

Construcción de Sistemas de Presión en el Intervalo de Medio y Alto Vacío

Carlos Mauricio Villamizar Mora^{1*}
Jonathan Javier Duarte Franco¹

1. Grupo de Investigación en Fluidos y Energía, Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, Bucaramanga, Colombia.

* cvillamizar@cdtdegas.com

RESUMEN

El trabajo en presiones de vacío es desarrollado en el campo de la industria y la investigación. Los sistemas de vacío son utilizados para generar estos valores de presión en diferentes intervalos, los cuales están clasificados según la norma ISO 3529. En el presente artículo, inicialmente se muestran las generalidades a la hora de construir un sistema de vacío, tomando como referencia compañías líderes en el desarrollo de tecnologías y componentes para el intervalo de medio y alto vacío. Posteriormente se procede a plantear una metodología donde se abordan factores como factores de selección y diseño concernientes a cámaras de vacío, materiales, sistemas de bombeo, entre otros. Finalmente, se muestran las características principales y consideraciones en el diseño y construcción de los sistemas de vacío, así como las diferentes tecnologías de medición.

Palabras clave: *Vacío, sistema de vacío, presión absoluta, vacuómetro, bomba de vacío.*

ABSTRACT

The work in vacuum pressures is developed in the field of industry and research. Vacuum systems are used to generate these pressure values at different intervals, which are classified according to ISO 3529. In this article, the generalities are initially shown when building a vacuum system, referring to leading companies in the development of technologies and components for the medium and high vacuum range. Subsequently, we proceed to propose a methodology where factors such as selection and design factors concerning vacuum chambers, materials, pumping systems, among others are addressed. Finally, an informative article on the main characteristics and considerations in the design and construction of vacuum systems is obtained.

Keywords: *Vacuum, vacuum system, absolute pressure, vacuum gauge, vacuum pump.*

INTRODUCCIÓN

El vacío es, según la norma ISO 3529 (Vacuum Technology – Vocabulary), “Si se trata de un gas enrarecido o el medio ambiente correspondiente a dicho estado, asociado con una presión o una densidad de masa por debajo del nivel atmosférico”. Es decir, el vacío es un estado en el cual la presión es menor que el nivel de presión atmosférica local o estándar.

A nivel industrial, la aplicación de los sistemas de vacío resulta relevante y útil en los procesos de químicos y de manufactura. Sectores productivos como alimentos y materiales, servicios de laboratorio especializados en hidrocarburos, procesos como evaporación, destilación, filtración, liofilización, fusión, deposición, soldadura y sinterización, requieren el uso de presiones absolutas en los niveles de medio y alto vacío. Para la realización de estos procesos, es necesaria la construcción de sistemas que permitan alcanzar dichos intervalos de presión.

La construcción de sistemas que trabajen en vacío se ha desarrollado a nivel mundial partiendo desde aplicaciones investigativas y posteriormente siendo implementados en el sector industrial, representando así una ayuda en los métodos de procesamiento [1]. En el presente artículo se dará una revisión a los componentes que se integran en la construcción de sistemas de presión en el intervalo de medio y alto vacío.

METODOLOGÍA

La metodología que se abordará en el artículo para la construcción de sistemas de presión en el intervalo de medio y alto vacío es la siguiente:

INTERVALOS DE PRESIÓN DE OPERACIÓN

Sea cual sea el proceso que se vaya a ejecutar, la primera consideración es el intervalo de presión o rango de vacío en que operará el sistema. Es importante esta selección ya que los instrumentos o herramientas presentan características de operación y tratamiento para cada región. Por ejemplo, no es lo mismo un proceso como la producción de lámparas incandescentes que emplea rangos de presión alrededor de 1×10^{-2} Pa, a otro proceso como lo es la investigación de materiales que logra presiones de hasta 1×10^{-10} Pa.

Según ISO 3529-1, ver Tabla 1, en la práctica se distinguen alcances en que se mide el vacío, hay algunas variaciones en los límites de los intervalos, normalmente se utilizan estos rangos típicos.

