Leybold

Manual de seguridad del sistema de vacío

Manual de seguridad

Instrucciones de funcionamiento 300314311_006_C1

Traducción de las instrucciones originales

Aviso de copyright

©Copyright 2026. Todos los derechos reservados.

Publicado: 9/9/2026

Contenido

1 Introducción. 6

1.1 Ámbito de esta publicación 6

1.2 Análisis de riesgos 7

1.3 Momento en que surgen los riesgos. 7

1.3.1 Diseño 8

1.3.2 Construcción. 8

1.3.3 Funcionamiento / Puesta en marcha. 8

1.3.4 Mantenimiento / Desmantelamiento. 9

2 Fuentes de peligro químicas. 10

2.1 Gases del proceso peligrosos 10

2.2 Reacciones químicas. 10

2.2.1 Reacciones homogéneas. 10

2.2.2 Reacciones heterogéneas. 10

2.2.3 Contaminación cruzada. 11

2.3 Materiales inflamables/explosivos. 12

2.3.1 Riesgos de explosión. 13

2.3.2 Fuentes de mezclas de gases o vapores potencialmente explosivas. 14

2.3.3 Cómo evitar la zona inflamable. 15

2.3.4 Estanqueidad (fuga de aire atmosférico). 19

2.4 Oxidantes. 20

2.5 Materiales pirofóricos. 21

2.6 Material tóxico. 22

2.7 Materiales corrosivos. 24

2.8 Resumen: fuentes de peligro químicas. 26

3 Fuentes de peligro físicas. 27

3.1 Sobrepresión en el escape de la bomba. 27

3.1.1 Protección contra la sobrepresión del escape. 28

3.1.2 Obstrucción del escape. 28

3.2 Sobrepresión en la entrada. 29

3.2.1 Suministros de gas comprimido y contrapresión. 29

3.2.2 Sobrepresión de los sistemas de purga. 29

3.2.3 Funcionamiento incorrecto de la bomba. 30

3.3 Temperatura. 30

Contenido

3.4 Resumen: fuentes de peligro físicas. 31

4 Diseño del sistema. 33

4.1 Índices de presión de un sistema. 33

4.2 Eliminación de volúmenes estancados. 33

4.3 Sistemas de extracción de gases de escape. 34

4.4 Uso de sistemas de protección de supresores de llamas (sistemas HazLoc). 34

4.5 Fuga de agua en el sistema de vacío. 35

4.6 Retrosucción de los gases de escape. 35

4.7 Fuentes de ignición. 35

4.8 Resumen: diseño del sistema. 37

5 Prácticas generales. 38

5.1 Formación de depósitos en conductos. 38

5.2 Uso de convertidores de frecuencia: uso de contraseñas. 38

5.3 Posición de válvula de entrada. 38

5.4 Colectores de calor. 39

5.5 Colectores de frío. 39

5.6 Condensadores. 39

5.7 Niveles de integridad del sistema. 39

6 Elección correcta del equipo. 41

6.1 Bombas de pistón y bombas rotativas de paletas con cierre de aceite. 42

6.2 Bombas en seco. 42

6.3 Diseño de la tubería. 43

6.3.1 Fuelles. 43

6.3.2 Tuberías flexibles. 43

6.3.3 Puntos de sujeción. 43

6.3.4 Juntas. 43

6.4 Protección física contra sobrepresiones. 43

6.4.1 Descarga de presión. 44

6.4.2 Alarma/limitador de sobrepresión. 44

6.4.3 Reguladores de presión. 44

6.4.4 Supresores de llamas. 44

6.5 Sistemas de purga. 45

Contenido

6.6 Resumen: elección correcta del equipo. 45

7 Procedimiento de uso y formación. 46

8 Modificación de los sistemas de vacío. 48

9 Resumen. 49

1 Introducción

1.1 Ámbito de esta publicación



ADVERTENCIA:

El incumplimiento de las instrucciones de seguridad proporcionadas en este manual y en el manual de instrucciones de la bomba correspondiente puede causar daños graves o la muerte.

Este documento registra nuestra experiencia en la especificación, el diseño, el funcionamiento y el mantenimiento de bombas de vacío y sistemas de vacío en beneficio de los usuarios de bombas y sistemas de bombeo. Asimismo, identifica algunos de los posibles riesgos que pueden surgir y ofrece directrices para ayudar a minimizar la probabilidad de que se produzcan riesgos de seguridad y garantizar el manejo adecuado en caso de que surja algún riesgo. Esto es importante, ya que el aumento del uso de productos químicos de proceso peligrosos crea una mayor posibilidad de que se produzcan estados peligrosos.

La información contenida en este documento no puede considerarse como una lista exhaustiva, sino que tiene por objeto comunicar peligros previsibles. Es esencial que cualquier usuario de equipos de vacío realice su propio análisis de riesgos y peligros para demostrar el cumplimiento de los requisitos normativos.

La estructura de este documento tiene en cuenta la seguridad en los siguientes ámbitos:

- Materiales de proceso
- Presión
- Diseño del sistema
- Selección de equipos
- Funcionamiento del sistema y formación

Todos estos ámbitos requieren una cuidadosa consideración para minimizar el riesgo.

Se espera que todas las personas encargadas de especificar, diseñar, instalar, manejar o mantener las bombas y los sistemas de vacío lean este documento. Se recomienda la lectura conjuntamente con:

- El Manual de instrucciones que se entrega con los equipos.
- La información que brindan los proveedores de gases y productos químicos del proceso.
- La información que suministra el departamento de seguridad.
- Manual de la bomba
- Manual del sistema
- Análisis de la operatividad y los riesgos (HAZOP)
- Fichas técnicas de seguridad de materiales
- Normas generales, directiva de maquinaria, etc.

Declinamos cualquier responsabilidad y garantía relacionada con la precisión, la práctica, la seguridad y los resultados de la información, los procedimientos o las aplicaciones que se describen en este documento. No aceptamos responsabilidad alguna por cualquier pérdida o daños derivados de la confianza depositada en la información de esta presentación o en

caso de que la información proporcionada sea incorrecta o incompleta de algún modo. Tenga en cuenta que la información que consta en este documento tiene únicamente carácter consultivo y, aunque podamos ofrecer directrices sobre los posibles peligros relacionados con el uso de materiales peligrosos, es responsabilidad del usuario final realizar una evaluación de riesgos y un análisis de riesgos específico para las operaciones y el entorno, así como cumplir las normativas estatales.

Si necesita más información sobre la adecuación de los productos para la aplicación de un proceso, o sobre cuestiones de seguridad de las bombas o los sistemas de vacío, póngase en contacto con su proveedor o con nosotros.

1.2 Análisis de riesgos

Las técnicas para el análisis de riesgos ofrecen un enfoque estructurado en cuanto a la identificación y el análisis de los riesgos que pueden surgir en un sistema en condiciones de uso normales, así como los riesgos que se pueden presentar en condiciones de avería. Dichas técnicas proporcionan un método para la gestión de riesgos y, en muchas circunstancias, su uso puede ser exigido por ley. Para garantizar una eficacia completa, los análisis de riesgos deben comenzar en la etapa de diseño inicial del sistema y continuar durante la instalación y el funcionamiento, así como en el mantenimiento y desmantelamiento del sistema.

El estudio detallado de las técnicas de análisis de riesgos está fuera del ámbito de esta publicación. No obstante, muchas de estas técnicas se describen en otros lugares. Por ejemplo, una técnica comúnmente utilizada en la industria de procesamiento de productos químicos es la del Estudio de operatividad y riesgos (HAZOP, por sus siglas en inglés). Se trata de un procedimiento de análisis de riesgos que se ocupa de identificar posibles peligros y problemas de funcionamiento.

Por lo general, los análisis de riesgos generan información sobre los tipos de riesgos, su gravedad y la probabilidad de que se produzcan. Esta información es útil para decidir cuál es la mejor manera de reducir los efectos de los riesgos a niveles aceptables. En función del origen del riesgo, es posible que pueda eliminarlo, reducir su gravedad o disminuir la probabilidad de que este se produzca. No obstante, es poco común que los riesgos se puedan eliminar por completo.

Debe tener en cuenta todos los efectos posibles de un riesgo a la hora de decidir cuál es la mejor manera de gestionarlo. Por ejemplo, una superficie caliente pequeña puede presentar un riesgo menor para un operador, ya que podría provocar una quemadura. Para reducir la probabilidad de que se produzca una quemadura, el diseñador del sistema puede colocar una advertencia visual que identifique la superficie caliente o una protección alrededor de dicha superficie. Sin embargo, el análisis de riesgos del sistema también puede indicar que esta misma superficie caliente podría constituir una fuente de ignición para los vapores inflamables, lo que podría dar lugar a una explosión o a la liberación de una nube de vapores tóxicos. Para reducir la probabilidad de ignición, el diseñador del sistema debe reducir la temperatura de la superficie caliente o asegurarse de que los vapores inflamables no puedan entrar en contacto con dicha superficie.

1.3 Momento en que surgen los riesgos

Los riesgos pueden surgir durante todas las fases de la vida útil de un sistema. Estas fases son:

- Diseño

- Construcción
- Funcionamiento / Puesta en marcha
- Mantenimiento / Desmantelamiento

A continuación, se resumen los tipos de problemas que pueden surgir en cada fase. Para todos los casos, debe saber que únicamente podrá reducir los riesgos del sistema si conoce al detalle el conjunto de los equipos y de los procesos, así como la aplicación del mismo. En caso de duda, solicite más información o asesoramiento a sus proveedores.

1.3.1 Diseño

A la hora de diseñar el sistema, debe seleccionar el tipo de equipos adecuado para su aplicación. Debe tener en cuenta:

- la especificación técnica de los equipos;
- los materiales utilizados en la construcción de los equipos;
- los insumos de funcionamiento que se emplean con los equipos (como lubricantes y fluidos);
- las condiciones y los materiales del proceso.

También debe considerar la adecuación general de los equipos para su aplicación y garantizar que estos siempre se utilicen dentro de las condiciones de funcionamiento especificadas.

Deberá elaborar procedimientos de diseño que garanticen que los errores en el diseño se reduzcan a un nivel mínimo. Dichos procedimientos deben incluir una comprobación independiente de los cálculos de diseño, así como la consulta de los parámetros respectivos.

El análisis de los riesgos siempre debe formar parte de la revisión del diseño. Puede eliminar muchos posibles peligros si considera cuidadosamente los equipos que se utilizan en su sistema.

1.3.2 Construcción

Para reducir la probabilidad de que se produzcan riesgos durante la construcción, debe contar con personal cualificado y con experiencia, así como utilizar procedimientos de control de calidad. El personal cualificado puede identificar los componentes adecuados que se necesitan durante el montaje, así como componentes y equipos defectuosos o con problemas de fabricación. Los procedimientos de control de calidad le permitirán identificar y rectificar defectos de fabricación, y garantizarán el cumplimiento estricto de las especificaciones de diseño.

El personal debe tener especial cuidado y respetar todas las precauciones de seguridad al instalar equipos nuevos en un sistema en el que se hayan bombeado o producido sustancias tóxicas, corrosivas, inflamables, asfixiantes, pirofóricas u otras sustancias peligrosas, o que todavía pueda contenerlas.

La instalación de equipos eléctricos debe correr a cargo de personal cualificado y con experiencia, y realizarse de acuerdo con las normativas eléctricas locales y nacionales que resulten de aplicación.

1.3.3 Funcionamiento / Puesta en marcha

Pueden surgir riesgos durante el funcionamiento por averías en los equipos y los componentes como resultado de la antigüedad, el uso incorrecto o el mantenimiento inadecuado. Para reducir la probabilidad de que surjan tales riesgos, debe impartir la formación adecuada sobre el uso

(y el mantenimiento) de los equipos. Cuando sea necesario, consulte la información proporcionada por nosotros y por los demás proveedores a través de manuales de instrucciones, cursos de formación y servicios posventa.

1.3.4 Mantenimiento / Desmantelamiento



ADVERTENCIA:

Se debe realizar un análisis de riesgos completo que incluya todos los procedimientos de mantenimiento. No realice ningún mantenimiento sin tener en cuenta los posibles riesgos y el equipo de protección necesario.

Para evitar que el personal entre en contacto con sustancias peligrosas, es preciso extremar la precaución y respetar todas las medidas de seguridad mientras se realizan tareas de mantenimiento en un sistema en el que se hayan bombeado o producido sustancias tóxicas, corrosivas, inflamables, pirofóricas, asfixiantes o de otro tipo.

Todos los sistemas de vacío requieren mantenimiento en algún momento y la calidad de este mantenimiento puede tener un efecto significativo en la seguridad del sistema. El análisis de riesgos debe tener en cuenta los detalles del procedimiento de mantenimiento para asegurarse de que no produzca un estado peligroso. Estos son algunos puntos que se deben tener en cuenta:

- El interior del sistema de vacío puede estar contaminado con materiales de proceso que pueden ser peligrosos para la salud.
- Es posible que se hayan seleccionado materiales concretos, como aceites de PFPE, para su uso con los gases del proceso. Si estos materiales se cambian durante el mantenimiento, es posible que se cree una nueva situación peligrosa.
- Las bombas que se detienen inesperadamente pueden contener gases del proceso peligrosos; en este caso, puede ser necesario llevar a cabo procedimientos especiales para proteger al personal cuando se retire la bomba.
- Es posible que no se observe una situación de sobrepresión dentro de un sistema de vacío hasta que se retira un componente y se fuerza su salida bajo presión.
- El equipo eléctrico debe aislarse antes de iniciar cualquier procedimiento de mantenimiento en el sistema de vacío.
- Tenga en cuenta el efecto de los disolventes de limpieza en el sistema de vacío, especialmente si son corrosivos o inflamables.

También se debe considerar la creación de un programa de mantenimiento planificado y la eliminación segura de componentes que podrían estar contaminados con sustancias peligrosas. Debe seguir los consejos de mantenimiento que se proporcionan en los manuales de instrucciones de todos los equipos para garantizar un funcionamiento seguro y fiable. Normalmente, los sistemas HazLoc tienen requisitos adicionales.

2 Fuentes de peligro químicas

2.1 Gases del proceso peligrosos

Los gases y vapores peligrosos se pueden definir como materiales que podrían adscribirse a una o a varias de las siguientes categorías:

- Inflamables
- Corrosivos
- Pirofóricos
- Radioactivos
- Tóxicos
- Explosivos
- Oxidantes

Debido a su naturaleza peligrosa, es esencial tener en cuenta sus características y la forma en que pueden afectar a la seguridad del sistema de vacío. Es normal hablar de estos tipos de gases del proceso con su proveedor de vacío al especificar un sistema de vacío; sin embargo, los siguientes puntos ofrecen una descripción general de algunos de los peligros.

