

4
2 ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACION Y OPTIMIZACION DE UN SISTEMA
DE ALTO VACIO.

TESIS PROFESIONAL QUE PARA OBTENER
EL TITULO DE FISICO PRESENTA

J. GUADALUPE BAÑUELOS MUÑETON.

SEPTIEMBRE DE 1992.

FALLA EN ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE.

	Pág.
INTRODUCCION.	1
I. COMPORTAMIENTO DE LOS GASES A BAJAS PRESIONES.	2
I.1. Estado viscoso.	2
I.1.1. Leyes de los gases.	2
I.1.2. Teoría cinética de los gases.	3
I.1.3. Camino libre medio.	5
I.1.4. Viscosidad.	5
I.2. Estado molecular.	6
I.2.1. Fenómenos de superficie.	7
I.2.1.1. Permeación.	7
I.2.1.2. Sorción.	7
I.2.1.3. Energía de adsorción.	7
I.2.1.4. Formación de monocapas.	8
I.2.1.5. Desorción.	8
I.3. Regímenes de flujo.	9
I.4. Conductancia.	10
I.5. Velocidad de evacuación.	11
I.6. Fugas reales y virtuales.	12
II. SISTEMAS DE ALTO VACIO.	14
II.1. Sistema de alto vacio en serie.	15
II.1.1. Bomba de pre-vacio.	15
II.1.2. Bombas de alto vacio.	16
II.1.2.1. Bombas de difusión.	16
II.1.2.2. Bombas turbomoleculares.	18
II.1.3. Medidores de vacio.	19
II.1.3.1. Medidores de bajo vacio.	19
II.1.3.1.1. Medidor pirani.	19
II.1.3.1.2. Medidor termopar.	21
II.1.3.2. Medidores de alto vacio.	22
II.1.3.2.1. Medidor de ionización de cátodo caliente.	22
II.1.3.2.2. Medidor de ionización de cátodo frío.	23
II.1.4. Procedimientos de operación del sistema.	23

II.2. Sistema de alto vacio en paralelo.	24
II.2.1. Bombas de adsorción.	24
II.2.2. Bombas de alto vacio.	28
II.2.2.1. Bombas iónicas de Ti.	28
II.2.2.2. Bombas criogénicas.	30
II.2.3. Procedimiento de operación del sistema.	33
II.2.4. Aplicaciones específicas.	35
II.2.5. Ventajas y desventajas en los sistemas.	35
II.4. Comparación entre los sistemas en serie y en paralelo.	36
III. CARACTERIZACION DEL SISTEMA DE ALTO VACIO.	37
III.1. Cámara de usos múltiples.	39
III.2. Línea de evacuación.	41
III.3. Sistema de bombeo de bajo vacio.	43
III.4. Sistema de bombeo de alto vacio.	45
III.5. Medidores de vacio.	45
III.6. Evaluación del sistema.	45
III.7. Estimación de la presión última.	47
IV. PRUEBAS DE OPERACION Y RESULTADOS.	49
V. CONCLUSIONES.	57
APENDICE A.	60
APENDICE B.	61
REFERENCIAS.	63

INTRODUCCION.

Actualmente la tecnología del vacío desempeña un papel importante en la investigación del país, sin embargo, todo el equipo existente en el mercado nacional es de fabricación extranjera y en consecuencia de muy alto precio. Con el fin de reducir esta dependencia, en el Instituto de Física, desde hace tres décadas se ha venido desarrollando equipo y accesorios de vacío, contando hoy día con los conocimientos, materiales y técnicas apropiadas para el diseño y la construcción de sistemas de bajo y alto vacío.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar los resultados de la caracterización de un sistema de alto vacío diseñado en el departamento de Física Aplicada y Tecnología Avanzada del IFUNAM y construido en el taller mecánico del mismo; así como los procedimientos para obtener la presión última del sistema.

En el primer capítulo se presentan los aspectos teóricos más importantes de la tecnología de vacío que posteriormente serán utilizados; en el segundo, se dan las opciones en cuanto a sistemas de alto vacío y se describen sus partes y funciones. El tercer capítulo muestra las características de la cámara, bombas y línea de evacuación, materiales empleados y otros datos del sistema construido. En el cuarto capítulo se presentan los procedimientos idóneos por medio de los que se logra de manera óptima la presión última del sistema.

I. COMPORTAMIENTO DE LOS GASES A BAJAS PRESIONES.

En el proceso de evacuación de una cámara de vacío, el gas está inicialmente a la presión atmosférica, al disminuir la presión, el gas pasa por tres estados: el estado viscoso se mantiene de presión atmosférica a 10^{-3} Torr aproximadamente; de 10^{-3} a 10^{-4} Torr el gas se encuentra en un estado de transición, donde su comportamiento esta entre viscoso y molecular; a presiones menores que 10^{-4} Torr, el estado del gas es totalmente molecular.

En consecuencia, para analizar el proceso de bombeo en un sistema de alto vacío, se requiere estudiar y conocer las propiedades del gas en los distintos estados.

I.1. Estado viscoso.

Cuando el gas se encuentra en estado viscoso, es decir a una presión entre atmosférica y 10^{-3} Torr, la ecuación de estado para los gases reales toma la forma que corresponde a la de un Gas Ideal.⁽¹⁾

I.1.1 Leyes de los gases.

Desde el punto de vista macroscópico, el comportamiento de un Gas Ideal se describe en base a cuatro leyes experimentales⁽²⁾:

i) Ley de Boyle: Para una masa de Gas Ideal a una temperatura [T] y número [N] de moléculas constante, el producto de su presión [P] y su volumen [V] es invariante:

$$PV = \text{cte.}$$

ii) Ley de Charles: A volumen constante, la presión del gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta:

$$P = \text{cte. } T$$

Análogamente, para un gas a presión constante, su volumen es directamente proporcional a su temperatura absoluta:

$$V = \text{cte. } T$$

El resultado de la combinación de las leyes anteriores es una ecuación con la que se determinan los estados de equilibrio de un Gas Ideal:

$$PV = cte. T \quad (1)$$

Para una mol de gas la ecuación anterior se escribe como:

$$PV = RT \quad (2)$$

donde R es la constante universal de los gases y cuyo valor es:

$$R = 8.31 \times 10^{-7} \text{ erg/mol} \cdot ^\circ\text{K.}$$

iii) Ley de Avogadro: En iguales condiciones de temperatura y presión, volúmenes iguales de diferentes gases, contienen el mismo número de moléculas. En base a esta ley se obtiene el número de Avogadro:

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}$$

que es el número de moléculas en un volumen de 22.41 litros a 0 °C y una atmósfera de presión.

iv) Ley de Dalton de las presiones parciales: La presión que ejerce una mezcla de gases ideales en un volumen determinado y a temperatura constante, es igual a la suma de las presiones que ejercen cada uno de ellos por separado.

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

1.1.2. Teoría cinética de los gases.

Desde el punto de vista microscópico, la teoría cinética de los gases considera como ideal al estado del gas en el que las moléculas son más independientes. Este concepto teórico tiene como base las siguientes hipótesis⁽³⁾:

i) Las moléculas son esferas rígidas y el volumen que ocupa cada una de ellas es pequeño comparado con el volumen del gas.

ii) Las moléculas no ejercen fuerzas entre ellas, por lo que viajan en trayectorias rectilíneas sin dirección preferencial.

iii) Los choques entre moléculas y con las paredes del recipiente que las contiene son perfectamente elásticos.

iv) Las moléculas están en constante movimiento, este movimiento está relacionado directamente con la temperatura.

A partir de estos postulados, se establece la presión de un gas como la transferencia de energía cinética promedio resultante de los choques de las moléculas del gas sobre una superficie^[2]:

$$\frac{1}{2} mnv^2 = \frac{3}{2} P \quad (3)$$

donde m = masa molecular, $n = N/V$ la densidad molecular, v la velocidad térmica ($v = 1.45 [T/M]^{1/2}$ cm/s, $M = mN_A$ denominado peso molecular)^[4]

Si se considera una mol de gas, entonces la densidad molecular n es:

$$n = \frac{N_A}{V}$$

sustituyendo en la ecuación (2) resulta

$$\frac{1}{3} mN_A v^2 = PV = RT$$

donde $\frac{R}{N_A}$ se denomina constante de Boltzmann \mathcal{K} y su valor numérico es:

$$\mathcal{K} = \frac{R}{N_A} = \frac{1}{3} mv^2 = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/}^\circ\text{K}$$

sustituyendo este valor en la ecuación de estado de un gas ideal, se obtiene una expresión que relaciona las variables macroscópicas al mismo tiempo que involucra el número de moléculas que contiene el volumen:

$$PV = NkT.$$

(4)

La expresión anterior (ecuación de estado) es la más usual para obtener otros parámetros relacionados directamente con la tecnología de vacío.

I.1.3. El camino libre medio.

Se denomina camino libre medio a la distancia promedio que recorre una molécula entre choques sucesivos⁽⁴⁾. Numéricamente, el camino libre medio ($\bar{\lambda}$) se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{2\pi^2 d^4 n^2}} \quad (5)$$

en donde n representa la densidad molecular y d el diámetro de la molécula del gas en cuestión. En términos de la presión, la ecuación anterior es:

$$\bar{\lambda} = \left[\frac{1}{2} \right]^{1/2} \frac{kT}{\pi d^2 P} \quad (6)$$

de esta última expresión, se deduce que el camino libre medio, depende de la naturaleza del gas y de las condiciones físicas en que se encuentre (presión y temperatura). Este parámetro es fundamental para la tecnología de vacío, ya que indica el estado del gas que se encuentra en el interior de un recipiente. En el estado viscoso (presiones cercanas a la presión atmosférica) prevalecen los choques entre moléculas, ya que el camino libre medio es muy corto. Al disminuir aun más la presión (en el estado molecular), el camino libre medio aumenta considerablemente, por lo que las moléculas solo encontrarán en su recorrido las paredes del recipiente que las contiene, lo que implica que las distancias son iguales o mayores que las dimensiones del contenedor.

I.1.4. Viscosidad.

Una masa de gas a través de un tubo estrecho experimenta una resistencia al flujo, de tal forma que su velocidad decrece uni-

formemente en dirección del flujo desde el eje del tubo hasta alcanzar el cero en las paredes. Cada capa de gas, paralela a la dirección del flujo ejerce una fuerza tangencial sobre la capa adyacente, ocasionando que la capa disminuya la velocidad. La propiedad del fluido en virtud del que exhibe este fenómeno se conoce como viscosidad interna.⁽⁶⁾

La fuerza tangencial entre capas debido a la transferencia de ímpetu, está dada como:

$$F = \eta \times \text{gradiente de velocidad}$$

$$F = \eta \times \frac{u}{d}$$

donde u es la velocidad del flujo, d es la distancia a la que se encuentra una superficie estacionaria y η es el coeficiente de viscosidad, que se define como "la fuerza tangencial que se ejerce por unidad de área y unidad de gradiente de velocidad."⁽⁵⁾ y se expresa:

$$\eta = \frac{0.998}{\pi d} \left(\frac{m \times T}{\pi} \right)^2 \quad (7)$$

Donde se observa que el coeficiente de viscosidad solo depende de la temperatura, de la presión y de la naturaleza del gas.

I.2. Estado molecular.

En el estado molecular, a diferencia del estado viscoso, se tiene que $\bar{\lambda} >$ dimensiones del contenedor, por lo que el comportamiento del gas es muy diferente a este último, ya que experimentalmente se encuentra que las moléculas no se comportan como esferas rígidas, los choques son principalmente con las paredes y que al chocar con ellas se retienen durante un tiempo para después evaporarse en una dirección independiente del ángulo de incidencia.⁽³⁾ El tiempo que permanecen las moléculas adheridas a las superficies del contenedor es muy corto cuando la presión es cercana a la presión de transición entre los estados y aumenta a medida que la presión disminuye.

I.2.1. Fenómenos de superficie.

Durante el tiempo de permanencia de las moléculas en la superficie pueden ocurrir ciertos fenómenos, a los que se conoce como "fenómenos de superficie", los principales son:

I.2.1.1. Permeación.

Este fenómeno se refiere al paso de gas a través de un sólido. Este proceso comprende la difusión de gas en los sólidos, que implica el movimiento de átomos, moléculas o iones a sitios de mayor estabilidad en un sólido; cuando existe un gradiente de energía libre o potencial químico sobre las partículas involucradas. El gradiente de energía libre resulta en la mayoría de los casos de una diferencia de concentración y la movilidad la proporciona principalmente la energía térmica.⁽⁶¹⁾

I.2.1.2. Sorción.

El fenómeno de sorción consiste en la captura de moléculas que llegan a una superficie sólida, este proceso incluye dos mecanismos: la adsorción y la absorción.⁽⁶²⁾

El término adsorción se refiere al proceso por el que las moléculas se adhieren a la superficie de un sólido, dando lugar a la formación de una capa de gas que puede tener un espesor de una o varias moléculas. La fuerza atractiva del sólido puede ser física (fisisorción) o química (quimisorción).

La absorción es la penetración del gas en el sólido, en forma parecida a como el gas se disuelve en un líquido.

I.1.2.3. Energías de adsorción.

Cualquier superficie de un sólido o líquido presenta fuerzas de atracción normales a la superficie, así, las moléculas de gas que inciden sobre una superficie se adsorben.

Una molécula que incide sobre una superficie adquirirá una posición de equilibrio, el mínimo potencial de equilibrio, llamado el calor de adsorción es igual a la energía de adsorción.

La adsorción física comprende enlaces del tipo Van der Waals, estas fuerzas atractivas son débiles y el calor de adsorción es muy bajo (max. 2.1×10^{17} MeV/mol)⁽⁶³⁾; como son atractivas, el

trabajo se emplea en adsorber moléculas y generar calor, por lo que la adsorción es un fenómeno exotérmico.

