

zej
39



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

**DESARROLLO DE UNA BOMBA
MOLECULAR DE TORNILLO.**

T E S I S

Que para obtener el título de:

F I S I C O

P r e s e n t a :

José Luis Ortega Rangel



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

	PAGINA
INTRODUCCION	1
I ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL VACIO	
I.1 ASPECTOS HISTÓRICOS	3
I.2 DEFINICIÓN DE VACÍO	5
I.3 RELACIÓN VACÍO-PRESIÓN	6
I.4 LEYES DE LOS GASES	9
I.5 CAMINO LIBRE MEDIO	10
I.6 FLUJO DE GASES	15
I.7 TEORÍA CINÉTICA DE LOS GASES	18
II BOMBAS DE VACIO	
II.1 EVACUACIÓN DE UNA CÁMARA	23
II.2 VELOCIDAD DE BOMBEO Y GASTO	26
II.3 CONDUCTANCIA EN UN SISTEMA DE VACÍO	29
II.4 TIPOS DE BOMBAS	35
II.5 BOMBAS IMPORTANTES EN EL DESARROLLO - DEL MODELO	38
II.5.1 MECÁNICA	38
II.5.2 TURBOMOLECULAR	41
II.5.3 MOLECULAR	47

III	ANTECEDENTES DE CONSTRUCCION	
	III.1 PRESIÓN DE VAPOR DE MATERIALES	54
	III.2 SELLOS PERMANENTES Y DESMONTABLES	56
	III.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	63
	III.4 MATERIALES UTILES EN EL MODELO	67
IV	DESARROLLO DE LA BOMBA MOLECULAR DE TORNILLO	
	IV.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	69
	IV.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN	75
V	CONCLUSIONES	79
	APÉNDICE A	
	APÉNDICE B	
	APÉNDICE C	

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

A través del tiempo, las bombas e instrumentos utilizados en la producción y medición de vacfo, se han perfeccionado cada vez -- más, y al mismo tiempo su complejidad ha ido en aumento. En el área industrial como en la investigación se requieren sistemas - de vacfo más sofisticados.

En la primera, el uso más frecuente está vinculado con el envasa do de alimentos, procesos metalúrgicos, fabricación de componen tes electrónicos, construcción de bombillas eléctricas, tubos de rayos catódicos, etc.

En la investigación, es ampliamente usada en experimentos rela-- cionados con Espectrometría, Microscopía Electrónica, Acelerado res de Partículas, Implantación de Iones, Semiconductores, etc.

Estos vacfos se producen generalmente con el uso de condensado-- res de superficies, bombas de Difusión, Mecánicas, Criogénicas, Turbomoléculares, Moleculares, etc.

Este trabajo se ocupa del desarrollo de una bomba molecular basa da en la de Holweck, construida en 1923, que dió buenos resulta dos de acuerdo a las limitaciones que se tenían para entonces.

En base al modelo original se le han incorporado adelantos técnicos y modificaciones en algunas partes como son: los baleros -- magnéticos y piezas de apoyo en el sistema de sustentación del - rotor, espirales de mayor profundidad en todo el cuerpo del esta tor, un motor de inducción cuya frecuencia de alimentación es variable, lo que permitirá aumentar la velocidad del rotor con lo cual se espera una mayor eficiencia durante su tiempo de opera-- ción y una mejoría en la última presión.

Se pretende que con el apoyo de una bomba mecánica, este disposi tivo trabaje entre los intervalos de Bajo y Vacío Medio - - - - ($\approx 10^{-4}$ Torr).

Lo relevante de esta bomba, es considerar que tanto el diseño, - como los elementos que la conforman han sido elaborados totalmen te por el grupo de Centrífugas del Instituto de Física de la --- U.N.A.M.

I. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL VACIO

En este capítulo se presenta una breve reseña desde los tiempos en que inquietó a los estudiosos, el ver si existía realmente el "Vacío", definirlo y así poder cuantificarlo.

Se mencionan además las leyes y principios en los cuales se ha estado apoyando hasta la actualidad, toda una técnica referente a él.

I.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

Desde la época de Aristóteles y Platón se hablaba del peso del aire, Aristóteles mencionó que no existía el vacío; Descartes a través de sus escritos apoyó esta misma idea y así por dos mil años, los filósofos hablaron del horror que la naturaleza sentía por el espacio vacío y lo llamaron "Horror Vacui".

No fue sino hasta el siglo XVII cuando Galileo considera el vacío, recalcando que el "Horror Vacui" es una fuerza, la cual tiene sus limitaciones y además puede ser medida. El consideró el peso del aire utilizando un globo de vidrio y observando la diferencia de pesos que existía al

llenarlo con aire a presión normal y después con aire a una presión mayor; concluyendo entonces que la densidad del aire es 400 veces menor en comparación con la densidad del agua. (1)

Posteriormente Torricelli diseñó el esquema para demostrar la existencia de un vacío, al colocar un tubo con uno de sus extremos cerrado y lleno de mercurio, que al invertirlo en una cubeta con el mismo líquido dejaba un espacio vacío, en el extremo superior de la columna.

La diferencia de presión entre el vacío y la presión atmosférica fue comprobada por Guericke en 1654, realizando un experimento en donde dos hemisferios "evacuados" no pudieron ser separados cuando fueron jalados por ocho caballos, demostrando así las fuerzas atmosféricas. Ese año, él mismo construyó la primera bomba de vacío de pistón.

La primera posibilidad de medir bajas presiones fue hasta 1874 con el medidor de McLeod (medidor directo) continuando con el de Pirani (conductividad térmica) en 1906, cubriéndose el intervalo de presión atmosférica hasta alto vacío.

(1) Historia de la Física R. Cajori.

Por otro lado, las bombas de difusión de Gaede en 1915 y la de condensación por Langmuir en 1916 abren las posibilidades a la tecnología del alto vacío; las bombas iónicas producidas después de 1953 permitieron obtener presiones muy bajas y el llamado "Vacío Limpio".

En las últimas décadas, la tecnología del vacío ha dado un gran paso para la solución de problemas en las misiones espaciales, la industria y la investigación.

I.2 DEFINICIÓN DE VACÍO

Idealmente el vacío es un espacio desprovisto de materia, esta definición clásica no es consistente con la naturaleza y por lo tanto no puede existir. Una definición más cercana a la realidad es la que considera al vacío como una presión menor que la presión atmosférica.

La tabla I.1 muestra las comparaciones de algunas presiones, con las cuales se trabaja en la Tecnología de Vacío, con su densidad de moléculas, a temperatura constante de 293 °K.

P (Torr)	n (moléculas / m ³)
760	2.49 x 10 ²⁵
10 ⁰	3.28 x 10 ²²
10 ⁻³	3.28 x 10 ¹⁹
10 ⁻⁶	3.28 x 10 ¹⁶
10 ⁻¹²	3.28 x 10 ¹⁰

Tabla I.1

Presión Contra Densidad de Moléculas

I.3 RELACIÓN VACÍO-PRESIÓN

Si consideramos un recipiente conteniendo un gas a Presión Atmosférica, el número de moléculas será de aproximadamente 2.49×10^{25} moléculas / m³, analizando cada una de ellas encontramos que:

El momento de una partícula de masa (m) moviéndose con una velocidad media (\bar{v}) es ($m\bar{v}$), esta partícula al chocar elásticamente con una pared, regresará con la misma velocidad y en dirección opuesta, teniendo un cambio de momento de:

$$(m\bar{v}) - (-m\bar{v}) = 2m\bar{v} \quad \dots(1)$$

Por definición $n = \frac{N}{V}$ con (N) el número de moléculas y (V)

el volumen en donde están contenidas (Tabla I.1). Si se considera un cubo de volumen unitario (esto es $V = 1$) entonces $n = N$. En cualquier instante de tiempo las moléculas se moverán en seis direcciones que corresponderán a las seis caras del cubo. El número de moléculas que cruzarán el área unitaria por unidad de tiempo es:

$$N_0 = \frac{N\bar{v}}{6} \quad \dots (2)$$

Por lo tanto, el número de partículas (N_0) chocando en una superficie de área unitaria, por el cambio de momento, es igual a la presión (P).

$$(N_0) (2m\bar{v}) = \frac{1}{3} mN\bar{v}^2 = P \quad \dots (3)$$

De la cual puede deducirse que, una disminución en el número de partículas produce una reducción en la presión. Así, la cuantificación del vacío puede expresarse en términos de unidades de presión.

Estas unidades han sido derivadas de una unidad básica, -- que depende de las características del medio que nos rodea; la Atmósfera, la cual ejerce una presión sobre cual-

quier objeto que esté inmerso en ella.

La unidad de Presión Atmosférica es llamada *Atmósfera*, y corresponde a la longitud de una columna de mercurio de 760 mm, cuando la densidad de este es de 13.595 gramos/cm³.

Otras unidades, han sido introducidas y sus equivalencias se presentan en la tabla I.2.

Unidades	una Atm	un mm Hg (Torr)	un Nt/m ² (Pascal)	un Bar	un micron
una Atm	1	760	1.01×10^5	760	760×10^3
un mm de Hg (Torr)	1.3×10^{-3}	1	133	1.3×10^{-3}	1×10^3
un Nt/m ² (Pascal)	9.9×10^{-6}	7.5×10^{-3}	1	1×10^{-5}	7.50
un Bar	0.98	752	1×10^5	1	750×10^3
un micron	131×10^{-6}	1×10^{-3}	133.3×10^{-3}	1.33×10^{-6}	1

Tabla I.2

Unidades y Equivalencias

I.4 LEYES DE LOS GASES

En 1660 Boyle estudió la comprensibilidad de los gases y encontró que la relación entre la presión que ejerce una masa gaseosa es inversamente proporcional a su volumen, - si la temperatura se mantiene constante. La expresión ma temática de esta ley es:

$$PV = \text{Constante} \quad \dots (5)$$

para una temperatura y masa constante.

Poteriormente (1802) Charles y Gay Lussac desarrollaron - un estudio cuantitativo sobre la expansión de los gases - por calentamiento, al establecer que la presión es propor cional a la temperatura para una cantidad de gas a volu-- men constante, obteniendo las siguientes relaciones:

$$\frac{P}{V} = \text{Constante} \quad \dots (6)$$

a temperatura y masa constante y:

$$\frac{V}{T} = \text{Constante} \quad \dots (7)$$

a presión y masa constante.

Con la combinación adecuada de estas leyes se obtiene la ecuación de estado de un gas ideal:

$$PV = NkT \quad \dots(8)$$

Con (N) el número de moléculas que ocupa un volumen (V) - en m^3 a una presión (P) en Newton/m^2 a temperatura (T) en grados Kelvin y con (k) la constante de Boltzman igual a 1.38×10^{-23} Joule/ $^{\circ}K$.