Nota:
La reacción de gases del proceso no peligrosos dentro de un sistema de vacío a veces puede generar subproductos que pueden considerarse peligrosos.

2.2 Reacciones químicas

Debe considerar atentamente todas las posibles reacciones químicas que se pueden producir en cualquier momento dentro del sistema de vacío bajo condiciones de uso normales, de uso incorrecto o de avería. En particular, debe prestar especial atención a las reacciones de gases y vapores que pueden provocar explosiones. La experiencia demuestra que se han producido explosiones en casos en los que el diseñador del sistema no había tenido en cuenta originalmente los materiales utilizados y en los que no había considerado el modo de avería de dichos equipos.

2.2.1 Reacciones homogéneas

Las reacciones homogéneas se producen en la fase gaseosa entre dos o más tipos de moléculas de gas. Las reacciones por combustión de gases se presentan comúnmente de esta forma. Por ejemplo, a nuestro entender, la reacción entre el silano (SiH_4) y el oxígeno (O_2) siempre es homogénea. Por lo tanto, si se producen tales reacciones en un proceso de fabricación, debe controlar atentamente la presión del proceso y las concentraciones de reactivos para evitar que se produzcan velocidades de reacción excesivas.

2.2.2 Reacciones heterogéneas

Para que se produzcan reacciones heterogéneas, es preciso que haya una superficie sólida, puesto que algunas moléculas de gas solo reaccionan cuando son adsorbidas en una superficie y nunca en la fase gaseosa a presiones bajas. Este tipo de reacción es ideal para determinados procesos, ya que minimiza los efectos de las reacciones que se producen dentro de la cámara del proceso, reduce la formación de partículas y disminuye la probabilidad de contaminación.

La mayoría de las reacciones heterogéneas se convierten en homogéneas a presiones más altas, normalmente muy por debajo de la presión atmosférica. Esto significa que la forma en que los gases reaccionan en las cámaras del proceso no se asemeja necesariamente a la forma en que reaccionan cuando los comprime una bomba de vacío.

2.2.3 Contaminación cruzada

Los sistemas de vacío suelen cambiarse para usarse con aplicaciones en las que se utilizan diferentes gases del proceso, ya sea porque el equipo se reutiliza en una aplicación diferente o incluso debido a diferentes pasos del proceso en una aplicación determinada.

En todos estos casos, es necesario tener en cuenta la posibilidad de contaminación cruzada entre los gases de proceso, los vapores o los materiales de un proceso y los gases de proceso, los vapores o los materiales de otro. En algunos casos, pueden producirse reacciones peligrosas entre dos materiales que normalmente no presentan ningún peligro cuando se bombean por separado.

En los casos en los que pueden producirse reacciones peligrosas, es normal purgar con un gas inerte entre los pasos del proceso durante ~15 minutos, lo que suele eliminar el primer material antes de que se bombee el segundo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, en algunos sistemas de vacío, existe la posibilidad de que queden bolsas de gas del proceso atrapadas que no se eliminen eficazmente mediante el paso de purga. En los casos en los que se pueda producir una reacción peligrosa, se debe tener en cuenta el diseño del sistema de vacío y la identificación de cualquier volumen retenido.

Purgas previas/posteriores al proceso

Para evitar reacciones químicas no deseadas, es una práctica habitual purgar las bombas de vacío con un gas de purga inerte durante 15 minutos antes y después de admitir los gases del proceso. Una purga previa al proceso eliminará todos los rastros de oxígeno atmosférico y agua, mientras que una purga posterior al proceso eliminará los gases del proceso residuales.

Problemas con reacciones anómalas

Se pueden producir reacciones anómalas cuando los productos químicos entran en contacto con gases o materiales que el diseñador del sistema no haya previsto. Esto puede suceder, por ejemplo, cuando existe una fuga que permite que los gases atmosféricos penetren en el sistema o que los gases tóxicos, inflamables, explosivos u otros gases peligrosos se escapen hacia la atmósfera.

Para evitar que se produzcan estas reacciones, debe mantener una estanqueidad de 1×10^{-3} mbar l/s (1×10^{-1} Pa l/s) o inferior en el sistema. Las aplicaciones de vacío alto suelen mantener una estanqueidad de 1×10^{-5} mbar l/s (1×10^{-3} Pa l/s) o inferior. Asimismo, debe asegurarse de que todas las válvulas del sistema estén ajustadas herméticamente en sus asientos.

Los gases que normalmente no entran en contacto entre sí durante el ciclo del proceso pueden mezclarse en el sistema de bombeo y en las tuberías de escape.

Cuando se desactiva una bomba de vacío con vacío en la entrada, se produce una retrosucción de los gases de escape de los conductos o del sistema de escape. Si este gas contiene aire/oxígeno, podrían producirse reacciones químicas no deseadas con los gases del proceso o depósitos internos. Se recomienda instalar una válvula de control sin retorno en el escape de la bomba de vacío para ralentizar el flujo de retorno de los gases de escape. Además, el uso de una purga de nitrógeno en la bomba de vacío garantizará la exclusión del aire del sistema de vacío.

Es posible que, tras completar los procedimientos de mantenimiento rutinarios, quede vapor de agua o soluciones de limpieza en la cámara del proceso. Esto puede producirse después de lavar y limpiar la cámara del proceso. El vapor de agua también puede entrar en el sistema a través de los conductos y los depuradores de escape.

Cuando se utilicen disolventes para limpiar los depósitos del proceso del sistema de vacío, es importante comprobar que el disolvente seleccionado sea compatible con todos los materiales del proceso.

Cambio de fase

Un sistema de vacío está diseñado para subir la presión de los gases y vapores bombeados del vacío hasta la presión atmosférica para posibilitar que los materiales cambien de fase a una forma líquida o incluso sólida. Los materiales que han sufrido un cambio de fase pueden causar peligros como conductos bloqueados, corrosión o incluso materiales inflamables. Normalmente, el cambio de fase se producirá a medida que la presión se aproxime a la atmósfera dentro del bombeo en seco; sin embargo, en condiciones ambientales muy frías, es posible que los materiales sufran un cambio de fase en la línea de entrada a la bomba de vacío.

Si esto puede crear un estado peligroso, se recomienda utilizar el calentamiento de trazas o gases de purga inertes secos.

Si se forman partículas sólidas en la línea de entrada, existe la posibilidad de que se formen capas en las paredes que, con el tiempo, pueden caerse y trasladarse hacia la bomba. Consulte el apartado *Formación de depósitos en conductos* en la página 38.

Si se desea recuperar los materiales condensados, se recomienda instalar un condensador y un recipiente en el sistema de vacío donde estos materiales puedan recogerse de forma segura.

2.3 Materiales inflamables/explosivos

Muchos gases y polvos, como el hidrógeno (H_2), el acetileno (C_2H_2), el propano (C_3H_8) y polvos de silicio finamente dividido, son inflamables o explosivos en ciertas concentraciones en un oxidante si se combinan con una fuente de ignición. Una fuente de ignición puede surgir, por ejemplo, a partir de una acumulación de calor localizada. Esta cuestión se analiza en *Fuentes de ignición* en la página 35.

Los vapores y gases inflamables son aquellos que, cuando se mezclan con una determinada cantidad de aire u oxidante, pueden crear una mezcla explosiva, pero no todas las concentraciones son peligrosas.

Una forma de evitar el riesgo de explosión es asegurándose de mantener la concentración de la mezcla potencialmente inflamable fuera de la zona inflamable. Se proporcionan más detalles en *Cómo evitar la zona inflamable* en la página 15.

Otro método que puede utilizar para reducir la probabilidad de explosión es eliminar la fuente de ignición. Se proporcionan más detalles en *Fuentes de ignición* en la página 35.

Las concentraciones peligrosas se encuentran dentro del intervalo inflamable y generalmente se denominan “atmósferas potencialmente explosivas” debido a que pueden inflamarse y provocar una explosión. El intervalo inflamable es el intervalo de concentración de combustible/aire entre el límite inflamable superior y el límite inflamable inferior. Las mezclas en este intervalo se queman o explotan si entran en contacto con una fuente de ignición.

Cuando no sea posible evitar la zona inflamable, debe garantizar que el diseño de los equipos pueda evitar o contener toda explosión resultante sin que se escape o transmita la llama a la atmósfera exterior. El uso de los supresores de llamas se trata en *Uso de sistemas de protección de supresores de llamas (sistemas HazLoc)* en la página 34. Si la atmósfera externa de su sistema de vacío es peligrosa, debe asegurarse de que todos los equipos sean adecuados para ella.

HazLoc proporciona directrices claras sobre el diseño de los que equipos que se utilizarán en atmósferas potencialmente explosivas.

Cuando sea posible evitar el bombeo en atmósferas potencialmente explosivas en todas las condiciones, se pueden usar todos nuestros tipos de bombas de vacío para el bombeo de vapores o gases inflamables.

Por lo general, la fuente de los riesgos de explosión se incluye en una de las categorías siguientes:

- Oxidantes
- Materiales inflamables / explosivos
- Materiales pirofóricos
- Azida sódica

Nota:

En los países de la Unión Europea (y en otros), los proveedores de materiales de procesos tienen la obligación legal de publicar los datos físicos y químicos de los materiales que venden (normalmente en la forma de fichas técnicas de seguridad de los materiales). Los datos de un material deben incluir, cuando corresponda, información sobre los límites máximos y mínimos de explosión, las propiedades físicas y termodinámicas del material y cualquier riesgo para la salud asociado con el uso de dicho material. Consulte esta información a modo de guía.

2.3.1 Riesgos de explosión

Nota:

Ofrecemos bombas que cumplen la directiva europea ATEX relativa a equipos para uso en atmósferas potencialmente explosivas.

Las explosiones inesperadas se producen, en todos los casos, por un incumplimiento de las directrices de seguridad. No obstante, algunos de los casos de explosiones han sido extremadamente violentos y podrían haber provocado lesiones graves o incluso la muerte.

Las causas habituales de la ruptura violenta de un componente del sistema de vacío son la ignición de materiales inflamables, así como la obstrucción o la restricción del escape de la bomba. Para evitar riesgos, debe prestar

atención a las siguientes situaciones a fin de ayudar a garantizar el funcionamiento seguro de las bombas y los sistemas de vacío.

- A menos que su sistema se haya diseñado para bombear material en concentraciones que podrían provocar su ignición en la bomba de vacío, debe asegurarse de que las mezclas de inflamables y oxidantes estén fuera del intervalo de inflamabilidad. Para ello, puede utilizar una purga inerte. Consulte el apartado *Cómo evitar la zona inflamable* en la página 15.
- Asegúrese de que no puedan producirse obstrucciones del escape durante el funcionamiento, ya sea debido a componentes mecánicos (por ejemplo, válvulas o espacios) o a causa del depósito de materiales o derivados del proceso en las tuberías, los filtros u otros componentes del escape, a menos que su sistema se haya diseñado para soportarlas.
- Utilice únicamente aceites de PFPE (perfluoropoliéter) en puntos de los mecanismos de bombeo que están expuestos a altas concentraciones de oxígeno u otros oxidantes. El uso de otros tipos de aceites que se comercializan como «no inflamables» solo podría ser apropiado con concentraciones de oxidantes de hasta el 30 % v/v.
- Asegúrese de que no pueda producirse la sobrepresión accidental de un sistema de vacío aislado o cerrado intencionalmente, por ejemplo, como resultado de una avería en un regulador de presión o en un sistema de control de purga.
- En caso de que un producto bombeado pueda reaccionar de forma violenta con agua, se recomienda utilizar un material refrigerante que no sea agua (por ejemplo, un fluido de transmisión de calor) en el circuito de refrigeración. Póngase en contacto con nosotros para obtener más información.

Los materiales explosivos pueden reaccionar sin la presencia de aire o de un oxidante, por lo que son especialmente peligrosos cuando se bombean.

Pueden formarse sólidos explosivos de polisilicio en sistemas de vacío que se acumularán en superficies horizontales. Se puede minimizar la cantidad de material que se forma realizando regularmente un paso de ataque con un oxidante fuerte como NF_3 o SF_6. Esto garantiza que haya menos material en la cámara de vacío y reduce la posibilidad de que se produzca un evento peligroso. Se debe prestar especial atención al diseño del sistema de vacío para evitar volúmenes en los que se puedan formar depósitos de polisilicio, pero que no sean purgados eficazmente por los gases de ataque. Un ejemplo común de este tipo de diseño son los fuelles horizontales en los que se pueden formar depósitos dentro de las circunvoluciones, pero los gases de ataque solo pueden atacar la pequeña superficie expuesta.

La solución consiste en evitar el uso de fuelles o montarlos en posición vertical.

2.3.2 Fuentes de mezclas de gases o vapores potencialmente explosivas

Cuando un gas o un vapor inflamable se combina con la concentración correcta de oxígeno u otro oxidante apropiado, formará una mezcla potencialmente explosiva que puede arder ante la presencia de una fuente de ignición.

Aunque, por lo general, esto resulta evidente si un material bombeado es potencialmente explosivo, según nuestra experiencia, hay determinadas circunstancias en las que se genera una mezcla potencialmente explosiva debido a condiciones que no se tuvieron en cuenta a la hora de diseñar

el sistema para el proceso. Por ello, se recomienda identificar todas las posibles condiciones del proceso y las posibles fuentes de mezclas potencialmente peligrosas que podría generar el equipo. A continuación, se mencionan algunos ejemplos obtenidos a través de nuestra experiencia, aunque esta lista no es de ningún modo exhaustiva:

- **Contaminación cruzada**: cuando una bomba de vacío se utiliza en varios procedimientos, es posible que su uso con materiales individuales sea seguro, pero si la bomba no se purga antes de emplearla con otro material, se puede producir una contaminación cruzada con reacciones inesperadas.
- **Líquidos de limpieza**: a pesar de que una aplicación se pueda considerar adecuada, el uso de líquidos de limpieza inflamables y el secado posterior mediante la evacuación a través de la bomba de vacío puede crear una mezcla potencialmente explosiva.
- **Materiales imprevistos**: en procedimientos de «vacío interno» en los que la bomba de vacío se utiliza para proporcionar un sistema de vacío distribuido, es posible que se bombeen materiales inflamables que no se tuvieron en cuenta durante el diseño del sistema. Estos materiales deben presentar temperaturas de autoignición inferiores a las temperaturas internas o la clasificación de temperatura de la bomba de vacío.
- **Vapores disueltos**: pueden evolucionar durante el funcionamiento del proceso, por lo que se debe prestar atención a la hora de elegir el rango de temperatura interna correcto para su proceso. Normalmente, en el mercado de procesos químicos, esto está previsto en los requisitos HazLoc.
- **Fugas de aire**: la entrada accidental de aire o de oxidante en un sistema puede cambiar la concentración de un gas o un vapor inflamable y generar una mezcla potencialmente explosiva.
- **Líquidos de sellado inflamables**: cuando un líquido inflamable se utiliza como líquido de sellado de una bomba de vacío de anillo líquido, la entrada de aire generará una mezcla interna potencialmente explosiva.
- **Materiales del proceso condensados**: si existe la posibilidad de que se condense material inflamable dentro del sistema, debe ser consciente de que este podría reaccionar con oxidantes de otras fases o con aire (por ejemplo, en el escape). Para evitarlo, controle que la temperatura o la presión parcial estén a un nivel adecuado.

