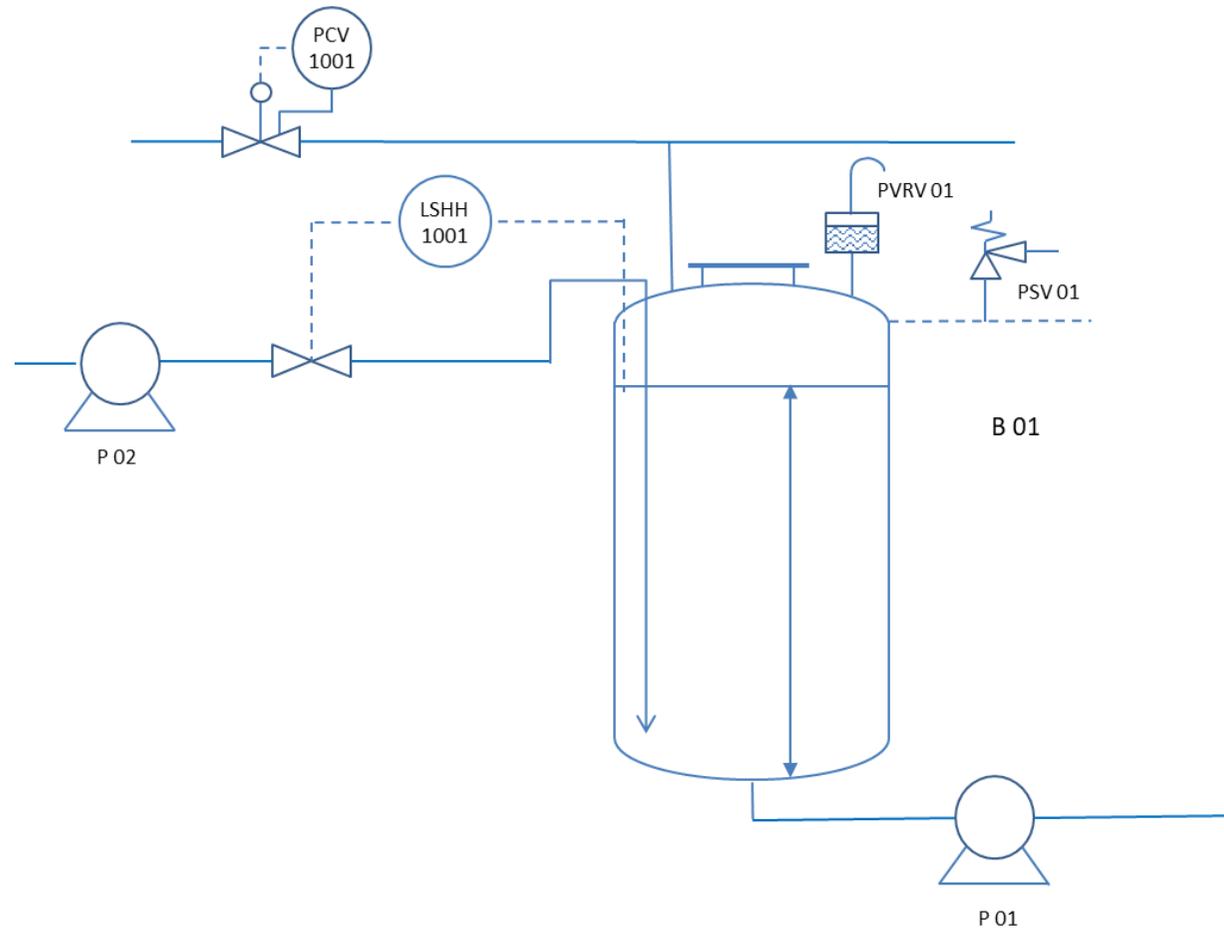
Revision: 1.0

**Stability**

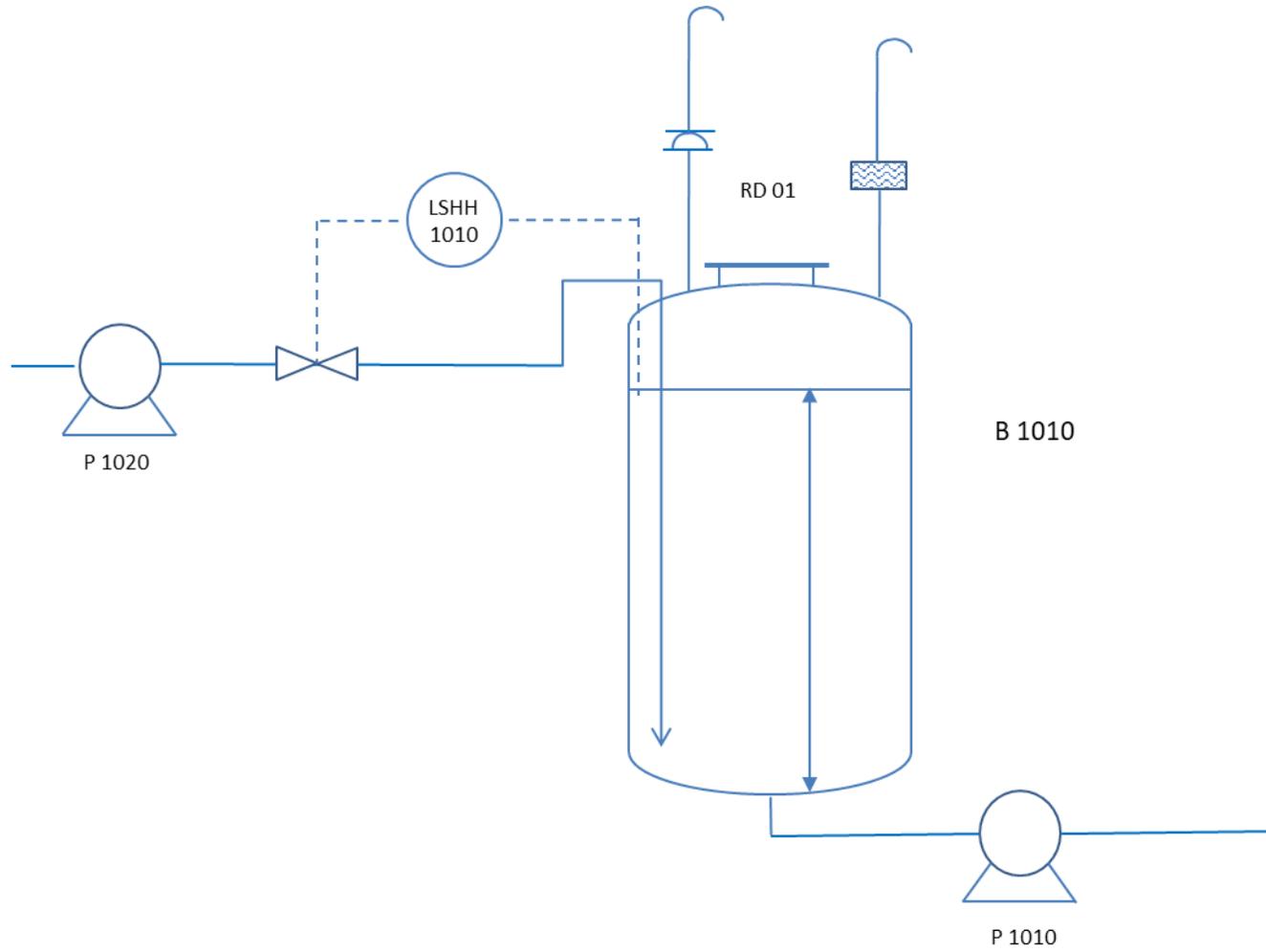
<b>Calculation type</b>	BACKPRESSURE		<b>Description</b>	Contrapresión en la tubería de descarga		
<b>Substance</b>	Ammonia		<b>Physical state</b>	Gas		
<b>Temp. relieving (°C)</b>		50	<b>Qm available (kg/h)</b>	5844		
<b>Pressure drop - ΔP (bar)</b>		0,66	<b>10% Pset (bar)</b>	2,5		
<b>Pressure drop calculation ↓</b>			<b>Acceptable</b>	Yes		
<b>Model</b>	Gas adiabatic flow in pipe					
<b>Reference</b>	Levenspiel O., Engineering Flow and Heat Exchange, Plenum, 1984					
<b>Description</b>	Estabilidad - Backpressure PSV 515					
<b>Fluid</b>	Ammonia					