En la quimisorción, el proceso es similar al de formación de compuestos químicos con transferencia de electrones. En este caso, las fuerzas atractivas son más grandes que en la fisisorción, en consecuencia los calores de la quimisorción son más altos (del orden de 6.5×10^{18} MeV/mol⁽⁷⁾). El proceso de quimisorción no siempre ocurre directamente del estado gaseoso, ya que las moléculas pueden ser al inicio físicamente adsorbidas y entonces, con un mínimo de energía (energía de activación), llegan a adsorberse químicamente, este efecto se conoce como quimisorción activada.

1.2.1.4. Formación de monocapas.

Sobre una superficie limpia, las moléculas de un gas se condensan y permanecen durante un tiempo antes de ser reevaporadas. El tiempo necesario para formar una monocapa se expresa como⁽⁸⁾:

$$\tau_m = \left[\frac{\sqrt{2\pi}}{d^2 n} \right] \left[\frac{M}{R T} \right]^{1/2} \quad (8)$$

donde d es el diámetro de las moléculas del gas, n la densidad molecular, M el peso molecular ($M = mNA$).

En la ecuación anterior, el tiempo de permanencia depende de la densidad molecular y de la temperatura de las paredes del recipiente que contiene al gas en el estado molecular: si la superficie interior de una cámara está a una temperatura muy baja, atrapa y retendrá por largo tiempo las moléculas de gases ligeros que se le adhieran.

1.2.1.5. Desorción.

Es el proceso de liberación de átomos o moléculas adsorbidas de la superficie de un sólido. Este proceso es el resultado de: (a) el impacto de átomos o moléculas, (b) impactos de electrones, (c) impactos iónicos, (d) impactos fotónicos (fotodesorción) o energía térmica (desorción térmica).⁽⁸⁾

1.3. Regímenes de flujo.

El proceso de bombeo de una cámara de vacío se realiza a través de tubos y orificios hasta los dispositivos o bombas encargados de realizar la evacuación, por lo que otro punto importante que debe considerarse en las técnicas del vacío es el régimen de flujo existente a baja presión.

En el intervalo donde el estado del gas es viscoso, el flujo puede ser:

i) Turbulento: que se caracteriza por velocidades altas, las capas del flujo no son paralelas, en las cavidades formadas entre capas se crean regiones de baja presión y su dirección se altera con cualquier obstáculo que se presente en su camino.

ii) Laminar: este ocurre a bajas velocidades, sus capas son paralelas y su velocidad aumenta de las paredes del tubo hacia su eje.

Así, un flujo puede ser turbulento, laminar, intermedio y molecular (Tabla 1). El límite entre flujo turbulento y laminar se define por el número de Reynolds, mientras que entre flujo laminar, intermedio y molecular se describe por el número de Knudsen.⁽³⁾

El número de Reynolds es una cantidad adimensional que se expresa por la relación:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (9)$$

donde ρ es la densidad del gas (g/cm^3), v la velocidad (cm/s), η la viscosidad (g/cm s), y D el diámetro del tubo (cm). De esta relación se establece que para números mayores que 2100, el flujo es completamente turbulento, mientras que para $Re < 1100$ el flujo es completamente laminar. El valor exacto de Re para que el flujo cambie de turbulento a laminar depende de la rugosidad de la superficie del tubo y otros factores experimentales, sin embargo, en la mayoría de los casos los intervalos mencionados son válidos.

El número de Knudsen es la razón entre el diámetro del tubo y el camino libre medio, es decir:

$$K = \frac{D}{\bar{\lambda}} \quad (10)$$

donde D es el diámetro del tubo y $\bar{\lambda}$ es el camino libre medio. Con esto se tiene la caracterización de los regímenes de flujo a bajas presiones.

Estado del Gas	Régimen del Flujo	Condición
Viscoso	Turbulento	$Re > 2100$ $Q > 200 D$ (aire)
	Laminar	$Re < 1100$ $Q < 100 D$ (aire); $D/\lambda > 110$
Transición	Intermedio	$1 < D/\lambda < 110$
Enrarecido	Molecular	$D/\lambda < 1$

Tabla 1. Regímenes de flujo.

1.4. Conductancia.

En un sistema de vacío siempre existe una instalación para la evacuación de la cámara, el transporte del gas a través de ella se ve afectado por las dimensiones y la forma geométrica de sus conductos. A la característica que tiene esta instalación se le denomina conductancia (C) y se define como la razón entre el gasto (Q) y la diferencia de presión (ΔP) entre los extremos de la conexión^[9];

$$C = \frac{Q}{\Delta P} \quad (11)$$

al inverso de la conductancia se le denomina resistencia. Haciendo una analogía entre el flujo y la corriente eléctrica, C corresponde a la conductividad eléctrica y ΔP a la diferencia de potencial. Las reglas para el cálculo de la conductividad en un circuito eléctrico son aplicables a un circuito de vacío.

i) en serie

$$1/C_r = \sum_i (1/C_i) \quad (12)$$

donde C_r es la conductancia total.

ii) en paralelo

$$C_r = \sum_i C_i. \quad (13)$$

I.5. Velocidad de evacuación.

El proceso de evacuación en un sistema se realizará por el desplazamiento de gas a través de conductos que van de la cámara del sistema a la bomba de vacío; este desplazamiento se genera por diferencias de presión que se produce en el conducto al iniciarse el bombeo.

La rapidez con la que un sistema transporta el gas de un volumen a otro se determina por la velocidad de bombeo (S), que se define como el volumen de gas que la bomba extrae por unidad de tiempo (dV/dt), a la presión existente en la entrada de la bomba.

El flujo de gas (Q) que sale de un sistema de vacío, llamado gasto, se define como el producto del volumen que pasa en la unidad de tiempo multiplicado por la presión (P) existente,

$$Q = P \left[\frac{dV}{dt} \right] \quad (14)$$

de la definición de velocidad de bombeo,

$$Q = PS. \quad (15)$$

Si se considera una cámara de volumen constante V y que será evacuada por un sistema con velocidad de bombeo efectivo S_e , y suponiendo que la presión fija del sistema de bombeo es despreciable, se tiene que el gasto está dado por la ecuación (15),

$$Q = PS_e \quad (16)$$

Como resultado del bombeo continuo, la presión dentro la cámara decae de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$Q = - \left[\frac{d(PV)}{dt} \right] \quad (17)$$

de ambas ecuaciones:

$$P = P_0 \exp \left[- \frac{S_e}{V} t \right] \quad (18)$$

donde P_0 es la presión inicial de la cámara.

I.6. Fugas reales y virtuales.

Al trabajar con un sistema de vacío se tiene que la principal causa que limita y mantiene la presión de bajo y alto vacío son las fugas del sistema.

Una fuga se define como un defecto que permite la presencia de gas no deseado dentro del sistema⁽¹⁰⁾. Las fugas se clasifican en reales y virtuales: las primeras son aquellas en las que gases que están fuera del sistema aparecen dentro del contenedor de vacío; las segundas son aquellas en que los gases ya están en el sistema y una vez que se tienen bajas presiones aparecen dentro del contenedor de vacío.

Las fugas reales se subclasifican en fugas tipo poro y tipo permeación: las fugas tipo poro son agujeros en las paredes del contenedor a través de las que el gas puede fluir en estado molecular o viscoso al interior de él. En las fugas tipo permeación, el gas debido a el gradiente de concentración, pasa atómicamente por medio de interacciones electrónicas de átomo en átomo a través de las paredes del contenedor de vacío.

Un tipo de fugas virtuales aparecen cuando los gases son atrapados dentro del contenedor de vacío, en cavidades o en canales. Las causas son usualmente por fallas en el diseño mecánico del sistema de vacío. Otro tipo de fugas virtuales se originan por adsorción y desorción.

En este capítulo se discutieron algunos aspectos importantes del comportamiento de los gases, los efectos de superficie y su transporte en situaciones de bajo y alto vacío. Esta breve discusión teórica tiene como finalidad obtener las bases suficientes para trabajar en un sistema de vacío real. En el siguiente capítulo se describen los sistemas más comunes para lograr el alto vacío, así como los principios de operación de cada uno de ellos, sus ventajas y sus principales aplicaciones.

II. SISTEMAS DE ALTO VACIO.

Un sistema de alto vacio (presiones $<10^{-5}$ Torr) está formado por: una cámara, el sistema de bombeo, un sistema de medición y control y un sistema de alimentación. En la cámara, que es el principal componente, se llevan a cabo los experimentos o bien los procesos industriales que requieren de una atmosfera enrarecida. La interacción entre estos sistemas se muestra en la Figura 1.

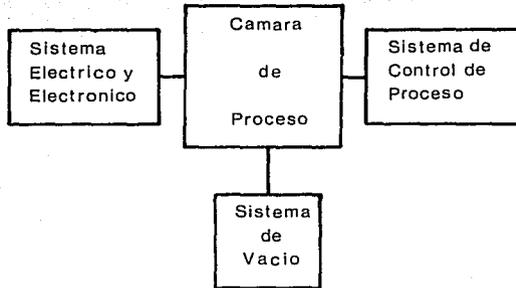


Figura 1

Diagrama de integración de un sistema de alto vacío.

Una gran cantidad de investigaciones y procesos industriales se realizan dentro de cámaras de vacío, por lo que su volumen es variable y tan complejas, como las tareas que al realizarse lo requieran. En la siguiente Tabla se muestran algunos ejemplos representativos y la presión a la que se llevan a cabo:

PROCESOS INDUSTRIALES.	INTERVALO DE PRESION.
Erosión de metales	10^{-6} - 10^{-9} Torr.
Recubrimiento por evaporación	10^{-4} - 10^{-9} Torr.
Producción de tubos electrónicos	10^{-4} - 10^{-7} Torr.
PROCESOS CIENTIFICOS.	
Espectrómetros de masas	10^{-4} - 10^{-9} Torr.
Aceleradores de partículas	10^{-6} - 10^{-9} Torr.
Producción de películas delgadas	10^{-3} - 10^{-9} Torr.
Simulación espacial	10^{-4} - 10^{-12} Torr.

Tabla 2. Ejemplos de procesos industriales y científicos con sus respectivos intervalos de presión.

II.1. Sistema de alto vacio en serie. (Transferencia de gas)

Su principal característica es que el gas que evacua se expulsa directamente a la atmosfera por medio de varias etapas de compresión. El sistema está formado por una cámara para alto vacio y un sistema de bombeo integrado por bombas de transferencia de gas, medidores de vacio y válvulas (Figura 2).

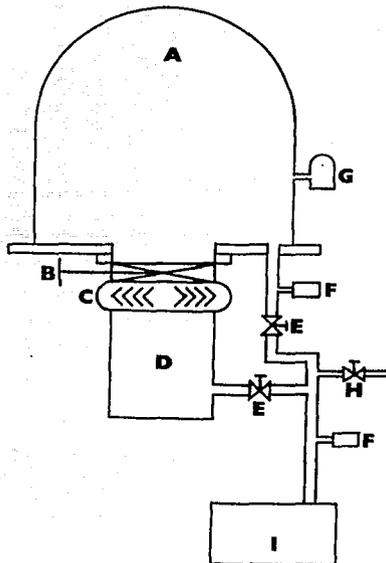


Figura 2.

Esquema de un sistema de vacio de transferencia de gas. (A) cámara de vacio, (B) válvula de alto vacio, (C) trampa fría, (D) bomba de alto vacio, (E) válvulas de bajo vacio, (F) medidores de bajo vacio, (G) medidor de alto vacio, (H) válvula de admisión de aire y (I) bomba de apoyo.

II.1.1. Bomba de pre-vacio.

La bomba de pre-vacio y apoyo tiene como primera función disminuir la presión interna desde la atmosférica, hasta un valor en el que las bombas de alto vacio comienzan a ser eficientes; una vez que se inicia el proceso de bombeo que permita obtener alto

vacio, la bomba es indispensable para comprimir el gas y expulsar lo a la atmósfera. La bomba que más se usa es la rotatoria de paletas deslizables, que emplea aceite como lubricante y sello dinámico a la atmósfera.

En la Figura 3 se representa el esquema de una bomba rotatoria de paletas:

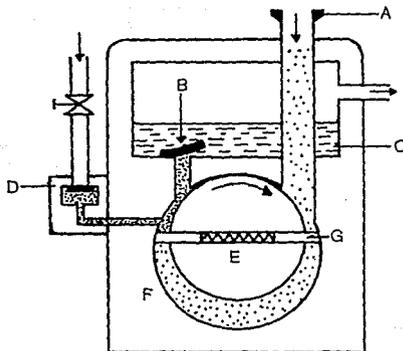


Figura 3.

Esquema típico de una bomba de apoyo: (A) conexión al sistema de vacío, (B) válvula de descarga, (C) aceite, (D) lastre de aire, (E) rotor y (F) estátor.

En el espacio limitado por el rotor (E), el estátor (F) y las dos paletas (G) se encierra un volumen de gas, que al comprimirse por la acción de rotación, abre la válvula de salida (B) y se expulsa a la atmósfera. Con este tipo de bombas se alcanzan presiones de 10^{-3} a 10^{-4} Torr iniciando con presión atmosférica. La velocidad de bombeo (S) es en general grande y su compresión (P_2/P_1) muy alta.

II.1.2. Bombas de alto vacío.

Una vez que se alcanza el bajo vacío en la cámara (10^{-3} Torr) se ponen en operación las bombas de alto vacío, las más usuales son las bombas de difusión y las bombas turbomoleculares.

II.1.2.1. Bombas de difusión.

Las bombas de difusión son bombas de chorro, en las que el

denso vapor (del orden de 10^{16} moléculas/cm³) del fluido de trabajo ya sea aceite o mercurio sale de las toberas con una velocidad supersónica en una dirección preferencial hacia abajo, al encontrarse moléculas de gas les transfieren ímpetu, arrastrándolas hacia la región de bajo vacío en donde son evacuadas por la bomba de apoyo. En la Figura 4 se muestra el corte de una bomba de difusión de aceite:

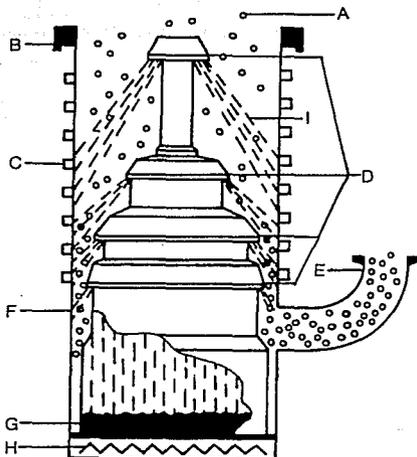


Figura 4.