2.3.3 Cómo evitar la zona inflamable

Un material inflamable solo creará una atmósfera potencialmente explosiva si se combina con aire o con oxígeno u otro oxidante y su concentración está comprendida entre el Límite de inflamabilidad inferior, LFL (o Límite de explosión inferior, LEL), y el Límite de inflamabilidad superior, UFL (o Límite de explosión superior, UEL). Tenga en cuenta que la mayoría de los datos presentes en la bibliografía hacen referencia a los límites de inflamabilidad en aire, es decir, cuando el oxígeno es el oxidante. Toda la información que proporcionemos a continuación se basará en esa premisa.

Para que sea potencialmente explosivo, también es necesario que la concentración de oxígeno sea superior a la Concentración de oxígeno mínima, MOC (o Concentración de oxígeno limitadora, LOC). La MOC (o LOC) de la mayoría de los gases inflamables es del 5 % vol. o superior

Fuentes de peligro químicas

Nota:

Esto no se aplica a los materiales pirofóricos que requieren precauciones especiales.

Existen varias estrategias que se pueden utilizar para evitar el funcionamiento con mezclas de gases en la zona inflamable. La selección de la estrategia dependerá del resultado de la evaluación de riesgos (análisis de riesgos) del proceso y del sistema de bombeo:

De acuerdo con la Directiva de la Unión Europea sobre atmósferas explosivas («ATEX 114» y 2014/34/CE, respectivamente), el método preferido para garantizar la seguridad de los gases inflamables es asegurarse de que su concentración en el aire no caiga dentro del intervalo inflamable, garantizando que no puedan quemarse en caso de que se produzca una fuente de ignición. Por lo tanto, es necesario realizar una de las siguientes acciones:

- **Mantener la concentración de gases inflamables por debajo del LFL (o LEL)**

  Para minimizar el riesgo de que gases inflamables penetren accidentalmente en la zona inflamable, se debe utilizar un margen de seguridad de funcionamiento por debajo del LFL (o LEL).

  El usuario deberá calcular un margen de seguridad basándose en una evaluación de riesgos. Algunas autoridades recomiendan mantener la concentración por debajo del 25 % del LFL (o LEL).

  El método más habitual para mantener una concentración adecuada por debajo del LFL (o LEL) es la dilución con una purga de gas inerte (por ejemplo, nitrógeno), que se introduce en la entrada de la bomba o en las conexiones de purga. La integridad requerida del sistema de dilución y de cualquier alarma o bloqueo dependerá de la zona de peligro que podría surgir en caso de que fallase el sistema de dilución.

  El límite inferior inflamable se puede encontrar normalmente en la MSDS (ficha técnica de seguridad de materiales) proporcionada por los proveedores del gas o vapor. Es la concentración mínima de aire/oxidante en la que una mezcla de gases inflamables podría prenderse y mantener una llama o provocar una explosión.

  Para evitar una atmósfera potencialmente explosiva y proporcionar un margen de seguridad, es necesario diluir con un gas inerte hasta que la concentración de combustible/aire [u oxidante] sea el 25 % de la concentración en el límite inferior de inflamabilidad.

  Este es uno de los modos de funcionamiento preferidos, ya que el efecto de una fuga de aire en el sistema de vacío solo diluye aún más los vapores/gases inflamables; sin embargo, es necesario considerar el sistema de gas inerte como un sistema de seguridad esencial.

  Nota:

  Asegúrese de tomar las precauciones apropiadas para evitar el riesgo de asfixia.

- **Mantener la concentración de gases inflamables por encima del UFL (o UEL)**

  El límite superior inflamable se puede encontrar normalmente en la MSDS proporcionada por los proveedores del gas o vapor. Es la concentración máxima de aire/oxidante en la que una mezcla de gases inflamables podría prenderse y mantener una llama o provocar una explosión.

Para evitar una atmósfera potencialmente explosiva y proporcionar un margen de seguridad, es necesario limitar la concentración de aire/oxidante al 60 % de la concentración requerida en el límite superior de inflamabilidad de aire/combustible.

Este modo requiere un control cuidadoso de las fugas de aire del recipiente de proceso, los conductos y el sistema de vacío; además, es necesario tener en cuenta la entrada accidental de aire debido a actividades operativas o de mantenimiento, como la apertura de válvulas o la sustitución de botellas de gas inerte.

La ventaja de este enfoque es que no es necesario utilizar una purga de gas inerte, lo que facilita/posibilita la reducción de los gases del proceso y de los costes.

- **Mantener la concentración de oxígeno por debajo de la MOC (o LOC)**

  Este modo de funcionamiento requiere el control de la concentración de oxígeno de los gases bombeados para garantizar el uso seguro. Para minimizar el riesgo de que gases inflamables penetren accidentalmente en la zona inflamable, se debe utilizar un margen de seguridad de funcionamiento por debajo de la MOC (o LOC). Las normas del sector disponibles indican que, para el control constante de la concentración de oxígeno, esta se debe mantener en un nivel inferior al 2 % en volumen por debajo del valor de MOC (o LOC) más bajo que se haya publicado para la mezcla de gases. A menos que el MOC (o LOC) sea inferior al 5 %, la concentración de oxígeno debe mantenerse por debajo del 60 % del MOC (o LOC). Si el control solo se realiza en forma de inspecciones rutinarias del nivel de oxígeno, no se deberá permitir que el nivel de oxígeno supere el 60 % del valor de MOC (o LOC) más bajo que se haya publicado, a menos que el MOC (o LOC) sea inferior al 5 %, en cuyo caso la concentración de oxígeno deberá mantenerse por debajo del 40 % del MOC (o LOC).

  El método preferido para mantener el nivel de oxígeno por debajo del valor de MOC (o LOC) más bajo que se haya publicado es excluir rigurosamente el aire y el oxígeno del sistema de bombeo y del proceso, junto con la dilución del gas bombeado con una purga de gas inerte (como nitrógeno) que se introduce en la entrada de la bomba o en las conexiones de purga, si es necesario. La integridad requerida de las medidas de exclusión de aire o de oxígeno y de cualquier alarma y bloqueo dependerá de la zona de peligro que podría surgir en caso de que fallasen los sistemas de exclusión y dilución.

  Las precauciones que comúnmente se requieren para excluir rigurosamente el aire del proceso y del sistema de bombeo se detallan al final de esta sección.

  La concentración mínima de oxígeno es la concentración de oxígeno en la que puede producirse una atmósfera potencialmente explosiva. Con concentraciones de oxígeno por debajo de este nivel, no es posible que las mezclas inflamables sufran una combustión o provoquen una explosión.

  Para evitar una atmósfera potencialmente explosiva y proporcionar un margen de seguridad, es necesario limitar la concentración de oxígeno al 60 % de la concentración mínima de oxígeno.

  De nuevo, este modo requiere un control cuidadoso de las fugas de aire del recipiente de proceso, los conductos y el sistema de vacío; además, es necesario tener en cuenta la entrada accidental de aire debido a actividades operativas o de mantenimiento, como la apertura de válvulas o la sustitución de botellas de gas inerte.

Fuentes de peligro químicas

- **Mantener la concentración de gases inflamables por encima del UFL (o UEL)**

  Cuando las concentraciones de gases inflamables son altas, el funcionamiento por encima del UFL (o UEL) puede ser más apropiado. Para minimizar el riesgo de cualquier penetración accidental en la zona inflamable, se debe utilizar un margen de seguridad de funcionamiento por encima del UFL (o UEL). Se recomienda mantener el nivel de oxígeno residual del gas a menos del 60 % del nivel de oxígeno absoluto que normalmente presenta la concentración del UFL (o UEL) del gas inflamable.

  El método preferido para mantener el nivel de oxígeno por debajo de este margen de seguridad consiste en excluir rigurosamente el aire y el oxígeno del proceso y el sistema de bombeo. Es posible que también sea necesario diluir el gas bombeado con una purga de gas inerte (como el nitrógeno) o con gas inflamable adicional («gas de relleno»), que se introduce en la entrada de la bomba o en las conexiones de purga. La integridad requerida de las medidas de exclusión de aire, de cualquier sistema de introducción de gas de purga y de cualquier alarma y bloqueo dependerá de la zona de peligro que podría surgir en caso de que fallasen los sistemas de exclusión y dilución.

- **Mantener la concentración de gases inflamables por debajo de la presión de explosión mínima**

  Todo material inflamable tiene una presión mínima por debajo de la cual no se experimentan explosiones. Si la presión de la entrada de la bomba de vacío se puede mantener por debajo de esta presión de forma segura, las igniciones que se inicien dentro de la bomba de vacío no se extenderán hasta la entrada. No obstante, es necesario tomar precauciones en el escape de la bomba de vacío.

  A continuación, se mencionan las precauciones que habitualmente se requieren para excluir de manera rigurosa el aire del proceso y del sistema de bombeo:

- **Eliminación de fugas de aire**

  Utilice un detector de fugas o realice una prueba de «índice de aumento» de presión. Antes de permitir la entrada de materiales inflamables a la cámara del proceso, es posible realizar una prueba para comprobar que la penetración de aire (oxígeno) en el sistema de vacío se encuentra dentro de los límites permitidos.

  Para realizar una prueba de «índice de aumento» de presión, la cámara del proceso vacía se evacua a una presión justo por debajo de la presión de uso normal y, a continuación, se aísla de la bomba de vacío. La presión de la cámara del proceso se registra posteriormente durante un período de tiempo establecido. Al conocer tanto el volumen de la cámara del proceso como la fuga de aire máxima permitida, es posible calcular el aumento de presión máximo permitido que se puede producir durante un período de tiempo establecido. Si se supera este límite de presión máximo, se deben tomar medidas para sellar la fuente de la fuga de aire (oxígeno) en la cámara del proceso; a continuación, se debe repetir correctamente la prueba antes de permitir la entrada de materiales inflamables en dicha cámara.

  En algunos casos, la capacidad del sistema de vacío para alcanzar una buena presión base sirve para indicar la estanqueidad del sistema.

- **Retirar todo el aire del sistema antes de iniciar el proceso**

  Antes de introducir cualquier gas inflamable en el proceso, el sistema debe evacuarse y/o purgarse completamente con gas inerte (como el

nitrógeno) a fin de eliminar todo el aire. Al finalizar el proceso, repita este procedimiento para eliminar cualquier gas inflamable antes de que el sistema se ventile.

- **Para bombas de vacío en seco**

  Compruebe que ningún gas de sello de purga o del eje pueda recibir el suministro de aire o contaminarse con él bajo ninguna circunstancia, y confirme que cualquier puerto de lastre de gas se encuentre sellado o que solo se utilice para introducir gas inerte.

- **Para bombas de vacío húmedas (p. ej., bombas rotativas de paletas o bombas rotativas de pistón con cierre de aceite)**

  Mantenga siempre los sellos del eje como se indica en las instrucciones del fabricante y utilice un sistema de lubricación de aceite bombeado y presurizado con una indicación de alarma en caso de pérdida de la presión del aceite. Este sistema puede incluir un accesorio externo que suministre el aceite lubricante filtrado y presurizado, con un interruptor de presión. Compruebe que cualquier puerto de lastre de gas se encuentre sellado o que solo se utilice para introducir un gas inerte. Suministre una purga adecuada de gas inerte a la caja de aceite para eliminar el aire antes de iniciar el proceso.

- **Para bombas de vacío Roots**

  Mantenga siempre el sello del eje propulsor principal como se indica en las instrucciones del fabricante y compruebe que las conexiones del puerto de purga o «respiración» solo se puedan utilizar para introducir gas inerte.

- **Contraflujo**

  Compruebe que los recursos y los procedimientos de uso del sistema ofrezcan protección contra cualquier contraflujo de aire que pudiera producirse debido a una avería de la bomba. Asegúrese de que todos los gases inflamables que se bombean se eliminen de manera segura en la ventilación final del escape de la bomba. Compruebe que no puedan producirse mezclas de gases inflamables en el tubo de escape mediante el uso de una purga inerte apropiada de la tubería antes de iniciar (y después de finalizar) el proceso con el gas inflamable, y mediante el empleo de una purga de gas inerte adecuada durante el funcionamiento, para impedir la mezcla turbulenta del aire en el escape.

2.3.4 Estanqueidad (fuga de aire atmosférico)

Los sistemas de vacío que manipulan gases del proceso peligrosos deben evaluarse cuidadosamente para determinar las consecuencias de las fugas de aire internas. Se recomienda realizar un análisis de riesgos para determinar el nivel de riesgo. Este debe tener en cuenta el funcionamiento normal, los modos de fallo y los procedimientos de mantenimiento. A continuación, se indican los problemas típicos:

- Reacción con gases pirofóricos
- Movimiento de vapores y gases inflamables a la región inflamable
- Corrosión provocada por la entrada de humedad atmosférica
- Reacciones no deseadas con gases del proceso.

Ningún sistema de vacío es 100 % estanco, siempre hay algún nivel de fuga de aire, incluso en un sistema de vacío ultraalto. En los casos en los que una falta de estanqueidad pueda provocar un problema de seguridad, se deben realizar cálculos para establecer qué nivel de estanqueidad es necesario para crear una condición segura.

Fuentes de peligro químicas

Por lo general, los sistemas de vacío están diseñados para ser estancos. Sin embargo, no es posible asegurar la estanqueidad del sistema contiguo. Utilice un método de detección de fugas apropiado (por ejemplo, la detección de fugas de helio con un espectrómetro de masas) para confirmar la integridad del sistema de escape y de vacío. Se recomienda el uso de conductos estándar de vacío, como ISO-KF o ISO-K, ya que están diseñados para ser estancos para los estándares de vacío. Tenga en cuenta la estanqueidad de toda la instalación si el bombeo se encuentra por encima del límite superior de explosión. Compruebe periódicamente el índice de fugas.

Si la instalación de un sistema estanco es de seguridad esencial, se debe calcular el nivel de rendimiento del sistema de vacío para determinar el nivel de riesgo.

Cuando la estanqueidad sea esencial para evitar un estado peligroso, es necesario realizar comprobaciones periódicas para confirmar que el sistema siga siendo estanco. Se debe prestar especial atención a las actividades de mantenimiento que puedan provocar fugas de aire accidentales y posibles peligros.