<b>P1: Upstream pressure (Bara)</b>	16,660					
<b>P3: Downstream pressure (Bara)</b>	16,000					
<b>Δp: Pressure drop (Bar)</b>	0,660					
<b>T: Temperature (°C)</b>	50					
<b>D: Pipe Ø (mm)</b>	54,5					
<b>L: Pipe length (m)</b>	4					
<b>ε: Pipe Roughness (mm)</b>	0,0450					
<b>K: Resistance coefficient additional (-)</b>	0,000					
<b>K: Resistance coefficient fittings (-)</b>	1,600					
<b>ΣK: Total Resistance coefficient (-)</b>	1,600					
<b>μ: Dynamic Viscosity (Cp)</b>	0,14					
<b>MW: Molecular Weight (kg/kmol)</b>	17					
<b>Tc: Critical Temperature (°C)</b>	132,5					
<b>Pc: Critical Pressure (bara)</b>	112,8					
<b>Z: Compressibility (-)</b>	0,811					
<b>κ: Specific heat ratio (-)</b>	1,31					
<b>ρ0: Upstream stagnation density (kg/m³)</b>	11,847					
<b>W: Mass flow (kg/h)</b>	5844,3					
<b>Re: Reynolds (-)</b>	270903					
<b>qN: Normal Volumetric flow (Nm³/h)</b>	7705,5					
<b>f: Friction coefficient (-)</b>	0,0199					
<b>v1: Upstream pipe Velocity (m/s)</b>	59,351					
<b>v2: Downstream pipe Velocity (m/s)</b>	62,127					
<b>N: Pipe Resistance (-)</b>	3,06					
<b>Chocked flow</b>	No					
<b>A: Pipe Area (mm²)</b>	2333					
<b>Fitting type</b>	<b>Quantity</b>	<b>Ø Pipeline</b>	<b>Ø Fitting</b>	<b>K</b>	<b>β</b>	<b>K Total</b>
Long Bend (50 mm - 2")	2	54,5	54,5	0,3	1	0,6
Exit to Container	1	54,5	54,5	1,000	1	1
<b>ΣK</b>						1,6