Reconociendo que un gas ideal es aquel en que las moléculas son independientes unas de otras, es decir, que la interacción entre ellas es nula. Bajo ciertas condiciones de presión, todos los gases se comportan como ideales, -- hasta que son llevados a temperaturas cercanas a la de su licuefacción, punto en el cual pierden esta condición.

I.5 CAMINO LIBRE MEDIO

Las moléculas de un gas contenido en un recipiente en -- condiciones normales, se mueven en todas direcciones con velocidades que en promedio son iguales, donde sus tra-- vectorias son en línea recta y con una alta probabilidad

de chocar entre sí o con las paredes del recipiente que las contiene. Sin embargo para las presiones que se manejan en los sistemas de vacío, las moléculas del gas se consideran libres, dando como resultado que la distancia que recorren antes de interactuar se incrementa.

A esta distancia entre colisiones sucesivas se le conoce como "Camino Libre", el cual es imposible de medir individualmente por lo que es necesario tomar el valor promedio. Así para un gran número de moléculas se promedian estos caminos estadísticamente y se define un concepto llamado "Camino Libre Medio" que difiere de un gas a otro por las dimensiones de las moléculas aún cuando se encuentren bajo las mismas condiciones de presión y temperatura.

Una interacción se lleva a cabo cuando dos moléculas se aproximan a una distancia (d) entre sus centros, figura I.1, presentando cada una un área:

$$A = \pi d^2 \quad \dots\dots(9)$$

con (d) su diámetro molecular. Para (N) moléculas -
el área total efectiva es:

$$A_{te} = N \pi d^2 \quad \dots\dots(10)$$

Considerando un volumen de dimensiones $V = (A_{te}) (L)$
con (L) su longitud, se obtiene:

$$V = LN \pi d^2 \quad \dots\dots(11)$$

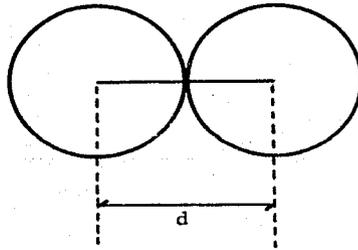


Figura I.1

Distancia entre sus Centros de Dos Moléculas

Por lo tanto, para una molécula que incide en este volumen, su camino libre es:

$$L = \frac{V}{N \pi d^2} \quad \dots\dots(12)$$

Una mejor consideración de esta ecuación lo representa - el valor estadístico de todos los caminos libres de las moléculas. Obteniéndose un valor promedio por medio de la relación:

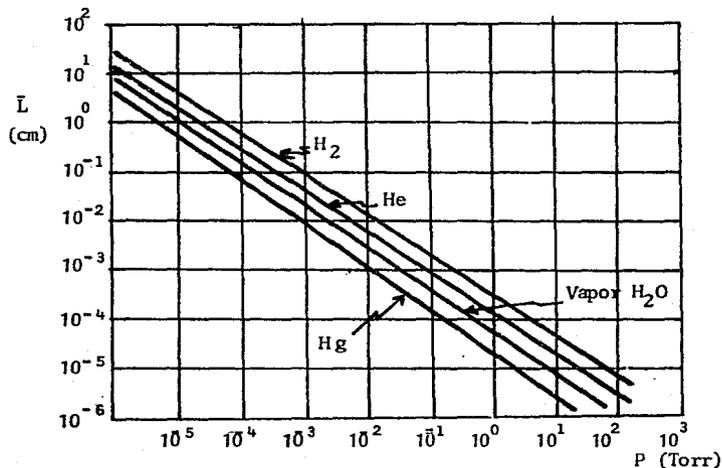
$$\bar{L} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 N} \quad \dots\dots(13)$$

La ecuación (13) considera al volumen unitario. En términos de las variables termodinámicas se tiene el camino libre medio:

$$\bar{L} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P} \quad \dots\dots(14)$$

sus unidades son: T en °K, d en metros, P en Newton/m², y k constante de Boltzman.

En la gráfica I.1 se muestran valores del camino libre medio de algunos gases en función de la presión a una temperatura constante de 293 °K.



Gráfica I.1
Camino Libre Medio contra Presión

La gráfica muestra que existen diferentes curvas para cada elemento debido al factor F dado como:

$$F = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2} \dots\dots(15)$$

Este factor constante para cada elemento⁽¹⁾, es multiplicado para diferentes presiones de acuerdo a la relación:

$$L = F \frac{1}{P} \quad \dots\dots(16)$$

Obteniéndose por lo tanto las rectas mostradas en la gráfica I.1.

I.6 FLUJO DE GASES

Quando un sistema de vacío es llevado de una presión atmosférica a una situación de baja presión, el gas ahí -- contenido pasa por tres estados, reconocidos como Viscoso, Intermedio o de Transición y el Molecular, determinándose por medio de las colisiones intermoleculares dentro del recipiente.

Si el camino libre medio de las moléculas a presión atmosférica es pequeño (del orden de 10^{-6}), el flujo de gas es limitado por su viscosidad y se le considera como un medio continuo y uniforme, esto es, un "Estado Viscoso".

(1) Ver Apéndice A de Diámetros Moleculares.

Dentro de este estado, se hace referencia a un flujo de tipo turbulento y otro de tipo laminar; el flujo turbulento se tiene cuando la velocidad del gas sobrepasa --- ciertos valores, las capas de gas que fluyen no son paralelas y la dirección se ve afectada por cualquier obstáculo en su camino, por el contrario el flujo laminar se obtiene para velocidades menores, en esta situación las capas son paralelas y su velocidad se va incrementando - de las paredes hacia el centro del conducto.

El límite entre el flujo laminar y turbulento se define por el número de Reynolds (R_e), el cual es sin unidades y puede ser utilizado para caracterizar la naturaleza del flujo de gas, la ecuación asociada al número de Reynolds es:

$$R_e = \frac{\rho \bar{v} D}{\eta} \dots\dots(17)$$

En donde (ρ) es la densidad de masa en Kg/m^3 , (\bar{v}) su velocidad en m/seg, (η) la viscosidad del gas en $\text{Pas}\cdot\text{seg}$ y (D) el diámetro del conducto en metros.

Reynolds encontró dos situaciones de flujo a partir de - su número deduciendo que si $R_e > 2100$ el flujo es comple-

tamente turbulento, y si $R_e < 1100$ el flujo es completamente laminar. Para valores de $1100 < R_e < 2100$ el flujo puede ser laminar o turbulento, dependiendo de las condiciones a la entrada y salida de los conductos.

Una observación experimental en el estado viscoso, reconoce que el flujo de gas es determinado exclusivamente por colisiones entre las moléculas.

Cuando el camino libre medio es comparable con las dimensiones del recipiente en que están contenidas el estado es de "Transición o Intermedio". El flujo aquí no es viscoso y tampoco molecular. La presión en la que ocurre este estado, es difícil de precisar y su duración es muy corta dentro de los sistemas de vacío.

Para la situación en que, el camino libre medio a bajas presiones (del orden de 10^{-5} Torr \bar{s}), es mucho mayor que las dimensiones del recipiente, se le determina como un estado "Molecular", en donde las moléculas se encontrarán alejadas unas de otras y moviéndose en direcciones aleatorias dependiendo de las colisiones que efec---

túen. Existiendo mayor probabilidad de choque con las - paredes del recipiente, y el flujo neto será hacia las - regiones de menor densidad molecular.

El flujo del gas se describe por el número de Knudsen, - este factor adimensional definido como el cociente del - camino libre medio entre el diámetro del conducto, resulta:

$$K_n = \frac{\bar{L}}{D} \quad \dots (19)$$

En base a esta relación los flujos del gas se clasifican de la siguiente manera:

$K_n < 0.01$ Viscoso

$0.01 < K_n < 1.0$ Intermedio o de Transición

$K_n > 1.0$ Molecular

1.7 TEORÍA CINÉTICA DE LOS GASES

Esta teoría fue propuesta por Bernoulli en el siglo ---- XVIII y desarrollada cien años después por Kronig y Clausius.

Las leyes de los gases describen su conducta, pero no -- prueban profundamente porqué se comportan de esa manera, esto dá origen al desarrollo de la teoría cinética; esta teoría se funda en hipótesis sencillas e intuitivas en lo que respecta al movimiento interno y externo de las moléculas y de sus fuerzas de interacción (choques mutuos o con las paredes del recipiente que las contenga), tomando como base las siguientes suposiciones para un -- gas ideal:

- a) El gas está compuesto de un gran número de partículas extremadamente pequeñas llamadas moléculas.
- b) Las moléculas están en movimiento continuo al azar y se desplazan en línea recta entre los puntos de colisión.
- c) Las moléculas están separadas por distancias que son grandes en comparación con sus dimensiones.
- d) Las moléculas son esferas pequeñas y rígidas que no ejercen fuerzas unas sobre otras, excepto en el momento de una colisión.

e) Las colisiones de las moléculas entre sí o con las paredes del recipiente, son perfectamente elásticas.

Referente a la ecuación 3 del inciso I.3 donde se obtuvo la presión en función de la energía cinética promedio y recordando la ecuación de estado para un gas ideal se establece:

$$\frac{NkT}{V} = \frac{1}{3} Nm\bar{v}^2 \quad \dots\dots(19)$$

Si consideramos nuevamente al volumen como unitario queda establecida la ecuación, en términos de la temperatura para un gas ideal:

$$kT = \frac{1}{3} m\bar{v}^2 \quad \dots\dots(20)$$

Si se multiplica y divide por 2 el término derecho, resulta:

$$kT = \frac{2}{3} \frac{m\bar{v}^2}{2} \quad \dots\dots(21)$$

por lo tanto:

$$\frac{3}{2} kT = \frac{m\bar{v}^2}{2} \quad \dots\dots(22)$$

La relación $\frac{mv^2}{2}$ representa la energía cinética media de traslación por molécula, siendo esta energía la única que puede poseer una molécula esférica y rígida, no influenciada por otras que estén próximas a ella, suposición establecida anteriormente.

Concluyéndose que todas las moléculas a la misma temperatura deberán tener la misma energía cinética promedio, y además moléculas con un peso molecular alto, serán más lentas que para aquellas cuyo peso sea menor.

Al mismo tiempo se puede establecer la velocidad cuadrática media de las moléculas por:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad \dots (23)$$

Este concepto significa que las moléculas que escapan de una superficie caliente, viajarán más rápido que las moléculas que dejan superficies a menor temperatura.

II. BOMBAS DE VACIO

En general todos los sistemas de vacio tienen partes comunes a ellos, sin considerar la forma en que sean evacuados, este conjunto de elementos lo constituyen las cámaras de vacio, las bombas, tubos que conectan al recipiente con la bomba, medidores - de vacio, válvulas, trampas y sellos en general. La figura --- II.1 muestra el arreglo de los diferentes elementos en un sistema completo.