Nota:

Cuando la estanqueidad de un sistema es de seguridad esencial, pero no es posible proporcionar el nivel de integridad requerido, se recomienda utilizar la dilución con gas inerte de los gases del proceso para reducirlos por debajo del límite de seguridad.

2.4 Oxidantes

Con frecuencia, en los sistemas de vacío se bombean oxidantes como el oxígeno (O_2), el ozono (O_3), el flúor (F_2), el trifluoruro de nitrógeno (NF_3) y el hexafluoruro de tungsteno (WF_6). Los oxidantes reaccionan fácilmente con múltiples sustancias en un sistema de vacío, incluidos los elastómeros, como los de las juntas tóricas, los polímeros y los aceites, y la reacción suele producir calor y un aumento de la presión del gas. Entre los posibles riesgos resultantes están el de incendio y el de sobrepresión en la bomba o el sistema de escape.

Para bombear estos gases de manera segura, siga las instrucciones de seguridad del proveedor de gases, así como las recomendaciones siguientes:

- Cuando la concentración de oxígeno es superior al 25 % en volumen, es esencial utilizar lubricantes de PFPE y polímeros resistentes a productos químicos en componentes como juntas tóricas, paletas de la bomba, etc. Al bombear oxígeno puro, es esencial utilizar una bomba calificada para O2.
- Utilice lubricantes de PFPE en bombas que se emplean para bombear gases en los que el porcentaje de oxígeno es, normalmente, inferior al 25 % por volumen, pero que podría aumentar por encima del 25 % en condiciones de avería. Si se bombean oxidantes distintos del oxígeno, póngase en contacto con el proveedor del lubricante para conocer los niveles recomendados para el oxidante en cuestión.
- Si bien se prefiere el uso de lubricantes de PFPE, los lubricantes del tipo hidrocarburo también son válidos si se emplea una purga de gas inerte adecuada para garantizar que el aceite no se exponga a niveles peligrosos de oxidante.

El efecto real de estos oxidantes dependerá de la presión y la temperatura del gas; ambos afectan a la velocidad de reacción. A medida que aumenta

la velocidad de reacción, también lo hace la posibilidad de que se produzca una sobrepresión o un incendio. En circunstancias normales, los lubricantes de PFPE no se oxidarán ni se descompondrán en una caja de aceite o de engranajes de una bomba de pistón o una bomba rotativa de paletas con cierre de aceite, lo que reduce la probabilidad de explosión.

Tenga en cuenta que se puede producir la descomposición térmica de los lubricantes de PFPE a temperaturas iguales o superiores a 290 °C en presencia de aire o materiales ferrosos. Sin embargo, esta temperatura de descomposición térmica se reduce a 260 °C en presencia de titanio, magnesio, aluminio o sus aleaciones.

Si no desea utilizar lubricantes de PFPE en bombas de vacío de pistón o rotativas de paletas con cierre de aceite, puede diluir el oxidante a una concentración segura utilizando un gas inerte como el nitrógeno seco.

Este enfoque solo es viable para caudales de gases oxidantes bajos. Debe instalar en el sistema las medidas de seguridad oportunas para garantizar que siempre se suministre el flujo mínimo de gas de dilución inerte necesario para reducir la concentración del oxidante a un nivel seguro y para asegurar que el flujo de oxidante no supere el caudal máximo permitido. Debe diseñar el sistema de tal manera que el flujo de oxidante se detenga de inmediato si no se cumplen estas condiciones.

Se recomienda utilizar nuestras bombas en seco para bombear oxidantes (consulte el apartado *Bombas en seco* en la página 42). Las bombas en seco no tienen fluidos de sellado en el volumen de barrido, por lo tanto, la probabilidad de que se produzca una explosión se reduce ampliamente si utiliza una bomba en seco para procesar los oxidantes. Si se utiliza un lubricante de hidrocarburo, recomendamos una purga de gas inerte en los cojinetes y en el interior de la caja de engranajes.

2.5 Materiales pirofóricos

En la mayoría de las condiciones, los gases pirofóricos como el silano (SiH_4) y la fosfina (PH_3) o los polvos pirofóricos reaccionan espontáneamente con aire a presión atmosférica, de modo que se puede producir una combustión cuando estos gases entran en contacto con el aire, u otro oxidante, si la presión es suficientemente alta como para permitirlo. Un gas pirofórico se incendiará espontáneamente en contacto con el aire; es un gas inflamable con un límite superior de inflamabilidad del 100 %. Esto puede suceder si se filtra aire en el sistema o si el escape del sistema entra en contacto con la atmósfera. El calor de la reacción de un oxidante y un gas pirofórico puede servir de fuente de ignición en el caso de los materiales explosivos.

No solo los gases son pirofóricos, también es posible que los polvos y las sustancias pulverulentas sean pirofóricos, especialmente el polvo de metal y las sustancias pulverulentas que se han formado por sublimación en la cámara de vacío. Estos polvos no han formado una capa protectora de óxido y, por lo tanto, son sensibles a la autoignición cuando se exponen al aire.

El polvo también puede funcionar como absorbente de gases del proceso inflamables y pirofóricos. La tasa de adsorción en el polvo aumenta debido a la alta presión, la baja temperatura y la gran superficie.

Si los gases de escape de diferentes procesos se ventilan a través de un sistema de extracción común, también se puede producir una combustión o una explosión. Por lo tanto, cuando se bombeen materiales pirofóricos, se recomienda utilizar sistemas de extracción independientes. Los procesos que utilizan fósforo pueden dar lugar a la condensación de fósforo sólido

en el sistema de vacío o su escape. Ante la presencia de aire, incluso si se somete a la más mínima agitación mecánica (por ejemplo, la activación de una válvula o la rotación de una bomba ocasionada por el diferencial de presión), el fósforo puede arder espontáneamente y liberar gases tóxicos. Se recomienda purgar las bombas con gas inerte y hacerlas funcionar con calor suficiente para reducir al mínimo la condensación de fósforo.

Los lubricantes de PFPE pueden absorber los gases del proceso que, en el caso de los materiales pirofóricos, pueden provocar la ignición local cuando el lubricante queda expuesto al aire. Este riesgo puede manifestarse especialmente durante las tareas de mantenimiento, o cuando se bombea un oxidante en el sistema después de un polvo o gas pirofórico. Puede reducir la probabilidad de que se produzca este riesgo si utiliza nuestras bombas en seco, que no contienen lubricantes en el volumen de barrido. Debe asegurarse de pasivar todo el material pirofórico antes de ventilarlo o manipularlo.

Al manipular gases pirofóricos, polvos o depósitos, es esencial evitar fugas de aire que puedan crear una reacción peligrosa. Las pequeñas fugas de aire reaccionarán con el gas pirofórico, pero podrían no crear una situación peligrosa. El nivel de fuga permitido debe calcularse para cada aplicación y se debe determinar un margen de seguridad adecuado.

Los polvos y las sustancias pulverulentas inflamables pueden recogerse en filtros, o podrían formar capas en los conductos que, al exponerse a la atmósfera, existe una posibilidad real de que puedan reaccionar de forma muy exotérmica. Se deben tomar medidas para garantizar que el aire no entre en estos sistemas durante el funcionamiento normal, el mantenimiento y los estados de avería. Cuando sea necesario ventilar el sistema a la atmósfera, se recomienda utilizar nitrógeno y, si es necesario desmontar el sistema de vacío, se debe utilizar un equipo de protección por si se produce una reacción imprevista.

Nota:
Se debe procurar identificar todos los materiales peligrosos y determinar una estrategia de manipulación adecuada.

Antes de abrir el sistema de bombeo y exponerlo al aire, se recomienda utilizar gas de purga durante un tiempo para eliminar los gases adsorbidos de cualquier capa de polvo. Se puede utilizar una oxidación controlada mediante el bombeo de oxígeno en concentraciones bajas para eliminar los gases pirofóricos del polvo y también para oxidar el polvo. Este enfoque debe definirse cuidadosamente, ya que existe el riesgo potencial de que solo se trate el material de la superficie mientras la mayor parte de la capa de polvo retiene el gas absorbido.

Puede ser eficaz usar baños de agua o aceite para sumergir los componentes del sistema de vacío después del desmontaje; sin embargo, la seguridad de dicho procedimiento debe tenerse en cuenta para cada aplicación.

Otros materiales, como el silicio y el polisilicio, pueden formar depósitos inestables dentro de los sistemas de vacío; estos materiales son el límite entre elementos pirofóricos y explosivos. Consulte el apartado sobre explosivos.

2.6 Material tóxico

Muchas aplicaciones de vacío implican el procesamiento y la manipulación de materiales tóxicos, por lo que exigen procedimientos específicos.

Fuentes de peligro químicas

Por su naturaleza, los materiales tóxicos son peligrosos para la salud. Sin embargo, la naturaleza del peligro es específica de cada material y de su concentración relativa. Respete los procedimientos correctos de manipulación que indica el proveedor del material y la legislación aplicable.

Los sistemas de vacío son una forma excelente de manipular materiales tóxicos, ya que una fuga en el lado de vacío solo aspirará aire de la atmósfera y no permitirá que escapen gases del proceso tóxicos. La situación es diferente cuando se empieza a considerar la línea de escape del sistema de vacío. Aquí la presión es similar a la de la atmósfera o ligeramente superior, y una fuga permitirá que escape cualquier gas tóxico bombeado.

Asimismo, tome en consideración los puntos siguientes:

- **Dilución del gas:** existen medios que permiten diluir los gases tóxicos del proceso a medida que atraviesan la bomba de vacío y penetran en el escape. Puede utilizar esta dilución para reducir la concentración por debajo del límite tóxico. Recomendamos que controle el suministro de gas de dilución para que emita una alarma si este falla. En el caso concreto de las bombas con cierre de aceite, consulte el manual de instrucciones de la bomba para conocer los posibles kits de retorno de aceite necesarios.
- **Sello del eje (bombas en seco)**: muchas bombas de vacío en seco utilizan un sistema de purga de gases para garantizar que los gases del proceso no penetren en la caja de engranajes y los cojinetes y, en consecuencia, posiblemente en la atmósfera alrededor del sistema de vacío. Debe garantizar la integridad de este suministro de gas cuando manipule materiales tóxicos. Se deben utilizar reguladores sin ventilación junto con una válvula de control sin retorno, como se indica en *Reguladores de presión* en la página 44.
- **Sello del eje (otras bombas)**: los diseños de sellos del eje inundados en aceite (por ejemplo, las bombas mecánicas Roots EH y las bombas rotativas de paletas EM) minimizan el riesgo de fuga de gases del proceso (o de la penetración de aire) y pueden proporcionar una advertencia visual (pérdida de aceite o reducción del nivel de aceite) antes de que surja el peligro. Es posible que otros diseños de ejes no ofrezcan advertencias adecuadas de las averías.
- **Transmisiones magnéticas**: cuando se requiera un sellado hermético total, póngase en contacto con su equipo de atención al cliente para obtener más asesoramiento. Tenga en cuenta todas las posibles fuentes de fugas. Dependiendo de la bomba, se pueden ofrecer sellos particulares, como transmisiones magnéticas y sellos mecánicos dobles.

Si se utilizan válvulas de descarga de la presión o discos de ruptura para liberar el exceso de presión, compruebe que ventilen de manera segura en un sistema de escape apropiado, lo que evitará un riesgo de contaminación por sustancias tóxicas.

El escape del sistema de vacío debe considerarse cuidadosamente, ya que es posible que no se pueda llevar a cabo la ventilación directa de materiales tóxicos a la atmósfera. En este caso, se recomienda consultar a una empresa de reducción de gases para encontrar una forma segura de eliminar el flujo de gas residual.

Cuando se han bombeado gases tóxicos, hay una alta probabilidad de que las superficies internas o los volúmenes internos atrapados contengan material tóxico. Antes de retirar bombas o componentes que hayan estado

en contacto con gases tóxicos, se recomienda purgarlos para eliminar todos los gases peligrosos.

Nota:

Se debe procurar identificar todos los materiales peligrosos y determinar una estrategia de manipulación adecuada.

Al retirar la bomba, todas las bridas de vacío deben sellarse y las piezas que no se puedan sellar deben almacenarse en contenedores herméticos. Cuando sea necesario desmontar la bomba con fines de mantenimiento, es esencial devolverla a una instalación de servicio donde haya instalaciones de descontaminación especializadas.

Cuando nos envíe un equipo de vacío contaminado para realizar tareas de servicio o mantenimiento, deberá seguir los procedimientos específicos (Formulario HS1) y completar la declaración (Formulario HS2) incluida en el Manual de instrucciones que se entrega con el equipo.

2.7 Materiales corrosivos

Muchas aplicaciones de vacío implican el procesamiento y la manipulación de materiales corrosivos, por lo que exigen procedimientos específicos. Los gases corrosivos pueden dañar el sistema de vacío y crear una situación peligrosa.

Algunos materiales corrosivos, como el flúor, el cloro, otros halógenos o halogenuros, y agentes oxidantes como el ozono o agentes reductores como el sulfuro de hidrógeno también pueden atacar a los materiales con los que están en contacto, sin necesidad de la presencia de un líquido. En estos casos, debe reducirse al mínimo la presión parcial del material corrosivo mediante un gas de dilución apropiado. Los materiales que componen el sistema de vacío y el modelo de bomba deben elegirse teniendo en cuenta su compatibilidad con el gas específico en las concentraciones previstas. Las altas temperaturas pueden acelerar la corrosión, por lo que deben reducirse al mínimo si lo permiten otros aspectos del proceso. Deben revisarse los intervalos de mantenimiento teniendo en cuenta el efecto de los materiales corrosivos en el sistema.

Todos los materiales corrosivos deben identificarse y debe confirmarse su compatibilidad con los materiales del sistema de vacío. Sin embargo, es importante tener en cuenta lo siguiente:

- La corrosión se basa en reacciones físicas, químicas o electroquímicas.
- La corrosión metálica más común se basa en una reacción electroquímica y, por lo tanto, es necesario un electrolito; esto normalmente significa la presencia de agua. Cuando el material corrosivo es anhidro [sin agua], no es posible que se produzca una reacción.
- Ciertos productos químicos, como halógenos o ácidos orgánicos, pueden reaccionar con el material de la bomba sin la presencia de agua y generar productos de reacción compuestos por iones de los materiales bombeados y el gas corrosivo. Dependiendo del tipo de material, estos productos de reacción pueden formar capas que luego evitarán/minimizarán más reacciones. Algunos de los productos de reacción, como el $AlCl_3$ y el SiF_4, tienen una presión de vapor relativamente alta y se eliminarán con el flujo de gas. En tales condiciones, el material de la bomba se eliminará con el tiempo y destruirá la bomba.

