

NTP 509: Válvulas de seguridad: modos de fallo y fiabilidad



Soupapes de sécurité. Modes de défaut et fiabilité
Safety valves. Failure modes and reliability

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Las válvulas de seguridad son los elementos específicos de seguridad mayormente implicados en accidentes graves de origen químico. Esta Nota Técnica aporta criterios para identificar sus modos de fallos más frecuentes y su posibilidad de acontecimiento, a fin de poder controlar la fiabilidad del sistema.

Introducción. Fiabilidad

La definición de fiabilidad en este campo necesita ciertas precisiones. Los fallos en pruebas de ensayo son de menor gravedad que en estado de funcionamiento. En esta NTP se consideran los distintos modos de fallo y se revisan los datos de fiabilidad. Las definiciones empleadas en la fiabilidad de estos dispositivos son las siguientes: Tasa de fallos de dispositivos en funcionamiento

$$F_1 = \frac{\text{nº de fallos}}{\text{nº de años de funcionamiento}}$$

Porcentaje de fallos de dispositivos en ensayos

$$F_2 = \frac{\text{nº de fallos}}{\text{nº total de ensayos}} \times 100\%$$

A partir de ahí se define la fiabilidad de la siguiente manera:

Fiabilidad de dispositivos en funcionamiento sin fallos

$$R_1 = (1/F_1) \text{ años}$$

Porcentaje de fiabilidad de dispositivos en ensayos

$$R_2 = 100 - F_2$$

Válvulas de seguridad. Modos de fallo.

En general los dispositivos de seguridad son de diseño robusto y sin piezas rotativas sometidas a desgaste continuo. Aunque a primera vista parezcan dispositivos fiables, su funcionamiento en ensayos muestra cierta falta de fiabilidad, la cual en los procesos reales puede ser catastrófica.

El diseño de las válvulas de seguridad se ha desarrollado y refinado a través de muchos años y su fiabilidad ha mejorado al mismo tiempo. Como ejemplo, las válvulas con guía en la parte inferior han mostrado una fiabilidad inferior que las de guía en la parte superior y en consecuencia ha bajado su demanda. Las mejoras conseguidas han llevado aparejadas un mayor número de piezas que pueden afectar a la fiabilidad.

Los modos de fallo de una válvula de seguridad son:

- a. No abre a la presión de tarado.
- b. No abre completamente a la presión de alivio.
- c. Apertura prematura a presión inferior a la presión de tarado.
- d. No reasienta bien después de la apertura.
- e. Fluctuación y castañeteo de la válvula (rápidas aperturas y cierres). La fluctuación de la válvula (valve simmer or flutter) consiste en un movimiento alternativo rápido de las piezas móviles sin contacto entre el disco y el asiento. El castañeteo de la válvula (valve chatter) es el mismo tipo de movimiento con contacto intermitente entre el disco y asiento.
- f. Fuga a través del asiento de la válvula.
- g. Fuga a través del cuerpo de la válvula.
- h. Rotura del cuerpo de la válvula.

Cada uno de estos modos de fallo se puede subdividir en fallo en operación y fallo en ensayo.

El fallo de no abrir [categorías (a) y (b)] es un modo de fallo crucial y la fiabilidad de la válvula por este concepto se denomina fiabilidad primaria.

La mayoría de datos de fiabilidad se registran en el taller, en donde la principal preocupación es la condición de la válvula y la precisión de la presión de tarado en frío cuando la válvula vuelve al taller para revisión y mantenimiento de rutina. Este trabajo se lleva a cabo después de unos años de servicio de la válvula, de forma que en la investigación pueden entrar varios factores. Trabajos realizados por Aird indican que la fiabilidad de válvulas de seguridad en ensayos después de servicio es independiente del tiempo que han funcionado.

Se debe distinguir entre fallo por no abrir a la presión de tarado requerida y ajuste o medición imprecisa durante el procedimiento de tarado en frío. Las válvulas de seguridad que funcionan a temperaturas inferiores a 100 °C pueden ajustarse a la temperatura ambiente del taller. Para temperaturas superiores de funcionamiento, el ajuste resulta más impreciso si se quiere hacer en frío.