Esquema de una bomba difusora: (A) partículas de gas, (B) conexión para alto vacío, (C) serpentín refrigerante, (D) sombrillas, (E) conexión a la bomba de apoyo, (F) cuerpo de la bomba, (G) hervidor para aceite, (H) calefactor y (I) jet de vapor.

El calefactor de aceite está en la base de la bomba y el vapor generado asciende por la tobera en forma de chimenea. Vertical y concéntrica se encuentran dispuestas las toberas anulares con sus correspondientes sombrillas. La tobera superior está diseñada para trabajar a presión mas baja y constituye la primera etapa de compresión. El vapor sale por las toberas y se dirige hacia la pared enfriada por agua, debido a la forma especial de

las sombrillas; allí se condensa y retorna al hervidor, el gas bombeado se evacua a través de la línea de vacío previo. Con estas bombas se han logrado obtener presiones de 3.7×10^{-9} Torr a partir de una presión de aproximadamente 10^{-2} Torr.⁽²⁾

II.1.2.2. Bombas turbomoleculares.

Las bombas turbomoleculares están compuestas de un rotor y un estátor; el rotor cilíndrico tiene en su superficie una serie de aspas con un ángulo determinado, que comprimen el gas por transferencia de ímpetu en una dirección preferencial. A través de varias etapas de compresión llegan a la zona de alta presión donde se capturan y transfieren por la bomba de apoyo a la atmósfera (Figura 5).

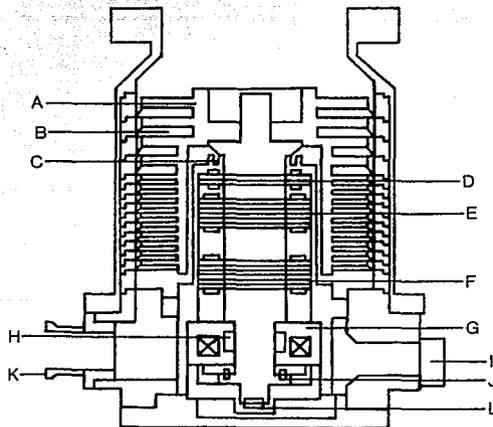


Figura 5.

Esquema de una bomba turbomolecular: (A) rotor, (B) estátor, (C) balero de seguridad (D) sensor radial, (E) electroimán radial, (F) motor de alta frecuencia, (G) electroimán axial, (H) balero de seguridad, (I) conector, (J) imán permanente, (K) Conexión y (L) sensor axial.

En el esquema de la bomba cada par circular de aspas rotor/es-tátor (A)/(B) forman una etapa. El gas se atrapa en las etapas de

alto vacío (parte superior del rotor y estator) que son las más largas, y se comprime por las etapas inferiores que son más cortas y tiene un ángulo menor que las primeras. Después se evacua a través de la línea de comunicación al vacío previo (K). La velocidad a la que gira el rotor de las bombas está dentro del intervalo de 24,000 a 60,000 rpm y se proporcionan por fuentes de poder de estado sólido o conjuntos motor-generador. La presión mínima que se obtiene con este tipo de bombas es de 3.7×10^{-11} Torr⁽²⁾. A diferencia de las difusoras, las bombas turbomoleculares son muy limpias y se construyen en una gran variedad de tamaños, son muy eficientes para el bombeo de gases y vapores.

II.1.3. Medidores de vacío.

Para determinar la presión de trabajo se han desarrollado un conjunto de medidores de vacío, aprovechando los fenómenos físicos asociados con el estado del gas en la cámara.

A la fecha se conoce una gran variedad de medidores de vacío, los cuales abarcan todos los intervalos de vacío alcanzados, entre estos se encuentran los medidores de bajo o medio y de alto vacío.

II.1.3.1. Medidores bajo vacío.

En este intervalo de presiones se conocen varios tipos de medidores, los más comunes son los medidores indirectos de conductividad térmica.

La utilidad de los medidores de conductividad térmica se extiende hasta una presión de aproximadamente 10^{-3} Torr⁽²⁾, donde comienza a predominar la transferencia de calor por radiación sobre la transferencia por conducción molecular. El límite superior ocurre en la región donde la conductividad del gas cambia muy poco con la presión, cerca de los 100 Torr. El medidor de termopar y el pirani se instalan en el sistema para determinar la presión de arranque de las bombas de alto vacío.

II.1.3.1.1. Medidor pirani.

Este medidor emplea un puente de Wheatstone, como se muestra en la Figura 6, que sirve para calentar un filamento (F) y balancear su resistencia con un resistor estándar sellado a alto vacío.

(B). Un cambio de presión modifica la temperatura del filamento y en consecuencia su resistencia, desbalanceando así el puente. Entonces la presión se puede medir en términos del voltaje de desbalanceo (M). Alternativamente, el potencial necesario para mantener el filamento a un nivel de temperatura constante es una medida indirecta de la presión. En este caso la temperatura se mantiene constante por medio de un circuito de retroalimentación.

El más pequeño cambio de presión detectable, queda determinado de cualquier forma por una pequeña señal que puede ser registrada en el medidor a la salida del puente. Los errores debidos a las fluctuaciones de fondo y los cambios en la temperatura de las paredes del medidor llegan a aumentar notablemente a altas presiones, sin embargo, estos defectos son minimizados trabajando con el filamento a temperatura constante en lugar de trabajar a voltaje constante o corriente constante.

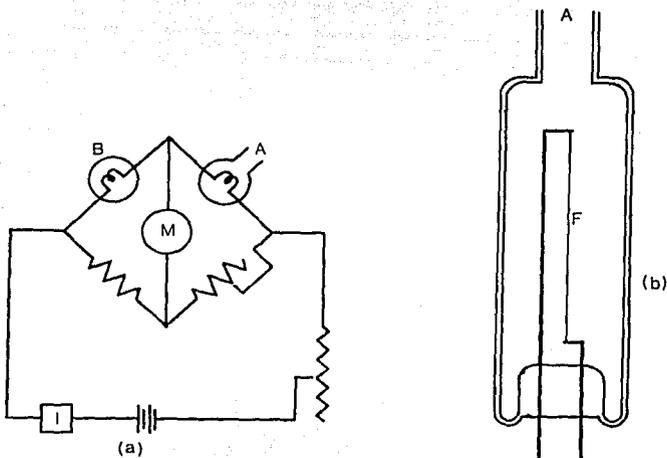


Figura 6.

Diagrama de un medidor Pirani: (a) circuito de medición y (b) medidor. (A) conexión al sistema de vacío, (B) resistor sellado a alto vacío, (F) filamento, (I) medidor de corriente y (M) medidor de vacío.

II.1.3.1.2. Medidor termopar.

El término termopar se refiere al punto de unión de dos conductores diferentes para producir un circuito cerrado. Cuando la unión se calienta, se genera una diferencia de potencial que depende de los metales y la diferencia de temperatura entre la unión y las terminales de los conductores que no se calentaron.

En su forma más simple (Figura 7) el medidor consiste de una unión termoelectrónica (T), cuya temperatura aumenta debido a una corriente eléctrica constante y regulada que se aplica al circuito (F). El cambio de la temperatura de la unión varía de acuerdo a la cantidad de calor tomada por el gas dentro del sistema, por lo que el potencial generado a través de las terminales de la unión depende de la temperatura y por consiguiente de la presión del gas. Los voltajes generados por la diferencia de temperatura son del orden de milivolts, suficientes para alimentar externamente un potenciómetro calibrado en un medidor para la indicación de la presión. El medidor termopar puede ser más austero que el pirani, pero es más limitado en su intervalo de sensibilidad. El termopar tiene la virtud de ser muy simple, pero la desventaja de tener una escala no lineal. Sus principales aplicaciones son en sistemas donde no se requiere gran precisión.⁵²¹

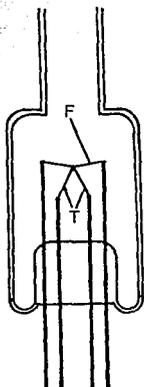


Figura 7.

Esquema de un medidor termopar: (F) filamento y (T) unión termoelectrónica.

II.1.3.2. Medidores de alto vacío.

Dadas las limitaciones de los medidores de conductividad térmica, al llegar a mejores vacíos, es necesario contar con otro tipo de medidores. A presiones menores a 10^{-3} Torr, se usan los medidores de alto vacío; los más usados son los de ionización.

II.1.3.2.1. Medidor de ionización de cátodo caliente.

En este tipo, los electrones emitidos de un filamento caliente, son acelerados hacia un malla cilíndrica cargada positivamente, algunos de ellos pasan entre el espacio de la malla y un colector negativo, al chocar con las moléculas del gas del sistema de vacío, producen iones positivos que son atraídos y capturados por el colector. Con un voltaje constante en la malla y con una emisión de corriente de electrones constante, el número de iones positivos es proporcional a la densidad molecular cuando la presión es menor a 10^{-3} Torr; en consecuencia, la corriente iónica sobre el colector es una medida indirecta de la presión.

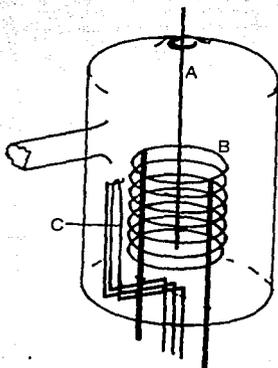


Figura 8.

Medidor de cátodo caliente: (A) colector de iones, (B) malla aceleradora de electrones y (C) filamento emisor de electrones.

Un medidor de ionización de cátodo caliente es el Bayard-Alpert Figura 8, el filamento (C) está fuera de la malla cilíndrica (B), que se mantiene a un potencial positivo para colectar

electrones, mientras que el colector iónico esta a un potencial negativo y consiste de un alambre delgado suspendido al centro de la malla (A).

II.1.3.2.2. Medidor de ionización de cátodo frío.

El principio de operación de estos medidores (Figura 9) es la creación de una descarga eléctrica autosostenida, aplicando externamente una diferencia de potencial de miles de volts a dos placas conductoras (cátodo (A)). Con la ayuda de un campo magnético exterior, los electrones que se producen por la descarga son forzados a seguir recorridos helicópticos, ionizando las moléculas del gas circundante. Debido a la gran masa de los iones, éstos viajan a bajas velocidades y el campo magnético tiene un efecto muy pequeño sobre ellos, por lo que una vez que se producen, son capturados por un colector (B). La corriente iónica positiva es una medida lineal de la densidad del gas y por consiguiente de la presión.⁽²⁾

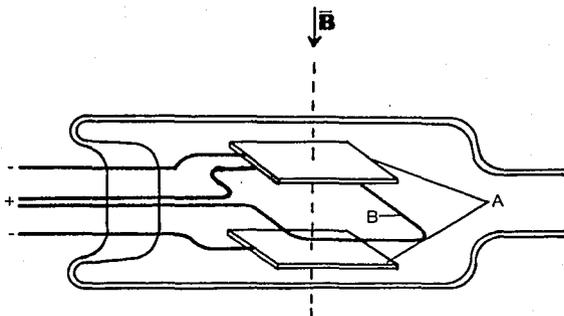


Figura 9.

Medidor de cátodo frío. (A) cátodo y (B) ánodo.

II.1.4. Procedimientos de operación del sistema.

Cuando se cuenta con todos los elementos que componen el sistema de alto vacío (Figura 1), se tiene especial cuidado en limpiar la cámara de vacío, así como la línea de evacuación del sistema.

En primer lugar se inicia la evacuación de todo el sistema por medio de la bomba mecánica, esperando llegar a la presión

ultima de operacion que es del orden de 10^{-3} Torr. Esto se hace para garantizar que no hay fuga en el sistema y asi poder alcanzar la presión base de operacion de la bomba difusora o turbomolecular. Si esta presión no se alcanza, se busca la fuente de gas que puede ser una fuga y se corrige. Una vez que se ha logrado llegar a la presión limite, se pone en operacion la bomba de alto vacio. Si se va a trabajar con una bomba de difusion, lo primero que se hace es llenar la trampa de la bomba con nitrógeno liquido y enseguida se enciende el calefactor del hervidor y el sistema de refrigeración.

Si en lugar de una bomba de difusion, se usa una turbomolecular, lo que se hace es poner en funcionamiento el sistema de refrigeración de la bomba y en seguida se pone en operacion ésta.

Una vez que se logra la presión de trabajo requerida y se realizan los procesos planeados, el proceso de apagado es el siguiente:

Si se usó un sistema con bomba difusora, se apaga ésta y se extrae el nitrógeno liquido de la trampa. Se espera a que el hervidor de la bomba este frio y la trampa adquiera la temperatura ambiente, para a continuación apagar la bomba mecánica de apoyo y el sistema de refrigeración.

Para el caso en que se usó una bomba turbomolecular, se apaga esta bomba y se espera a que el rotor se detenga por completo para apagar la bomba mecánica de apoyo y el sistema de refrigeración.

II.2. Sistema de alto vacio en paralelo. (Atrapamiento)

La característica de este sistema, es que el gas de la cámara se atrapa y se retiene en las bombas mientras están en operacion. Este sistema, al igual que el anterior, está formado por una cámara, medidores, una bomba de alto vacio y una bomba de pre-vacio (Figura 10).

II.2.1. Bombas de adsorción.