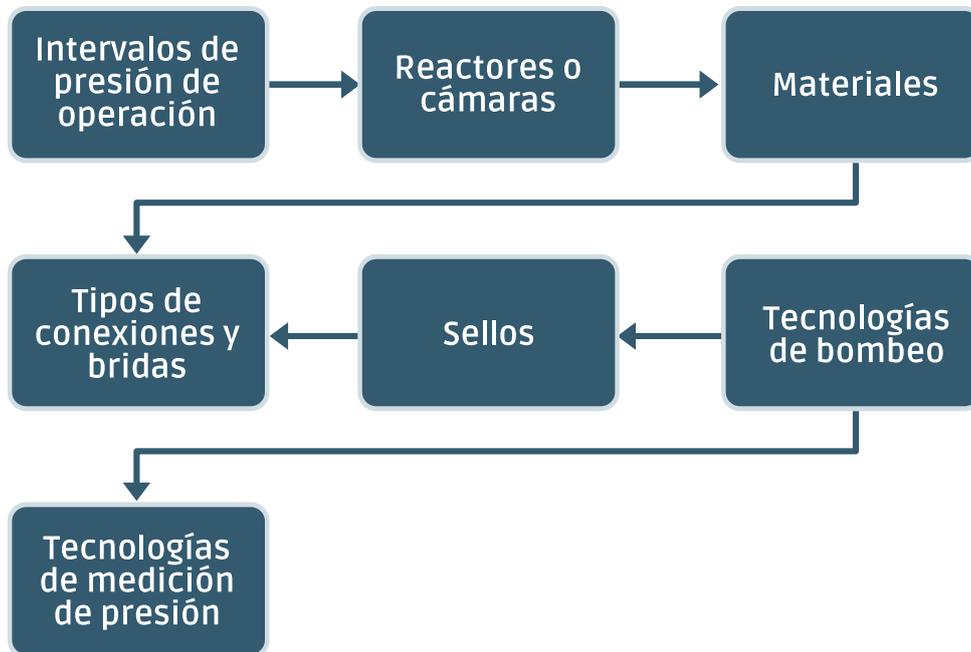
Tabla 1. >> Intervalos de vacío reconocidos [17].

100 kPa – 100 Pa	Bajo Vacío
100 Pa – 0,1 Pa	Medio Vacío
0,1 Pa – 0,0001 Pa	Alto Vacío (HV)
Debajo de 0,0001 Pa	Ultra Alto Vacío

REACTORES O CÁMARAS

Un reactor o cámara de vacío es un contenedor del cual se extrae el aire y otros gases mediante una bomba de vacío. Hay diferentes configuraciones ya estandarizadas dentro de las cuales están tipo caja, esfera, cilindro, D, campana de vidrio, entre otros. Estas configuraciones

Figura 1. >>
Metodología.



pueden alcanzar valores entre medio y alto vacío, pero difieren en su uso dependiendo de la aplicación. Kurt J. Lesker, compañía norteamericana especializada en la manufactura y fabricación de estos componentes, describe las características de cada configuración empleada en sistemas de vacío que se resumen en la Tabla 2.

MATERIALES

Algunos de los materiales que son comúnmente empleados para la construcción de reactores o cámaras en sistemas de vacío son el vidrio, el acero inoxidable y el aluminio. Los materiales que representan una opción económica, maquinado fácil y manipulación como el cobre, latón, algunos polímeros y otros cerámicos porosos son empleados de forma estratégica en

ambientes de medio o bajo vacío. La Tabla 3 describe las ventajas y desventajas de cada uno de estos materiales [3].

TIPOS DE CONEXIONES Y BRIDAS

Según Kurt J. Lesker, las bridas son elementos semipermanentes que permiten la unión entre partes que:

- Son frecuente u ocasionalmente des-ensambladas,
- Son livianos como para ser trasladados con el equipo disponible,
- No pueden ser soldados debido a la sensibilidad al calor o los reemplazos que necesitan. [3]

Enseguida, se listan los requisitos a la hora de

Tabla 2. >> Características de los tipos de cámaras empleados en sistemas de vacío [18].

Tipo de cámara	Características	Ilustración
Caja	Tienen un lado plano, emplean paredes gruesas o abrazaderas grandes para soportar la presión atmosférica. Fácil y rápido acceso a su interior.	
Esférica	Los puertos ubicados alrededor de la cámara permiten con el centro de la cámara o con puntos focales. Para un volumen requerido emplean menor área superficial.	
Cilíndrica	Poseen delgadas paredes, pueden ser empleadas en orientación vertical u horizontal. Al interior de las cámaras verticales se accede mediante cámaras secundarias de carga-bloqueo ubicadas en un puerto lateral. Las cámaras horizontales poseen domos o bridas con sellos de juntas tóricas que son del mismo diámetro del cilindro.	
Campanas de metal	Son una cámara cilíndrica con un domo soldado en uno de sus extremos, mientras que el otro tiene una brida metálica.	
Campanas de vidrio	Son empleadas en aplicaciones de laboratorio. El material permite visibilizar lo que ocurre al interior de la cámara.	