## **ANEXO C. ESQUEMAS DIAGRAMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y TUBERÍAS (P&IDs)**

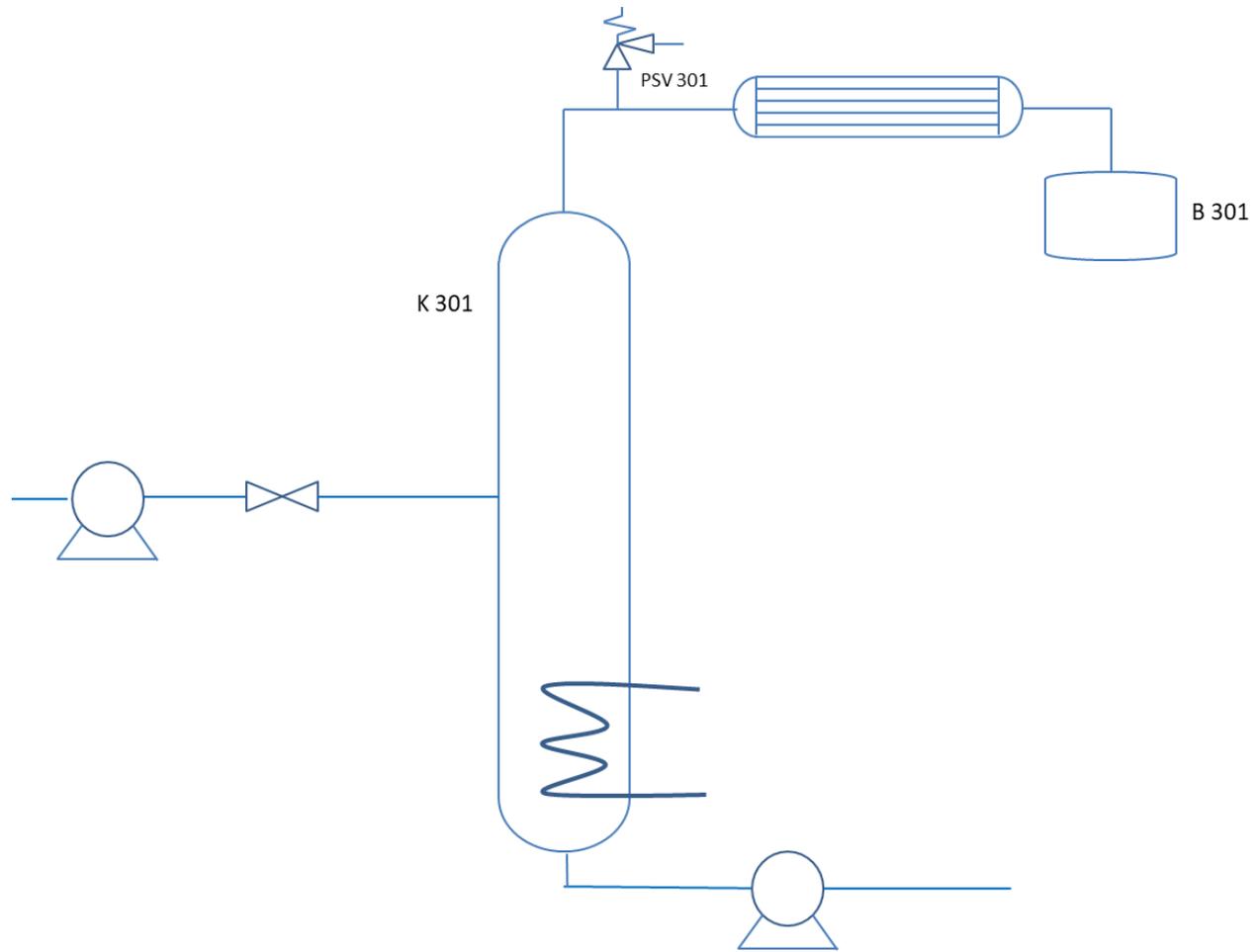
## B 01



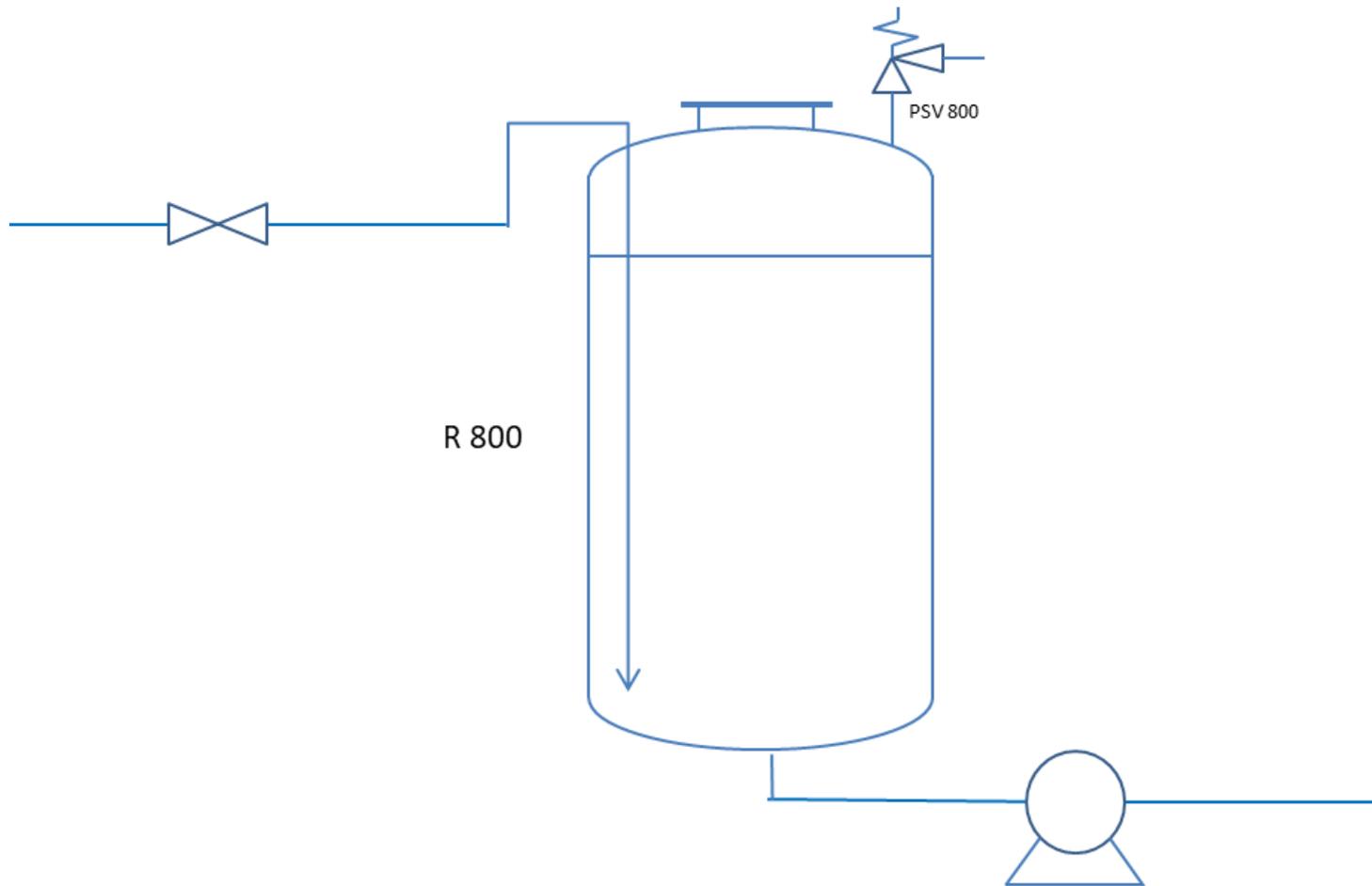
## B 1010



## K 301