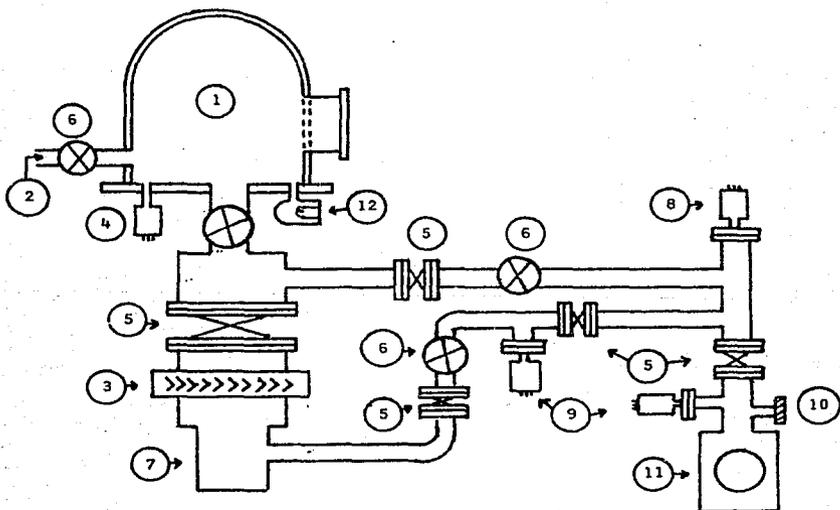


Figura II.1
Diagrama de un Sistema de Vacío

Elementos que conforman al sistema de vacfo de la figura II.1

1. Cámara de Vacío
2. Admisor de Aire
3. Trampa Fría
4. Medidores de Penning
5. Uniones de Conductores
6. Válvulas de Paso
7. Bomba de Difusión, Molecular, etc.
8. Medidor de Pirani
9. Medidor Termopar
10. Válvula de Fuga Calibrada
11. Bomba Mecánica de Apoyo
12. Medidor de Ionización

II.1 EVACUACIÓN DE UNA CÁMARA

El lograr un vacfo, es establecer un espacio en el cual los gases han sido removidos. De los resultados obtenidos en este campo se sabe que no pueden ser complementamente evacuados y que sólo se logra expulsar una parte de ellos.

El aire, uno de los más importantes gases que se encuen-

tran en cualquier sistema de vacío y que debe ser evacuado, consiste de al menos doce elementos. (1) La cantidad de aire dentro de un sistema nos dará una respuesta específica en el uso adecuado de los medidores y de las bombas de vacío.

Teóricamente se considera que la evacuación en un sistema es del cien por ciento cuando no existan fugas, es decir, cuando las superficies del sistema no estén agrietadas y que además sea operado por una bomba que no baje su rendimiento y no reduzca su velocidad.

La evacuación de una cámara se obtiene por medio del siguiente proceso:

Inicialmente el sistema a evacuar de volumen (V) contiene (N) moléculas a una presión inicial (P_i) al tiempo $t=0$, situación que se presenta en la figura II.2.A., al efectuar el encendido de la bomba (B_1), las moléculas de la cámara tendrán un movimiento preferencial hacia el puerto de entrada de (B_1), indicando que la presión en esa región es menor que la del resto de la cámara, $P_1 < P_i$. Ver figura II.2.B

(1) Ver Apéndice B referente a composición del aire.

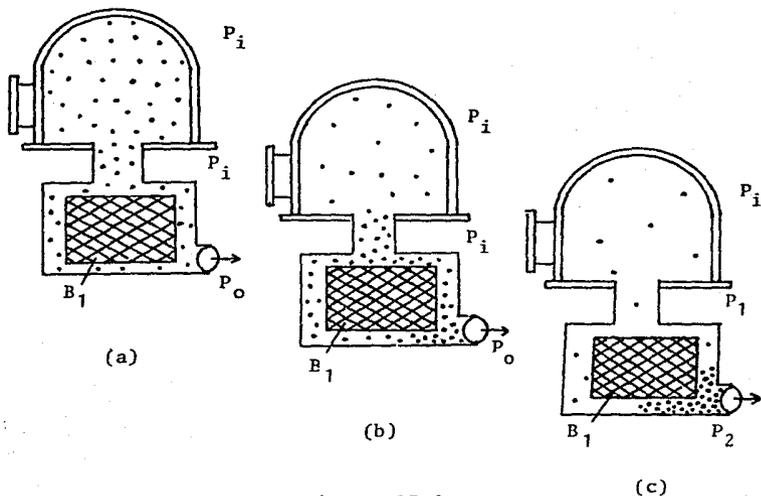


Figura II.2

Proceso de Evacuación

Al continuar el bombeo, se disminuye el número de moléculas en el recipiente, dando como resultado la relación $P_2 > P_1 > P_i$, figura II:2.C., esto indica nuevamente una reducción en la presión, comprimiendo el gas a una situación de mayor presión que la presión atmosférica, permitiendo que el gas sea expulsado al medio ambiente. De acuerdo a estas situaciones, se le puede considerar a una bomba de vacío como un compresor de gas.

Realmente esta evacuación no se logra y por lo tanto se tiene una evacuación que no es total; así, la última presión en un sistema se logrará cuando se establezca un estado de equilibrio con la velocidad del sistema de bombeo, las condiciones de limpieza sean óptimas y las fugas --- sean minimizadas.

II.2 VELOCIDAD DE BOMBEO Y GASTO

En base a la ecuación de estado de un gas ideal, se deduce la ecuación de bombeo para un sistema e involucra los parámetros conocidos como velocidad de bombeo y gasto -- (flujo másico). Con la ecuación $PV = NkT$ puede encontrarse el cambio en la presión para un sistema en proceso de evacuación en función del tiempo, por lo tanto, -- puede obtenerse la derivada:

$$\frac{d}{dt}(PV) = \frac{d}{dt}(NkT) \quad \dots (24)$$

por la propiedad de la derivada de un producto de funciones:

$$P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} = kT \frac{dN}{dt} \quad \dots (25)$$

para el segundo término, la derivada en $\frac{dT}{dt}$ se elimina al considerar la variación de la temperatura con respecto al tiempo constante.

De la ecuación (25) se define el término $\frac{dV}{dt}$ como la velocidad de bombeo (S) en el estado estacionario, --- cuando la presión se mantiene constante ($\frac{dP}{dt} = 0$); en este mismo estado $\frac{dN}{dt}$ es proporcional al gasto (Q) es decir, al flujo de masa.

De acuerdo al inciso anterior, el flujo de gas a través de los conductores de un sistema se originará de una diferencia de presiones entre los extremos de ellos. Esto es, el flujo seguirá una dirección de un región de alta presión hacia una región de menor presión.

Por lo tanto, el uso de una bomba de vacío producirá que el gas viaje por los conductos reduciéndose la presión - en una región cercana a la bomba. Este flujo se verá -- afectado por las dimensiones y forma geométrica de los - conductos y la capacidad del sistema de bombeo que es -- utilizado para producirlo.

En todo sistema de vacío, el grado en que sea expulsado un gas por una bomba, sin considerar el tipo que sea, se expresará en términos de su velocidad de bombeo; siendo posible determinar este grado de flujo en cualquier punto del sistema por la misma, y su valor irá cambiando en todo el sistema de la manera en que cambie la presión.

Esta velocidad se define como el cociente de flujo de masa (Q), dado en unidades de presión por unidad de volumen en la unidad de tiempo, entre la presión (P) en el mismo punto donde la velocidad (S) es medida, partiendo de la relación:

$$PS = kT \frac{dN}{dt} = Q \quad \dots\dots(26)$$

obteniéndose la velocidad:

$$S = \frac{Q}{P} \quad \dots\dots(27)$$

Mostrando entonces que la velocidad estará en función de la presión.

Para las bombas mecánicas de tipo rotatorio, la veloci--

dad (S) se dá en litros por minuto y (Q) en Torr litro por minuto. En el caso de tener presiones por abajo de 10^{-3} Torr, (S) se dá en litros por segundo y (Q) en Torr litro por segundo.

Con respecto a la bomba utilizada, esta removerá gases - de acuerdo a su naturaleza y diseño, considerando que ca da tipo de bomba removerá solamente en un intervalo particular de presión y que no existe una bomba que sea capaz de cubrir todos los intervalos de presión mencionados en el capítulo anterior.

II.3 CONDUCTANCIA EN UN SISTEMA DE VACÍO

Los diferentes componentes en un sistema de vacío, impiden el flujo de gas a través de ellos, es decir, ofrecen una resistencia al flujo; esta resistencia (Z) se define como la diferencia de presiones entre una región y -- otra (P_0 y P_1) por unidad de flujo de masa (Q). La relación de estas cantidades se expresa por la fórmula:

$$Z = \frac{P_0 - P_1}{Q} \quad \dots\dots(30)$$

Dando como resultado unidades de segundos por litro. -- Sin embargo, es posible utilizar en este campo, un concepto llamado Conductancia, elemento útil en la tecnología de vacío que puede ser combinada con la velocidad de una bomba, para obtener una velocidad de bombeo más precisa dentro de la cámara. Esta conductancia (C) se define como el inverso de la resistencia (Z), esto es:

$$C = \frac{1}{Z} = \frac{Q}{P_0 - P_1} \quad \dots\dots(31)$$

resultado con unidades de litros por segundo. De esta fórmula se puede deducir que: para un sistema de vacío se requiere una conductancia alta con el objeto de reducir la resistencia al flujo.