Tabla 3. >> *Ventajas y desventajas de algunos materiales empleados en tecnologías de vacío.*

Vidrio	Acero	Aluminio
<p>Se emplea usualmente el vidrio blando de soda y el de borosilicato (Pyrex).</p> <p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo de adquisición de las partes. - Permite observar lo que sucede en el interior. - Químicamente inerte. - Fácil limpieza. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Frágil. - Vulnerables a choques térmicos. - No es horneable. 	<p>Se usa la serie 300 de Acero Inoxidable.</p> <p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resistente a la corrosión. - Soldable. - Permite su horneado. <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Deformación una vez se superan los 500 °C. - Elevado costo de materia prima. - El hidrógeno limita la llegada a la presión última. 	<p>Se comercializan las series 5000 y 6000.</p> <p>Ventajas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Puede ser soldable. - Empleado en aplicaciones de alto vacío. - Resistencia a la corrosión y ambientes corrosivos. <p>Desventajas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se requiere de un recubrimiento en las piezas de otros materiales. - Bridas de aluminio caras respecto a las de acero.

seleccionar un sistema de bridas para una aplicación de vacío:

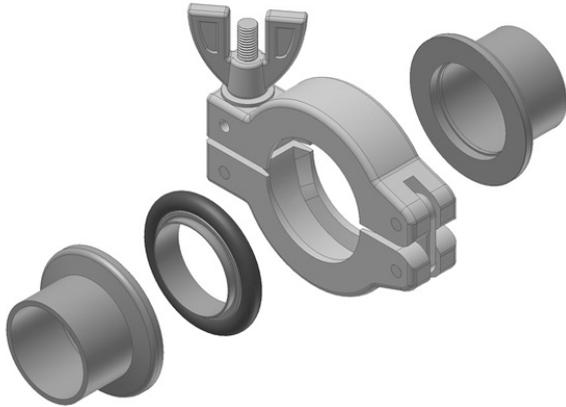
- Tipo de material del sello.
- Compatibilidad del material de la brida con los otros elementos del sistema de vacío.
- Presión última de trabajo.
- Temperatura de operación.
- Organizaciones internacionales y algunos fabricantes han diseñado sistemas de bridas que satisfacen las necesidades de las aplicaciones de alto vacío. A continuación, se muestran algunos tipos de bridas empleadas en sistemas de vacío.

BRIDAS ISO

La Organización Internacional de Estándares (ISO), publicó sus normas dimensionales para bridas de vacío con sello de anillo, las cuales están divididas en dos grupos, las ISO 2861 también llamadas ISO-KF y las ISO 1609 son relacionadas como ISO-MF o ISO-K.

Una brida ISO 2861, son de diámetros de brida pequeños suelen emplearse en aplicaciones de tubería y en aplicaciones de alto vacío [4], también se les conoce como ISO-KF, devengando la sigla KF del alemán Kleinflansch que traduce

Figura 2. >> Conexión de bridas KF [4].



“brida pequeña”.

El ensamblaje consta de dos bridas idénticas y rotables, un anillo de centrado con sello y una abrazadera, tal y como se ve en la Figura 2.

La función del anillo de centrado o junta tórica es mantener centradas y espaciadas las bridas, sostener el sello de anillo y limitar la compresión de este mismo. La abrazadera junta las bridas y también ejerce una fuerza de sello.

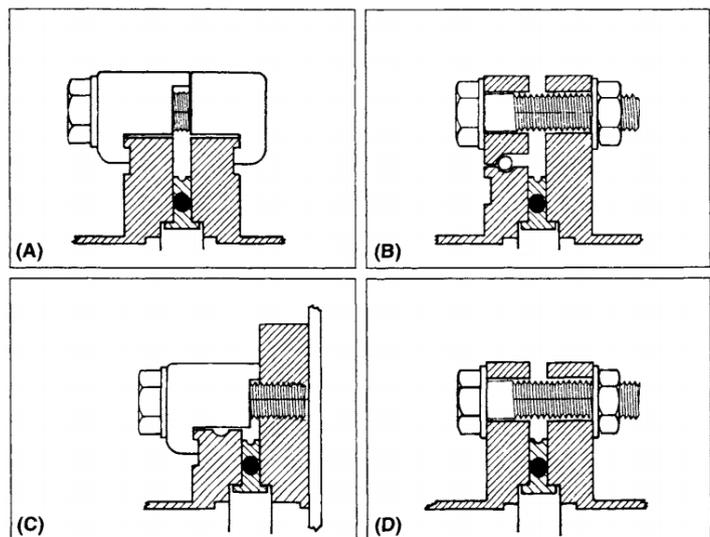
Las bridas ISO 1609 o ISO-MF, están diseñadas

para diámetros de brida desde 2,5 pulgadas hasta 12 pulgadas, su montaje involucra un anillo centrador para el sellado. Para sujetarlas, utilizan múltiples fijaciones, la sigla MF es debido a “Multi Fastener Flange” [5]. La Figura 3 muestra las técnicas de sujeción para las bridas ISO 1609.