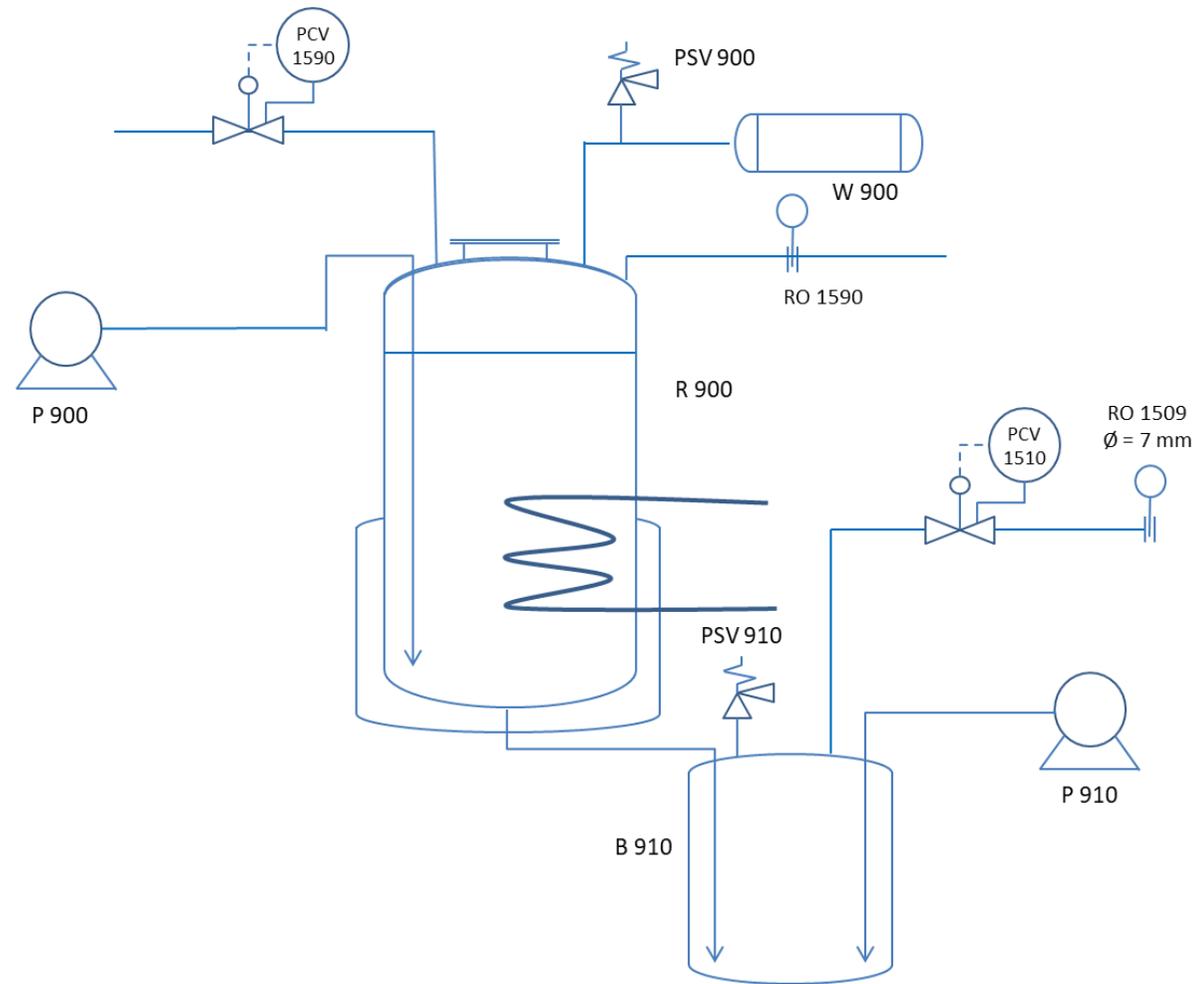


R 800

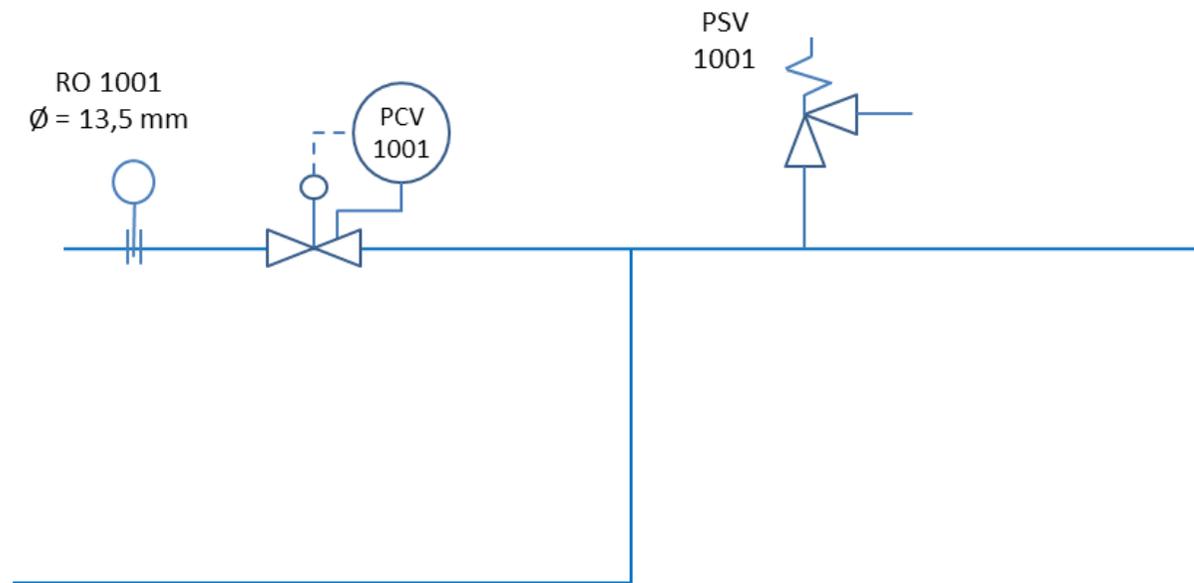


C5