Cuando en un sistema de vacío se conectan varios elementos en línea, se dice que están en serie y su conductancia total será la suma de los inversos de todas ellas; su cálculo es análogo al de un circuito eléctrico en serie, al considerar la suma de los inversos de las conductancias individuales, obteniéndose:

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad \dots\dots(32)$$

1. Cámara de Vacío
2. Elemento de Conexión #1 = C_1
3. Componente del Sistema = C_2
4. Elemento de Conexión #2 = C_3
5. Bomba de Vacío

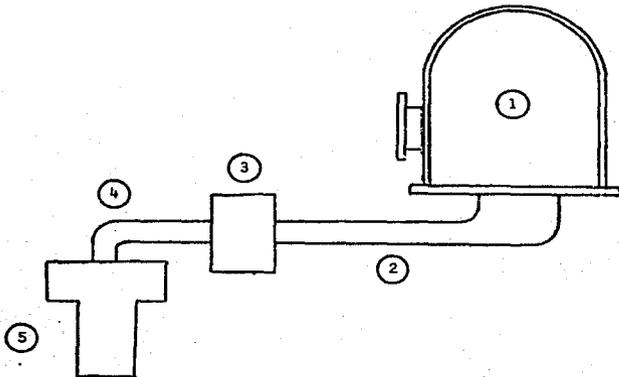


Figura II.3

Elementos de Conductancias en Serie

De la misma manera, cuando el sistema consta de varios - elementos en paralelo, la conductancia total será mayor que cada una de las conductancias individuales, teniendo

entonces la siguiente ecuación:

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad \dots (33)$$

1. Cámara de Vacío
2. Elemento de Conexión # 1 = C_1
3. Elemento de Conexión # 2 = C_2
4. Elemento de Conexión # 3 = C_3
5. Bomba de Vacío

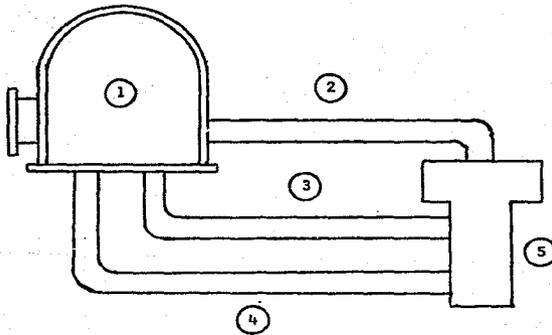


Figura II-4

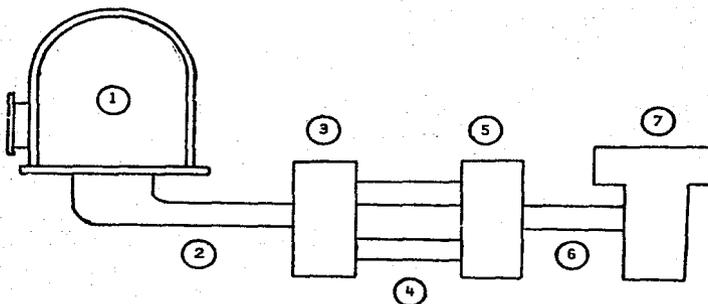
Elementos de Conductancias en Paralelo

En condiciones de flujo molecular, las moléculas de gas golpean las entradas de los conductos y de los elementos asociados, por tal motivo, los puertos tienen también -- una conductancia, que dependerá del área de abertura. -- Por lo tanto, la conductancia a la entrada estará en serie con la conductancia propia del elemento, obteniendo la total con la relación:

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_e} + \frac{1}{C_c} \quad \dots (32)$$

donde C_e representa a la conductancia a la entrada y C_c la conductancia del elemento en cuestión.

Ver figura II.5



1. Cámara de Vacío
2. Elemento de Conexión en Serie
3. Componente del Sistema
4. Elementos de Conexión en Paralelo
5. Componente del Sistema
6. Elemento de Conexión en Serie
7. Bomba de Vacío

Figura II.5
Elementos de Conductancias en Serie-Paralelo

II.4 TIPOS DE BOMBAS

La tecnología del vacío ha sido un amplio campo de investigación desde mucho tiempo atrás, de tal manera, que en el diseño y mejoramiento de las bombas, se ha puesto un especial interés para lograr que realicen reducciones en la presión del sistema, cada vez más efectivas.

La función principal de la bomba, es la de reducir el número de moléculas presentes en la fase gaseosa dentro de un sistema, el llegar a tal condición dependerá del tipo de bomba seleccionada; esto implica que cada bomba tendrá parámetros específicos que las caracterizan como: el intervalo de presión, su velocidad de bombeo, presión de escape, composición del gas residual, etc.

La forma de bombeo dependerá de uno o más de los siguientes principios:

Compresión-Expansión del gas en bombas de pistón, bombas rotatorias.

Arrastre por efectos de viscosidad, en bombas eyectoras de vapor.

Arrastre por efectos de difusión, en bombas de vapor por difusión.

Arrastre molecular, en bombas moleculares.

Efectos de Ionización, en bombas iónicas.

Adsorción Física o Química, en bombas que inmovilizan gases dentro del sistema.

La tabla II.1 muestra algunos intervalos de operación de las bombas de vacío, utilizadas comúnmente en un laboratorio de investigación.

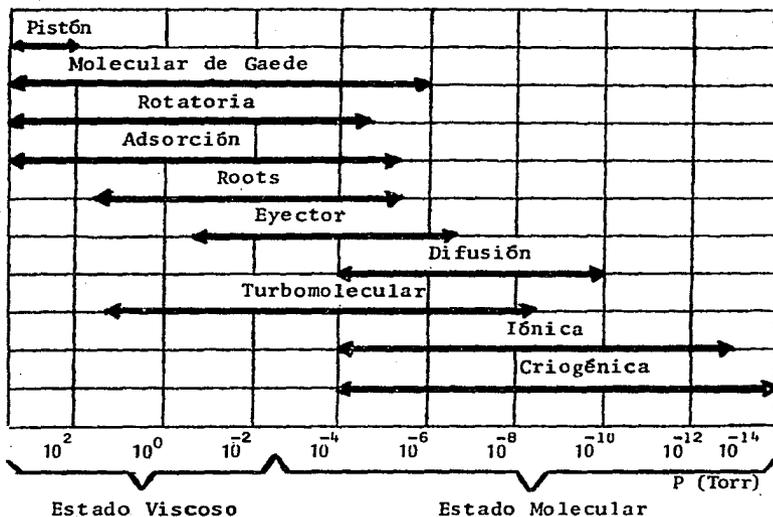


Tabla II.1
Intervalos de Operación de Diferentes Bombas

En la tabla anterior se muestra que existen bombas que -- trabajan inicialmente a presión atmosférica, caracteri-- zándose su funcionamiento dentro del estado viscoso y -- las bombas restantes operan a presiones considerablemen-- te más bajas que la atmosférica y su operación está den-- tro del intervalo de estado molecular del gas.

II.5 BOMBAS IMPORTANTES EN EL DESARROLLO DEL MODELO

Al desarrollar la bomba molecular de tornillo, se han considerado las experiencias adquiridas en bombas anteriores, mencionando los aspectos relevantes que serán útiles para el modelo y que han de servir de base para su construcción.

La exposición de estas bombas se da a continuación en un panorama general, sin considerar el orden de estudio, al tener todas la misma importancia.

II.5.1 BOMBA DE VACÍO MECÁNICA

Como ya se mencionó anteriormente, las bombas mecánicas son las únicas cuyo intervalo de operación es desde presión atmosférica hasta presiones de 10^{-3} Torr y son utilizadas en todos los sistemas de vacío como bomba de apoyo o pre-vacío.

El principio físico bajo el cual operan, es el de la transferencia de momento al gas en algún punto del sistema, ya sea por el deslizamiento de un pistón o por un fluido a gran velocidad, de tal -

manera que el gas es forzado a viajar hacia afuera del sistema. Las figuras II.6 muestran los elementos de una bomba mecánica con sus secuencias de expulsión.

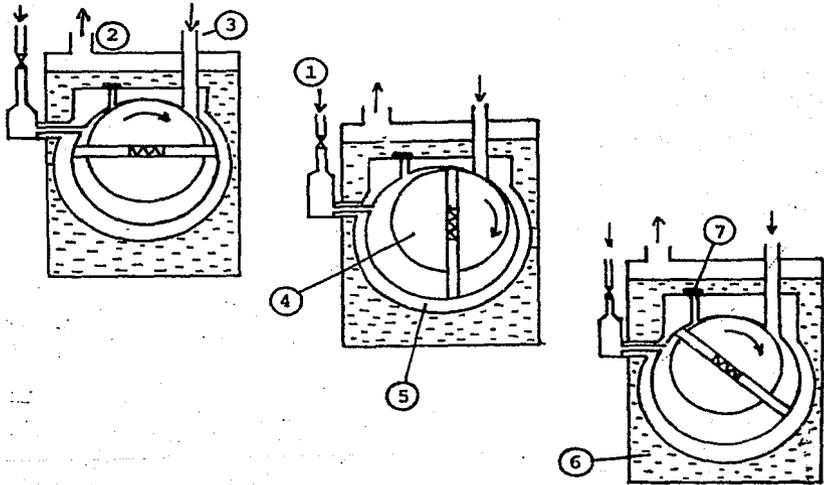


Figura II.6

Fases de una Bomba Mecánica

Elementos de la bomba mecánica de la figura II.6

1. Acceso de Aire
2. Descarga
3. Acceso entre el Sistema y la bomba
4. Rotor
5. Estator
6. Aceite Lubricante y Sellador
7. Válvula de Descarga

Esta bomba contiene un cilindro sólido colocado - excéntricamente llamado rotor, que gira dentro de un recipiente formando una cámara con un volumen de gas que es succionado por la expansión dentro del contenedor; éste tenderá a cero debido a la - rotación, con lo que la presión del gas confinado aumentará rápidamente siendo mayor que la presión atmosférica y al llegar a la válvula de expulsión se descarga al medio ambiente.

La bomba rotatoria se mantiene inmersa en aceite durante su operación cumpliendo con dos funcio-- nes:

- a) Como lubricante de las partes rotativas del sistema.
- b) Como sello dinámico ocupando espacios libres y redituando en el aumento de la compresión.

El vacío final en este tipo de bombas es limitado debido a los gases y vapores disueltos que contaminan el aceite y a la capacidad de la bomba.

II.5.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UNA BOMBA TURBOMOLECULAR

Este principio, intenta dar una descripción acerca del mecanismo que sigue una bomba en su funcionamiento, omitiendo su representación matemática formal.

Se analizará primeramente una sección del rotor que contiene unas aspas con un ángulo de inclinación (α) con respecto al plano donde están fijadas y que giran a una velocidad (\bar{u}). El conjunto de aspas hace una separación entre espacios, efectuando una transporte de moléculas del espacio A al espacio B, si la probabilidad de transmisión

sión para moléculas que se acercan a la serie de aspas desde (A) es mayor que para moléculas que se aproximan a ellas por el espacio (B).

Considerando la situación para moléculas que tengan una velocidad térmica que sea igual a (\bar{u}), entonces el borde principal del aspa será alcanzado por moléculas que incidan con un ángulo (β_A) en el punto (1), teniendo las siguientes opciones; viajar con un ángulo sólido (δ_A) hacia el espacio (B), transportarse con un ángulo (γ_A) hacia el aspa opuesta o regresarse al espacio (A). Ver figura II.7.

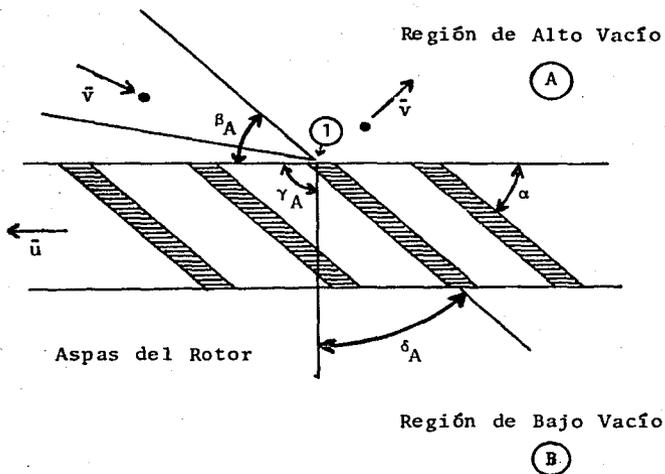


Figura II.7

Opción de una Molécula Incidiendo del Espacio A al B

La misma situación se presenta para moléculas que llegan al borde del aspa en el punto (2) por el espacio (B), teniendo los parámetros - - - - - $(\beta_B, \delta_B, \gamma_B)$ con las mismas opciones. Situación

que se presenta en la figura II.7

Bajo estas condiciones se define la relación:

$$\frac{\delta_A}{\beta_A} > \frac{\delta_B}{\beta_B} \quad * \quad \dots\dots (33)$$

Lo que implica que la combinación apropiada de -- los ángulos, con la separación de las aspas, aumentan y reduzan la probabilidad de transmisión en el sentido contrario.