BRIDAS DE BORDE DE CUCHILLA (CF)

Este sistema de bridas fue introducido en 1960 con el nombre de ConFlat®, una serie de bridas de sello metálico especiales para Ultra Alto Vacío. Están disponibles en el mercado debido a los numerosos fabricantes que existen, al mismo tiempo las bridas pueden ser intercambiadas sin importar quien haya sido el fabricante. La unión de bridas tipo ConFlat se muestra en la Figura 4. Se logra el sello gracias a que las caras de las bridas cuentan con un borde de cuchilla, el cual penetra en un sello de metal suave. La sujeción del par de bridas se logra gracias a pernos pasantes que al mismo tiempo ejercen presión para sellar, también pueden usarse pernos

Figura 3. >> Formas de sujetar las bridas ISO 1609 o ISO-MF. Se pueden emplear abrazaderas de doble gancho (A) o pueden utilizarse pernos (D). Se usan tornillos cuando se cuenta con poco espacio para la sujeción, siendo el caso de las válvulas. Para las bridas no roscadas se puede colocar una brida roscada y usar ganchos sencillos de abrazadera (C), o mediante un anillo que encaja en el borde externo de la brida (B).



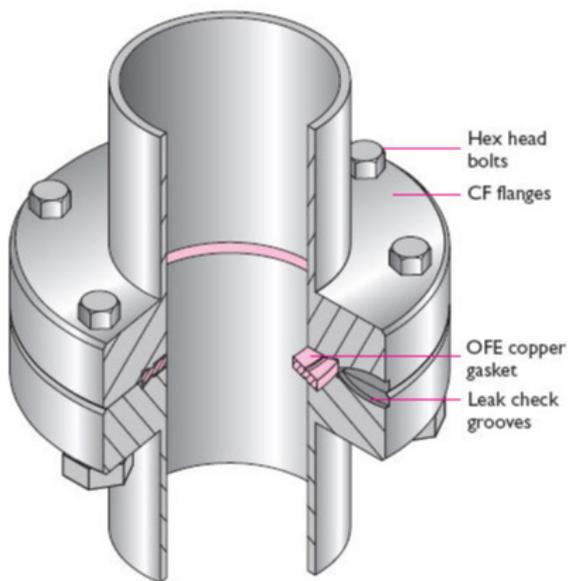


Figura 4. >> Ensamblaje de bridas metálicas o ConFlat (CF) [19].

en bridas roscadas, siendo práctico para situaciones en que no sea posible el uso de tuercas. Se tienen dos posibilidades de bridas, rotables y no rotables y pueden ser utilizadas en una misma junta [5].

La compañía Kurt J. Lesker recomienda para el caso en que se desee construir una nueva cámara de vacío, comparar todos los sistemas de bridas y escoger según los siguientes requerimientos:

- Cumplir con las condiciones de vacío requeridas.
- Coincidir con las condiciones de temperatura a las que se expondrá la cámara.
- Afectaciones por materiales o productos del proceso.
- Costo de adquisición.
- Compatibilidad con las juntas y componentes agregados de otros fabricantes.

SELLOS

Los sellos en la construcción de los sistemas de vacío ayudan a unir componentes con una mínima tasa de fuga y practicidad para su desmonte, pueden ser de metal (cobre u oro) o elastómero dependiendo de la aplicación del sistema de vacío.

SELLOS DE POLÍMEROS

Polímeros como nitrilo, poliuretano, silicona y PTFE son empleados como materiales de sello en sistemas de vacío, a la hora de seleccionar se deben tener en cuenta los siguientes factores de operación y su desempeño [6]:

- Temperatura máxima de operación.
- Tiempo de vida durante la instalación.
- Exposición química, interna y externa.
- Características de compresión.
- Permeabilidad y características de desgasificación.

Figura 5. >> Corte transversal donde se aprecia el sello metálico en bridas CF [20].



- Posibilidad de daño por radiación nuclear.
- Disponibilidad y costo.

SELLOS METÁLICOS:

Los sellos metálicos pueden ser fabricados de cobre, oro y aluminio, usualmente estos sellos son de un solo uso o “sacrificio”, ya que el sello es aplastado y a la vez deformado en ambos extremos por los bordes de cuchillas que tienen las bridas ConFlat, tal y como se muestra en la Figura 5.

A la hora de seleccionar el tipo de sello para el sistema de vacío, los sellos metálicos presentan las siguientes características [7]:

- Resistencia a altas temperaturas de hornado.
- Bajas tasas de desgasificación.
- No se produce permeación.
- Resistente a ambientes extremos, corrosivos, radioactivos, etc.
- Facilidad de ensamble.
- Sello durante un tiempo prolongado; no hay degradación del material.

TECNOLOGÍAS DE BOMBEO

Las tecnologías de bombeo empleadas en la generación de vacío están clasificadas en dos categorías: bombas de desplazamiento y bombas de unión a gas [8].