En este caso se debe aceptar el factor de corrección del fabricante o intentar el ajuste de la presión de tarado en las condiciones reales de funcionamiento. Para tener en cuenta estas variaciones se permite un cierto margen de tolerancia, normalmente especificado en normas.

Independientemente de lo expuesto, cabe resaltar el típico fallo debido a la manipulación indebida del elemento de regulación de la presión de tarado para evitar normalmente disparos frecuentes y goteos molestos. Es por ello que las válvulas de seguridad han de estar precintadas y controladas periódicamente ante esta posible anomalía.

Causas de los modos de fallo

Entre las causas de que una válvula abra a una presión superior a la de tarado (modo de fallo a) se han encontrado:

- a. Disco adherido al asiento
- b. Daño en las superficies deslizantes (eje y guías) debido a vibraciones, castañeteo o corrosión excesivos
- c. Materias extrañas dentro del sombrerete que afectan al movimiento de la válvula

En el caso de modo de fallo c) apertura prematura a presión inferior a la presión de tarado las causas más importantes encontradas han sido:

- d. Relajación del muelle (o pérdida de tensión)
- e. Fallo del resorte
- f. Tuerca de ajuste floja

La causa d) es la más común y para limitarla se debe tener en cuenta en las fases de especificación y selección. La relajación de un muelle ocurre en dos etapas: una relajación inicial inmediatamente después del tarado en frío, seguida de una relajación gradual dependiente del tiempo que sigue de forma exponencial hasta un límite. La velocidad de relajación es función del material, de la tensión y de la temperatura de funcionamiento. A temperaturas y presiones moderadas la relajación es despreciable con materiales de calidad. A temperaturas elevadas de funcionamiento, parece inevitable una cierta relajación y la presión de tarado tenderá a bajar. La relajación se puede hacer mínima mediante una selección cuidadosa del material del resorte para que se adecue a la temperatura de funcionamiento y también por una técnica de tarado en caliente. Esta técnica consiste en calentar el resorte de la válvula en el taller

hasta una temperatura superior a su temperatura normal de funcionamiento y después es comprimido por encima de su tensión normal al menos durante dos horas.

Aparte del modo de fallo por abrir a presión superior o inferior a la presión de tarado, los dos modos de fallo más comunes son el d) fallo de reasiento después del ascenso y e) fenómeno del golpeteo o castañeteo. El fallo de reasiento es un problema mecánico que puede ser causado por una desalineación temporal del disco respecto al asiento o más grave, un daño permanente en el asiento de la válvula causado por erosión o golpeteo. Una desalineación temporal se puede arreglar levantando la válvula y restableciendo luego la presión de reasiento. A veces se requiere una reducción temporal suplementaria de presión para hacer estanca la válvula. Cualquier reducción permanente en la presión de reasiento indica una pérdida de ajuste en los anillos del escape o daños en el asiento de la válvula. En cualquiera de los dos casos se debe quitar la válvula y revisarla.

La fluctuación (simmering) o el golpeteo (chattering) de la válvula ocurre cuando la presión de funcionamiento está muy cercana a la presión de tarado y se experimentan transitorios de presión. El golpeteo más que la fluctuación, predomina cuando la caída de presión en la tubería de entrada es demasiado grande o la contrapresión demasiado alta. Ya que el golpeteo de la válvula puede dañar permanentemente el asiento de la válvula, es importante ajustar el régimen de presión a la primera oportunidad.

Sistemas de contención o eliminación de las descargas

Cuando tiene lugar una descarga de un fluido a través de una válvula de seguridad u otro dispositivo de alivio se debe tener en cuenta la peligrosidad de tal descarga y disponer de sistemas para contenerla o eliminarla.

Se destacan tres categorías de sistemas:

- a. Sistemas que funcionan continuamente y están siempre disponibles ante una descarga de alivio. Ejemplo: antorcha para quemado de gases inflamables.
- b. Sistemas que funcionan normalmente a baja carga y que aumentan a plena carga cuando ocurre la descarga de alivio. Ejemplo: torre de absorción o neutralización.
- c. Sistemas que sólo se ponen en funcionamiento ante la demanda de cualquier descarga de alivio. Ejemplo: un incinerador en posición de espera o reserva.