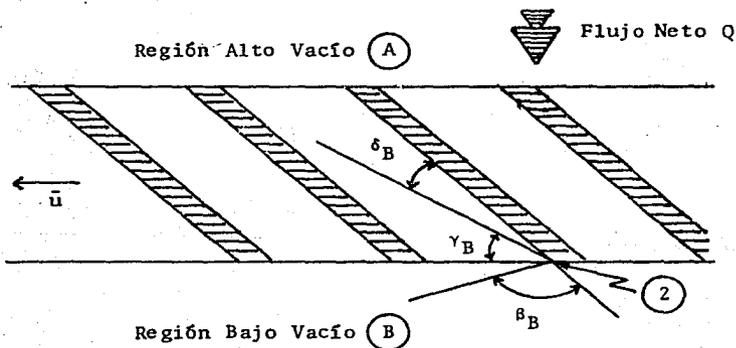


Figura II.8

Opción de una Molécula del Espacio A al B

* Consultar Bibliografía, Revista Turbovac.

Durante las colisiones simples que se suceden al llegar una partícula del espacio (A) con una velocidad (\bar{v}) y que incide en el punto (3) sobre el borde del aspa, como lo muestra la figura II.8, se mantiene sobre la superficie por un tiempo que depende de la presión en la bomba, si el gas y la bomba se mantienen en equilibrio térmico, la partícula es expulsada con una dirección más probable perpendicular a la superficie del aspa. La suma vectorial de ambas velocidades (\bar{w}) adquiere una dirección preferencial hacia el espacio (B). Al incidir la partícula con el estator, la velocidad resultante (\bar{w}) tendrá una componente debida al ángulo de inclinación (α) y la partícula dejará la superficie con la velocidad original (\bar{v}) y una dirección no preferencial, siendo la más probable la dirección perpendicular a la superficie.

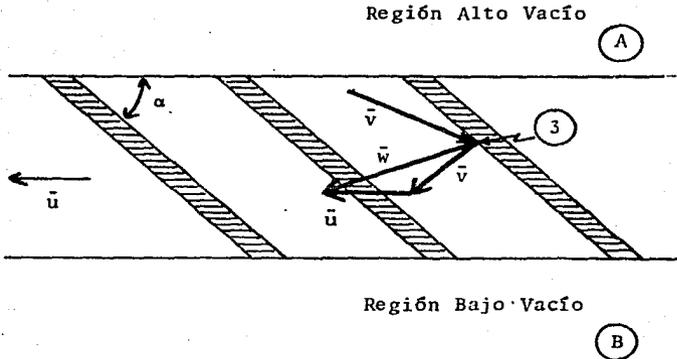


Figura II.9

Velocidad Resultante de una Partícula
del Espacio A al B

Para lograr una mayor compresión se dispone de --
una serie de etapas en el rotor, formando una tur-
bina, de tal forma que la primera etapa que está
en contacto con el sistema tenga un ángulo grande
(α) en sus aspas con respecto a la horizontal,

para capturar tantas moléculas como sean posibles. Al continuar la turbina se reduce el ángulo de -- las aspas para lograr una mayor compresibilidad del gas que ha sido capturado. Para que el bombeo se realice, es importante que el camino medio de las moléculas sea grande comparado con las dimensiones de la bomba, entonces las moléculas man tendrán la velocidad (\bar{w}) que les ha sido impartida hasta que incidan con las aspas del estator, y además la velocidad (\bar{u}) sea comparable con la velocidad térmica media de las moléculas.

Por lo tanto, las bombas turbomoleculares necesitarán velocidades de rotación muy altas que están en función del diámetro del rotor.

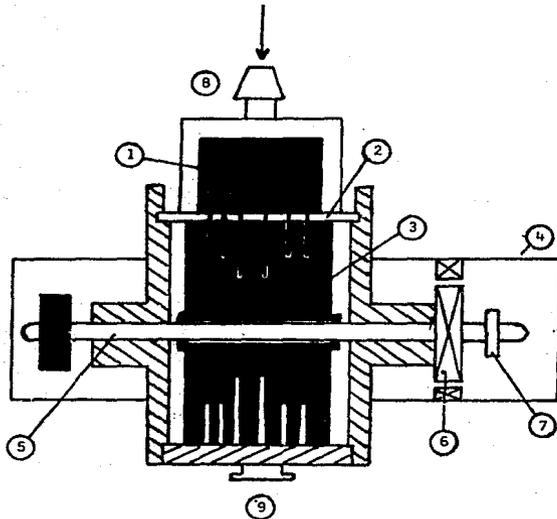
II.5.3 BOMBA DE VACÍO MOLECULAR

La acción de esta bomba se basa en la fuerza de -- arrastre ejercida sobre las moléculas de un gas, debido a una superficie que se mueve rápidamente con respecto a otra fija, donde ambas han sido -- elaboradas de tal forma que tienen un alto grado de precisión. Este tipo de bombas están dentro -

del grupo de las mecánicas.

La primera bomba molecular fue diseñada en 1912 - por Gaede y consiste de un cilindro girando axialmente a altas velocidades llamado rotor, conteniendo unas ranuras paralelas en toda su superficie, las que se acoplan a una superficie fija llamada estator.

La figura II.10 muestra el perfil de la bomba.

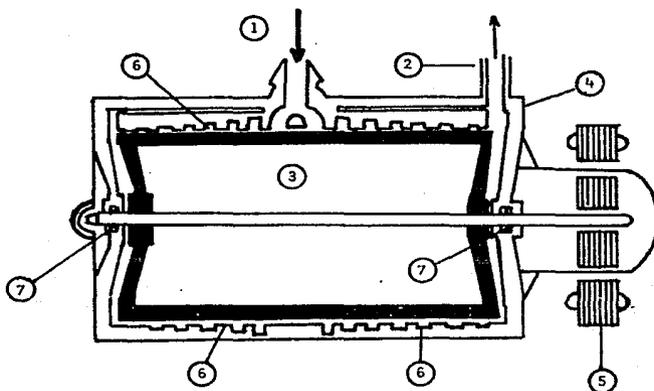


- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| 1. Estator Sólido con Aspas | 5. Eje de Rotación |
| 2. Cámara | 6. Motor de Inducción |
| 3. Rotor Ranurado | 7. Baleros |
| 4. Cuerpo | 8. Entrada |
| 9. Expulsión | |

Figura II.10
Bomba Molecular de Gaede

Sin embargo esta bomba presentó varios problemas mecánicos y no pudo dar buenos resultados para competir con los tipos de bombas que ya eran usadas en ese tiempo.

En 1923 Holweck le hace mejoras a la bomba de Gaede y --- construye una bomba en la cual un cilindro se mantiene ro tando axialmente dentro de una armadura de bronce, esta - armandura en su parte interna tiene dos canales formando una espiral, uno de cuerda derecha y otro de cuerda iz--- quierda que tienen profundidades que van desde 0.05 hasta 0.5 cm., teniendo la mayor profundidad hacia la región de alto vacío tal como lo muestra la figura II.11 produciendo un vacío de 10^{-6} Torrs.



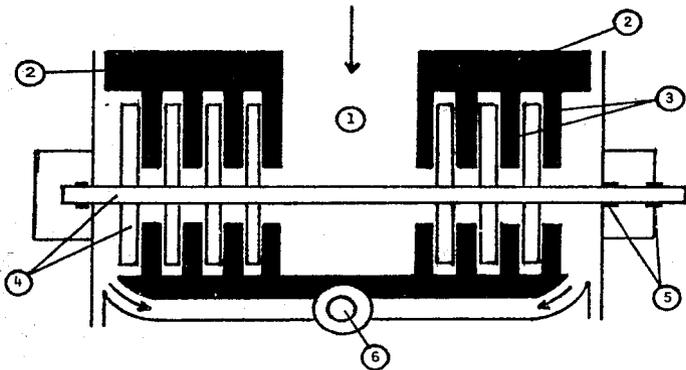
- | | |
|--------------------------|---------------|
| 1. Entrada de Alto Vacío | 4. Contenedor |
| 2. Salida de Bajo Vacío | 5. Motor |
| 3. Rotor | 6. Helicoide |
| 7. Baleros | |

Figura II.11

Bomba Molecular de Holweck

En 1958 Becker da a conocer una bomba molecular más sofisticada y que utiliza un rotor que elimina los problemas - que se le presentaron a Gaede en su bomba. (Por ejemplo: la separación entre rotor y estator).

Al igual que la bomba de Holweck, tiene un cilindro metálico girando axialmente, la diferencia esencial se tiene en el rotor, ya que tiene unas paletas ligeramente inclinadas formando dos conjuntos de discos y que ensamblan -- con el estator que contiene también dos series de discos con paletas inclinadas en forma opuesta con respecto al rotor. Figura II.12.



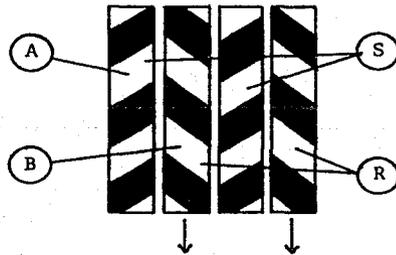
- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Acceso a la Bomba | 4. Rotor |
| 2. Estator | 5. Motor de Inducción |
| 3. Paletas Inclinadas | 6. Salida de la Bomba |

Figura II.12

Bomba de Vacío de Becker

Los discos del rotor y estator convertidos en una cierta cantidad de paletas con una inclinación dada con respecto a sus ejes, imparten un momento a las moléculas de gas, dirigiéndolas hacia la región de expulsión.

El arreglo de las paletas son opuestas en su inclinación unas con respecto a las otras (entre rotor y estator), -- por lo tanto las paletas en el estator forman una canal -- dirigiendo las moléculas hacia el rotor al incidir en él, estas son dirigidas a su situación inicial ya que forma -- una canal idéntica y en posición contraria como ya se indicó anteriormente, esto se muestra en la figura II.13



A. Canal en Estator S. Estator
B. Canal en Rotor R. Rotor

Figura II.13

Paletas Opuestas en el Rotor y Estator

III. ANTECEDENTES DE CONSTRUCCION

En la construcción de un sistema y una bomba de vacío se toman en cuenta problemas como los debidos a porosidad y tensión de trabajo en los materiales utilizados, las fugas que se presentan al realizar malas uniones en los elementos y conductos que los conforman, así como un motor inadecuado.