Las bombas de adsorción consisten en un recipiente refrigerado que contiene un adsorbente activado. Los materiales usados como adsorbentes son en general las zeolitas o el carbón de coco. Las zeolitas son aluminosilicatos metalicos alcalinos, que tienen una

estructura de redes tetraedrales, que a diferencia de los cristales ordinarios que contienen agua de cristalización, son deshidratadas sin cambiar su estructura de red cristalina, dando como resultado que las moléculas de distintos gases puedan ocupar los espacios del agua removida, siendo así las zeolitas muy buenos adsorbentes. Sin embargo, esto es válido para algunos gases, ya que estos materiales presentan la propiedad de persorción: que se define como la adsorción en los poros que son ligeramente mayores que el diámetro de las moléculas a adsorber.³⁹

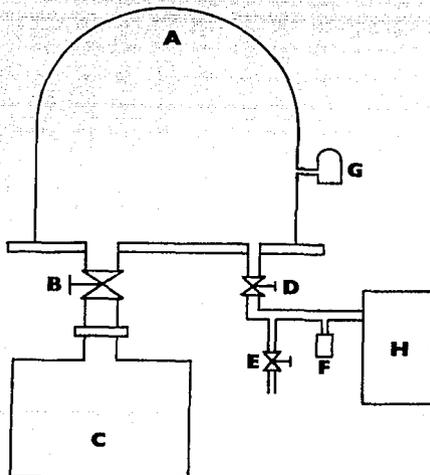


Figura 10.

Diagrama de un sistema de alto vacío en paralelo. (A) cámara de vacío, (B) válvula de alto vacío, (C) bomba de alto vacío, (D) válvula de bajo vacío, (E) válvula de admisión de aire, (F) medidor de bajo vacío, (G) medidor de alto vacío y (H) bomba de bajo vacío.

Las características de adsorción de un típico tamiz molecular (con un tamaño promedio de poro de 5 \AA) se muestran en la Figura 11. En la curva, se grafica la cantidad de gas que puede ser adsorbido, en Torr x litro de gas por gramo de adsorbente, como una función de la presión del gas residual. En apariencia, si la

Temperatura del adsorbente es menor, mayor número de moléculas de gas son adsorbidas, sin embargo, el neón y el helio son adsorbidos a menor escala que el nitrógeno. En la atmosfera, las presiones parciales del nitrógeno, neón y helio son de 595, 1.4×10^{-2} y 4×10^{-3} Torr respectivamente.

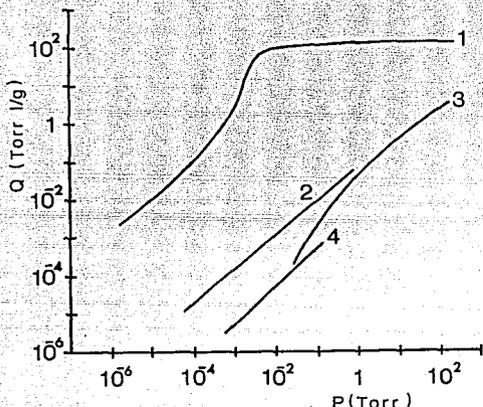


Figura 11.

Isotermas de adsorción para la zeolita 5A. (1) N₂ a -195°C , (2) Ne a -195°C , (3) N₂ a 20°C y (4) He a -195°C .

La isoterma de adsorción indica que una presión parcial de 10^{-2} Torr se obtiene después de bombear 100 Torr-litro de nitrógeno, 10^{-3} Torr-litro de neón o 8×10^{-5} Torr-litro de helio por gramo de zeolita (Figura 11).

Las bombas de adsorción están compuestas de un cuerpo de acero inoxidable con difusores internos de cobre para facilitar la transferencia de calor hacia la carga de zeolita. Además llevan asociado un contenedor de nitrógeno desmontable que se sujeta en tres soportes y con una válvula por donde se libera el gas en el proceso de activación (horneado) (Figura 12).

La bomba de adsorción se conecta al sistema de vacío y se sumerge en nitrógeno líquido; como la temperatura de la zeolita disminuye, adsorbe gas del sistema causando un descenso en la

presión. Cuando se alcanza la presión de equilibrio (la presión última de la bomba), la bomba se aísla. En esta fase el tamiz molecular está saturado, para reactivarlo es necesario calentarlo por varias horas; para este propósito se usan calefactores en forma de cinturón a una temperatura mayor de 200°C .⁽¹⁰⁾

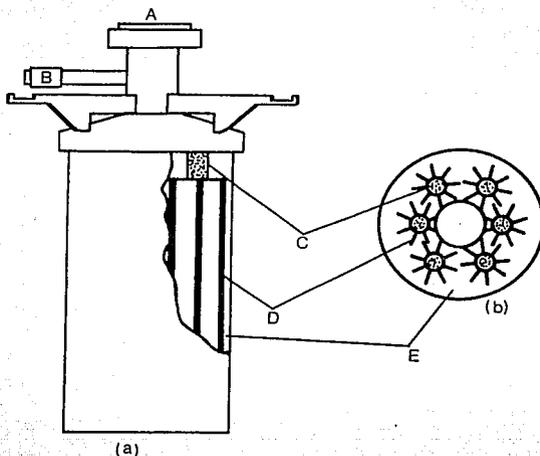


Figura 12.

Bomba de adsorción (Varian): (a) forma exterior, (b) corte transversal. (A) entrada de la bomba, (B) válvula liberadora de gas. (C) depósitos de nitrógeno líquido, (D) difusores y (E) contenedor de tamiz molecular.

Una bomba de adsorción es capaz de bombear sistemas de vacío de 1 a 50 litros, desde atmósfera hasta una presión última de alrededor de 10^{-2} Torr, donde el medio residual consiste principalmente de neón. Sin embargo, es posible reducir presión última de neón, mediante el uso de bombas subsecuentes⁽¹⁰⁾. A presiones mayores de los 100 Torr, Figura 13, las moléculas de nitrógeno y oxígeno, fluyen hacia la bomba arrastrando con ellas las moléculas de helio y neón, reduciendo así su presión parcial dentro de la cámara, en proporción directa con el cambio en la presión total. Si el proceso de bombeo continúa, eventualmente, la presión puede

caer del nivel donde el nitrógeno comprime al helio y al neón en la bomba. Esta situación puede provocar un movimiento de regreso a la cámara y su presión parcial volverá a aumentar. Si se cierra la primera bomba, en el momento que la presión del neón pase por un valor mínimo y se pone en operación una segunda bomba, se obtendrá una presión última más baja. Esto se ejemplifica en la Figura 14.

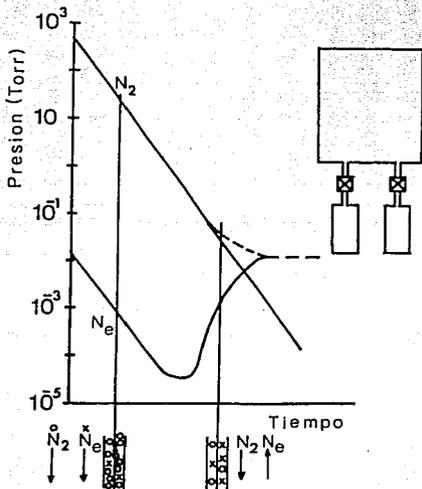


Figura 13.

Proceso del bombeo de neón y helio

II.2.2. Bombas de alto vacío.

En este tipo de sistema las bombas de alto vacío comúnmente usadas son las de ionización y las criogénicas.

II.2.2.1. Bombas iónicas de Ti

El principio de estas bombas es ionizar el gas que hay dentro de un sistema, acelerar los iones hacia una placa cargada negativamente, donde son atrapados y retenidos por combinación química con el material de la placa, siendo así removido el gas del sistema.⁽¹¹⁾

En las bombas iónicas se genera una descarga eléctrica entre

un ánodo y un cátodo a un alto voltaje dentro de un campo magnético (Figura 15): este campo provoca que los electrones de la descarga sigan trayectorias helicoidales. El aumento en el recorrido de los electrones, asegura un aumento de la eficiencia en la formación de iones del gas dentro de la cámara. Los iones formados, se aceleran hacia el cátodo de titanio donde son capturados o quimisorbidos. Debido a las altas energías que adquieren algunos de ellos, al golpear el cátodo arrancan material (titanio), que en baja proporción se sitúa en la superficie del ánodo, capturando átomos del gas.

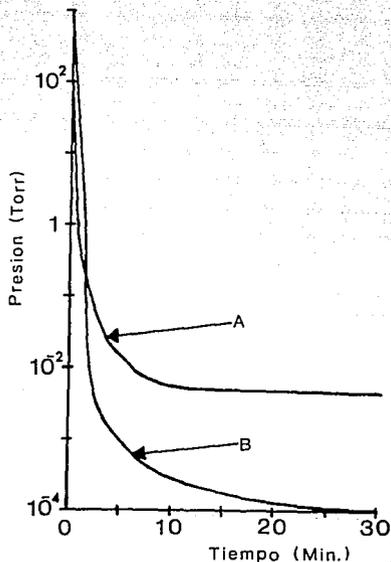


Figura 14.

Proceso de evacuación de una cámara de 100 litros empleando dos bombas de adsorción: (A) en paralelo y (B) en serie.

Las bombas iónicas consisten esencialmente de una cámara de acero inoxidable, conteniendo un ánodo construido en forma de paneles, Figura 16, y unas placas de titanio como cátodo, colocadas a los extremos del ánodo. Entre los electrodos se mantiene un potencial de 3000 a 7000 volts. Externamente se aplica un campo

magnético de 1500 gauss por medio de imanes permanentes a lo largo del eje del ánodo.

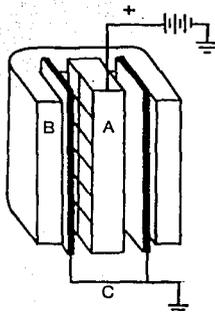


Figura 15.

Esquema del principio operativo de una bomba iónica de titanio. (A) ánodo en forma de paneles, (B) imán permanente y (C) cátodo de placas de titanio.

Para estas bombas, la eficiencia se expresa con la razón entre la corriente iónica y la presión i^+/P . La corriente iónica i^+ es proporcional a el número de moléculas que entran a la bomba por unidad de tiempo que es el gasto $Q^{(1)}$. Así que,

$$\frac{i^+}{P} = K \left[\frac{Q}{P} \right] = KS \quad (19)$$

y entonces la velocidad de bombeo S es:

$$S = \beta \left[\frac{i^+}{P} \right] \text{ litros/s} \quad (20)$$

donde $\beta = 1/K$ es la constante de bombeo, i^+ es la corriente iónica y P es la presión. El valor de K varía de 0.05 a 0.1 dependiendo del gas que se trate y de la bomba.

II.2.2.2. Bombas criogénicas.

En estas bombas la acción de reducir la presión se realiza

con base en la condensación de los gases (vapores) existentes en el sistema, sobre superficies a temperaturas criogénicas. El criobombeo comprende tres mecanismos: la criocondensación, la criosorción y el criotrapamiento⁽¹³⁾. La criocondensación ocurre cuando las moléculas del gas inciden sobre moléculas de la misma especie adheridas a la superficie; por este proceso se pueden producir capas de espesor considerable. La criosorción es la adsorción física de gases por superficies frías. El criotrapamiento es el proceso mediante el cual los gases son atrapados (sepultados) bajo la condensación de una segunda capa de gas, por ejemplo en las trampas de hidrógeno.

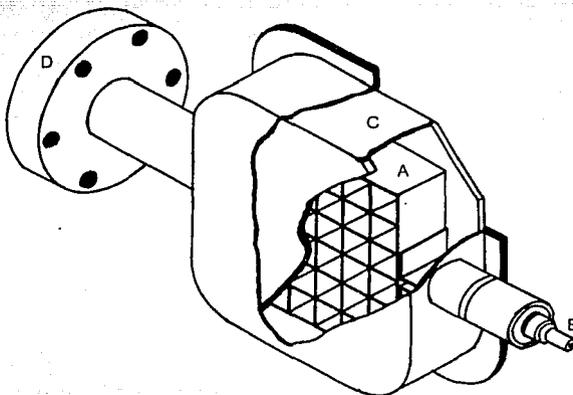


Figura 16.

Esquema de una pequeña bomba iónica de titanio. (A) ánodo, (B) conector al sistema de alimentación eléctrica, (C) cátodo de titanio y (D) conexión al sistema de vacío.

En general las superficies de criobombeo no pueden ser expuestas directamente a fuentes de gas a temperatura ambiente, ya que la carga de calor debida a la radiación excede a la que se debe a la condensación de las moléculas del gas. Por tanto, la superficie criogénica que se expone a la fuente de gas, debe protegerse con un baffle ópticamente opaco.⁽¹⁴⁾

Las bombas criogénicas usualmente consisten de una cámara de vacío, un refrigerador mecánico criogénico y dos conjuntos de condensadores, uno conectado al sistema refrigerador y el otro a una cámara baja llena de nitrógeno líquido (Figura 17). Al conjunto de condensadores externos se le conoce como colección 77K y al conjunto de condensadores internos como colección 20K.

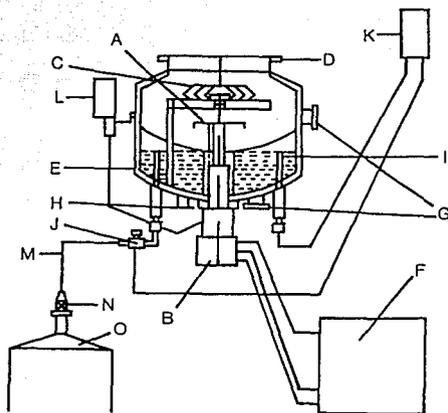


Figura 17.

Esquema de una bomba criogénica. (A) condensador 20K, (B) fuente fría, (C) condensador 77K con nitrógeno líquido, (D) conexión de alto vacío, (E) cuerpo de la bomba, (F) compresor de helio, (G) conexiones de vacío de apoyo, (H) conexión para medir, (I) sensor de nitrógeno líquido, (J) válvula de entrada de nitrógeno líquido, (K) dispositivo de control de flujo de nitrógeno, (L) medidor de temperatura, (M) línea de nitrógeno, (N) válvula de salida de nitrógeno y (O) taque de nitrógeno.