La primera categoría, bombas de transferencia de gas o de desplazamiento de gas tienen dos subcategorías, bombas de desplazamiento positivo o bombas cinéticas de vacío. En las bombas de desplazamiento, el gas bombeado es atrapado, comprimido y eyectado hacia la atmósfera u otra estación de bombeo [9]. Las bombas cinéticas desplazan gas al acelerar este mismo en la dirección del bombeo, ya sea con un sistema mecánico de bombeo o con una corriente de vapor la cual es condensada al final de la sección de bombeo [10].

La segunda categoría, bombas de unión a gas, empleada en sistemas de UHV juntan el gas a un sustrato activo mediante la captación o condensado del gas a una temperatura adecuada. Este tipo de bombas presentan limitación debido a la capacidad de absorción del gas y deben ser regeneradas en ciertos intervalos dependiendo del proceso [10]. La quimisorción es ejecutada técnicamente por bombas getter, bombas criogénicas, bombas de criosorción.

En la Figura 6, adaptada de información de la empresa Pfeiffer, se muestra un mapa conceptual de las bombas de vacío y su clasificación dependiendo del principio de operación.

Las bombas de vacío pueden ser divididas también en tres categorías:

- Bombas primarias (respaldo): Intervalos de bajo y medio vacío.
- Bombas de refuerzo: Intervalos de bajo y

Figura 6. >> Principio de operación de las bombas de vacío. Adaptado de [10].

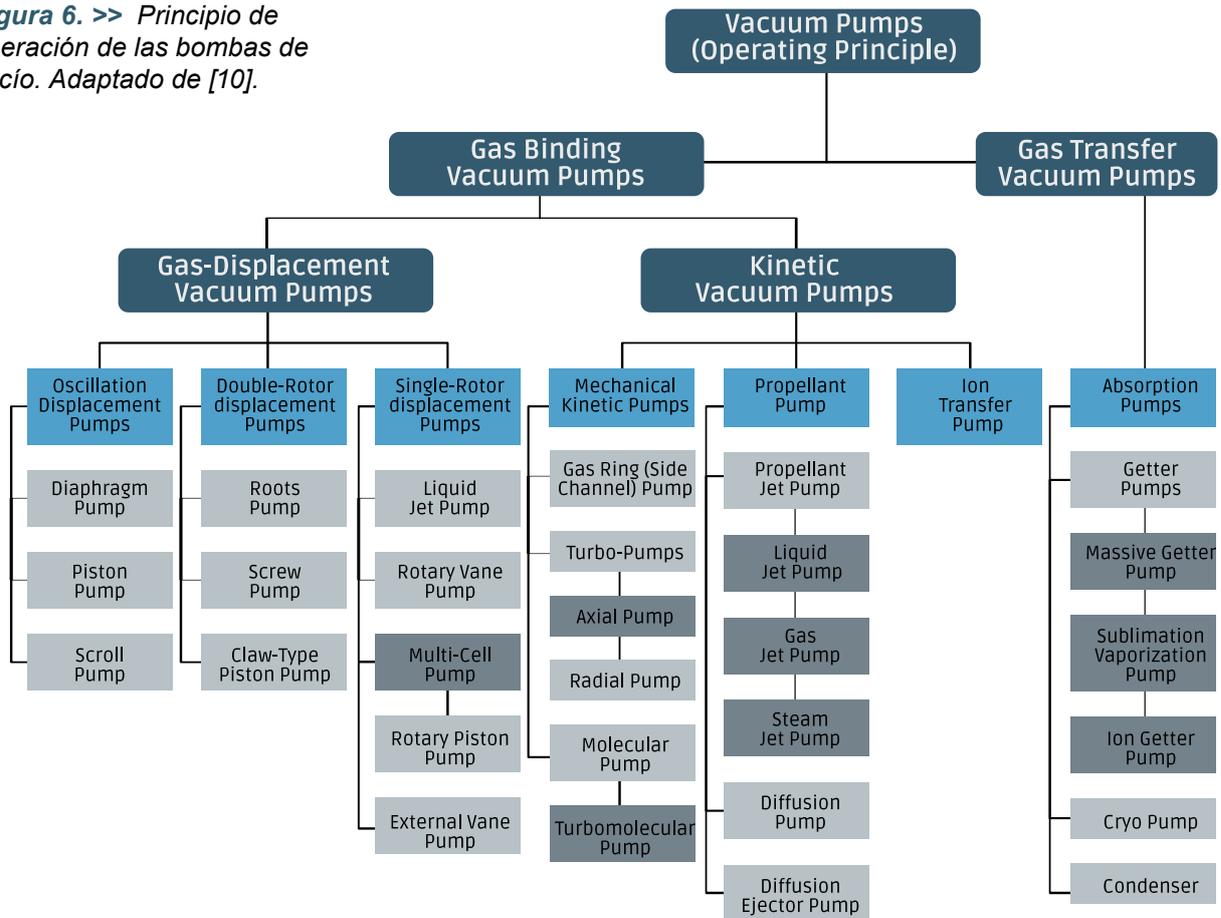
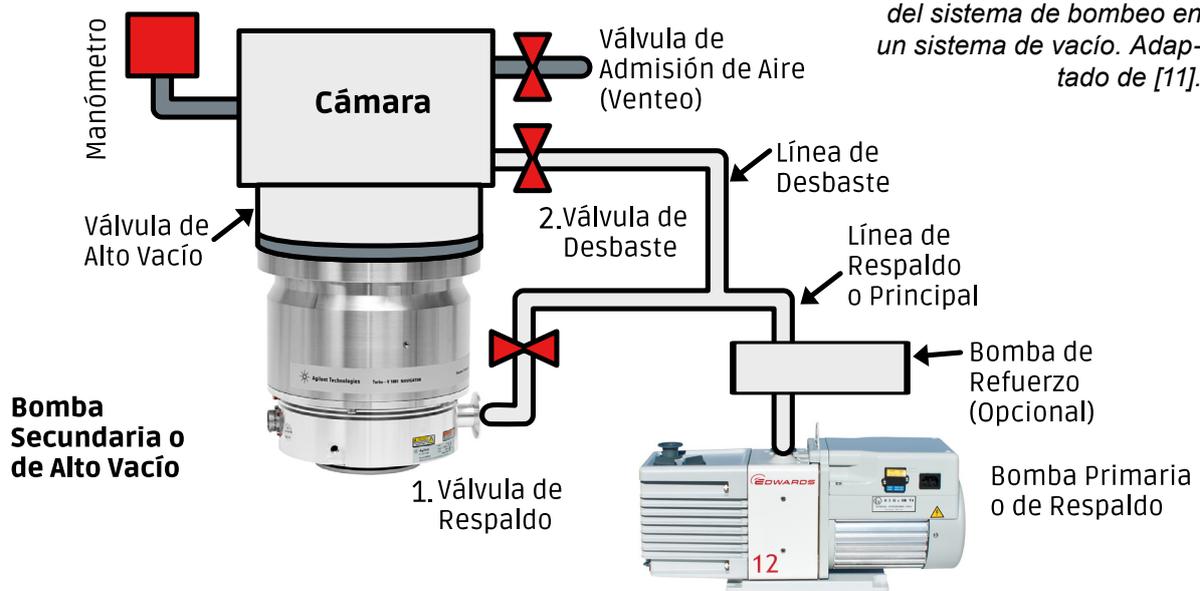