Se pueden considerar causas tales como: el material, fabricación y forma de las juntas, la técnica y materiales en la soldadura de partes y el uso de un motor de inducción adecuado para la obtención de una mayor eficiencia en la evacuación, por lo tanto, los diferentes materiales constituyentes de todo el sistema, acoplamiento de juntas en el sellado y el funcionamiento esencial de un motor de inducción se discuten en las secciones siguientes.

III.1 PRESIÓN DE VAPOR DE MATERIALES

En la tecnología de vacío, se utiliza una amplia variedad de materiales, de tal modo, que es necesario conocer ampliamente sus propiedades y conductas al situarlos como parte del medio en el que se manejan gases a baja presión.

Estos materiales requieren de un proceso especial para su fabricación, utilización y limpieza; así, en el desarrollo del equipo, este se verá afectado principalmente por las características de los materiales involucrados.

Caba hacer mención, que junto con los gases que están presentes dentro del sistema, están también contenidos los vapores, si se considera el caso de que un sólido o un líquido esté expuesto a la atmósfera, entonces las moléculas de vapor escapan y se establece una situación conceptualizada como "Vapor no Saturado", si ahora se le encierra en un recipiente la presión de vapor alcanzará un máximo, que está en función de su naturaleza y temperatura, entonces el vapor se satura y se tiene una "Presión de Vapor Saturado".

En el caso de saturación, se establece el equilibrio dinámico entre las moléculas que escapan de la superficie --- (evaporación) y el número de moléculas que son atrapadas por ella (condensación), teniéndose que el número total de moléculas libres en el estado gaseoso sea constante.

Dentro de un sistema de vacío, existen estas dos condiciones y los vapores ahí contenidos mantendrán o cambiarán -

su estado físico de acuerdo a las condiciones que existen dentro del sistema (volumen, presión, temperatura); por lo tanto, la superficie de cualquier elemento dentro del sistema, será una fuente de vapor dentro de él, y la máxima presión alcanzada será la "Presión de Vapor" ⁽¹⁾ del material a la temperatura del medio.

Con respecto a los componentes de un sistema, deben ser impermeables a los gases, ser resistentes a los esfuerzos mecánicos involucrados (diferencias con la presión atmosférica y cambios de temperatura) y tener una presión de vapor baja, para prevenir de la misma manera, la evaporación que ocurre a altas temperaturas o bajas presiones.

III.2 SELLOS PERMANENTES Y DESMONTABLES

El acomplamiento de las diferentes partes que constituyen un sistema, se realiza por medio de sellos como previosores de fugas, y la forma en que se clasifican se basa en las características, propósitos y técnicas de construcción en los materiales, teniendo entonces sellos permanentes y sellos desmontables.

(1) Apéndice "C" Sólidos y Líquidos Útiles en Vacío.

SELLOS PERMANENTES

Son aquellos que mantienen las partes unidas e inalterables al someterlas a altas temperaturas y presiones, a este proceso se le conoce como soldadura y puede efectuarse entre metales, vidrios, cerámica o la combinación entre ellos. Se utilizan en la construcción de cámaras de vacío, entre conductos con válvulas y medidores.

El mecanismo a seguir, al efectuar la soldadura entre partes, se puede resumir en los siguientes puntos:

- a) Al diseñar y maquinar las piezas en cuestión, se deberán tomar en cuenta los esfuerzos mecánicos y la presión atmosférica a que son sometidos.
- b) La limpieza de las superficies a unir debe ser máxima.
- c) Escoger el elemento soldador apropiado, tomando en cuenta su punto de fusión, dureza y presión de vapor.
- d) No sobrecalentar las partes a unir (temperatura apropiada).

- e) No vertir exceso de soldadura.
- f) Limpiar las superficies soldadas, antes de instalarlas en el sistema de vacío.

En lo relativo al elemento soldador, éste es un metal cuyo punto de fusión es bajo comparado con los metales a unir, entonces al realizar el acoplamiento, éstos son calentados momentáneamente por encima de su punto de fusión y el soldador se espase produciendo una aleación superficial entre ellos.

Cuando no se realizan buenas soldaduras, pueden producirse inclusiones y segregaciones en el metal, causando micro grietas y porosidades que afectan el nivel de vacío que se desea alcanzar.

SELLOS DEMONTABLES

Son los que pueden ser removidos o cambiados con cierta regularidad como son: las ceras, las grasas para vacío (Apiezon), adhesivos, líquidos, O-Rings metálicos y de diferentes clases de hule sintético, etc.

Se utilizan en los elementos de un sistema cuya función permita realizar ajustes, sustitución y limpieza de las partes, así como la introducción al sistema de elementos que serán operados en condiciones de baja presión.

Las ceras por ejemplo, son utilizadas en una aplicación temporal para unir: metal, vidrio, cerámica, etc. Estas ceras son plásticas cuando se aumenta su temperatura y rígidas a temperatura ambiente.

El uso de Cloruro de Plata es eficiente ya que soporta -- temperaturas por arriba de 300°C y su presión de vapor es de 10^{-7} Torr, la técnica consiste en calentar las partes a unir por arriba de los 300°C y al fundir el Cloruro de Plata se vierte en las uniones.

La forma más general para sellar sistemas es utilizar --- O-Rings Metálicos o Sintéticos que tengan una presión de vapor baja.

En general el Nitrilo-Buna y Viton son los materiales sin téticos más utilizados en esta clase de sellos, el Teflón supera a los anteriores, pero tienen características que requieren de un reajuste en las uniones cada vez que es -

utilizado, otro material empleado para la fabricación de O-Rings es el Silicón, sin embargo no tiene una permeabilidad baja como otros materiales.

Al determinar el lugar donde se sitúe el O-Ring (en una de las superficies a unir), éste será en forma de canal, cuidando su terminado y el radio de compresión del sello.

De acuerdo a la experiencia, se considera que para superficies en posición horizontal, un 75 por ciento del sello esté inmerso en la canal y el 25 por ciento restante será lo que se comprima por la presión entre superficies. Figura III.1

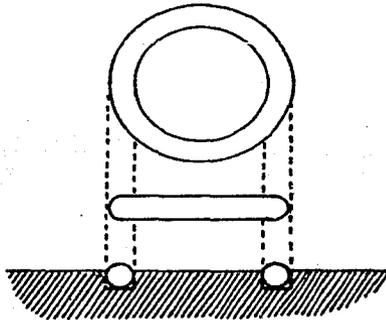


Figura III-1
O-Ring en Posición Horizontal

En la posición vertical, se recomienda una canal en la -- que sus paredes no estén a 90° , sino que tengan un corte hacia el fondo, de tal manera que sostenga firmemente el O-Ring. La profundidad del canal será de un 65 por ciento del sello y lo restante es la compresión entre superficies. Figura III.2

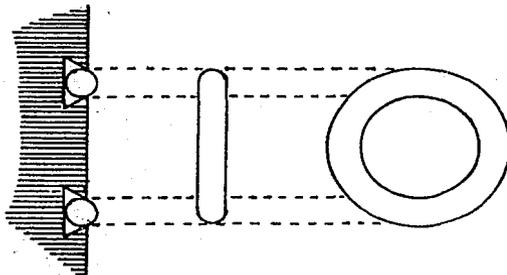


Figura III.2

O-Ring en Posición Vertical

Es importante que para cualquier posición de los O-Rings las canales sean pulidas y aseadas después de cada operación del sistema.

Los O-Rings metálicos se utilizan cuando están en contacto con superficies calientes y a bajas presiones, ya que

son indeformables y tienen un punto de evaporación bajo. Existen sellos de Cobre, Oro, y Aluminio con diámetros de 5 pulgadas o más. La particularidad en ellos, consiste en que la canal donde se sitúan, su fondo tiene una saliente en forma de diente de sierra que circunda a toda ella; entonces, al realizar la compresión entre superficies, este diente penetra al O-Ring y produce un grado bastante alto de sellado.

El uso de este tipo de sellos es reducido, ya que se restringe por las deformaciones que sufren cada vez que se ponen en operación, causando un alto costo. Figura III.3

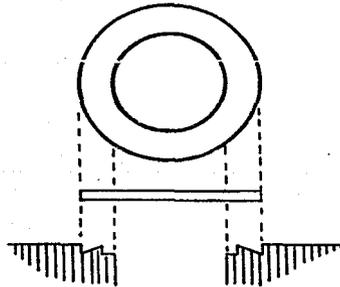
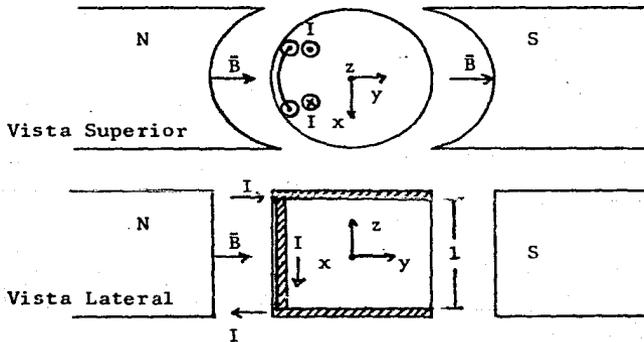


Figura III-3
O-Ring Metálico Situado en una Canal
en Forma de Diente de Sierra

III.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Un motor eléctrico es en general, un transformador de -- Energía Electromecánica y en su forma más simple consta de dos elementos, uno estático y otro rotativo, concéntricos y separados entre sí, por un espacio reducido (en trehierro).



\vec{B} Campo Magnético Rotativo	N Polo Norte
I Corriente Inducida	S Polo Sur
x, y, z Ejes Coordinados	l Longitud del Rotor

Figura III-4

Diagrama de un Motor de Inducción

Los dos elementos básicos del motor de inducción son:

ESTATOR

Consiste de un cilindro ranurado interiormente en las --
cuales se aloja el devanado primario, que es el encarga-
do de inducir el campo magnético necesario para producir
el movimiento.

ROTOR

Elemento que lleva el devanado secundario alojado en ra-
nuras que se localizan en la superficie externa del ci--
lindro; en estos motores puede ser por medio de un deva-
nado o por el llamado "Jaula de Ardilla".

Cuando el rotor está formado por una estructura en jaula
de ardilla, las espiras del devanado se sustituyen con -
barras idénticas de cobre o aluminio fundido, conectadas
sólidamente a unos anillos conductores situados a cada -
extremo.