El refrigerador mecánico está compuesto de un compresor, un par de líneas flexibles y un dispositivo de expansión llamado fuente fría, todas estas partes se acoplan para formar un sistema cerrado de transferencia de gas. La cámara baja se llena de nitró

geno líquido por medio de un tanque fijo, esta cámara al igual que el refrigerador, forma un circuito cerrado de transferencia de gas, que viaja por las líneas y llega a la colección 77K enfriandola. Por otro lado el helio comprimido que sale del compresor, viaja a través de la línea flexible, entrando a la fuente fría, donde el helio se expande bajo condiciones controladas y circula por la colección 20K enfriandola. El helio retorna hacia la unidad de compresión por la otra línea flexible.

La colección 77K, que normalmente se hace de cobre, se enfria a una temperatura entre 25 y 80 °K que es suficiente para condensar muchos gases.

La colección 20K construida también de cobre, pero recubierta con un material adsorbente (carbon de coco activado entre otros) alcanza una temperatura de 10 a 20 °K, aquí algunos de los gases ligeros tales como el hidrógeno, el helio y el argón, son atrapados.

II.2.3. Procedimiento de operación del sistema:

Al igual que en los sistemas en serie, el proceso de operación se inicia con la limpieza a fondo de los componentes del sistema, al ensamblar las partes se tiene cuidado en que todo quede sellado herméticamente para evitar las fugas.

En cuanto se tiene todo armado, se inicia el bombeo con la bomba de adsorción hasta alcanzar la presión de equilibrio que dependiendo de la relación, volumen del sistema-carga de adsorbente en la bomba debe ser de 10^{-2} Torr para dos bombas secuenciales.

Las fallas que se pueden presentar en esta etapa de bombeo son: la relación volumen del sistema-carga de adsorbente de la bomba no es el adecuado o que la bomba este saturada.

En cuanto se corrige la falla y se logra la presión de equilibrio de la bomba, se aísla del sistema, se extrae el nitrógeno líquido del contenedor y se pone en operación la bomba de alto vacío al aplicar voltaje entre los electrodos.

Si se cuenta con una bomba iónica el procedimiento es el siguiente: se enciende la fuente de alimentación de la bomba, se regula manualmente el voltaje aplicado. Dado que la cantidad de

gas existente a esas presiones es aun muy grande, la bomba requiere de mucha corriente para mantener la descarga entre los electrodos. A medida que el vacio mejora la corriente necesaria se reduce y por tanto el consumo de potencia tambien (ecuacion 19). El proceso para alcanzar el alto vacio con esta bomba requiere de tiempo, pero se obtienen vacios muy limpios a diferencia de los sistemas en paralelo.

Si en lugar de usar una bomba ionica se usa una criogenica, el procedimiento es el siguiente: Previamente a trabajar con la bomba, se pone en operacion el refrigerador mecanico a fin de comprimir helio. Una vez que se alcanza la presion de operacion de la bomba, se llena la camara baja de nitrogeno liquido y se hace circular a traves de la coleccion 77K, hasta alcanzar la presion de equilibrio para esta temperatura, a continuacion se hace circular el helio comprimido por la coleccion 20K logrando el alto vacio. Al igual que en el sistema anterior, el proceso de bombeo requiere de un tiempo considerable.

Los problemas que se pueden presentar en estas bombas son: que las superficies de condensacion se saturen limitando el bombeo del sistema; que las linea de conduccion del refrigerante, sufran desperfectos como que esten parcial o completamente tapadas, que presenten picaduras o abolladuras ocasionando que el refrigerante no llegue a las colecciones; que el aislamiento termico tenga fugas y en consecuencia no se llega a la temperatura requerida; o que el compresor de helio no funcione perfectamente y limite parcial o completamente la obtencion de helio comprimido.

Quando se ha completado el proceso de evacuacion del sistema y se han realizado las actividades que se tenian planeadas, el proceso de apagado es el siguiente, como la bomba de bajo vacio ya se ha aislado previamente del sistema, los que hay que interrumpir son las de alto vacio, para el caso de la bomba ionica, solo se corta el suministro de energia, de la fuente de alimentacion y deja de funcionar. Para la criogenica se cierran los conductos del nitrogeno liquido y del helio comprimido, cuidando de que toda la linea quede libre de ellos, por ultimo se apaga el compresor.

Para repetir los procesos de operacion se hornearn previamente

las bombas de adsorción, a fin de que queden nuevamente activadas.

II.2.4. Aplicaciones específicas

A pesar de que los vacíos que se generan en estos sistemas son muy limpios, las aplicaciones que se le pueden dar a ellos varían uno del otro, por ejemplo al usar un sistema bomba criogénica-bomba de adsorción, dado que el bombeo se realiza por enfriamiento, hay algunos procesos térmicos que no se pueden realizar. Las aplicaciones que se le pueden dar a este sistema son: simuladores espaciales, en espectrómetros de masas, aparatos de haces moleculares, investigaciones de bajas temperaturas, aceleradores de partículas etc. En la industria en la producción de tubos electrónicos y tubos de descarga etc.

En los sistemas bomba iónica-bomba de adsorción, las aplicaciones no tienen restricciones, científicamente se pueden aplicar en: espectrómetros de masa, aparatos de haces moleculares, aceleradores de partículas, aparatos de difracción electrónica, física de superficies, investigación de materiales, etc. En la industria en aleación de metales, fundición por cañón de electrones, evaporación por capas, erosión de materiales, etc.

II.2.5. Ventajas y desventajas de los sistemas.

La ventaja primordial de estos dos sistemas, como se mencionó antes, es que los vacíos que se generan son muy limpios.

Desde el punto de vista de costo es más económico adquirir una bomba iónica que una criogénica dado que cuenta con compresores de gas, que esencialmente es la parte más costosa de la bomba.

Tomando en cuenta que en el uso de cualquiera de los dos sistemas los procesos de bombeo son muy largos, se tiene que el sistema de la bomba criogénica consume mayor energía, por el proceso de compresión y circulación del refrigerante, que envuelve muchas transformaciones de energía y por consiguiente pérdidas, mientras que en el sistema con iónica, solo es necesaria energía eléctrica.

Por lo tanto para esta clase de sistemas, el tipo bomba iónica-bomba de adsorción es más eficiente que el de bomba criogénica-bomba de adsorción.

II.3. Comparación entre los sistemas en serie y en paralelo.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de las dos clases de sistema por separado, se hace un balance en el empleo de uno o del otro.

En eficiencia se tiene que los sistemas en serie son mejores que los en paralelo, en especial el sistema bomba turbomolecular-bomba mecánica.

Si lo que se necesita son vacíos muy limpios, los sistemas en paralelo son los más indicados, en especial por menor inversión, el sistema bomba iónica-bomba de adsorción.

Considerando el costo al adquirir un sistema, se tiene que los más económicos son: en serie el sistema bomba difusora-bomba mecánica, y en paralelo el sistema bomba iónica-bomba de adsorción.

Por lo tanto un sistema económico en el que se obtienen vacíos muy limpios, aunque sin embargo se invierte mucha energía por lo prolongado del proceso de evacuación, es el sistema bomba iónica-bomba de adsorción.

En el siguiente capítulo se hace un análisis de un sistema de este tipo que se construyó en los talleres del Instituto de Física de la UNAM.

III. CARACTERIZACION DEL SISTEMA DE ALTO VACIO.

Como se menciono al inicio del trabajo, el objetivo es realizar la caracterización y la optimización del sistema de alto vacio que se construyo en el Instituto de Física.

La caracterización del sistema comprende el analisis de cada uno de los materiales de los elementos que lo componen; la evaluación de diseño y de construcción, así como el estudio de una serie de factores que intervinieron en la construcción del sistema y que en un momento dado limitan la presión ultima.

En la evaluación, los factores que se analizan son: las dimensiones del sistema, las propiedades de los materiales usados en la construcción, las clases de sellos desmontables con que cuenta y el tipo de soldadura.

La finalidad de esta caracterización es la de contar con los parámetros que permitan hacer una predicción sobre la presión ultima que se puede lograr.

En la Figura 18 y 19 se muestra un diagrama del sistema de alto vacio que se construyo.

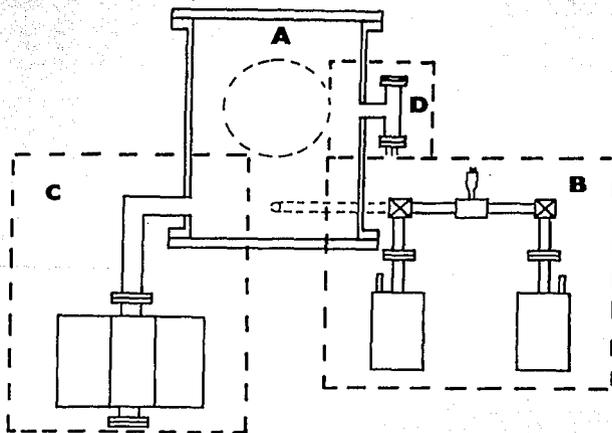


Figura 18.

Diagrama del sistema de alto vacio: (A) cámara de alto vacio, (B) sección de bajo vacio (bombas de adsorción, termopar y válvulas), (C) sección de alto vacio (bomba iónica) y (D) medidor de alto vacio.

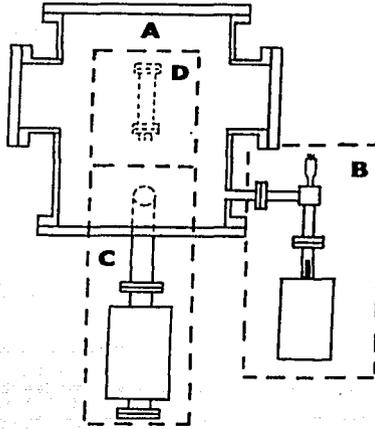


Figura 19.

Diagrama del sistema de alto vacío rotado 90° .

El diseño y la construcción se realizó en base a los estándares establecidos, tomando los siguientes criterios:

Para el diseño y construcción del sistema: ⁽¹²⁾

- Presión última.
- Presión total
- Presión parcial
- Presión de operación.
- Gases que intervienen en el proceso.
- Inversión de tiempo en el proceso de bombeo.
- Volumen del sistema.
- Área superficial de la sección de alto vacío.
- Desgasificación de las partes que lo componen.
- Dimensiones de las fugas del sistema.
- Procedimientos de operación.

Para la selección de materiales: ^(12,13)

- Presión de vapor.
- Temperaturas máximas de horneado, sin perder su resistencia y sin sufrir efectos de corrosión.

- Propiedades físicas.
 - Resistencia a la deformación por presión atmosférica.
 - Conductividad térmica.
 - Propiedades magnéticas.
- Construcción.
 - Maquinado.
 - Soldadura.
- Peso.
- Acabado.
- Costo.
- Vida útil.

III.1. Cámara de usos múltiples.

La cámara del sistema se construyó a partir de un tubo de acero inoxidable 304 con costura axial con diámetro interior de 20.5 cm, espesor de 0.65 cm y longitud de 40 cm (Figura 20). A cada extremo del tubo se soldaron anillos de acero inoxidable 304 que tienen la caja de aro-sello. Las tapas de la cámara y los anillos tienen un diámetro exterior de 28 cm y espesor de 1.9 cm. Cuenta con dos accesos de usuario a 180° construidos con tubo de 10 cm de diámetro, espesor de 0.40 cm y longitud de 7 cm; los anillos con los aro-sellos y las tapas de estos, tienen un diámetro exterior de 13 cm y un espesor de 1.2 cm, la cámara tiene un terminado espejo en la superficie interior y exterior. El volumen de la cámara incluyendo los accesos es de 14.55 l.

Características del acero inoxidable 304⁽¹²⁾.

- Desgasificación menor a 10^{-13} Torr $\text{L}/\text{cm}^2 \text{ s}$.
- Alta resistencia.
- No magnético.
- Facilidad para el maquinado.
- Soldable (TIG).
- Acabado espejo.

El tipo de soldaduras usadas en las uniones, es a base de arco eléctrico con atmósfera de gas inerte (TIG). Esta técnica es una de las más apropiadas ya que no involucra elementos de relleno, fundentes y la oxidación es mínima debido a la atmósfera libre de

oxígeno⁽¹⁴⁾. Los aro-sellos de viton empleados para los sellos desmontables tienen las siguientes características:⁽¹²⁾

- Desgasificación menor que 10^{-8} Torr l/cm^2 s.
- Baja penetración de helio.
- Temperatura máxima de trabajo 180 °C.
- Horneable entre 100 y 125 °C.

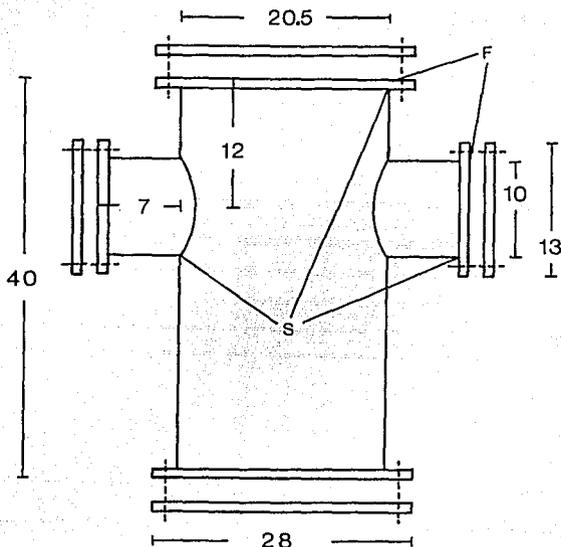


Figura 20.

Diagrama de la cámara de alto vacío. (F) unión desmontable con caja para aro-sello de viton (S) uniones soldadas por proceso TIG. Las dimensiones son en centímetros.

Del análisis de la construcción y de los materiales empleados en la cámara, los factores que pueden modificar la presión última del sistema son:

La formación de poros y microgrietas en las soldaduras.

En los sellos desmontables (tapa con aro-sello), aquí se tiene que en el mejor de los casos, de la presión de vapor que tienen los aro-sellos, la presión última que se puede lograr es 10^{-9} Torr, aunque existe la posibilidad de que por defectos en la

caja de éstos o en ellos mismos existan otras fuentes de fuga real.

III.2. Línea de evacuación.