En la categoría (a) se puede aumentar la fiabilidad de elementos esenciales de maquinaria rotativa mediante la duplicación de los equipos y con arranque automático del equipo de reserva al recibir una señal de fallo del equipo en funcionamiento. Respecto a los elementos esenciales de instrumentación, se puede mejorar duplicando y hasta triplicando los sensores y transmisores, con una toma de decisiones por votación de dos tercios en el caso de triplicación. La fiabilidad también se puede mejorar con pruebas e inspecciones periódicas.

La fiabilidad de la categoría (b) es ligeramente inferior debido a que un sensor debe detectar de forma fiable una descarga o un cambio en las condiciones de funcionamiento causado por esa misma descarga y entonces una válvula de control debe responder a ese cambio mediante un controlador.

La fiabilidad de la categoría (c) es apreciablemente inferior ya que la maquinaria debe arrancar, o encenderse los quemadores en respuesta a una descarga, con todos los problemas de funcionamiento que pueden suceder.

Accidentes típicos

Para conocer la casuística de accidentes por fallos en válvulas de seguridad se describe una serie sintetizada de accidentes típicos y sus consecuencias:

1. **Canadá. Septiembre 1983.** En el trasvase de borol mediante gas a presión desde un vagón cisterna, se rompió la válvula de seguridad del equipo de suministro de gas de relleno para el trasvase. En el vagón cisterna se produjo una subida de presión que no pudo resistir la manguera flexible de trasvase y se derramaron unos 40.000 litros de borol. Es un ejemplo con modo de fallo (h) (rotura del cuerpo) de la válvula de seguridad que hizo que no funcionara y diera lugar al aumento de presión en el vagón cisterna. El equipo de suministro de gas para el trasvase debe tener sus propios dispositivos de control de presión y de alivio de presión. El tanque desde el que se realiza el trasvase debe haberse construido con una determinada presión de diseño y también debe tener los dispositivos de alivio de presión correspondientes que le protejan contra presiones excesivas provocadas por el gas o vapor utilizado para el trasvase. También debe tener un sistema de contención o absorción para el caso de productos peligrosos.
2. **Tennessee. EE.UU. Diciembre 1983.** Una válvula de seguridad en un depósito a presión de cloruro de hidrógeno abrió a presión inferior a la de tarado, provocando una nube de vapor de HCl. La cantidad purgada fue de 3200 kg de ácloruro de hidrógeno sin daños apreciables sobre el medio ambiente.

Es un ejemplo del modo de fallo (c) apertura prematura a presión inferior al tarado. Se observa un tarado defectuoso y una falta de formación del personal y un plan de mantenimiento e inspecciones periódicas. Los líquidos corrosivos están reglamentados por la ITC-MIE-APQ-006 del Reglamento de almacenamiento de productos químicos.

3. **New Jersey, EE.UU. Junio 1978.** Una válvula de seguridad de alivio de presión en una columna de destilación de éter se rompió y se formó una nube de vapor de éter en la atmósfera. Al contacto con un foco de ignición se provocó una explosión y subsiguiente incendio con el resultado de siete personas lesionadas y daños materiales.

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

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

El grado de llenado es un aspecto de vital importancia para evitar la rotura de recipientes por dilatación de la fase líquida sin la amortiguación de la fase vapor. Este tipo de accidente muestra la necesidad de disponer una instrumentación precisa y fiable para la medición del nivel, del cual se deduce el grado de llenado según la forma del recipiente. Los grados de llenado vienen impuestos por la legislación en el Reglamento del Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera y el Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR).

5. **Quebec. Enero 1970.** Una válvula de seguridad en un tanque de almacenamiento refrigerado de etileno gas licuado falló debido a una acumulación de hielo en el conducto de descarga. El recipiente interior de aluminio y el exterior de acero que forman el tanque de almacenamiento se rompieron liberando 70 toneladas de etileno licuado. El incendio posterior destruyó totalmente el tanque de almacenamiento.