Tanto el rotor como el estator estan formados de un nú--
cleo compuesto de laminillas de hierro al silicio, con -

ranuras axiales semicerradas, para lograr una mayor área periférica y llevar el flujo magnético por el entrehierro.

Por lo general, el estator se fabrica de tal modo que pueda ser alimentado por una corriente trifásica (con número de polos múltiplo de tres). La superposición de los tres campos magnéticos producidos por una corriente de alimentación alterna, producirá un campo magnético sinusoidalmente distribuido, que gira en sincronía con la frecuencia de la fuente. El tiempo que tarda el valor máximo del campo en pasar de una fase del devanado al siguiente, se fija por el intervalo de tiempo que hay entre los momentos en que las correspondientes corrientes de cada fase alcanzan sus valores máximos.

Los motores de rotor bobinado, están provistos de un devanado aislado en el rotor y el extremo de cada fase se conecta a un anillo colector. Unas escobillas fijas, unidas entre sí por una resistencia regulable, cierran el circuito sobre el anillo. De esta manera, la resistencia del rotor puede variarse para obtener una variación correspondiente en las características del motor.

Una característica que distingue al motor de inducción de otros tipos de motores eléctricos, consiste en que -- las corrientes secundarias se producen solamente por inducción, debido a una corriente alterna, en vez de ser producidas por una fuente de corriente continua, como en las máquinas sincronas y en las de corriente continua.

La ventaja del uso de motores de inducción en las bombas de vacío, contemplan tres aspectos:

- a) No requieren de conmutadores eléctricos que aumenten las pérdidas de energía debidas a la fricción.
- b) Alcanzan grandes velocidades con un consumo relativamente bajo de energía y sus tiempos de operación son largos.
- c) Su ubicación en el sistema de vacío puede ser externa ya que no existe interacción mecánica entre sus elementos.

III.4 MATERIALES ÚTILES EN EL MODELO

ACERO INOXIDABLE

Este material es permeable, no se corroe, su solubilidad de gases es baja, es fácil de limpiar, de fácil maquinado y es transparente al campo de inducción, tiene además -- una alta resistencia a la tensión y es de gran uso en la tecnología de vacío.

ALUMINIO

Es extremadamente suave, de fácil maquinado y su presión de vapor es alta, su utilización es limitada en la tecnología de vacío.

ALUMINIO 7075

Es el producto de una aleación de aluminio y zinc, es de alta resistencia a la tensión, de fácil maquinado, no se corroe y es de amplio uso en este campo.

LATON

Es un material suave, poroso, su solubilidad de gases es alta y tiene la particularidad de no ser útil para alto vacío por lo tanto es de poco uso en esta área.

FIERRO

Este material es permeable, tiene corrosión, su presión de vapor es alta, así como su solubilidad de gases y es de poco uso en la tecnología.

HULE SINTETICO NEOPRENO

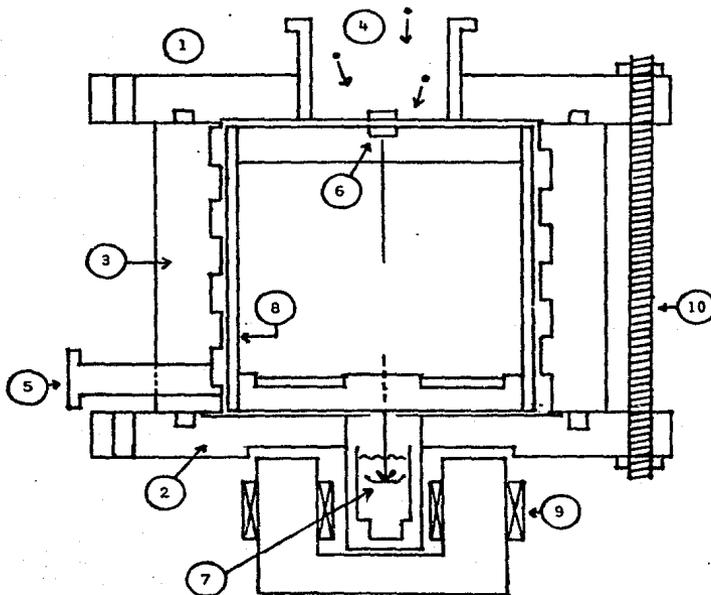
Es un hule artificial, este material tiene una gran consistencia y dureza comparable con el hule natural, es resistente a la acción de los aceites y solventes orgánicos, resistiendo además el incremento de temperatura de la misma manera que un producto natural (hule).

IV. DESARROLLO DE LA BOMBA MOLECULAR DE TORNILLO

IV.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Al realizar la construcción de la bomba, se tomó en cuenta que los materiales utilizados tuvieran: baja producción de gas, fácil maquinado, que soporten los esfuerzos debidos a la baja presión y además el material del rotor resista las tensiones a la cual va a estar sujeto, al adquirir una velocidad angular durante su funcionamiento.

El modelo de la figura IV.1 ha sido desarrollado de acuerdo a las características anteriores.



- | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Tapa Superior | 6. Apoyo y Centrador Magnético |
| 2. Tapa Inferior | 7. Apoyo y Centrador Hidrodinámico |
| 3. Estator con Canal Interior | 8. Rotor |
| 4. Acceso Alto Vacío | 9. Motor |
| 5. Salida a Bomba de Apoyo | 10. Tornillos para Conformar la Bomba |

Figura IV.1

Perfil de la Bomba Molecular de Tornillo

La bomba molecular de tornillo presentada, puede dividirse en seis partes fundamentales:

Rotor

Estator

Acoplamiento al Sistema

Sistema de Sustentación y Centrado

Motor y

Acoplamiento con la Bomba Mecánica de Apoyo

ROTOR

Su función consiste en atrapar momentáneamente las moléculas que inciden en su superficie, girando axialmente a altas velocidades. Está formado por tres piezas de aluminio, un cilindro de paredes delgadas y dos tapas que formarán un bote.

La estructura de este elemento se conforma con el método de preesforzado, que consiste en mantener a baja temperatura (-190 °C) las tapas y el cilindro a alta temperatura (+120 °C), efectuándose el acoplamiento a presión.

Al conformarse el rotor, su tapa inferior y superior ten

drá en su parte central los puntos de sustentación y centrado, permitiendo con ello, su giro axial y establecer un coeficiente de fricción bajo.

ESTATOR

Este elemento es concéntrico al rotor, con diferencia de diámetros de unas décimas de milímetros. El estator se encarga de recolectar y arrastrar a través de su canal interior las moléculas que han sido enviadas por el rotor, transportándolas de una región de menor presión a otra de mayor presión y se le puede considerar como un compresor.

Está formado por tres piezas: tapa superior o inferior de acero inoxidable y una carcaza de aluminio.

Su ensamblado se efectúa por medio de tornillos pasados, sujetando ambas tapas, este tipo de unión es semifija.

Tanto la tapa superior e inferior acoplan con la carcaza, su función es sellar la cámara y proporcionar la sustentación y centrado del rotor.

ACOPLAMIENTO AL SISTEMA

Este paso tiene como función el interrumpir o comunicar al sistema de vacfo con la bomba, permitiendo también el estudio de la misma en forma aislada sin tener que hacer contacto con todo el sistema.

Esta sección consiste de un tubo de acero inoxidable sol dado en la parte superior del estator.

SISTEMA DE SUSTENTACION Y CENTRADO

Este se localiza en los extremos del rotor y sus puntos de apoyo en el estator.

Su función consiste en mantener y centrar con un alto -- grado de precisión al rotor. Estos apoyos en la parte - superior de tipo magnético e hidrodinámico en su punto - inferior.

El apoyo superior consiste de dos imanes permanentes de polos contrarios, eliminando el coeficiente de fricción entre elementos, además de "suspender" al rotor por la - acción de los campos magnéticos ahí presentes.

El apoyo hidrodinámico consiste de un cilindro de acero inoxidable, de diámetro pequeño e inmerso en aceite; sus funciones son: amortiguar las vibraciones producidas -- por el rotor, evitar el calentamiento excesivo y reducir el coeficiente de fricción entre partes.

MOTOR

Este elemento se encuentra externo a la bomba. El motor se encarga de accionar el rotor por medio de inducción, logrando con este efecto que gire a altas velocidades.

ACOPLAMIENTO CON LA BOMBA MECANICA DE APOYO

En páginas anteriores se mencionó que existen bombas de vacío que utilizan otra de apoyo para trabajar dentro -- del estado molecular, ésto es: al inicio de la opera--- ción funciona una bomba mecánica que parte de una pre--- sión atmosférica, logrando así la expulsión de moléculas al medio. Al obtenerse una reducción en la presión, ini--- cia su operación la bomba molecular de tornillo.

El acoplamiento entre las bombas es por medio de un tubo de acero inoxidable, localizado en la parte inferior a -

un costado del estator. Esta unión es semifija.

IV.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El principio de la bomba molecular de tornillo, lleva a plantear un breve análisis, que muestra la situación en la cual se fundamenta su operación. Este principio se basa en el fenómeno conocido como "arrastre molecular", que se presenta cuando una superficie se mueve rápidamente frente a otra que se mantiene en reposo.

El arrastre molecular, consiste en dar un momento adicional en una dirección preferencial a las moléculas incidentes por medio de una superficie en movimiento (rotor); ya que la superficie en reposo (estator) tiene una canal en su cuerpo, las partículas son obligadas a viajar dentro de ésta, aumentando la presión a medida que la longitud crece, en el sentido del movimiento del rotor. Figura IV.2

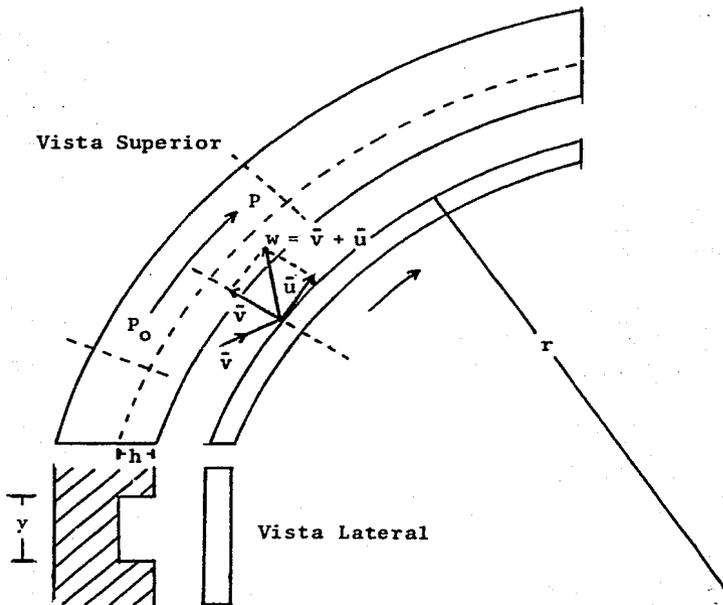


Figura IV.2
Arrastre Molecular al Incidir en la Canal

Bajo este principio trabajan y han sido diseñadas hasta ahora las bombas moleculares. En ellas el gas es bombeado por la canal que tiene una profundidad (h) y anchura

(y), la canal está en reposo mientras que la superficie (S) se mueve con una velocidad lineal (v) en la dirección positiva de (x), produciendo entonces un incremento en la presión para el volumen y h dx, obteniéndose la siguiente relación.

$$\ln \frac{P}{P_0} = \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{1/2} \frac{\bar{v}}{h} x \quad * \quad \dots\dots (33)$$

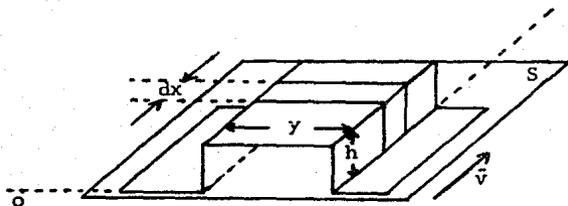


Figura IV.3

Movimiento Relativo entre Superficies

De la fórmula se observa que la razón entre las presiones será mayor cuando (m) sea grande, esto es, cuando se tengan gases pesados dentro de la bomba.