La línea de evacuación se divide en dos partes: la primera va de la cámara a las bombas de adsorción y la segunda une la cámara con la bomba iónica (Figura 18 y 19).

La línea que va a las bombas de adsorción en su primera parte esta construida con un tubo unido por bridas, el tubo es de acero 304⁽¹²⁾ de 2.1 cm de diámetro interior y longitud total de 25.5 cm. Las bridas tambien de acero 304 (Figura 21) son del tipo Conflat de 2 3/4" con arco-sello de cobre OFHC que tiene las siguientes características⁽¹²⁾:

- Desgasificación de 10^{-6} Torr $\sqrt{\text{cm}^2 \text{s}}$.
- No magnético.
- Alta conductividad térmica.
- Facilidad para el maquinado.
- Facilidad para la soldadura por varios métodos.

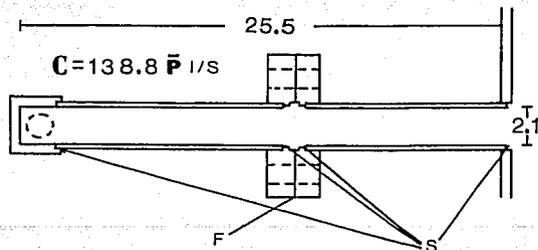


Figura 21.

Diagrama de la primera parte de la línea que va a las bombas de adsorción. (C) la conductancia, (F) union de bridas tipo Conflat estandar 2 3/4", (S) uniones soldadas por proceso TIG. Las dimensiones son en centímetros.

Este tramo total de la línea, se une por un extremo a la cámara (soldadura TIG), y por el otro a las bombas de adsorción Figura 19, el tubo de acero de esta línea tiene un diámetro de 0.5 cm y longitud de 9.8 cm. Al final éstas forman un codo con una válvula Figura 22.

Las válvulas están conectadas a las bombas de adsorción por bridas con aro-sello de vitón. El tramo de línea que va de la válvula a la bomba de adsorción tiene el mismo diámetro que el anterior pero con longitud de 18.4 cm.

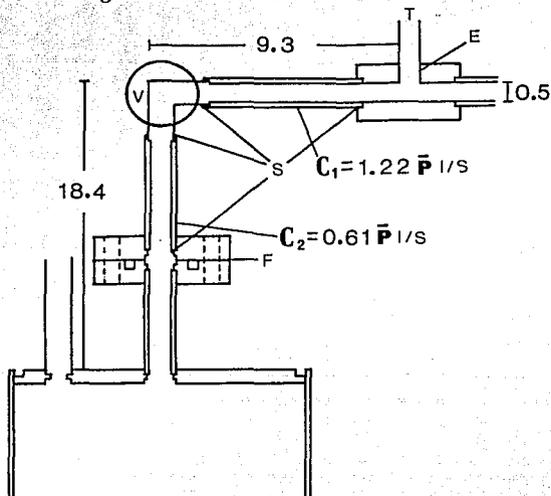


Figura 22.

Diagrama de la segunda parte de la línea que va a la bomba de adsorción. (C₁) y (C₂) las conductancias, (E) unión con rosca, (F) unión desmontable con caja para aro-sello de vitón, (S) uniones soldadas por proceso TIG, (T) medidor termopar y (V) válvula. Las dimensiones son en centímetros.

La línea de evacuación que va de la cámara a la bomba iónica está construida de un tubo de acero 304, soldado (T.I.G.) en forma de codo a 90°, con un diámetro interior de 3.7 cm y una longitud de 11.5 y 20.5 cm (Figura 23).

El codo se conecta a la bomba iónica a través de una unión de bridas de tipo Conflat de 4 1/2" con aro-sello de aluminio con las siguientes características⁽¹²⁾:

- Desgasificación menor a 10^{-6} Torr $\text{l}/\text{cm}^2 \text{ s}$.
- Alta resistencia.
- No magnético.
- Facilidad de maquinado.

- Baja densidad.
- Horneable.

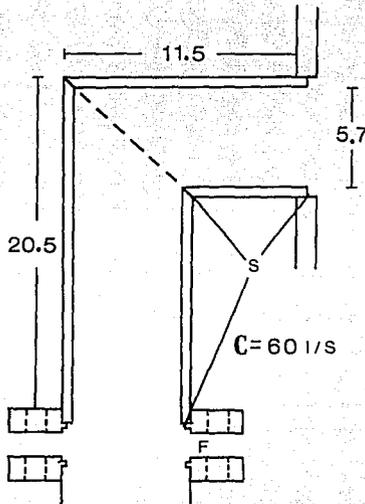


Figura 23.

Diagrama del codo que une la cámara con la bomba iónica.(C) la conductancia. (F) unión desmontable con bridas tipo Conflat estandar 4 1/2" y (S) uniones soldadas por proceso TIG. Las dimensiones son en centímetros.

Esta sección es de gran importancia en la evacuación del sistema, ya que durante el proceso de bombeo las conductancias limitan la velocidad de evacuación de los gases.

III.3. Sistema de bombeo de bajo vacío.

Esta constituido por dos bombas de adsorción criogénica (Figura 19). El cuerpo de la bomba es a partir de tubo de acero inoxidable 304, con espesor de pared de 0.2 cm su diámetro interior es de 11 cm y su longitud 25 cm. Figura 24. Las tapas superior e inferior están soldadas con arco de helio (TIG), se construyeron de placa de acero 304 con espesor de 0.6 cm, el

cuerpo difusor es de fundición de aluminio 6061-T6. El elemento activo es zeolita 5A (900 gramos/bomba) que para ser activada se hornea a 240 °C.

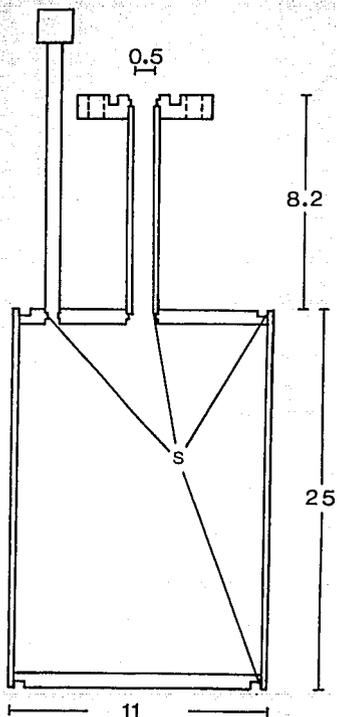


Figura 24.

Diagrama de una bomba de adsorción. (S) uniones fijas soldadas por proceso TIG. Las dimensiones son en centímetros.

Los inconvenientes que presenta el diseño de las bombas son: que al hornearlas a 240 °C. transfieren el calor a los aro-sellos de vitón en la unión de las bombas con la línea de evacuación. Los difusores se hicieron por fundición y presentan poros.

III.4. Sistema de bombeo de alto vacío.

El sistema de alto vacío está formado por una bomba iónica de 80 l/s diseñada y construida en el Instituto de Física⁽¹⁵⁾. El cuerpo de la bomba es de acero inoxidable 304 con dos puertos de admisión, su volumen es de 5,35 litros. La diferencia de potencial aplicada a la bomba es de 5600 volts, este suministro de energía lo proporciona una fuente de alto voltaje (también construida en el Instituto de Física).

III. 5. Medidores de vacío.

La presión que se logra en el primer intervalo de presiones (de presión atmosférica a 10^{-2} Torr) se registra con un medidor de bajo vacío tipo termopar, que se localiza en la unión de la "T" que forman la línea que une a la cámara con las bombas de adsorción Figura 19. Este medidor tiene una junta caliente tipo E, es decir, en uno de los extremos tiene un alambre de nicromel (80% Ni, 20% Cr) y en el otro uno de constantan (45% Ni, 55% Cu), como filamento incandescente también usa nicromel. En este medidor registra presiones que van de atmosférica a 10^{-3} Torr.⁽¹⁶⁾

Para censar la presión de la cámara una vez que se alcanzan presiones menores a 10^{-3} Torr el sistema cuenta con un medidor de alto vacío desnudo de cátodo caliente tipo Bayard-Alpert. Este medidor es de adquisición comercial y cuenta con dos filamentos de tungsteno reemplazables⁽¹⁷⁾ que se seleccionan por medio de un controlador en el que se registran las lecturas.

Este medidor se localiza en una de los puertos de la "T" que está unida a la cámara ver Figura 18. La "T" está hecha de acero inoxidable 304 con extensiones de tubo del mismo acero (soldadas por proceso TIG) sus dimensiones se muestran en la Figura 25. En cada puerto de esta "T" tiene soldadas dos bridas tipo Conflat 3 3/8", con aro-sellos de cobre OFHC.

III.6. Evaluación del sistema.

A partir de la información existente de las propiedades de los materiales que integran el sistema, se tiene como resultado que éstos cumplen con las normas de selección establecidas. Con relación a las propiedades para construcción los materiales son

maquinables y se logran acabados espejo, son soldables por diferentes procesos y son de fácil adquisición en el mercado nacional.

Un factor importante que se debe considerar dentro de las propiedades de los materiales es la presión de vapor, ya que en primera instancia señala el límite en la presión última del sistema.

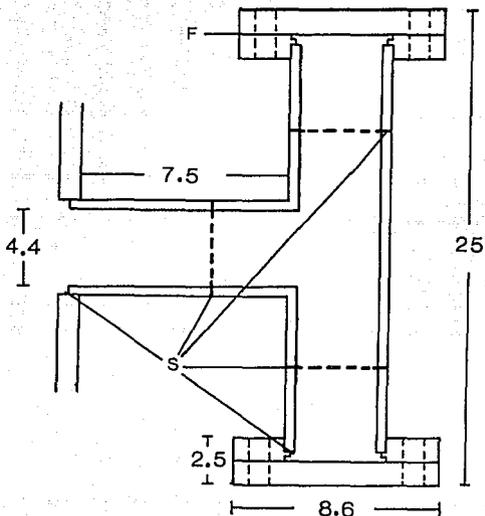


Figura 25.

Diagrama del acceso en forma de "T" donde se fija el medidor de alto vacío. (F) uniones desmontables con bridas tipo Conflat estándar 3 3/8" y (S) uniones fijas soldadas por proceso TIG. Las dimensiones se expresan en centímetros.

Para el caso del sistema que se construyó en el Instituto de Física, el material que tiene mayor presión de vapor es el vitón, y es de 1×10^{-10} Torr $l/m^2 s$ para los aro-sellos.

Con relación al diseño, se tiene que: las dimensiones de la cámara son adecuadas, si se toma en cuenta el tamaño de las bombas que se van a emplear. El método de soldadura que se usó, garantiza la homogeneidad de los materiales y se evita la presencia de fundentes, que en la mayoría de los casos es perjudicial en la

evacuación del sistema; por otro lado, las bridas tipo Conflat usadas en las uniones, son confiables porque en pocas ocasiones son fuente de fuga real.

Los problemas que presenta el diseño son: en primer lugar las líneas de evacuación son estrechas y eso aumenta el tiempo que se invierte en el proceso de bombeo; en segundo lugar, el uso de bridas con aro-sello de vitón en el cuello de las bombas de adsorción, no permiten que se hornén a temperaturas mayores de 160°C , por consiguiente, las bombas no se logran activar completamente (temperatura de activación 250°C). El último problema que se encontro es que la unión del termopar al sistema es por medio de rosca que no es confiable como sello para alto vacío, es decir, puede presentar fugas reales que deben corregirse.

III.7. Estimación de la presión última.

Para obtener una estimación de la presión última, en el caso de bajo vacío, se aplica la razón del volumen entre la carga de material adsorbente ($14.551/1800\text{g}$), donde se obtiene 8.1×10^{-3} l/g. Este valor se interpola en la gráfica de la Figura 26^(a), a una temperatura de 78 K del material adsorbente de la bomba y se obtiene una presión aproximada de 1.5×10^{-3} Torr.

Para el intervalo de alto vacío, en el reporte de la bomba iónica⁽¹⁵⁾, se obtiene una presión última de 8×10^{-6} Torr; sin embargo, no se mencionan el volumen evacuado y el tiempo en el que se realizó el proceso. Por lo tanto, se puede hacer una estimación de la presión última del sistema.

Como resultado de la caracterización mostrada en este capítulo, se tiene que el sistema construido, es adecuado para lograr una presión última del orden de 10^{-6} Torr, aunque no se conoce el tiempo que se tiene que invertir, dadas las conductancias, en algunas secciones de las líneas de evacuación. En el siguiente capítulo se presenta el proceso de limpieza y ensamble del sistema; las pruebas para detectar y corregir las fugas; el proceso de evacuación de las bombas de adsorción aisladas y en serie; por último se obtiene el proceso adecuado de evacuación del sistema para obtener presión última del sistema en el menor tiempo.

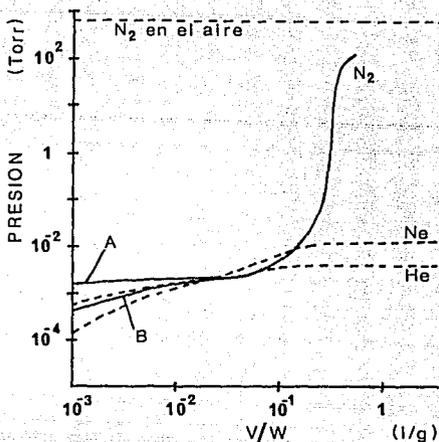


Figura 26.

Presión de equilibrio de algunos componentes del aire como función de la carga de bombeo. (V/W) relación del volumen de la cámara entre la cantidad de adsorbente en las bombas medida en gramos. (A) proceso que se inicia con la bomba a temperatura ambiente y (B) proceso en que la bomba se precalienta a 300°C y se enfría desde esa temperatura. El adsorbente es zeolita 5A a -195°C .

IV. PRUEBAS DE OPERACION Y RESULTADOS.

Después de un análisis del diseño y construcción, de los materiales usados en el sistema y hacer una estimación de la presión última, en este capítulo se describen los procedimientos iniciales para poner en operación por primera vez el sistema de alto vacío, comenzando con la limpieza de todas sus partes; la detección de fugas; la carga y pruebas de las bombas de adsorción; realización de pruebas de operación del sistema en conjunto y la obtención experimental de la presión última del sistema.