- Los materiales oxidantes fuertes, como el NF_3 o el flúor, pueden reaccionar con el material orgánico utilizado en el interior de la bomba y destruir estos componentes, Como los sellos, las juntas, el aceite de grasa, etc.
- En los casos en los que pueden mantener materiales corrosivos en la fase de vapor, normalmente no es posible que se produzca corrosión.
- Pueden producirse reacciones químicas o físicas en materiales poliméricos y cerámicos.

A la hora de bombear materiales corrosivos con bombas de vacío, debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Entrada de humedad:** debe prestar especial atención para evitar la entrada de aire húmedo, que puede acelerar los efectos corrosivos. Como parte del proceso de apagado, utilice una purga inerte para expulsar los corrosivos del sistema antes de apagarlo.
- **Dilución:** utilice un gas de dilución inerte apropiado para evitar la condensación de corrosivos y, de esta forma, mitigar la corrosión resultante.
- **Temperatura:** aumente la temperatura de la bomba y de la línea de escape para evitar la condensación del vapor de agua y así limitar la corrosión. En algunos casos, las temperaturas superiores pueden aumentar los niveles de corrosión; consulte el siguiente apartado.
- **Corrosión de los equipos de seguridad:** en caso de que los equipos de seguridad esenciales (como los elementos del supresor de llamas, los sensores de temperatura, etc.) pudieran dañarse por la acción de productos corrosivos en el flujo de gas del proceso, seleccione los materiales de construcción oportunos para evitar este riesgo.
- **Cambios de fase:** los cambios de fase no planificados pueden producir condensación. Tenga en cuenta los cambios de temperatura y de presión para evitar este riesgo.
- **Reacciones imprevistas:** las reacciones químicas imprevistas pueden generar productos corrosivos. Se debe prestar especial atención a la posibilidad de que se produzca una contaminación cruzada cuando los equipos se utilizan para más de un propósito.

Para evitar la corrosión, se pueden tomar las siguientes medidas:

La adición de gases de purga en el puerto de lastre de gas o en el escape de la bomba puede garantizar que los gases corrosivos se mantengan en la fase de vapor.

Si las bombas están desactivadas, se recomienda mantener en funcionamiento un pequeño flujo de gas de purga (por ejemplo, purga del sello del eje) para purgar la bomba de materiales corrosivos y evitar la entrada de aire húmedo desde la línea de escape. Además, la instalación de una válvula de control en la línea de escape junto a la bomba evitará el reflujo de humedad cuando la bomba esté apagada. Esto se recomienda encarecidamente cuando haya instalados depuradores húmedos para la reducción de gases.

Las superficies frías y a alta presión son aquellas donde es más probable que se produzca condensación, lo que provoca corrosión. Por lo tanto, el mayor riesgo se encuentra en la tubería de escape, especialmente si esta se encuentra en un lugar frío (por ejemplo, al aire libre). Se recomienda tener en cuenta las especificaciones de la línea de escape para evitar una corrosión peligrosa. Los materiales de sellado deben seleccionarse cuidadosamente para garantizar su compatibilidad con los materiales corrosivos.

Fuentes de peligro químicas

No se recomienda el uso de aluminio o aleaciones de aluminio para las bombas que manipulan halógenos. Para evitar una reacción entre el material de la bomba y los halógenos o ácidos, es habitual revestir la cámara de bombeo. No se recomienda el uso de cobre o latón en contacto con gases del proceso reactivos.

Para el bombeo de gases corrosivos u oxidantes fuertes con bombas con cierre de aceite o con bombas que utilicen cojinetes lubricados con grasa en la cámara de vacío, se recomienda utilizar PFPE para evitar la degradación del aceite.

2.8 Resumen: fuentes de peligro químicas

- Identifique todas las reacciones químicas posibles que podrían presentarse en su sistema.
- Tenga en cuenta las reacciones químicas anómalas, incluso las que podrían producirse en condiciones de avería.
- Consulte las fichas técnicas de seguridad de los materiales a la hora de evaluar los posibles riesgos asociados con los materiales del proceso.
- Utilice técnicas de dilución para minimizar las reacciones con oxidantes y materiales inflamables.
- En la UE, deberá emplear una bomba de vacío con certificación HazLoc apropiada en caso de que se haya especificado una zona inflamable. En el resto de los países, recomendamos el uso de bombas certificadas para HazLoc siempre que sea posible.
- Utilice el tipo de lubricante correcto para la bomba cuando se bombeen oxidantes y considere el uso de una bomba en seco.
- No utilice metales pesados en la vía de gas del sistema si el proceso utiliza o produce azida sódica.
- Preste especial atención a la manipulación de materiales tóxicos, corrosivos o inestables.

3 Fuentes de peligro físicas

Tipos de riesgos por sobrepresión

La sobrepresión de los componentes de un sistema de vacío puede derivar de alguna de las situaciones siguientes:

- la introducción de gas a alta presión en el sistema;
- la compresión del gas por parte del sistema;
- un aumento repentino de la temperatura del gas volátil en el sistema;
- un cambio de fase que conduce a la sedimentación de un producto sólido;
- una reacción dentro del sistema de vacío que bloqueó el escape. También puede deberse a otras causas.

3.1 Sobrepresión en el escape de la bomba

Una causa habitual de sobrepresión en el escape es la obstrucción o la restricción del sistema de escape, lo que puede derivar en una avería de la bomba o de otros componentes del sistema.

Las bombas de vacío son compresores diseñados específicamente para funcionar con elevados índices de compresión de entrada y salida. Además de la posible sobrepresión causada por el funcionamiento de la bomba, la introducción de un gas comprimido (como un gas de purga o de dilución) también puede elevar en exceso la presión del sistema si el sistema de escape se encuentra obstruido o restringido.

Normalmente, los sistemas de vacío están diseñados para y funcionan a presiones que van desde un intervalo ligeramente superior a la presión atmosférica hasta el vacío máximo. No están diseñados para alta presión y, por lo tanto, se debe procurar evitar condiciones que puedan provocar una sobrepresión peligrosa. Las áreas que deben tenerse en cuenta son las siguientes («Obstrucción del escape», «Sobrepresión de los sistemas de purga», «Presión de diseño»).

Cuando la bomba incluye supresores de llamas u otros equipos —como filtros o condensadores— en la sección de escape, es fundamental que la contrapresión de escape no supere el límite máximo que se especifica en el Manual de instrucciones del sistema de vacío. Se debe implementar un programa de mantenimiento adecuado para garantizar que los depósitos del proceso no obstruyan el sistema de escape ni el supresor de llamas.

Si esto no fuera posible, se debe utilizar un sensor de presión colocado entre la bomba y el supresor de llamas para detectar la obstrucción. Deben tomarse las mismas medidas en otros equipos de escape, como filtros y condensadores.

Cualquier sublimación o cambio de fase puede derivar en la obstrucción de los conductos del proceso debido a depósitos sólidos y en un riesgo por sobrepresión. La formación de depósitos de proceso en la línea de escape puede provocar una condición de sobrepresión que se produce cuando la bomba funciona con un flujo de gas alto. Normalmente, esto provocará que la bomba de vacío se detenga debido a un exceso de corriente del motor, pero sigue siendo posible que, en determinadas condiciones, la bomba de vacío produzca una sobrepresión peligrosa significativa. Se debe evaluar el potencial de acumulación de depósitos de proceso en el escape del sistema de vacío y, cuando esto no se pueda evitar, se debe utilizar alguna forma de detección de presión para detectar condiciones de sobrepresión. Se debe

tener cuidado de evitar que el propio sensor de presión se contamine con depósitos del proceso.

Consulte los manuales de instrucciones que se entregan con el sistema de bombeo de vacío para conocer los valores máximos y recomendados de contrapresión continua de todos los componentes de escape, incluida la bomba de vacío. Cuando diseñe el sistema de escape, tenga en cuenta estas limitaciones.

En el caso de los límites aplicables en funcionamiento continuo, consulte el manual de instrucciones de la bomba.

3.1.1 Protección contra la sobrepresión del escape

En general, se recomienda utilizar las bombas con el escape conectado a un sistema de escape con ventilación libre. Sin embargo, es posible que el sistema de escape incluya componentes que podrían obstruir o restringir el sistema. Si así fuera, también debe incorporar métodos de protección apropiados contra la sobrepresión. A continuación, se incluyen ejemplos de dichos métodos:

Componente	Método de protección
Válvula en tubería de escape	Bloquee la válvula de modo que quede siempre abierta cuando la bomba esté funcionando.
	Incorpore una válvula de derivación de descarga de presión.
Depurador de escape	Incorpore una válvula de derivación de descarga de presión.
	Incorpore un presostato y conéctelo con la bomba de modo que esta se apague cuando la presión de escape sea muy alta.
Supresor de llamas	Medición de la presión de escape.
	Medición de la presión diferencial.

En resumen, si la presión del sistema de escape se aproxima a la presión máxima permitida:

- Reduzca la presión mediante un dispositivo en una vía de gas paralela a la restricción u obstrucción.
- Reduzca la fuente de presión. Detenga la bomba o apague cualquier suministro de gas comprimido.

3.1.2 Obstrucción del escape

El escape de un sistema de vacío puede obstruirse por varias razones y provocar una sobrepresión. La más obvia es la instalación de una válvula en la línea de escape ya que, si falla la apertura de la válvula, la bomba de vacío creará una presión que podría provocar una situación de sobrepresión peligrosa. Cuando una válvula es esencial, su funcionamiento debe interconectarse con cuidado con el funcionamiento de la bomba de vacío.

En algunas aplicaciones, se puede utilizar la gestión de la temperatura en la bomba y/o en el tubo de escape para evitar el bloqueo. Dicha técnica se utilizaría con subproductos del proceso con altas presiones de vapor.

3.2 Sobrepresión en la entrada

3.2.1 Suministros de gas comprimido y contrapresión

Habitualmente, el índice de presión que requiere la tubería que conecta la bomba al sistema de vacío se calcula en menos de lo que correspondería, ya que se cree que esta tubería no estará expuesta a presiones superiores a la presión atmosférica. En la práctica, esto solo es cierto bajo condiciones de funcionamiento normales. Se recomienda calcular el índice de presión requerido de modo que permita dejar un margen para presiones más altas causadas por condiciones anómalas o de avería.

Una causa habitual de sobrepresión en los conductos de entrada de la bomba es la introducción de gases comprimidos (como gases de purga) cuando la bomba no está funcionando. Si los componentes del conducto de entrada no son apropiados para las presiones resultantes, la tubería se romperá y los gases del proceso se escaparán del sistema. El retroceso de los gases desde el sistema hacia una cámara del proceso incapaz de tolerar la presión resultante también provocará rupturas y fugas.

Cuando conecte los suministros de gas comprimido al sistema a través de reguladores de presión que se han diseñado para brindar un flujo de presión bajo, compruebe que la presión esté comprendida dentro del valor límite del sistema.

Los reguladores de presión sin ventilación utilizados habitualmente harán que la presión del sistema aumente hasta la presión del suministro de gas conectado al regulador, si se utilizan bajo condiciones donde el flujo de gas del proceso no pasa por el sistema. Por lo tanto, para evitar la sobrepresión, se deberá utilizar uno de los dos métodos siguientes:

- reducir la presión, dejar que los gases se desvíen de la bomba y que fluyan hacia un escape con ventilación libre;
- controlar la presión del sistema y utilizar una válvula de cierre positivo para cortar el suministro de gas comprimido según un nivel de presión preestablecido.

3.2.2 Sobrepresión de los sistemas de purga

Es habitual que los sistemas de vacío estén equipados con sistemas de purga para facilitar el bombeo fiable de los gases del proceso y evitar reacciones químicas peligrosas. Aunque estas purgas desempeñan una función muy útil, también pueden crear su propio peligro de sobrepresión si su implementación no se considera cuidadosamente.

El gas de purga se suministra desde un depósito o una botella de gas de purga y llegará al sistema de vacío con una presión de suministro de entre 2 bar(g) y 10 bar(g). En la mayoría de los casos, es necesario reducir esta presión mediante el uso de un regulador de presión. Un regulador de presión reducirá la presión del gas de la presión de suministro entrante a la presión de funcionamiento deseada, y es bastante normal tener presiones de funcionamiento en el rango de 0,1 bar(g) a 1 bar(g).

Cuando el gas de purga se suministra a un sistema abierto, estos sistemas de purga regulados funcionan bien; sin embargo, si el sistema es un sistema cerrado o se crea un sistema cerrado mediante una acción como el cierre de una válvula, existe el riesgo de que se produzca una situación de sobrepresión.

Hay dos tipos de reguladores de presión: Uno se denomina regulador «de alivio» y el otro regulador «sin alivio». Funcionan de manera diferente y pueden crear sus propios peligros.

El regulador de alivio controlará la presión en un sistema cerrado ventilando el exceso de presión a la atmósfera. Aunque parece una buena característica, debe recordarse que este exceso de presión puede ser un gas del proceso peligroso.

En el caso del regulador sin alivio, está diseñado para ser utilizado con un sistema abierto y no reducirá la presión en una situación de sobrepresión. Si se utiliza un regulador sin alivio en combinación con un sistema cerrado, con el paso del tiempo se producirá una pequeña fuga de gas desde el lado de suministro del regulador al sistema, que provocará que el sistema se presurice a la presión de suministro. Dado que la mayoría de los sistemas de vacío abiertos pueden convertirse en un sistema cerrado en caso de fallo, existe un riesgo derivado del uso de este tipo de dispositivo que debe tenerse en cuenta.

Una solución es utilizar un regulador de alivio equipado con una válvula de «control» de no retorno entre el regulador y el sistema de vacío. El regulador garantizará que la presión en el lado del sistema se controle con la presión deseada, mientras que la válvula de «control» de no retorno evitará un flujo de retorno de gas desde el sistema hacia el regulador. Las válvulas de control están disponibles con un diferencial de presión de tan solo 25 mbar, lo que minimiza la caída de presión. Debe tenerse en cuenta que, si hay otras fuentes de presión en el sistema de vacío, estas deben considerarse de forma independiente, ya que el regulador de alivio no ventilará este exceso de presión.

Si se utilizan válvulas de ventilación de sobrepresión, es esencial tener en cuenta el tipo de gas que se ventila y el lugar al que se ventila. De lo contrario, es posible que se ventilen gases del proceso peligrosos a la atmósfera local.

3.2.3 Funcionamiento incorrecto de la bomba

Se deben tomar precauciones especiales hasta que se determine que la bomba funciona correctamente.

Si la dirección de rotación de la bomba no es correcta y se utiliza con la entrada obstruida o restringida, la bomba generará una presión alta en el conducto de entrada. Esto podría provocar la ruptura de la bomba, las tuberías o los componentes de la tubería.

Utilice siempre una placa de obturación ligeramente ajustada con tornillos a la entrada de la bomba hasta que haya determinado que la dirección de rotación de la bomba es correcta.