*Consultar Bibliografía Autor Roth.

Otro hecho importante, muestra que esta razón entre presiones es directamente proporcional a la velocidad (\bar{v}) y al largo de la canal (x) e inversamente proporcional a la profundidad de la canal.

Por lo tanto la figura IV.2 representa también gráficamente el proceso, en la que se observa cómo la presión aumenta en favor de la dirección del movimiento.

V CONCLUSIONES

El haber considerado las bombas de vacío construidas anteriormente como base para el desarrollo de la bomba molecular de tornillo, ha permitido que ésta obtenga adelantos dentro de su --- construcción.

Al inicio se buscaron materiales que cumplieran con la mayor -- cantidad de requerimientos útiles para la elaboración de cada - una de sus partes. Esta investigación basada en experiencias - previas, lleva a considerar al acero inoxidable y al aluminio - 7075 como los materiales que permitieran realizar su fabrica--- ción.

Durante su construcción se tomó en cuenta que la precisión en - las medidas de las partes, son de mayor importancia, ya que per- mitió un ensamblado de precisión, disminuyendo en gran medida -- las posibles fugas entre piezas fijas y semifijas.

Mediante la unión de los elementos, se corrigieron y mejoraron los métodos de ensamblado, resaltando que no existen partes solidas que puedan afectar las propiedades de los materiales utilizados. Como principal elemento se tiene al rotor, ya que du-

rante su constitución se utilizó el método de preesforzado, proceso que consistió en calentar y enfriar sus componentes, considerando que la diferencia entre diámetros debe ser mínima, al ser una parte mayor que otra (tapas y cilindro).

En la integración rotor-estator, son importantes las dimensiones que hay entre sus diámetros: rotor 134 mm, estator 135.6 mm.

La diferencia entre ellos (1.6 mm.) soporta el giro al cual está sujeto el rotor (de 15 000 a 30 000 r.p.m.), suficiente para que las moléculas sean arrastradas de una región de menor a mayor presión a través de la canal del estator.

La canal en la que existe el desplazamiento molecular tiene las siguientes dimensiones:

Longitud (x) = 544 mm.

Profundidad (h) = 3 mm.

Anchura (y) = 9 mm.

El comportamiento del nitrógeno como elemento constituyente del aire seco y dentro del sistema, permite interpretar su conducta

al ser impulsada por una superficie en movimiento y ser conducida por la canal fija por medio del siguiente cálculo:

Masa molecular del nitrógeno $m = 4.65 \times 10^{-26}$ Kg, constante de Boltzman $k = 1.3806 \times 10^{-23}$ J/°K, a una temperatura de $T=293$ °K.

Al sustituir estos valores en la fórmula (33):

$$\ln \frac{P}{P_0} = 1.35 \times 10^{-3} \frac{v}{h} x$$

Para la profundidad de la canal $h = 0.003$ m. y para una $x = 0.01$ m. se obtiene:

$$\ln \frac{P}{P_0} = 4.5098 \times 10^{-3} \bar{v}$$

Si se considera que la bomba comienza a trabajar a una presión inicial $P_0 = 1 \times 10^{-3}$ Torr entonces:

$$P = 10^{-3} e^{4.5 \times 10^{-3} \bar{v}}$$

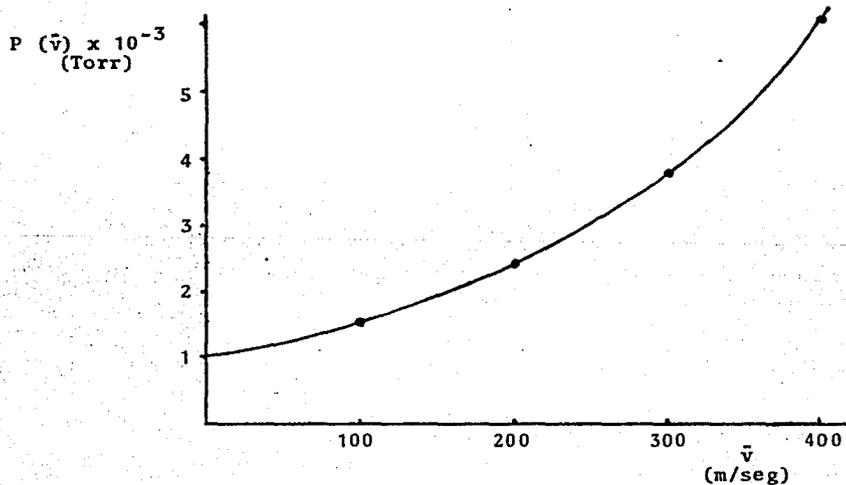
Por lo tanto se puede predecir su comportamiento al variar su velocidad, resultanto la siguiente tabla:

\bar{v} (m/seg)	P (\bar{v}) (Torr)
100	1.56×10^{-3}
200	2.45×10^{-3}
300	3.85×10^{-3}
400	6.04×10^{-3}

Tabla IV. 1

Velocidad Lineal y su Presión Obtenida

De acuerdo a la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica:



De acuerdo a los cálculos realizados, considero que la bomba de sarrollada tendrá una gran eficiencia en la reducción de moléculas dentro del sistema, siendo de gran utilidad la canal producida en el estator. Se concluye además que el motor de inducción es ideal para estos sistemas al colocarlo externo a la bomba, ya que no sufre calentamientos al no encontrarse en una región de baja presión, como generalmente se localiza.

Por lo tanto, el conocimiento adquirido durante su elaboración permite corregir y mejorar el modelo, aparte de tomar las experiencias para investigaciones futuras en construcción, precisión y limpieza; incrementándose la importancia en la tecnología de vacío tanto para el área industrial como para la investigación.

APÉNDICE A

DIÁMETRO MOLECULAR Y CAMINO MEDIO LIBRE

Gas	d ($\times 10^{-10}$ m)	F	$\bar{L} = F(1/p)$
H ₂	2.74	09.118 $\times 10^{-5}$	0.0910
He	2.18	14.400 $\times 10^{-5}$	0.1440
CO ₂ - Vapor H ₂ O	4.60	03.230 $\times 10^{-5}$	0.0323
O ₂ - N ₂ - Aire	3.75	04.860 $\times 10^{-5}$	0.0486
Ar	3.64	05.166 $\times 10^{-5}$	0.0516
Hg	4.26	03.770 $\times 10^{-5}$	0.0377

d. Diámetro Molecular

F. Factor de Proporción

\bar{L} . Camino Medio Libre

p. Presión

APÉNDICE B

COMPOSICIÓN DEL AIRE SECO A NIVEL DEL MAR

<u>Gas</u>	<u>Por Ciento de Volúmen</u>	<u>Presión (Torr)</u>
Nitrógeno	78.03000	593.000000
Oxígeno	20.99000	159.000000
Argón	00.94000	007.100000
Dióxido de Carbono	00.03000	000.230000
Neón	00.00180	000.014000
Helio	00.00050	000.003800
Metano	00.00020	000.000760
Kriptón	00.00010	000.000380
Hidrógeno	00.00005	000.000068
Xenón y otros	indicios	indicios
TOTALES	99.992651 =====	759.349008 Torr =====

APÉNDICE C

PRESIÓN DE VAPOR A DIFERENTES TEMPERATURAS EN °C

Elemento	Punto de Fusión	Presión dada en Torr					
		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰
Aluminio	660	724	808	889	996	1123	1279
Cobre	1083	946	1035	1141	1273	1432	1628
Cromo	1900	907	992	1090	1205	1342	1504
Fierro	1535	1094	1195	1310	1447	1602	1783
Magnesio	651	287	331	383	443	515	605
Mercurio	-38.9	-23.9	-9.5	18	48	82	126
Oro	1063	1083	1190	1316	1465	1646	1867
Plata	961	767	848	936	1047	1184	1353
Plomo	328	483	548	625	718	832	975

BIBLIOGRAFIA

1. BARRINGTON
High Vacuum Engineering U.S.A., 1963
2. CRUZ MANJARREZ H.
Tesis. Diseño y Construcción de Impulsores de
Alta Velocidad para Ultracentrífugas México, 1981
3. DUSHMAN S.
Scientific Foundations of Vacuum Technique U.S.A., 1962
4. GUTHRIE A.
Vacuum Technology U.S.A., 1963
5. KENNARD
Kinetic Theory of Gases U.S.A., 1938
6. KUHLMAN J.
Diseño de Aparatos Eléctricos U.S.A., 1959
7. NOTAS IFUNAM
Tecnología Básica de Vacío México, 1982
8. O'HANLON
A User's Guide to Vacuum Technology U.S.A., 1980
9. ROBINSON
The Physical Principles of Ultra High Vacuum -
System end Equipment U.S.A., 1980

10. ROTH A.
Vacuum Technology Netherlands, 1978
11. YARWOOD J.
High Vacuum Technique London, 1967
12. ZEMANSKY
Calor y Termodinámica España, 1973
13. REVISTA LEYBOLD-HERAEUS
Design Operating Principle and Performance
of TURBOVAC Cologne, 1975

Mi agradecimiento al Sr. Gerardo Lopez, jefe del taller de mantenimiento de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del I.P.N. en la elaboración de componentes del modelo desarrollado, a Hector Cruz Manjarrez por haber aceptado la dirección de ésta Tesis, así mismo a:

Dr. Fernando Alba Andrade

Fis. Arturo Gomez Nogueira

M en C Silvia de Jesús Gonzalez

Fis. Joaquin Mendez

por formar parte del jurado, y a la colaboración y apoyo prestada por el Instituto de Física de la U.N.A.M.

Y mi mas sincero agradecimiento a Yolanda Tovar - por su dedicación y esmero en la mecanografía de este trabajo.