Figura 7. >> Configuración del sistema de bombeo en un sistema de vacío. Adaptado de [11].



medio vacío.

- Bombas secundarias (Alto vacío): Intervalos de alto vacío y ultra alto vacío.

Se emplean las bombas de desplazamiento como bombas primarias y también como bombas de refuerzo, esto debido a que su presión última está en el intervalo de la presión inicial que requieren las bombas cinéticas o bombas secundarias. La Figura 7 muestra la configuración del sistema de bombeo conectado a una cámara de vacío. El juego de válvulas permite el funcionamiento de las bombas en serie o que opere la bomba secundaria directamente conectada a la cámara. [11]

A la hora de seleccionar un sistema de bombeo, los factores a tener en cuenta se muestran en la Tabla 4.

TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN

Los manómetros de vacío o vacuómetros son dispositivos para la medición de presiones de vacío o subatmosféricas. Los vacuómetros son empleados para monitorear y controlar la presión en un sistema. [13]. Al llevar a cabo la medición de presión, existen dos puntos de referencia. Por un lado, el instrumento puede medir con respecto a la presión absoluta, empleando como punto de partida en su escala el vacío perfecto (0 psia), es decir, con cero como punto cero. O la segunda, cuando se toma la presión con respecto a la presión manométrica pues se ocupa como punto inicial la presión atmosférica (0 psig) [14].

Las tecnologías de vacío miden presión p de una forma directa de acuerdo a la ecuación que la define al medir la fuerza ejercida en un área $p=F/A$ empleados en bajo y medio vacío,

Tabla 4. >> Características de operación para seleccionar las bombas que conforman el sistema de bombeo del sistema de vacío [12].

Nivel de vacío	Máxima presión de vacío que una bomba puede alcanzar.
Razón de aire extraído	También expresado como eficiencia verdadera volumétrica.
Caballos de fuerza	Cantidad de fuerza requerida para operar la bomba.
Temperatura	Temperatura de operación al realizar la extracción del fluido gaseoso.
Costo	Cada tecnología tendrá coste propio dependiendo del nivel de vacío.
Configuración del sistema de bombeo	Paralelo, en serie o mixto.
Seguridad	Requisitos de seguridad y reglamentarios de dicho sistema de bombeo.

