



30
220

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DESARROLLO DE UNA BOMBA DE DIFUSION ECONOMICA
PARA ALTOS VACIOS (10^{-5} A 10^{-7} mm Hg)

TESIS QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

F I S I C O

PRESENTA

ALICIA LARA ALVAREZ

BAJO LA DIRECCION DEL

ING. MARCOS MAZARI MENZER

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1993



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.

CONTENIDO

| | Pag. |
|---|-----------|
| Introducción | 1 |
| CAPITULO 1. Conceptos | 3 |
| 1.1 Vacío | 3 |
| 1.2 Ecuación de estado de un gas ideal | 3 |
| 1.3 Camino libre medio | 7 |
| 1.4 Estados de un gas | 7 |
| 1.5 Intervalos de presión | 8 |
| 1.6 Velocidad de bombeo | 9 |
| 1.7 Gasto y Conductancia | 9 |
| 1.8 Sistema de vacío | 11 |
| CAPITULO 2. Bomba de difusión de aceite | 16 |
| 2.1 Componentes | 17 |
| 2.2 Mecanismo de bombeo | 19 |
| 2.3 Velocidad de bombeo | 19 |
| 2.4 Fluidos de bombeo | 21 |
| CAPITULO 3. Diseño y construcción de los componentes | 23 |
| 3.1 Características del cobre | 23 |
| 3.2 Descripción del prototipo | 24 |
| 3.3 Construcción del cuerpo | 26 |
| 3.3.1 Por deformación del tubo de cobre | 26 |
| 3.3.2 Por medio de piezas de cobre prefabricadas | 27 |
| 3.4 Componentes | 30 |
| 3.4.1 Contenedor de aceite | 30 |
| 3.4.2 Toberas | 30 |
| 3.4.3 Trampa fría | 31 |
| CAPITULO 4. Pruebas y caracterización | 34 |
| 4.1 Limpieza | 34 |
| 4.2 Proceso de desgasificación | 36 |
| 4.3 Montaje de la bomba | 36 |
| 4.3.1 Fugas | 38 |
| 4.3.2 Intervalo de operación | 38 |
| 4.4 Caracterización | 38 |
| 4.5 Resultados | 40 |
| CAPITULO 5. Conclusiones | 43 |
| APENDICE A | 45 |
| APENDICE B | 48 |
| REFERENCIAS | 50 |

INTRODUCCION

En la tecnología de vacío se consideran diferentes intervalos: el bajo, alto y ultra-alto vacío, que comprenden respectivamente los siguientes órdenes de magnitud: de presión atmosférica a 10^{-3} , de 10^{-3} a 10^{-7} y de 10^{-7} a 10^{-12} Torr, (1 Torr = 133.22 Pa).

Se presenta una tecnología para la construcción de una bomba de difusión de aceite, cuyo intervalo de operación eficiente es de 10^{-3} a 10^{-7} Torr. El diseño parte del conocimiento y experiencia que se tiene en el laboratorio de Implantación de Iones del Instituto de Física de la UNAM (IFUNAM).

El objetivo específico fue diseñar y construir el prototipo de una bomba de difusión con las características de una bomba comercial y que además cumpla con las siguientes:

- Reducción del retroflujo de vapores de aceite y por consiguiente la disminución de la contaminación en la cámara.
- Mínimo volumen de aceite.
- Dimensiones reducidas.
- Bajo costo.

El proyecto se originó como una parte del proyecto "Desarrollo de tubos novedosos de rayos-X" que se desarrolla en el Departamento de Física Experimental del IFUNAM.

En el capítulo 1, se hace referencia a conceptos relacionados con la teoría cinética de gases, el gasto, la conductancia, la velocidad de bombeo, entre otros; que son la base de la tecnología de vacío.

En el capítulo 2 se describen los elementos y principios de operación de una bomba de difusión de aceite.

En el capítulo 3, se detalla el proceso de construcción y el modelo final del prototipo.

En el capítulo 4, se presentan el ensamble y las pruebas que se realizaron con la bomba de difusión; así como su montaje a un sistema de vacío para su caracterización.

CAPITULO 1

CONCEPTOS

Antes de iniciar la discusión para el diseño y construcción de la bomba de difusión, es necesario referirse a algunos conceptos como se definen en la tecnología del vacío. Posteriormente se hace mención a un sistema de vacío compuesto por una cámara, sistema de bombeo, medidores y accesorios.