Si utiliza la bomba a altas velocidades de rotación, podría romperse. No utilice la bomba a velocidades de rotación superiores a la velocidad máxima indicada; esto es de particular importancia cuando se utilizan convertidores de frecuencia para el control de la velocidad.

3.3 Temperatura

Ciclos térmicos

Cuando el equipo está sujeto a ciclos térmicos (por ejemplo, debido al ciclo de bombeo normal de la bomba de vacío), es importante saber que, con el tiempo, estos ciclos térmicos pueden provocar que las sujeciones y las conexiones se aflojen si no se bloquean correctamente con selladores

o dispositivos mecánicos. Cuando exista riesgo de ciclos térmicos y el hecho de que las sujeciones se aflojen pudiera crear una situación peligrosa, entonces el apriete de estas debe comprobarse regularmente.

Superficies calientes

Los sistemas de vacío y las bombas de vacío suelen tener superficies calientes debido a la naturaleza del proceso. Por ejemplo, en algunos procesos es necesario calentar las líneas de escape para evitar la condensación de gases peligrosos. Cuando se producen superficies calientes superiores a 70 °C, se recomienda colocar una etiqueta de advertencia en la superficie caliente. Si la temperatura supera los 100 °C, es necesario proteger la superficie con algún tipo de protección para evitar el contacto.

Temperatura ambiental para el funcionamiento

Los sistemas de vacío suelen estar diseñados para funcionar a una temperatura ambiental para el funcionamiento máxima de 40 °C. Con temperaturas superiores a este nivel, es posible que las juntas elastoméricas de las bombas de vacío se sobrecalienten, lo que provocaría posibles fugas y tal vez la aparición de productos de descomposición peligrosos. Se deben comprender los peligros asociados con las altas temperaturas ambientales para el funcionamiento.

Unas temperaturas ambientales bajas también pueden dar lugar a riesgos debido a la fragilidad de elastómeros, como juntas tóricas, o a una condensación de subproductos del proceso que forme líquidos peligrosos. Un análisis de riesgos debe tener en cuenta la temperatura mínima de diseño del equipo de vacío y la posibilidad de que se condensen los subproductos del proceso.

Calentamiento de la línea de escape

El calentamiento de la línea de escape debe utilizarse cuando exista la posibilidad de que los gases del proceso se condensen o solidifiquen en la línea de escape, lo que provocaría obstrucciones, corrosión o explosiones. Cuando se utiliza el calentamiento de la línea de escape, es esencial tener en cuenta la seguridad de dicho sistema, especialmente en condiciones de fallo en las que la temperatura podría aumentar fuera de control y sobrecalentar los sellos elastoméricos dentro de los conductos.

Temperatura de diseño

Cuando un recipiente o conducto está diseñado para contener una presión, es necesario definir la temperatura de diseño máxima a la que el recipiente o conducto tiene una presión nominal. No utilice un sistema si supera la temperatura máxima de diseño.

3.4 Resumen: fuentes de peligro físicas

- Al realizar los cálculos de seguridad, asegúrese de que se tengan en cuenta las presiones de funcionamiento seguras para todos los componentes del sistema.
- Compruebe que el escape de la bomba no pueda obstruirse ni restringirse.
- Si existe el riesgo de que se produzcan presiones elevadas fuera de los índices de presión en cualquier parte del sistema de vacío, se recomienda incorporar un equipo de medición de la presión en un punto adecuado del sistema. Este equipo debe estar conectado a su sistema

de control, para poner el sistema en estado seguro si se detecta una condición de sobrepresión.

- Tenga en cuenta las condiciones anómalas y de avería cuando evalúe el índice de presión que requiere el sistema de vacío y los componentes de la bomba.
- Compruebe que esté utilizando el tipo de dispositivo de descarga de presión correcto y que este sea apropiado para su aplicación
- Confirme que los suministros de gas comprimido estén debidamente regulados y controlados. Desconecte estos suministros si la bomba está apagada.
- Siempre que sea posible, compruebe que la presión de suministro de cualquier purga regulada sea inferior a la presión estática máxima permitida del sistema. De manera alternativa, confirme que sea posible descargar la presión en caso de que se produzcan fallos en los componentes.

4 Diseño del sistema

4.1 Índices de presión de un sistema

Como se indica en *Fuentes de peligro físicas* en la página 27, las tuberías y los componentes del sistema de vacío están diseñados para funcionar con presiones internas inferiores a la presión atmosférica. En la práctica, sin embargo, también suele ser necesario diseñar el sistema para poder utilizarlo con presiones internas superiores a la presión atmosférica. Si es necesario, incorpore dispositivos de descarga de presión para evitar que se produzca una sobrepresión durante un estado de avería.

Es importante que no permita que los tubos de entrada y otros componentes de la entrada se conviertan en la parte más débil del sistema bajo la premisa de que siempre funcionarán al vacío, incluso en condiciones de avería.

Los sistemas de escape siempre deben diseñarse de tal modo que se garantice la menor contrapresión posible en la bomba durante el funcionamiento. Sin embargo, es importante que diseñe el sistema de escape con un índice de presión adecuado, que debe ser apropiado para el uso con las presiones que puede generar la bomba y, por ejemplo, la introducción en el sistema de un gas comprimido. Además, también debe ser apropiado para ser utilizado con las medidas de protección contra sobrepresión implementadas.

Al realizar el análisis de riesgos, siempre debe tener en cuenta lo siguiente:

- entradas externas, como las conexiones para gas inerte;
- aislamiento y constricción de todas las fuentes, en especial en las líneas de escape;
- reacciones entre los gases del proceso.

Se debe tener en cuenta que si un recipiente contiene un líquido volátil y se puede aislar del resto del sistema, la aplicación de una fuente de calor externa (por ejemplo, un incendio) puede originar presiones internas superiores a la presión de diseño de dicho recipiente. En este caso, debe considerar la necesidad de incorporar una válvula de descarga de presión apropiada.

4.2 Eliminación de volúmenes estancados

Un volumen estancado es cualquier volumen en un tubo o componente de vacío que no está sometido a un flujo de gas continuo. Por ejemplo, la caja de engranajes de una bomba mecánica Roots o el cabezal de calibre de un instrumento. Las tuberías con válvulas y los conductos de entrada de gas nitrógeno también pueden convertirse en volúmenes estancados cuando se aíslan.

Los volúmenes estancados se deben tener en cuenta a la hora de evaluar la mezcla y la reacción de los gases del proceso que normalmente no están juntos en la cámara del proceso. Los tubos, las bombas y las cámaras del proceso generalmente transportan los gases de manera lineal, con un gas o una mezcla de gases seguida de otra. Por lo general, los gases que se mueven en dicho flujo lineal no se mezclan, a menos que la velocidad del gas de escape se vea reducida por una restricción u obstrucción. Un volumen estancado no se purga y se puede llenar con los gases del proceso a medida que la presión del sistema sube y baja. De esta forma, es posible retener los gases que pasan a través del sistema en una etapa

del proceso. Estos gases pueden reaccionar con los gases de una fase subsiguiente del proceso. La purga y evacuación minuciosa de la cámara entre la introducción de gases incompatibles asegurará la protección contra el riesgo de explosiones.

Debe prestar especial atención a la hora de considerar la posibilidad de contaminación cruzada en volúmenes estancados y cuando los gases son potencialmente explosivos. En especial, debe considerar el riesgo de acumulaciones en filtros y separadores y otros componentes. Cuando corresponda, utilice flujos continuos de una purga de gas inerte de alta integridad para reducir la probabilidad de contaminaciones cruzadas. Esto puede garantizar que no se alcancen concentraciones de mezclas que puedan provocar problemas.

Cuando se bombean gases inflamables, es posible que los volúmenes estancados se llenen con gases o vapores potencialmente explosivos que no se pueden eliminar con una purga normal. Cuando es posible que también exista una fuente de ignición, se debe considerar una purga específica del volumen estancado.

4.3 Sistemas de extracción de gases de escape

Es importante que utilice el tipo de sistema de extracción de gases correcto para su proceso. Como se indicó anteriormente, el sistema de extracción debe haberse diseñado para tolerar las presiones de funcionamiento y, cuando se producen o procesan materiales peligrosos, debe ser lo suficientemente hermético como para contener los materiales del proceso y sus derivados con el fin de evitar liberaciones peligrosas a la atmósfera.

4.4 Uso de sistemas de protección de supresores de llamas (sistemas HazLoc)

Si la mezcla de gases y vapores bombeados es inflamable (consulte el apartado *Cómo evitar la zona inflamable* en la página 15) de forma continua o durante períodos de tiempo prolongados (es decir, la condición de Zona 0) y si existe riesgo de que una fuente de ignición (consulte el apartado *Fuentes de ignición* en la página 35) pase a ser activa durante el funcionamiento normal o ante una avería previsible, deberá incorporar supresores de llamas a la bomba principal según se requiera (consulte también el apartado *Supresores de llamas* en la página 44). Para evitar la propagación de llamas a lo largo de los conductos del proceso o a la atmósfera circundante, los supresores de llamas deben probarse con bombas de vacío.

Si la mezcla inflamable está presente durante un período de tiempo prolongado, es necesario instalar en el supresor de llamas de la entrada un transmisor de temperatura homologado y probado para detectar un incendio continuo. Si se detecta un incendio continuo, deberá apagar la bomba y aislarla de la fuente de combustible. Para obtener asesoramiento sobre los transmisores de temperatura y los supresores de llamas homologados, póngase en contacto con su centro de atención al cliente local. A fin de proteger térmicamente el supresor de llamas y la bomba en caso de averías poco probables (Zona 0) de la bomba, instale un transmisor de temperatura de escape en el escape de la bomba. Los puntos de desconexión dependen del sistema de bombeo. Consulte el manual de HazLoc correspondiente de la bomba.

Si el transmisor de temperatura de la entrada o del escape llega a su límite máximo (e indica una condición de avería), deben tomarse medidas

apropiadas. Estas dependen de cada aplicación, pero podrían incluirse las siguientes:

- **Detener el suministro de combustible:** al cerrar una válvula ubicada en la entrada de la bomba de vacío se evitará el suministro de combustible a la bomba.
- **Detener la fuente de ignición:** detener la bomba de vacío mediante la desconexión de la alimentación del motor.
- **Desactivar el área del incendio**: al incorporar rápidamente un gas inerte en el área del incendio (por lo general, aunque no siempre, ubicada en el colector de escape de la bomba), se eliminará la llama. Tenga en cuenta que es posible que una llama se vuelva a encender si no se elimina la fuente de ignición.

4.5 Fuga de agua en el sistema de vacío

Cuando se bombeen vapores y gases del proceso que puedan suponer un peligro en caso de contacto con el agua, es necesario tener en cuenta la estanqueidad del sistema de agua de refrigeración. Se pueden considerar líquidos refrigerantes alternativos, pero antes de hacerlo, póngase en contacto con su centro de atención al cliente local.

4.6 Retrosucción de los gases de escape

Cuando se desactiva una bomba de vacío con vacío en la entrada, se produce una retrosucción de los gases de escape de los conductos o del sistema de escape. Si este gas contiene aire/oxígeno, podrían producirse reacciones no deseadas con los gases del proceso o los depósitos internos. Se recomienda instalar una válvula de control sin retorno en el escape de la bomba de vacío para ralentizar el flujo de retorno de los gases de escape. Además, el uso de una purga de nitrógeno cuando se detiene la bomba de vacío garantiza la exclusión del aire del sistema de vacío.

4.7 Fuentes de ignición

Si utiliza bombas de vacío para bombear mezclas inflamables, debe tener en cuenta todas las posibles fuentes de ignición. A continuación, presentamos algunas áreas de consideración que puede utilizar como parte de una revisión general. En función de su proceso, es posible evitar algunas o todas las fuentes de ignición. Si es imposible evitar la fuente de ignición debido a las circunstancias del proceso o a un requisito del sistema, debe diseñar su sistema teniendo esto en cuenta.

Nota:
Algunas bombas están certificadas por terceros para confirmar que (si se aplican correctamente) podrán contener una explosión interna.

- **Contacto mecánico**: el contacto mecánico de las piezas giratorias y fijas en el interior de la bomba y del sistema de vacío podrían provocar una fuente de ignición. Todas las bombas de vacío se han diseñado y montado para mantener los espacios de funcionamiento correctos dentro de la bomba durante todas las condiciones de funcionamiento. Para evitar esta fuente de ignición, es importante evitar la sedimentación de materiales en las superficies internas o limpiar la bomba. Los cojinetes deben mantenerse en buen estado y contar con suficiente lubricación y un gas de purga adecuado para eliminar el contacto con los gases del proceso. Para garantizar un funcionamiento seguro y fiable, debe seguirse el plan de mantenimiento recomendado para los cojinetes.

- **Absorción de partículas**: todos los mecanismos de bombeo tienen la capacidad de absorber las partículas que genera el proceso o que se derivan del proceso de fabricación del sistema. Cuando las partículas se desplazan entre una superficie móvil y una estática, es posible que generen calor. Con una pantalla de entrada (malla) o un filtro adecuado impedirá la entrada de partículas a la bomba de vacío, de manera que el tamaño y el volumen de partículas se reduce a un nivel seguro. Debe establecer un plan de mantenimiento adecuado para la pantalla de entrada o el filtro.
- **Acumulación de polvo**: cuando cualquier mecanismo de bombeo se coloca en un proceso que genera polvo, es posible que en los espacios libres internos se acumule un polvo fino y compacto. Aunque se usen filtros de polvo en la entrada, aún es posible que penetren en la bomba partículas de polvo pequeñas. Con pequeños cambios de dimensión debidos a variaciones térmicas, el polvo compacto puede tocar una superficie móvil y generar calor. Además, este calor puede provocar la ignición del polvo. Para obtener más información, consulte el apartado *Materiales pirofóricos* en la página 21.
- **Calor de compresión (autoignición)**: se debe considerar el calor de compresión interno de cualquier compresor en relación con la temperatura de autoignición de cualquier gas o vapor que se bombee. Asegúrese de que la bomba tenga una clasificación de temperatura al menos igual o superior a la de los gases que se están bombeando.
- **Superficies calientes**: cuando se permite que los gases o vapores inflamables entren en contacto con una superficie caliente, estos pueden arder si se supera la temperatura de autoignición. Nota: Los supresores de llamas y las bombas no se deben aislar térmicamente si esto pudiera provocar mayores temperaturas de la superficie de manera interna (y externa) que condujeran a la autoignición.
- **Calor derivado del exterior**: el calor puede derivarse del exterior, por ejemplo, en caso de incendio en un área cercana al equipo de vacío. En esta circunstancia, es posible generar presiones internas superiores a la presión estática máxima del sistema y temperaturas superiores a la temperatura de autoignición. Esta situación se debe tener en cuenta como parte del análisis de riesgos del sistema.
- **Flujo de gas del proceso caliente**: las temperaturas de entrada de gases elevadas pueden provocar que las superficies internas (o externas) superen la temperatura de autoignición de los materiales que se bombean. La entrada de gases a alta temperatura también puede provocar el agarrotamiento del rotor o del estator. Consulte el manual de instrucciones de la bomba de vacío para comprobar las temperaturas máximas permitidas para gases internos. Póngase en contacto con su centro de atención al cliente local para obtener más información.
- **Reacción catalítica**: la presencia de ciertos materiales puede provocar una ignición catalítica. Se debe considerar el potencial que pueden tener todos los materiales de construcción del sistema de vacío para reaccionar de esta forma con los gases o vapores que se bombean.
- **Reacción pirofórica**: el calor de una combustión de materiales pirofóricos causada por la entrada de aire u oxidantes podría servir de fuente de ignición si hay algún material inflamable presente. Consulte el apartado *Materiales pirofóricos* en la página 21.
- **Electricidad estática**: se pueden presentar determinadas condiciones en las que se acumule electricidad estática en los componentes aislados antes de descargarse a tierra en forma de chispa. El potencial de acumulación de cargas estáticas se debe considerar como parte del diseño del sistema.