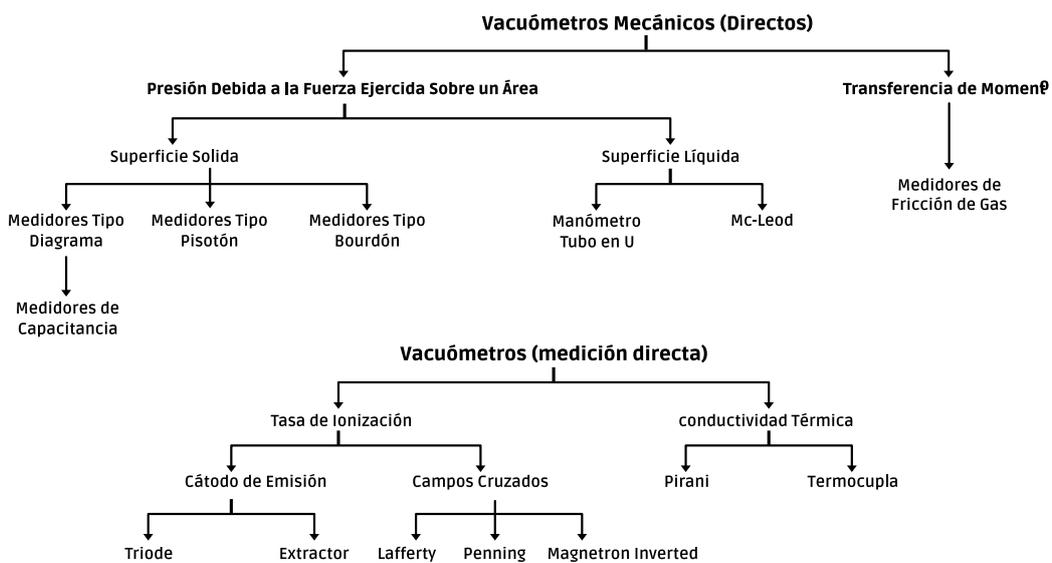


Figura 8. >> Clasificación de vacuómetros dependiendo de su principio físico de medición. Adaptado de [15].

o indirectamente al medir una magnitud física proporcional a la presión, y son adecuados en intervalos desde medio hasta ultra alto vacío. Entre las magnitudes usadas por diferentes tecnologías para inferir la presión se encuentran la densidad del número de partículas, la conductividad térmica y la probabilidad de ionización [15]. En la Figura 8, se muestra la clasificación de los manómetros de vacío típicos, de acuerdo a su principio de medición.

El intervalo de presión medido en la tecnología de vacío está comprendido por alrededor de 15 potencias de 10. Se requeriría acomodar distintas tecnologías de medición de presión para lograr cubrir todo el rango de vacío [16]. La Figura 9 detalla los intervalos aproximados de operación de algunos vacuómetros de vacío.

A la hora de seleccionar una tecnología de medición, se deben tener en cuenta los siguientes requisitos [5]:

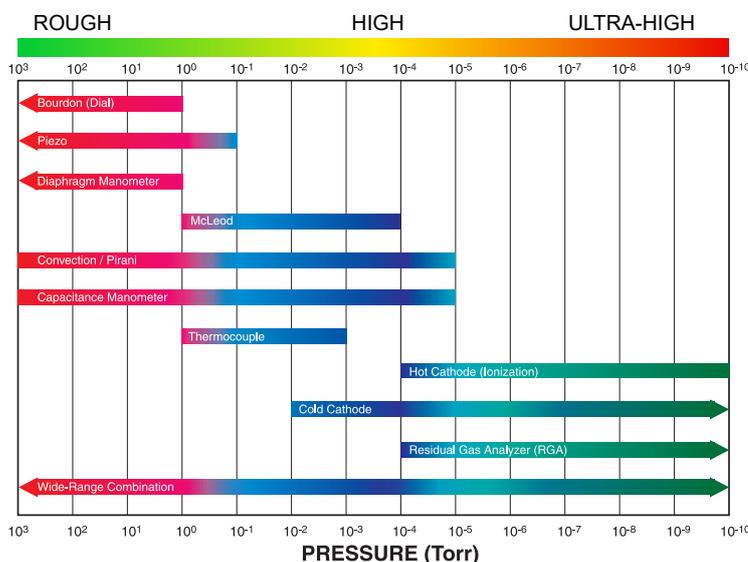


Figura 9. >> Intervalos de presión para diferentes tipos de manómetro de vacío [21].

- Intervalo de operación de vacío.
- Tipo de método de medición.
- Punto de referencia de la toma de presión.