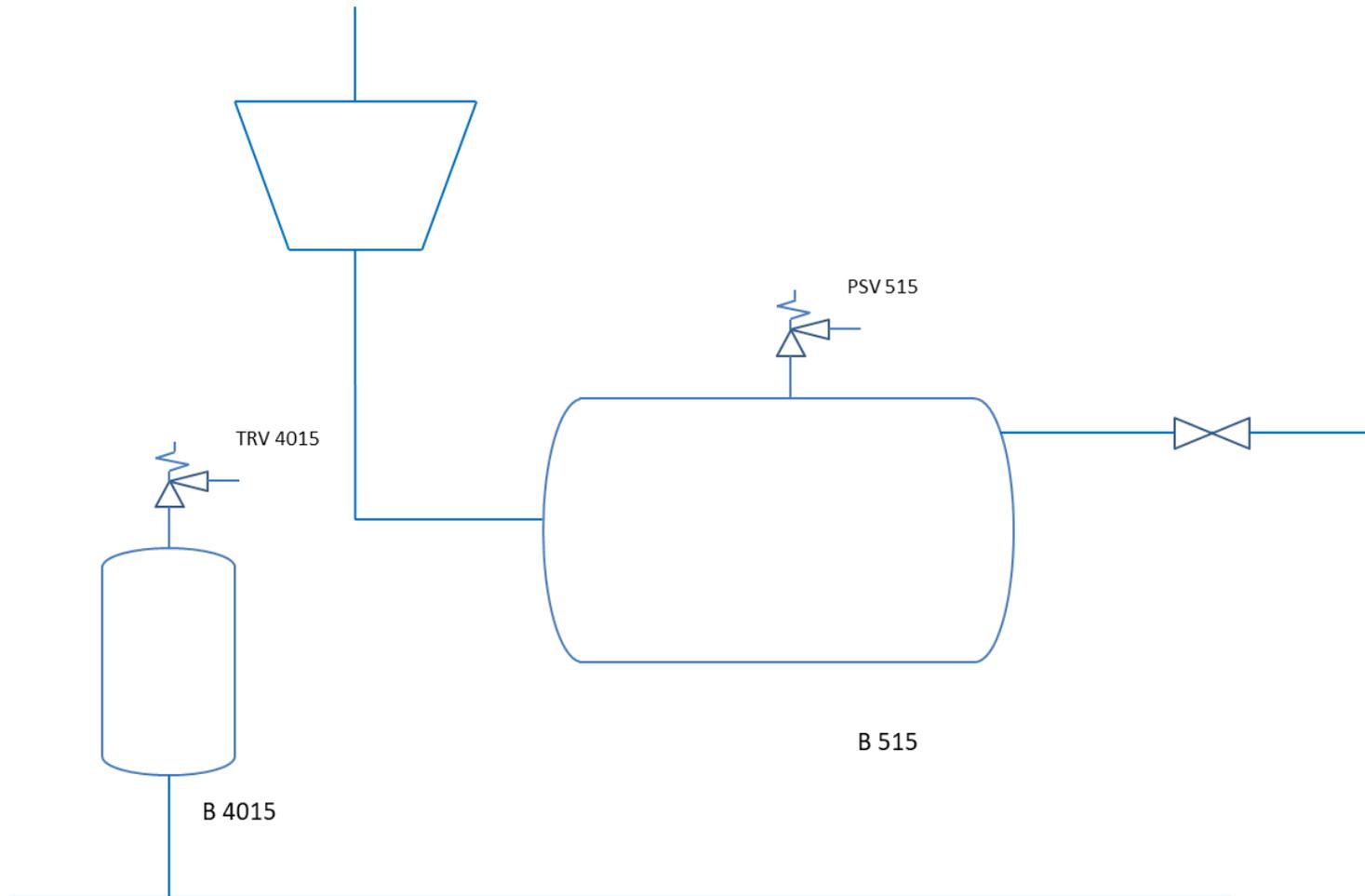
# R 900 / B 910



## LÍNEA DE VAPOR



## B 515 / B 4015



## SISTEMA DE VENDEO