En primer lugar, se limpió la cámara, las tapas, la línea de evacuación, las bombas de adsorción y los aró-sellos de aluminio y vitón, utilizando como desgrasantes acetona y alcohol.

En la bomba iónica, el procedimiento fue diferente, ya que fue usada con anterioridad. Primero se lijaron sus partes: carcasa, placas de titanio y los dos paneles de ánodos; después se lavaron, se secaron con aire a presión y se limpiaron con acetona y alcohol.

Se realizó el ensamblado de todo el sistema que comprende: medidores, bomba iónica y bombas de adsorción. Estas dos últimas se cargaron cada una, con 900 gramos de zeolita 5A nueva.

Para la detección de fugas en el intervalo de presión atmosférica a 10^{-9} Torr, se conectó una bomba mecánica de apoyo a una de las bridas que une al sistema con una bomba de adsorción. Al obtener la presión última del sistema, se censaron los cambios de presión al aplicar acetona a los posibles puntos con fuga, localizándose en los sellos desmontables y en la cuerda que une al termopar con el sistema; se corrigieron apretando los sellos adecuadamente y para el termopar, agregando cinta de teflon.

Para tener la seguridad en la lectura que se estaba registrando en el termopar hecho en el Instituto⁽¹⁸⁾, se calibró con un termopar comercial y se volvió a colocar al sistema, pero ahora se fijó utilizando resina Torr-Seal^{MR}, especial para vacío y que tiene las siguientes características⁽¹⁸⁾:

Presión de trabajo menor a 10^{-9} Torr.

Forma uniones de gran resistencia mecánica con metales, cerámicas y vidrio.

Corrige fugas menores a 10^{-9} Torr/litro.

Máxima temperatura de operación 120°C .

El siguiente paso fue detectar fugas en el intervalo 10^{-9} a 10^{-10} Torr. Para tal efecto, se utilizó un detector de fugas marca Varian modelo 936-40⁽¹⁶⁾, que se conectó en el mismo lugar que ocupó la bomba de apoyo inicialente.

El detector consta de una bomba mecánica, una bomba difusora y un espectrómetro de masa con señal audible. El procedimiento para la detección fue el siguiente: se evacuó el sistema con el sistema de vacío del detector, hasta lograr la presión de operación del espectrómetro; una vez encendido, se buscó la fuga recorriendo con una boquilla conectada a un tanque de helio las regiones con posibles fugas (soldaduras de todo el sistema, sellos desmontables y algunos lugares de los materiales). Se localizaron fugas en la soldadura de uno de los accesos de usuario con la cámara y en el pasamuros de alimentación de la bomba iónica. Otro punto fue en el sello desmontable que une al codo con la bomba iónica, que se corrigió cambiando el sello metálico y apretando adecuadamente.

Para corregir las fugas en las soldaduras se utilizó como sellador resina líquida Leak Sealant^{MR}, que tiene las siguientes características⁽¹⁷⁾:

- Aplicable a sistemas de ultra alto vacío, presiones menores a 10^{-9} Torr.
- Resiste temperatura de 73 a 723 K.
- Presenta buena adherencia a temperaturas criogénicas.
- Excelente resistencia eléctrica.

Para el caso de las bombas de adsorción, la prueba se hizo aislada del sistema.

Se acopló un termopar a una de las bombas, previamente horneadas. Se sumergió en un baño de nitrógeno líquido (temperatura de 78 K⁽¹⁸⁾) y se registró la presión desde ese momento, obteniendo la Gráfica 1. La presión última que se logró es de 2.2×10^{-9} Torr en 50 minutos de operación. Este período incluye siete minutos de enfriamiento de las bombas en los que no se registra un cambio de

presión en la cámara (Intervalo E en la Gráfica 1).

Como segunda prueba, se conectaron las dos bombas y se realizó el proceso de evacuación en serie. Gráfica 2. Primero se bombea con una de las bombas de adsorción (B₁) todo el circuito, incluyendo a la otra bomba, al llegar a una presión de 2.7×10^{-2} Torr se inicia el bombeo con la segunda bomba y se concluye la evacuación con ambas (B₂). Después de 70 minutos se obtuvo una presión de 2.2×10^{-3} Torr (al igual que en el caso anterior, E es el tiempo transcurrido antes de que se presente un cambio en la presión).

Como tercera prueba, se realizó el bombeo secuencial. Gráfica 3 (proceso 1), con la siguiente variante: se inicia la operación de la segunda bomba, en el momento que se tiene una presión en la cámara de $P_1 = 8 \times 10^{-2}$ Torr, como resultado se logró una presión última de 1.5×10^{-3} Torr en 60 minutos.

Concluida las fases anteriores y con el sistema completamente integrado, se hicieron pruebas de todo el conjunto:

En primer lugar se obtuvo el proceso de evacuación de bajo vacío que se incluye en la Gráfica 3 (proceso 2) para esta prueba, se pone en operación la bomba (B₁), hasta obtener una presión de $P_2 = 4 \times 10^{-1}$ Torr, se activa la segunda bomba y con ambas (B₂) se llega a una presión última de 2×10^{-3} Torr en un tiempo de 60 minutos.

El siguiente paso, después de lograr la presión de bajo vacío Gráfica 4 (B₁, B₂), fue realizar el proceso de encendido de la bomba iónica (B₃), donde, en los primeros intentos la bomba desgasificó, aumentando la presión en el sistema, por lo tanto, se apagaba y se esperaba a que se recuperara el vacío. Este proceso se hizo a intervalos de 3 a 4 minutos durante 30 minutos (Intervalo T₁, T₂ en la Gráfica 4 (1)). En este intervalo, se cuidó no exceder una corriente de 300 mA en la alimentación de la bomba con el propósito de no sobrecargarla. En cuanto la bomba fue eficiente, se aislaron las bombas de adsorción, y se continuó el proceso de bombeo con la bomba iónica (B₃). En el periodo inicial, el bombeo es rápido, lo que da como resultado, una disminución en la corriente y un aumento del voltaje aplicado.

Al llegar a una presión de 2×10^{-5} Torr, la bomba libera gases

atrapados, aumentando la presión hasta 5.8×10^{-4} Torr, donde nuevamente comienza a descender hasta una presión de 5.6×10^{-7} Torr, donde la evacuación es muy lenta; después de un total de 7 horas se logró una presión última del sistema de 4.5×10^{-7} Torr (Gráfica 4-1).

El proceso anterior, se realizó iniciando el proceso de bombeo con el sistema abierto y expuesto al medio ambiente. En la Gráfica 4-2, se muestra los resultados del proceso en el que, el sistema se a hornearo al vacío y no hay exposición al medio ambiente. Como se observa, en este caso la evacuación se realizó en un tiempo menor y el pico de liberación de gases no aparece.

De los resultados anteriores, se tiene que el sistema trabaja en el intervalo de alto vacío y que la variante es el tiempo que se invierte en evacuación y que depende del procedimiento y las condiciones iniciales del sistema al inicio del proceso de evacuación.

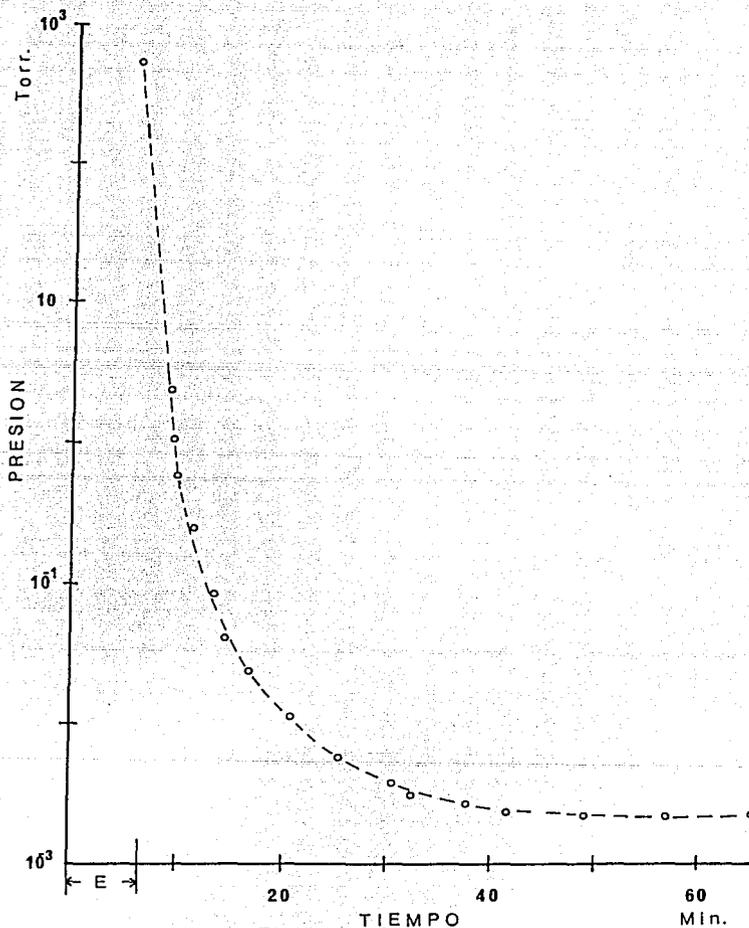
Por consiguiente después de las pruebas realizadas, un procedimiento recomendable para optimizar el funcionamiento del sistema de alto vacío es el siguiente:

Evitar que el sistema esté abierto un tiempo prolongado, con objeto de reducir el vapor de agua en la superficie.

Para realizar el proceso de evacuación de manera más eficiente, se sugiere que antes de abrir la válvula de la bomba de adsorción 1, se enfría hasta obtener el equilibrio térmico con el nitrógeno líquido. Una vez que se abre la válvula, se debe mantener el nivel de LN en la bomba hasta obtener una presión aproximada de 1×10^{-1} Torr, se activa la bomba de adsorción 2 y se aísla la bomba 1.

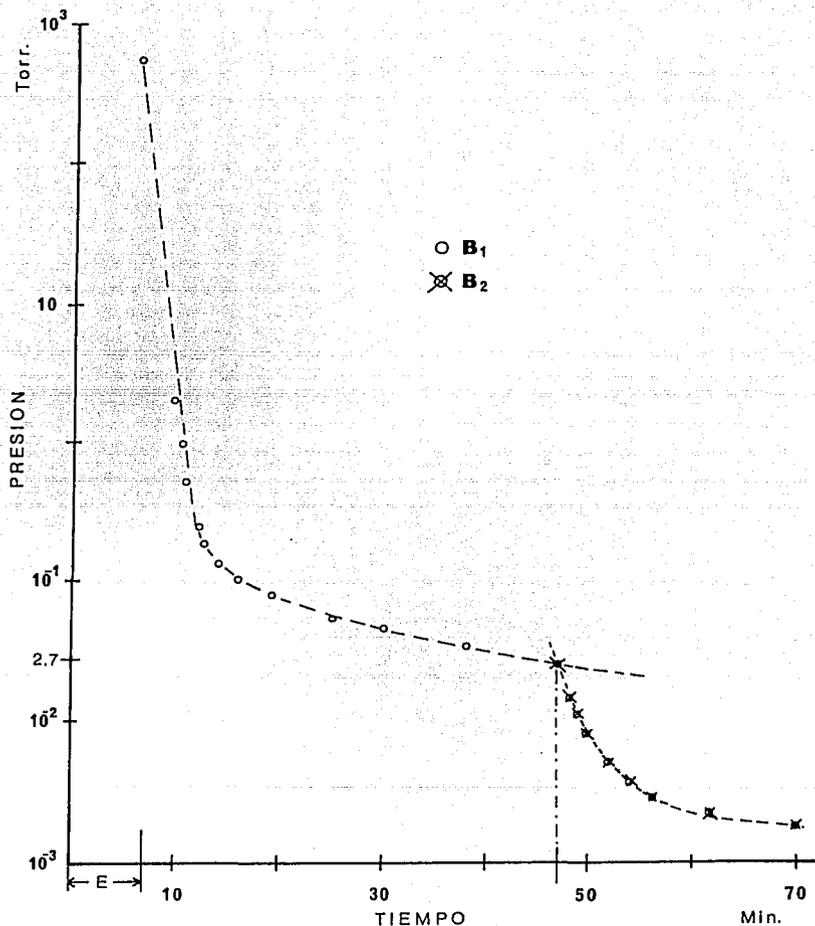
En el momento que se logre una presión de 10^{-8} Torr, se inicia el encendido de la bomba iónica y se cuida no sobrecargarla (con un potencial de +600 volts y no excedido 300 mA), en caso de desgasificación se recomienda apagarla y esperar a que se restablezcan las condiciones de presión para encenderla nuevamente, este proceso se realiza hasta que la bomba iónica sea eficiente, posteriormente se aísla la bomba de adsorción 2 y se aumenta el voltaje conforme mejore el vacío, hasta tener un voltaje de ali-

mentación de +6700 volts y una corriente de 5 mA.