- **Rayos**: cuando el equipo se instala en el exterior, la descarga de un rayo puede suministrar energía de ignición. La probabilidad de que esto ocurra se debe considerar como parte del diseño del sistema.

4.8 Resumen: diseño del sistema

Para diseñar sistemas de bombeo de vacío seguros, deben tenerse en cuenta los siguientes puntos: En función de su aplicación, pueden añadirse otros.

- Si se bombean materiales peligrosos, debe diseñar el sistema de modo que sea seguro en caso de avería.
- Utilice lubricantes PFPE (perfluoropoliéter) en las bombas cuando se bombeen oxidantes.
- Si se usa gas inerte para reducir la concentración del gas inflamable por debajo del límite de inflamabilidad o explosión inferior o por debajo de la concentración de oxidante mínima o inferior, debe asegurar la integridad del suministro de gas inerte.
- También es posible mantener la concentración por encima del límite de inflamabilidad o explosión superior, pero en este caso deben tomarse precauciones de seguridad apropiadas para garantizar que la concentración no entre en el intervalo de inflamabilidad.
- Realice una prueba de fugas de los sistemas y los equipos antes del uso para garantizar la estanqueidad requerida.
- Diluya los gases pirofóricos a niveles seguros con un gas inerte antes de que los gases se liberen a la atmósfera o se mezclen con gases oxidantes.
- No permita que la azida sódica entre en contacto con metales pesados en ningún lugar de la vía de gas del sistema.
- No permita que la presión máxima del sistema supere el nivel seguro característico de ninguna pieza individual del sistema.
- Consulte siempre la información de seguridad de las sustancias que tiene la intención de bombear.
- Considere la posibilidad de utilizar bombas en seco en lugar de las bombas de pistón o las bombas rotativas de paletas con cierre de aceite cuando existan riesgos asociados con el aceite en el volumen de barrido.
- Si utiliza bombas de vacío para bombear mezclas potencialmente inflamables, debe tener en cuenta todas las posibles fuentes de ignición y las consecuencias potenciales de una posible explosión.

5 Prácticas generales

5.1 Formación de depósitos en conductos

En algunas aplicaciones, es posible que se formen depósitos en la línea de entrada del sistema de vacío; por ejemplo, la formación de capas de silicio después de un paso de deposición de semiconductores. Estos depósitos sólidos se forman en la fase de vapor y forman capas que presentan una serie de peligros.

- A medida que las capas aumentan, es posible que se desprendan y se muevan hacia la bomba de vacío. En algunos casos, estas capas pueden dañar la bomba de vacío y, en raras ocasiones, pueden causar daños mecánicos significativos y romper la carcasa de la bomba.
- Las capas se depositan al vacío y, por lo tanto, no suelen tener capas protectoras de óxido que impidan que se quemen en contacto con el oxígeno. Se debe tener cuidado cuando estos materiales acaben expuestos a la atmósfera.
- La acumulación de capas significativas puede bloquear las líneas de entrada provocando una pérdida del rendimiento de vacío. Se recomienda instalar un ramal sin circulación en la línea de entrada para atrapar las partículas más grandes cuando los depósitos del proceso puedan desprenderse de las paredes de la línea. Además, se debe instalar un filtro de malla metálica en posición vertical junto al ramal sin circulación o un separador ciclónico para evitar la transferencia de partículas a la bomba.

Cuando los depósitos del proceso puedan ser peligrosos, es esencial que el usuario del sistema de vacío realice un análisis de riesgos para determinar la forma segura de manipular estos materiales.

5.2 Uso de convertidores de frecuencia: uso de contraseñas

Los convertidores de frecuencia suelen utilizarse para mejorar el rendimiento de un sistema de vacío, sin embargo, se debe tener cuidado de ajustar correctamente la velocidad de rotación máxima.

Muchos convertidores de frecuencia pueden crear una velocidad de salida máxima de hasta 200 Hz que, cuando se acoplan al tipo de motor adecuado, podría generar una velocidad de rotación de 12000 rpm. Dado que la mayoría de las bombas de vacío funcionan a velocidades de rotación de entre 3000 y 6000 rpm, podría crearse un riesgo considerable si el convertidor de frecuencia se programa accidentalmente con una velocidad de rotación superior.

Cuando se utilicen convertidores de frecuencia, se recomienda que la velocidad de rotación máxima de la lista de parámetros esté protegida con una contraseña. Esto ayudará a garantizar que se evite un ajuste accidental del parámetro de velocidad máxima.

5.3 Posición de válvula de entrada

La válvula de entrada situada entre el sistema de vacío y la cámara del proceso suele utilizarse para aislar el sistema de vacío durante el mantenimiento. Es esencial que esta válvula esté en la posición correcta mientras se realiza el mantenimiento.

Cuando la posición de esta válvula sea de seguridad esencial, se recomienda revisarla como parte del análisis de riesgos para determinar las prácticas de funcionamiento seguras.

5.4 Colectores de calor

El uso de colectores de calor para atrapar o hacer reaccionar los gases del proceso antes de que lleguen a la bomba de vacío crea peligros propios. El principal peligro es térmico ya que, normalmente, estos colectores funcionan con temperaturas internas de cientos de grados centígrados. Generalmente, esta temperatura no se transmite por completo a las superficies externas, pero existe la posibilidad de que los componentes adyacentes, como las juntas tóricas de elastómero, etc., sufran daños térmicos. Se debe tener especial cuidado al especificar un colector de calor.

5.5 Colectores de frío

Cuando se utiliza un colector de frío de nitrógeno para condensar materiales que suelen ser gases o vapores a presión atmosférica, es esencial tener en cuenta las consecuencias de un calentamiento inesperado. Los gases y vapores líquidos al calentarse generarán grandes volúmenes de gases/vapores que, si se ventilan en un sistema cerrado, podrían provocar una sobrepresión peligrosa. Se debe prestar especial atención a cómo se ventila el sistema para evitar la posibilidad de que se produzca una sobrepresión peligrosa.

5.6 Condensadores

Los condensadores son una forma muy eficaz de eliminar un vapor de una corriente de proceso, pero es esencial tener en cuenta la posibilidad de que se bloqueen. Normalmente, se utilizará un condensador con un recipiente receptor adecuado situado debajo en el que pueda drenarse el líquido. Este debería incluir un indicador de nivel que se utiliza para determinar cuándo se debe vaciar el recipiente. Si el recipiente no se vacía, existe la posibilidad de que el líquido se desborde hacia la bomba de vacío y empiece a bloquear la línea de escape.

5.7 Niveles de integridad del sistema

En las secciones anteriores se han indicado los métodos de protección con una dilución de gas inerte. El principio del método consiste en mezclar un gas inerte (generalmente, nitrógeno) con los gases del proceso para diluirlos hasta un nivel en que no se pueda producir ninguna explosión o reacción. Cuando se utiliza una dilución de gas como sistema de seguridad principal contra una posible explosión, es posible que necesite un sistema de alarmas y bloqueos de alta integridad para impedir el uso del sistema cuando el sistema de dilución de gas no esté en funcionamiento. La integridad del sistema de dilución de gas se debe considerar durante la etapa de evaluación de riesgos (análisis de riesgos) y dependerá de la distribución de zonas internas (es decir, el nivel de riesgo) que podría resultar en caso de que el sistema de dilución fallase. A fin de determinar los niveles requeridos de integridad del sistema, siempre se deben aplicar las mejores prácticas actuales a esta evaluación de riesgos.

Por ejemplo, si se utiliza un sistema de dilución para mantener una concentración de gases inflamables fuera de la zona inflamable y el resultado de la avería en la dilución es que el gas bombeado pueda quedar dentro de dicha zona, de manera continua o durante un período de tiempo prolongado (por ejemplo, el requisito para la Zona 0 de ATEX es >50 %),

entonces el sistema de dilución deberá cumplir una de las condiciones siguientes:

- Debe ofrecer protección total, incluso en casos de averías poco comunes.
- Debe ser seguro con dos averías presentes.
- Debe incluir dos sistemas de suministro de dilución independientes
- De manera alternativa, si el resultado de una avería en el sistema de dilución es que el gas bombeado pueda quedar dentro de la zona inflamable ocasionalmente (por ejemplo, una condición de Zona 1 de ATEX), entonces el sistema de dilución deberá cumplir una de las condiciones siguientes:
    - Debe ofrecer protección total, incluso en casos de averías inesperadas
    - Debe ser seguro con una avería presente

Si, como resultado de una avería en el sistema de dilución, es poco probable que el gas bombeado penetre en la zona inflamable, pero pueda hacerlo solo por períodos breves (por ejemplo, la condición de Zona 2 de ATEX), entonces el sistema de dilución deberá ser seguro en condiciones de funcionamiento normales.

6 Elección correcta del equipo

Para asegurarse de que elige el equipo correcto para su aplicación, considere los límites dentro de los cuales se utilizará el sistema. Los datos técnicos de nuestros equipos se incluyen en el catálogo de productos, en las publicaciones de marketing y en los manuales de instrucciones de los equipos. En la mayoría de los casos, puede solicitar más información. Para recibir asesoramiento, póngase en contacto con nosotros.

Cuando diseñe su sistema de vacío, tenga en cuenta los parámetros de la bomba mecánica correspondiente, como:

- Presión estática máxima (entrada y escape)
- Presión de entrada máxima de uso
- Presión de escape máxima de uso
- Conductancia de los componentes de entrada y escape
- La especificación de presión de otros componentes conectados a la bomba
- El control de la presión en caso de que la línea de escape quede obstruida
- Para bombas de pistón y bombas rotativas de paletas con cierre de aceite, también debe considerar, por ejemplo:
    - Flujo de lastre de gas
    - Caudal de purga de la caja de aceite
    - Gases y vapores atrapados en la caja de aceite
    - Gases y vapores absorbidos en el aceite dentro de la caja de aceite

La presión estática máxima define la presión máxima a la que se puede exponer la conexión de entrada o salida de una bomba cuando esta no está en funcionamiento. La presión depende del diseño mecánico de la bomba.

Las bombas de pistón y las bombas rotativas de paletas con cierre de aceite están diseñadas para su uso con presiones de entrada iguales o inferiores a la presión atmosférica y, aunque el índice de presión estática máxima se encuentre por encima de la presión atmosférica, no se debe permitir que la presión de entrada máxima de la bomba supere el nivel de presión atmosférica durante el funcionamiento. Algunos fabricantes limitan la presión de entrada continua de sus bombas a presiones inferiores a la presión atmosférica. Se hace referencia a la presión de entrada máxima con la bomba en funcionamiento como la presión máxima de uso.

El motivo por el que la presión máxima de uso se encuentra limitada no está necesariamente relacionado con la integridad mecánica de la bomba. La presión máxima es normalmente proporcional a la potencia nominal de la bomba a presiones de entrada elevadas y se asocia con el posible peligro de sobrecalentamiento de los componentes mecánicos de la bomba o el motor eléctrico.

Por motivos similares, se recomienda mantener la presión de salida de la bomba de vacío tan baja como sea posible, normalmente a 0,15 bar de presión manométrica (1,15 x 10 ^{5}Pa) o por debajo de ese valor, para un funcionamiento continuo. Las bombas están diseñadas para ser usadas con escapes sin restricciones. Una presión de salida de 0,15 bar de presión manométrica (1,15 x 10 ^{5} Pa) suele ser suficientemente alta para impulsar los gases de escape a través del sistema de extracción y del equipo de tratamiento.

Elección correcta del equipo

6.1 Bombas de pistón y bombas rotativas de paletas con cierre de aceite

Nuestras bombas rotativas con cierre de aceite incluyen la serie de bombas rotativas de paletas E1M, E2M, ES y RV, y la serie de bombas de pistón con cierre de aceite Stokes Microvac. En general, todas las bombas de vacío están diseñadas para utilizarlas con presiones de entrada inferiores a la presión atmosférica y con el escape con ventilación libre a la atmósfera.

Las bombas de pistón y las bombas rotativas de paletas con cierre de aceite son compresores volumétricos y pueden generar presiones de escape muy elevadas si la salida se encuentra obstruida o restringida. En estos casos, las presiones pueden superar la presión estática segura de la caja de aceite de la bomba y, en muchas circunstancias, las presiones estáticas seguras de los componentes posteriores del sistema (como los depuradores de polipropileno o las juntas tóricas de vacío). Por lo tanto, recomendamos encarecidamente colocar un sensor de presión de escape de alta integridad en la línea de escape de la bomba.

Para alcanzar un nivel de dilución seguro, el lastre de gas se puede aumentar mediante una purga de la caja de aceite (cuando se disponga de este elemento) conectada a la caja de aceite de la bomba. Un aumento en los caudales de lastre de gas y de purga de la caja de aceite aumenta la cantidad de aceite que se transfiere al sistema de escape.

Todas nuestras bombas con cierre de aceite tienen volúmenes significativos de la caja de aceite que pueden retener mezclas de gases inflamables y explosivos. El aceite de esta caja puede absorber o condensar derivados de vapor o gaseosos de forma eficaz. Los gases y vapores atrapados en el aceite pueden ser pirofóricos o tóxicos. Por lo tanto, debe contar con procedimientos de manipulación especiales para garantizar la seguridad mientras se realizan tareas de mantenimiento.

6.2 Bombas en seco

La presión máxima de uso está limitada por los mismos factores que afectan a las bombas con cierre de aceite (es decir, el posible peligro de sobrecalentamiento de los componentes mecánicos de la bomba o el motor eléctrico).