El etileno normalmente se almacena como gas licuado refrigerado, por ser su temperatura crítica 9,7 °C, inferior a la temperatura ambiente y a esta temperatura sería imposible mantenerlo en estado líquido. Para conseguir un buen aislamiento térmico se necesita una cámara aislante entre la pared interior y la exterior del tanque de almacenamiento. La descarga debe diseñarse de forma que se evite la condensación y congelación del vapor de agua de la atmósfera. Si se instala una antorcha de quemado de gases deben tomarse precauciones para evitar los riesgos siguientes:

- a. Explosión en el sistema de la antorcha
- b. Obstrucción en el sistema de la antorcha
- c. Fragilidad de las conducciones por baja temperatura
- d. Radiación térmica de la antorcha
- e. Arrastre de líquido a la antorcha

f) Emisión de productos tóxicos en la antorcha

6. **Brasil, Marzo 1972.** El trasvase de un producto caliente a un tanque de almacenamiento de gas licuado del petróleo dio lugar a un rápido aumento de presión y la válvula de seguridad no abrió. Para reducir la presión el operario abrió la válvula de drenaje que se congeló. La explosión de la nube de vapor escapada causó 39 muertos, 51 lesionados y daños materiales por valor de 4,8 millones de dólares.

Las fugas y derrames son las principales causas de incendios y explosiones en las plantas químicas y pueden dar lugar a un incendio o explosión localizado en la zona de escape, a un incendio más amplio tipo llamarada ("flash fire") o a una explosión no confinada de una nube de vapor.

Las válvulas de drenaje o purga son una fuente importante de derrames. Un incidente típico es el bloqueo de esas válvulas debido a la formación de hielo o hidrato. El bloqueo se consigue deshacer de una u otra forma pero después resulta imposible cerrar la válvula cuando ya se tiene un escape en cantidad importante.

7. **Reino Unido. Noviembre 1967.** Aumento de presión en un tanque de almacenamiento de etileno líquido. La congelación de una válvula de seguridad hizo que no abriera. El tanque reventó liberando 204 toneladas de etileno líquido. El derrame fue contenido en el cubeto de retención del tanque y se evaporó sin incidentes.

Incidente similar al caso nº 5 al que se puedan hacer las mismas consideraciones.

Datos de fiabilidad

El investigador Pearce ha realizado un estudio sobre una muestra de 1062 válvulas con una tolerancia de $\pm 10\%$ en la presión de tarado y ha mostrado una tasa de fallos del 17% de los cuales un 7% corresponden a válvulas que han empezado a abrir tarde y un 10% que lo han hecho demasiado pronto. Esto equivale a una fiabilidad del 83%. Si la muestra se subdivide en servicio limpio, medio y sucio las fiabilidades correspondientes serían 95%, 84% y 73% respectivamente. En el grupo de servicio limpio sólo 1 válvula entre 165 abrió tarde por lo que la llamada fiabilidad primaria estaba por encima del 99%. En los grupos de servicio medio y sucio la fiabilidad primaria bajó a 90% y 86%. La razón preponderante para que éstas últimas categorías abrieran tarde estaba en la tendencia de esas válvulas a pegarse, debido a la deposición de sedimentos del proceso sobre la válvula, lo cual hace sugerir el uso razonable de discos de rotura aguas arriba de la válvula de seguridad para evitar este inconveniente.

El investigador Aird, indica que de una muestra de 746 válvulas se ha tenido un 55% de fiabilidad con una tolerancia del $\pm 10\%$ en la

presión de tarado sin hacer distinción entre abrir tarde o pronto.

Entre los datos disponibles de fiabilidad de válvulas de seguridad se puede mostrar el del banco de datos del National Centre for Systems Reliability (NCSR) de la United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA).

El estudio parte de la población total de una muestra de válvulas de seguridad según los datos siguientes, reflejados en la Tabla 1. No se dispone de un análisis de la población total de la muestra por falta de definición de los fallos existentes en la mayoría de entradas. Se han podido extraer dos grandes subgrupos en donde se identifican el modo de fallo y el fluido que se trata.

Tabla 1. Muestra de válvulas de seguridad estudiadas y resultados obtenidos (fuente NCSR)

Número total de partidas	237	
Número total de válvulas de seguridad	4289 válvulas	
Experiencia total	17654 años	
Experiencia media por válvula	4,116 años	
Número total de fallos registrados	2366 fallos	
Tasa de fallos	0,134 fallos/año	
	GRUPO I	GRUPO II
Número de partidas	29	32
Número de válvulas	95	608
Funcionamiento nº años	830	2576
Nº total fallos	126	821
Tasa total de fallos nº fallos/año	0,152	0,319
Fallos primarios	3	344
Tasa de fallos primarios nº fallos primarios/año	0,0036	0,1335

Comentarios a la tabla 1

Los fallos primarios se han considerado según la definición dada para fiabilidad primaria en el apartado 2 “Válvulas de seguridad. Modos de fallo”.