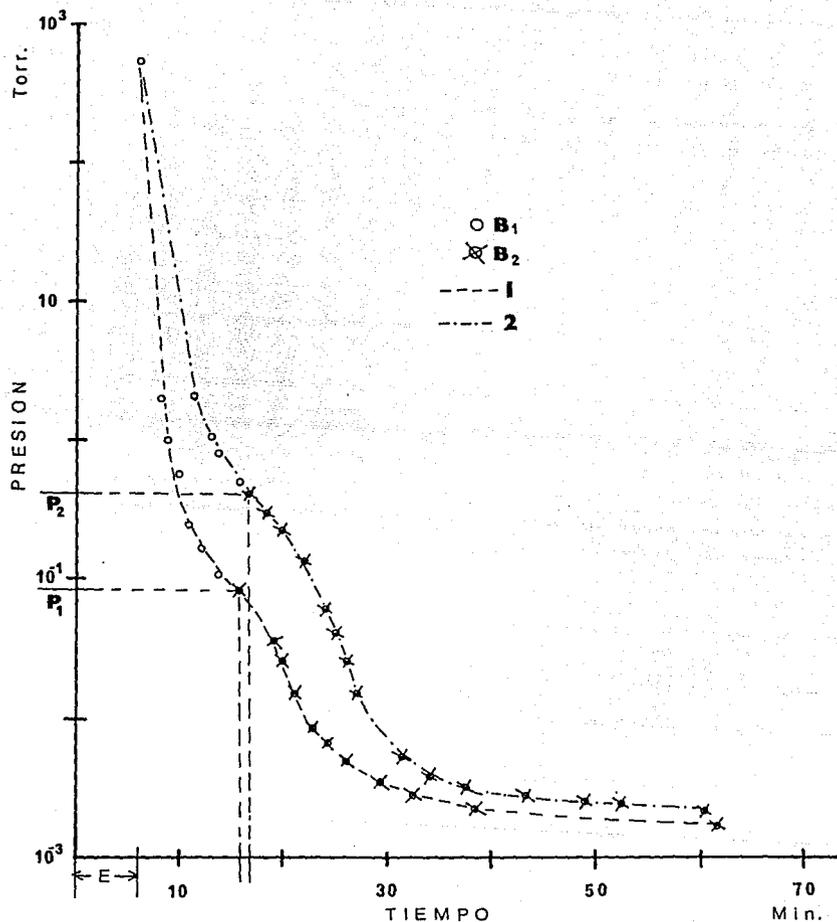
Grafica 1.

Proceso de evacuación de una bomba de adsorción sin carga. La presión última es 2.2×10^{-9} Torr. (E) tiempo en el no hay cambio en la presión.



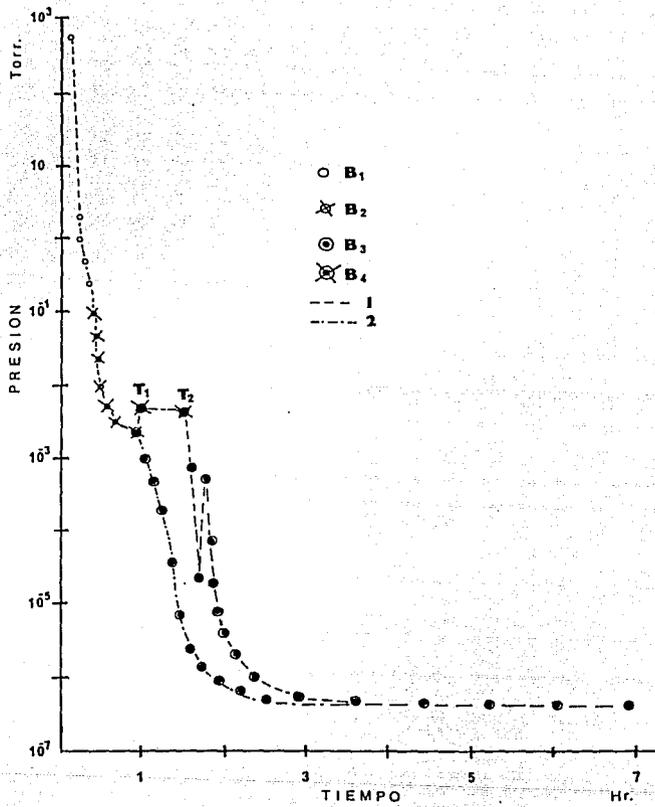
Gráfica 2.

Proceso de evacuación secuencial de las dos bombas de adsorción. La primera parte del proceso (B1) se realiza con una bomba y a la presión de 2.7×10^{-2} Torr entra en operación la segunda bomba y con ambas bombas (B2) se concluye el proceso, logrando una presión de 1.5×10^{-3} Torr.



Gráfica 3.

Proceso de evacuación secuencial de dos bombas de adsorción. (1) sin carga y (2) con carga. B₁ esta parte del proceso se realiza con una bomba y B₂ con las dos bombas. P₁ y P₂ son las presiones a las que se principia la operación de la segunda bomba. Las presiones que se logran son 1.5×10^{-3} Torr para el proceso sin carga y 2×10^{-3} Torr para el proceso con carga.



Gráfica 4.

Proceso de evacuación del sistema de alto vacío. (1) primera prueba de evacuación, (2) segunda prueba de evacuación. B₁ etapa realizada con una bomba de adsorción, B₂ etapa realizada con dos bombas de adsorción, B₃ etapa realizada con la bomba iónica y B₄ etapa en la que interviene las tres bombas. La presión última lograda es de 4.5×10^{-7} Torr.

V. CONCLUSIONES.

Al trabajar en sistemas de vacío, el usuario desarrolla un conjunto de técnicas y establece los procedimientos específicos que lo garantizan una operación eficiente y segura de su equipo, así como de su persona. Estas técnicas incluyen la limpieza, el mantenimiento, los procedimientos de encendido y apagado de cada elemento del sistema, hasta el análisis de los procesos que se desarrollan dentro del sistema.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar y optimizar un sistema de alto vacío que se construyó en el Instituto de Física de la UNAM. Para tal efecto fue necesario contar con el conocimiento de las técnicas del vacío, la configuración de las diferentes opciones de sistemas de alto y bajo vacío para ubicar dentro de ellos el sistema construido. También fue necesario conocer el principio de operación de cada uno de ellos, con sus ventajas y desventajas.

Partiendo de estas bases se realizó la caracterización del sistema con base en la evaluación del diseño, los materiales y la construcción del equipo. Como primer resultado de la evaluación se concluyó que el diseño, la construcción y los materiales son los adecuados para obtener y mantener presiones de trabajo en el intervalo de alto vacío (10^{-4} a 10^{-6} Torr).

Las pruebas de las bombas, por separado y acopladas al sistema, permitieron hacer una serie de ajustes en el proceso de bombeo con objeto de establecer un procedimiento que permita optimizar la operación del sistema. Con esto se logra obtener una presión última de 4.5×10^{-7} Torr, en un tiempo relativamente corto si se toma en cuenta, como se muestra en el capítulo 3, lo estrecho de las líneas de evacuación.

El procedimiento específico que se determinó para el sistema es el siguiente:

Con la cámara de vacío a presión atmosférica, se inicia el proceso de evacuación con la primera bomba de adsorción; cuando la

presión disminuye hasta 4.5×10^{-1} Torr en la cámara, se inicia el bombeo con una segunda bomba de adsorción, la presión última con las dos bombas en operación simultánea es de aproximadamente 2×10^{-3} Torr. Con esta presión en la cámara se enciende la fuente de la bomba iónica, y se alimenta con un potencial de +600 volts, cuidando no exceder una corriente de 300 mA. El voltaje mínimo para que la bomba comience a ser eficiente es de +800 volts, por lo que durante el período inicial, la bomba sufre un calentamiento debido al plasma que se produce por la alta presión; cuando la bomba comienza a ser eficiente, se aíslan las bombas de adsorción y se mantiene en operación la bomba iónica. En estas condiciones, el potencial aplicado aumenta hasta +6700 volts y la corriente disminuye hasta un promedio de 5 mA.

A partir del procedimiento anterior se pueden realizar algunas modificaciones para mejorar el tiempo de evacuación asegurando un proceso óptimo.

El procedimiento que se recomienda es el siguiente:

Con el sistema a presión atmosférica y las bombas de adsorción previamente horneadas, se aísla la bomba de adsorción 1 y se enfría hasta la temperatura del nitrógeno líquido, en ese momento se abre la válvula y se mantiene el nivel de nitrógeno en la bomba. Al llegar a una presión aproximada de 1×10^{-1} se inicia la evacuación con la bomba de adsorción 2 y se aísla la bomba 1; en cuanto se tiene una presión de 10^{-2} se enciende la bomba iónica con un voltaje de alrededor de +600 volts cuidando no exceder 300 mA. Al comenzar a ser eficiente la bomba (al alcanzar los +800 volts) se aísla la bomba de adsorción 2 y se continúa con la bomba iónica. Así continúa el proceso hasta que el potencial aumenta hasta +6700 volts y la corriente disminuye hasta aproximadamente 5 mA.

Se recomienda cambiar la línea de evacuación que va de las bombas de adsorción a la cámara por otra de mayor conductancia, de igual forma, se sugiere modificar el tipo de unión del termopar con el sistema.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Por lo expuesto anteriormente, se puede concluir que es posible construir sistemas de alto vacío en nuestro país y con tecnología propia que son comparables con equipos comerciales de procedencia extranjera cuyo costo es mayor.

APENDICE A.

Unidades de presión y equivalencias.⁽²⁰⁾

Presión	Atmósfera	Bar	Torr	Pascal
Atmósfera	1	1.013	760	1.013×10^5
Bar	9.869×10^{-1}	1	7.501×10^2	10^5
Torr	1.316×10^{-3}	1.333×10^{-3}	1	1.333×10^2
Pascal	9.869×10^{-6}	10^{-5}	7.501×10^{-3}	1

1 Bar = 10^6 dinas/cm²; 1 Torr = 1 mm Hg; 1 Pascal = 1 N/m².

Unidades de volumen y equivalencias.⁽²⁰⁾

1 litro = 10^3 cm³; 1 m³ = 10^3 litros.

APENDICE B.

Cálculo de conductancias.¹³¹

Estado viscoso.

Conductancia de un tubo largo.

$$C_{\text{aire}} = 180 \left(\frac{D}{L} \right)^4 \bar{P} \text{ l/s.}$$

donde D es el diámetro interno, L la longitud del tubo en cm y \bar{P} el gradiente de presión en los extremos.

De la Figura 21 (capítulo 3):

D = 2.1 cm y L = 25.5 cm, por lo tanto:

$$C = 1.38 \bar{P} \text{ l/s.}$$

Y de la Figura 22:

D₁ = D₂ = 0.5 cm, L₁ = 9.3 cm y L₂ = 18.4 cm. De donde:

$$C_1 = 1.22 \bar{P} \text{ l/s y } C_2 = 0.61 \bar{P} \text{ l/s.}$$

Así que la conductancia total (ecuación 13) es:

$C_T = 0.405 \bar{P} \text{ l/s}$, donde \bar{P} = la presión cámara - presión bomba.

Estado molecular.

Conductancia de un codo de 90°

$$C_{\text{aire}} = 12.1 \left(\frac{D}{L_e} \right)^4 \text{ l/s.}$$

donde $L_e = (L_1 + L_2) + 1.33 \left(\frac{\theta}{180} \right) D$ cm.

De la Figura 23:

L₁ = (20.5 - 5.7/2) cm, L₂ = (11.5 - 5.7/2) cm. Por lo tanto:

$$C = 77.45 \text{ l/s.}$$

Conductancia de un agujero de sección circular.

$$C_{\text{circ}} = 9.16 D^2 \text{ l/s.}$$

donde D es el diámetro de la sección en cm.

De la Figura 23:

$$D = 5.7 \text{ cm, así que } C = 297 \text{ l/s.}$$

Por lo tanto de la ecuación 13, la conductancia total de agujero de sección circular y el codo es:

$$C = 60 \text{ l/s.}$$

REFERENCIAS.

- 1.- Zemansky, M. W., "Calor y Termodinámica", Colección Ciencia y Tecnología, Cuarta Edición, Aguilar, Madrid, 1977.
- 2.- Barrington, A. E., "High Vacuum Engineering", Primera Edición, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1963.
- 3.- Roth, A., "Vacuum Technology", North-Holland Publishing Company, Nueva York, 1976.
- 4.- Roy-Pochon, C., Berthaud, M., Champeix, R., Degras, D., Jean, R. y Radult, G., "Tratado Practico de la Técnica del Vacío", Ediciones Urmo, Bilbao, 1963.
- 5.- Dushman, S., "Scientific Foundations of Vacuum Technique", Segunda Edición, John Wiley & Sons, Nueva York, 1962.
- 6.- Kaminski, Manfred S., Lafferty James M. "Dictionary of Terms for Vacuum Science and Technology Surface Science", American Vacuum Society, American Institute of Physics, Nueva York, 1980.
- 7.- Lewin, G., "Fundamentos de la Ciencia y Técnica del Vacío", Colección Ciencia y Técnica, Primera Edición, Aguilar, Madrid, 1972.
- 8.- Beavis L. C. "Real Leaks and Real Leak Detection". Vacuum 20 (1970) pag. 233.
- 9.- O'Hanlon, J. F., "A User's Guide to Vacuum Technology", John Wiley & Sons, Nueva York, 1980.
- 10.- Turner, F., "Cryosorption Pumping", Reprinted from Varian Vacuum Division 11th Annual Vacuum Technology Seminar, 1973. Reporte interno VR-73.

- 11.- Jepsen, R. L., "On the Physics of Sputter-Ion Pumps", Material from the 4th International Vacuum Congress, Manchester, abril 17-20, 1968. Reporte interno Varian VR-53.
- 12.- Patton, Howard G., "Sistem Design Concepts", American Vacuum Society, Nueva York, 1981.
- 13.- Weston, G. F., "Materials for Ultrahigh Vacuum", Vacuum 25 (1975) pag. 469.
- 14.- Peacock, R. N., "Técnicas de Unión para Vacío"; Edición en español a cargo de E.P. Zironi, Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío A. C. y American Vacuum Society, México D.F., 1983.
- 15.- Muñoz Ledo, J. M., Alba A. F., "Bomba Iónica de 80 Litros/Segundo", Instrumentación y Desarrollo 2 (1986) pag.24.
- 16.- González, P. S., Tesis Profesional, "Medidores de Vacío en el Intervalo de 1 ATM, a 10^{-9} mm de Hg", Facultad de Ciencias, UNAM, 1983.
- 17.- Kurt J Lesker Co., Catalogo "Vacuum Products '89". U.S.A., 1989.
- 18.- Varian Co., "Varian Vacuum Catalog", USA, 1989-1990.
- 19.- Varian Co., Manual de Operación "Varian 936-40 Leak Detector", Varian I.E.G. Vacuum Division, U.S.A., 1987.
- 20.- García, R., "Sistema Internacional de Unidades", Primera Edición, México D.F., 1984.