CONCLUSIONES

- La selección de tecnología de vacío para intervalos de medio y alto vacío requiere un análisis detallado de factores como presión final de operación, temperatura máxima, características del material, compatibilidad entre materiales, material de sello, exposición a niveles radioactivos o corrosivos, y método de medición.
- Materiales como acero inoxidable, aluminio y vidrio son empleados para la manufactura de elementos como cámaras de vacío, y se encuentran presentes en formas en D, cilíndricas, esféricas, de campana, etc.
- Se debe procurar que todos los elementos seleccionados posean un mismo intervalo de operación.
- Los sistemas de bridas dan la posibilidad de efectuar ensamblajes entre partes que pueden ser intercambiadas o para una fácil remoción de los dispositivos.
- Las tecnologías de medición de presión, presentes en el mercado, tienen ligado su precio a la presión última que logran medir o generar respectivamente. Se dividen en dos grupos, las de medición directa y las de medición indirecta.
- Es común que se empleen mínimo dos bombas en los sistemas de medio y alto vacío. La primera bomba cumple con la función de disminuir la presión desde la atmósfera, conocida como bomba de respaldo, y la segunda permite alcanzar los valores inferiores del rango de presión para el sistema de bombeo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) a través del Convenio Especial de Cooperación n°. 0233 de 2018. El Centro Industrial del Diseño y la Manufactura (CIDM) y el Centro Industrial y del Desarrollo Tecnológico (CIDT) participaron en el Plan de Transferencia del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Ppi Pumps PVT. Why Vacuum Technology is Important in Various Industries?. Disponible en: <http://www.ppipumps.com/why-vacuum-technology-is-important-in-various-industries.html>
- [2] Danielson, P. Normandale Community College. Choosing the Right Vacuum Materials, Abril-2013. Disponible en: <http://www.normandale.edu/departments/stem-and-education/vacuum-and-thin-film-technology/learning-in-a-vacuum---what-to-expect/articles/choosing-the-right-vacuum-materials>
- [3] Kurt J. Lesker Company. Flange Systems Overview. Disponible en: https://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_technicalnotes_overview_1.cfm
- [4] VACOM. KF Components. Disponible en: <https://www.vacom.de/en/products/standard-components/flange-systems/476-kf-components>
- [5] Hoffman D, Thomas J, Singh B. 1997. Handbook of Vacuum Science and Technology, Elsevier Science & Technology Books
- [6] VAT. Vacuum Sealing Technology. Disponible en: <https://cas.web.cern.ch/sites/cas.web.cern.ch/files/lectures/platjadar0-2006/sonderegger.pdf>

- [7] Technetics Group. Metal Seals. High-performance sealing solutions that are engineered to increase performance in critical applications. Disponible en: <https://technetics.com/products/sealing-solutions/metal-seals/>
- [8] Lonestar Turbo Systems. Vacuum Pumps. What are The Different Uses of Vacuum Pumps? What You Need to Know. Disponible en línea: <http://www.lonestarmafc.com/different-uses-vacuum-pumps-need-know/>
- [9] Pramod K. 2018. Vacuum Science, Technology and Applications. CRP Press.
- [10] Pfeiffer Vacuum. Know How. Vacuum Pumps- Working Principles and Properties. Disponible en: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/vacuum-generation/>
- [11] Vac Aero International Inc. An Introduction to Vacuum Pumps. Enero 13 de 2016. Disponible en: <https://vacaero.com/information-resources/vacuum-pump-technology-education-and-training/1039-an-introduction-to-vacuum-pumps.html>
- [12] Ppi Pumps PVT. Achieve High Vacuum for Industrial Processes Using High Tech Vacuum Pumps. Disponible en: <http://www.ppipumps.com/achieve-high-vacuum-for-industrial-processes-using-high-tech-vacuum-pumps.html>
- [13] Engineering 360. Vacuum Gauges and Instruments Information. 2019. Disponible en: https://www.globalspec.com/learn-more/manufacturing_process_equipment/vacuum_equipment/vacuum_gauges
- [14] Solar Atmospheres, Inc. Understanding Vacuum and Vacuum Measurement. 2016. Disponible en: <https://solarmfg.com/wp-content/uploads/2016/02/Understanding-Vacuum-9.pdf>
- [15] Jousten K. Handbook of Vacuum Technology. (2 ed.), Wiley-Vch.
- [16] Yoshimura N. 2008. Vacuum Technology Practice for Scientific Instruments. Springer
- [17] ISO/IEC 3529:1981, Vacuum technology – Vocabulary
- [18] Kurt J. Lesker Company. Vacuum Chambers. Disponible en: <https://www.lesker.com/newweb/vacuumchambers.cfm>
- [19] Fti Controlling pressure and vacuum. CF vacuum components. Disponible en : <https://www.ftipv.com/cf-vacuum-components/>
- [20] Atlas Technologies. CF components aluminium and titanium flanges. Disponible en: <https://www.atlasuhv.com/products/aluminum-titanium-flanges/cf-flange-alss/>
- [21] Kurt J. Lesker Company. Measuring Pressure. Disponible en: https://www.lesker.com/newweb/gauges/gauges_technical-notes_1.cfm