Nuestras bombas en seco son compresores volumétricos positivos y pueden generar presiones de escape elevadas. Cuando las bombas se instalan en un sistema cuyo proceso puede generar derivados sólidos (y, por lo tanto, existe la posibilidad de obstrucción en la línea de escape), recomendamos encarecidamente incorporar un presostato de escape de alta integridad. Consulte el manual de instrucciones de la bomba para conocer las presiones de funcionamiento a las que se deben ajustar los interruptores.

Nuestras bombas en seco tienen una capacidad de lastre de gas de gran volumen. La incorporación de un gas de dilución como el nitrógeno se puede realizar a través del mecanismo de bombeo para optimizar la supresión de la reacción. Consulte el manual de instrucciones de la bomba para comprobar los caudales de la purga de gas.

6.3 Diseño de la tubería

6.3.1 Fuelles

Los fuelles son componentes cortos, de paredes delgadas y circunvoluciones profundas. Se utilizan para reducir la transferencia de vibraciones de una bomba al sistema de vacío.

Instale siempre los fuelles en línea recta con ambos extremos ajustados de manera rígida. Cuando se instalan correctamente, los fuelles pueden tolerar una leve presión interna positiva (consulte el manual de instrucciones que se entrega con los fuelles para conocer más detalles). No utilice fuelles en escapes de bombeo en seco; utilice tuberías trenzadas flexibles (consulte el apartado *Tuberías flexibles* en la página 43).

Considere la posibilidad de avería por fatiga de los fuelles cuando se utilizan en aplicaciones de ciclos frecuentes.

6.3.2 Tuberías flexibles

Las tuberías flexibles poseen una pared más gruesa y circunvoluciones menos profundas que los fuelles. Estas tuberías ofrecen un método conveniente para conectar los componentes del sistema de vacío y permiten compensar las faltas de alineación o los pequeños movimientos en tuberías de vacío rígidas. Las tuberías flexibles se pueden configurar en codos ligeramente agudos y mantendrán su posición.

Las tuberías flexibles están diseñadas para instalarse en sistemas estáticos. No son apropiadas para flexiones repetidas que pueden provocar ruptura por fatiga.

Cuando utilice una tubería flexible, emplee la longitud más corta que sea posible y evite los codos innecesarios. En el caso de las aplicaciones donde se puedan dar presiones de escape altas, utilice tuberías trenzadas flexibles.

Las tuberías trenzadas flexibles son fuelles con una capa de protección exterior de hebras entrelazadas de acero inoxidable Cuando instale una tubería trenzada flexible, debe tener en cuenta el radio mínimo de plegado indicado en el Manual de instrucciones que se entrega con dicha tubería.

6.3.3 Puntos de sujeción

Debe sujetar correctamente las tuberías y los componentes oportunos. Por ejemplo, si sujeta los fuelles de manera incorrecta, no reducirán la vibración que genera la bomba y esto puede provocar la fatiga de las tuberías.

6.3.4 Juntas

Cuando exista la posibilidad de que se produzcan presiones positivas en cualquier parte del sistema de vacío (incluso en condiciones de avería), utilice materiales y sellos adecuados, capaces de tolerar las presiones positivas y de vacío esperadas.

6.4 Protección física contra sobrepresiones

Como se ha indicado anteriormente, una restricción u obstrucción en el sistema o en uno de sus componentes puede provocar una sobrepresión. Una sobrepresión se puede producir como resultado de un flujo de gas comprimido proveniente de la bomba o de suministros externos de gas comprimido (como los que se utilizan en un sistema de dilución). Hay dos métodos principales para proteger un sistema contra la sobrepresión: la

descarga de presión y la alarma o el limitador de sobrepresión, que se describen en los siguientes apartados.

6.4.1 Descarga de presión

Puede utilizar discos de ruptura o válvulas de descarga de presión para liberar cualquier exceso de presión. La presión de uso del dispositivo debe ser inferior al índice de presión de diseño del sistema. Conecte estos dispositivos con tuberías apropiadas a un área donde sea seguro ventilar los gases del proceso y que no presente restricciones de ventilación. Si en el proceso se generan derivados sólidos, los dispositivos de descarga de presión se deben revisar regularmente para garantizar que no se encuentren obstruidos ni restringidos. En el diseño de tales dispositivos de protección, se debe tener en cuenta el efecto de las pulsaciones de la presión sobre la resistencia a la fatiga del disco de ruptura o la vida útil de la válvula.

6.4.2 Alarma/limitador de sobrepresión

Este es el método de protección que solemos utilizar. Se recomienda para cualquier sistema, pero puede no ser adecuado para los sistemas que generan derivados sólidos.

6.4.3 Reguladores de presión

Hay dos tipos principales de reguladores de presión: con ventilación y sin ventilación. Los reguladores con ventilación liberan los gases a la atmósfera o a una línea de ventilación independiente para mantener una presión de salida constante en condiciones sin flujo. Por lo general, estos reguladores se utilizan cuando la integridad de la tubería es de extrema importancia.

Los reguladores sin ventilación solo pueden mantener una presión de salida constante en condiciones de flujo. En condiciones en las que no existe flujo, la presión de salida de algunos reguladores puede subir hasta el nivel de la presión de suministro. La tasa de aumento depende de las características del regulador y del volumen al que esté conectada la salida. El aumento puede tardar en producirse desde unos pocos minutos hasta varios meses.

Los reguladores de presión no están diseñados para su uso como válvulas de cierre y deben utilizarse junto con un dispositivo aislante apropiado (como una válvula solenoide) cuando se requiere aislamiento.

Asimismo, deberá tomar las medidas necesarias para ventilar los excesos de presión de manera segura.

6.4.4 Supresores de llamas

Los supresores de llamas no son dispositivos que permiten evitar explosiones. Están diseñados para evitar la propagación de un frente de llama a lo largo de un tubo o conducto (consulte el apartado *Uso de sistemas de protección de supresores de llamas (sistemas HazLoc)* en la página 34). Los supresores de llamas ofrecen una superficie grande y pequeños espacios de conductancia al frente de llama y, de esta manera, permiten templar la llama. Por lo general, los supresores de llamas solo son apropiados para sistemas que utilizan gases o vapores limpios.

La energía explosiva de las mezclas de gases aumenta con la presión. La mayoría de los supresores de llamas están diseñados para proteger áreas en las que la presión interna no supera la presión atmosférica. Compruebe que la presión de uso del sistema de extracción de gases que conduce al supresor de llamas no pueda superar la presión máxima de uso. No obstante, en el caso de los supresores homologados para su

uso con las bombas de vacío en seco de sustancias químicas, deberá consultar el manual de instrucciones del producto relacionado para conocer las presiones máximas permitidas. También debe tener en cuenta la contrapresión máxima permitida de la bomba de vacío.

Los supresores de llamas funcionan mediante la eliminación del calor de combustión del frente de llama y, por lo tanto, tienen una temperatura máxima de uso segura. No permita que esta temperatura se supere mediante una cinta calefactora, un aislamiento o la temperatura del flujo de gas que pasa a través de ellos.

La capacidad de un supresor de llamas para detener el fuego depende de la velocidad del frente de llama que, a su vez, depende de la distancia desde la fuente de ignición. Cuando se usan con nuestras bombas de vacío de sustancias químicas, deben estar estrechamente conectados a la entrada y el escape. En determinadas circunstancias, se acepta el uso de codos y piezas en T entre la bomba y el supresor con algunas bombas. Póngase en contacto con nosotros para obtener más información.

6.5 Sistemas de purga

Se pueden instalar sistemas de purga de gas inerte en los equipos para eliminar los gases del proceso que quedan en el sistema al finalizar un ciclo.

El uso correcto de la purga puede garantizar la eliminación de los productos corrosivos, lo que impedirá que dañen la bomba y, más importante aún, los sistemas de protección como los supresores de llamas. Además, la eliminación de los gases del proceso garantiza que no se produzcan reacciones químicas indeseables y potencialmente peligrosas entre los materiales que se emplean en diferentes ciclos del proceso.

6.6 Resumen: elección correcta del equipo

- Seleccione el tipo de equipo correcto para su aplicación
- Instale todos los dispositivos de seguridad apropiados que sean necesarios para garantizar la seguridad en caso de avería
- Elimine los volúmenes estancados
- Confirme que el sistema esté debidamente controlado y regulado
- Cuando corresponda, instale dispositivos de descarga de presión
- Utilice supresores de llamas, cuando corresponda
- Realice una prueba de fugas de los sistemas y los equipos antes del uso.

7 Procedimiento de uso y formación

La seguridad de uso de los equipos implica una formación apropiada, instrucciones claras y concisas, así como tareas de mantenimiento regulares. Es importante que todo el personal que utiliza equipos de vacío cuente con la formación y cualificación adecuadas y, si es necesario, con supervisión.

Si tiene dudas sobre cualquier detalle del funcionamiento o la seguridad relacionado con nuestros equipos, póngase en contacto con nosotros para obtener más información.

El diseño de un sistema de vacío influye significativamente en la seguridad; sin embargo, la experiencia ha demostrado que el funcionamiento correcto del sistema es igualmente importante, especialmente cuando se tiene en cuenta el potencial de uso indebido o los fallos.

No se puede proporcionar una lista completa de los peligros asociados al funcionamiento de un sistema de vacío específico. El usuario final debe determinarlo mediante un análisis de riesgos adecuado.

Es muy importante que se establezca un procedimiento de funcionamiento detallado que no solo cubra el funcionamiento normal, sino también lo que se debe hacer en caso de realizar un paso de mantenimiento o producirse un fallo. Suelen ser estos eventos planificados los que provocan peligros inesperados y posibles daños o lesiones.

A continuación, se muestran algunos ejemplos para dar una idea del tipo de peligro inesperado que podría producirse:

- Un proceso que crea polvo de metal puro dentro del sistema de vacío funciona con purgas de nitrógeno para garantizar que la atmósfera dentro del sistema de vacío no contenga oxígeno. Durante una perturbación del proceso, es necesario abrir la cámara para retirar algunos componentes dañados. Este procedimiento tarda solo unos minutos, durante los cuales la válvula aislante de entrada aísla la bomba de vacío de la cámara. Al finalizar el paso de mantenimiento, la cámara se sella y, a continuación, se bombea con la bomba de proceso. Desafortunadamente, la cámara contiene ahora aire atmosférico y la presión resultante en la bomba de vacío provoca una ignición del polvo de metal reactivo.
- En una aplicación de horno, los materiales del proceso se extraen a través de un filtro situado en la línea de escape que necesita una limpieza periódica. Debido a las presiones de la producción, se omitió el paso de limpieza y, con el paso del tiempo, el filtro se obstruyó y provocó la desconexión de la bomba de vacío debido a la sobrepresión en el escape. Normalmente, esta habría sido una condición segura, salvo por el intento del operario del proceso de volver a poner en funcionamiento la bomba manteniendo pulsado el botón de arranque verde y anulando la protección térmica del motor. Como consecuencia, la bomba de vacío generó una contrapresión excesiva que provocó la explosión del filtro.
- En una planta química, se instaló una bomba de vacío con un condensador de escape para atrapar un subproducto corrosivo antes de que entrara en la línea de escape. Parte del procedimiento de funcionamiento consistía en drenar el recipiente cuando el interruptor de nivel alto indicara que estaba lleno. El escape se conectó a una línea de escape común que normalmente estaba alrededor de la presión atmosférica, pero, debido a un fallo, estaba a una presión

mayor. Cuando el operario abrió el recipiente para drenarlo, el líquido corrosivo fue expulsado a presión y salpicó al operario provocando graves consecuencias.

8 Modificación de los sistemas de vacío

Normalmente, los sistemas de vacío están diseñados para un fin concreto y es habitual realizar un análisis de riesgos teniendo en cuenta una aplicación específica.

Si el sistema de vacío se utiliza para un fin diferente o si los gases del proceso bombeados se modifican de alguna manera, el análisis de riesgos original dejará de ser válido y existirá el riesgo de que se produzca un peligro inesperado.

Realice un nuevo análisis de riesgos siempre que se modifique un sistema de vacío o se cambien los gases del proceso de alguna manera.

9 Resumen

- Realice una evaluación de riesgos para detectar cualquier peligro y eliminarlo o, de no ser posible, mitigarlo. Esto se aplica al diseño, la construcción, la puesta en marcha, el funcionamiento, el mantenimiento y el desmantelamiento del sistema de vacío.
- Identifique todas las reacciones químicas posibles que podrían presentarse en su sistema. Tenga en cuenta las reacciones químicas anómalas, incluso las que podrían producirse en condiciones de avería.
- Consulte las fichas técnicas de seguridad de los materiales/fichas técnicas de los materiales a la hora de evaluar los posibles riesgos asociados con los materiales del proceso; por ejemplo, la autoignición.
- Utilice técnicas de dilución para minimizar las reacciones con oxidantes y materiales inflamables.
- Utilice el tipo de lubricante correcto para la bomba cuando bombee oxidantes y materiales pirofóricos.
- No utilice metales pesados en la vía de gas del sistema de bombeo si en su proceso se utiliza o produce azida sódica.
- Al realizar los cálculos de seguridad, asegúrese de que se tengan en cuenta las presiones de funcionamiento seguras para todos los componentes del sistema. Asegúrese también de identificar las condiciones anómalas y de avería.
- Compruebe que está utilizando los tipos de dispositivos de descarga de presión correctos y que sean apropiados para su aplicación.
- Asegúrese de que no puedan producirse obstrucciones del escape.
- Confirme que los gases de dilución estén debidamente regulados y controlados.
- Si se bombean materiales peligrosos, debe diseñar el sistema de modo que sea seguro en caso de avería.
- Utilice aceite y lubricantes de PFPE (perfluoropoliéter) cuando bombee oxidantes.
- Utilice un gas inerte para diluir gases inflamables y pirofóricos a niveles seguros o garantizar que está por encima del límite inflamable o de explosión superior, teniendo en cuenta los factores de seguridad apropiados durante todas las condiciones del proceso, incluidas la averías.
- No permita que la presión máxima del sistema supere el índice de presión máxima de ninguna pieza individual del sistema.
- Considere la posibilidad de utilizar bombas en seco en lugar de las bombas con cierre de aceite cuando existan riesgos asociados con el aceite en el volumen de barrido.
- Elimine los volúmenes estancados.
- Confirme que el sistema esté debidamente controlado y regulado.
- Utilice supresores de llamas, cuando corresponda.
- Realice una prueba de fugas de los sistemas y los equipos antes del uso.

Límites de funcionamiento normales: no supere los límites de funcionamiento normales

Hay muchos componentes que pueden formar un sistema de vacío. En todos los casos, estos componentes deben seleccionarse y utilizarse dentro de sus límites de funcionamiento previstos. De lo contrario, podría producirse un fallo inesperado.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Leybold

Pioneering products. Passionately applied.

Leybold GmbH,
Bonner Strasse 498,
50968 Colonia,
ALEMANIA
+49-(0)221-347-0
info@leybold.com
www.leybold.com