En el grupo I el modo de fallo preponderante ha sido el (f) y se observan unos errores importantes por falta de calibración en las categorías (a) (b) y (c). En realidad los tres fallos clasificados en la categoría (a) están realmente descritos como “presión de alivio incorrecta” por lo que con mayor precisión se podrían haber reclasificado en la categoría (c).

La preponderancia de la categoría (f) en el grupo I indica que los fallos se han anotado en funcionamiento, mientras que se han ignorado los fallos en ensayos.

Las conclusiones sobre fiabilidad no están del todo justificadas, pero se debe destacar que con 95 válvulas de seguridad y un tiempo medio de servicio de 830 años totales de funcionamiento que corresponde a $830 \text{ años} / 95 \text{ válvulas de seguridad} = 8,7 \text{ años/válvula}$, se han tenido $115 + 3 = 118$ casos de fuga entre los 126 registrados.

En el grupo II el fallo más común es “disco pegado” (sticking) y está adscrito a las categorías (a), (b) o (d) y otro fallo se describe como “agarrotamiento” (seized) y se ha colocado en la categoría (a). Cuando no se dispone de aclaraciones complementarias se clasifica en la categoría (b) con una nota a pie de página.

Ambos grupos muestran una variación amplia de tasas de fallos según el fluido de servicio. En general los productos químicos y el dióxido de carbono han ocasionado las mayores tasas de fallos en el grupo I mientras que los fluidos limpios como el nitrógeno en el grupo I y el gas natural y el vapor de agua en el II han dado las tasas de fallos más bajas.

Hay algunas anomalías interesantes tal como la elevada tasa de fallos con helio en el grupo I y con el agua e hidrógeno en el grupo II. Una investigación más profunda en los datos disponibles limitados sugiere que la presión elevada y la contaminación de fluidos son factores contribuyentes particularmente cuando los modos de fallo son de fuga en el asiento y disco pegado.

En la Tabla II se presenta un desglose de los resultados de este estudio. Se ha añadido j) modo de fallo desconocido para completar la tabla en caso necesario y para futuras aplicaciones. Un análisis más completo de la fiabilidad necesitaría datos de cada aplicación y de cada fallo.

Tabla 2. Fiabilidad de los diferentes tipos de válvulas y modo de fallo

Grupo	Fluido en servicio	Nº válvulas de seguridad	Total años de funcionamiento	Nº de fallos	Tasa de fallos por año	Nº DE FALLOS SEGÚN MODO DE FALLO								
						(a) [1]	(b) [2]	(c)	(d)	(e)	(f)	(h)	(g)	(j)
I	Vapor de agua	33	280	39	0,139						39			
I	Agua	21	210	45	0,214			3	1		41			
I	Helio	22	150	34	0,226						31	3		
I	Nitrógeno	19	190	8	0,042	3		1			4			
I	Total	95	830	126	0,152	3		4	1		115	3		
II	Vapor de agua	117	534	126	0,236	1	42	46	1	1	35			
II	Agua	60	277	140	0,505	10	61	31			38			
II	Productos químicos	12	57	38	0,666	4	11	8			15			
II	Aceite de lubricación/hidráulico	29	141	47	0,333	1	19	9			18			
II	Aire/nitrógeno	73	358	102	0,285	3	39	38		2	19		1	
II	Gas natural	73	144	18	0,125		7	7	1		3			
II	Amoniaco	83	390	90	0,231	6	37	25			22			
II	Dióxido de carbono	104	401	123	0,307	4	46	38		1	29		5	

II	Mezclas de hidrógeno	57	274	137	0,500	8	45	38		1	45			
II	Total	608	2576	821	0,319	37	307	240	2	5	224		6	

[1] En el grupo I este modo de fallo está asignado a presión de alivio incorrecta.

[2] En el grupo II este modo de fallo está asignado a disco pegado.

Bibliografía

(1) PARRY, G.F.

Relief Systems Handbook

Rugby, Reino Unido, Institution of Chemical Engineers, 1992