1.1 Vacío.

El vacío es una región del espacio donde la presión es menor que la presión atmosférica.

1.2 Ecuación de estado de un gas ideal.

La Teoría cinética de los gases ideales explica las propiedades de los gases a partir de las leyes mecánicas. Para su estudio se toman las siguientes hipótesis:

- El gas está compuesto por partículas idénticas muy pequeñas llamadas moléculas.
- Las moléculas son esferas rígidas.
- Las moléculas están muy separadas en relación con sus propias dimensiones.

- Las moléculas se encuentran en un estado continuo de movimiento caótico y viajan en línea recta.
- Las moléculas no interaccionan con el medio, sólo en las colisiones.
- Las colisiones entre las moléculas o con las paredes del recipiente que las contiene son perfectamente elásticas.

Un gas que tiene estas propiedades microscópicas se conoce como gas ideal.

A las variables macroscópicas de presión, volumen y temperatura se les aplican las leyes de los gases ideales:

Boyle encontró que, a temperatura constante, al variar el volumen, la presión también cambia, (compresión isotérmica):

$$PV = \text{cte.} \quad (1.1)$$

Charles y Gay-Lussac observaron que a volumen constante la presión del gas aumenta linealmente con la temperatura y a presión constante, el mismo fenómeno sucede con el volumen, (expansión isobárica):

$$\frac{P}{T} = \text{cte.} \quad \frac{V}{T} = \text{cte.} \quad (1.2)$$

Un gas ideal con valores iniciales P_0 , V_0 y T_0 al ocurrir un cambio a los valores P_2 , V_2 y T_2 se interpreta como una expansión isobárica, seguida de una expansión isotérmica; al combinar estas dos leyes se obtiene un valor constante, si además se considera

una muestra de gas de masa W y peso molecular M se obtiene:

$$\frac{P \cdot V}{T} = \left(\frac{W}{M}\right) R_0 \quad (1.3)$$

donde $R_0 = 8.314 \frac{\text{Joule}}{\text{K}} \text{ mol}$, es la constante universal de los gases.

Avogadro demostró que a una misma temperatura y presión, la masa de un volumen de gas es proporcional a su peso y concluyó que a volúmenes iguales todos los gases contienen igual número de moléculas. A esto se le conoce como el número de Avogadro, cuyo valor numérico es $N_A = 6.023 \cdot 10^{23}$ molec/mol. Así, el número de moléculas por unidad de volumen es:

$$\left(\frac{W}{M}\right) \left(\frac{N_A}{V}\right) = n \quad (1.4)$$

Al combinar las ecuaciones (1.3) y (1.4), se obtiene la ecuación de estado para los gases ideales a partir de los parámetros P , V y T :

$$P \cdot V = N \cdot K \cdot T \quad (1.5)$$

donde $K = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Joule}}{\text{K}}$ mol, es la constante de Boltzmann; P en $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$; V en m^3 ; T en grados Kelvin (K).

Las moléculas de gas están en constante movimiento, durante el cuál sufren colisiones entre ellas y las paredes del recipiente

que las contiene. La transferencia de momento sobre las paredes resulta ser la presión, es así como la presión se relaciona con la energía cinética de las moléculas, $P = \frac{1}{2} n m \bar{v}^2$; de aquí, la presión promedio debido a N moléculas en un volumen, ($N/V=n$), medida en cualquier dirección, está dada por:

$$\bar{P} = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 \quad (1.6)$$

Al comparar esta relación con la presión del gas, ($P=nKT$), se obtiene:

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} KT \quad (1.7)$$

que es la ecuación fundamental de la teoría cinética de los gases y relaciona la energía cinética promedio de las moléculas que es la misma para todos los gases y es proporcional a la temperatura absoluta.

La ocurrencia constante de colisiones sucesivas produce una amplia distribución de velocidades, Maxwell y Boltzmann expresaron esta distribución por medio de una relación exponencial, finalmente se obtiene que la velocidad promedio para las moléculas está dado por la ecuación:

$$v_{av} = \left(\frac{8KT}{\pi m} \right)^{1/2}$$

$$v_{av} = 6 \cdot 10^{-12} \left(\frac{T}{m} \right)^{1/2} \quad (1.8)$$

donde m es la masa molecular, en kg; T es la temperatura, en $^{\circ}\text{K}$; K es la constante de Boltzmann.

1.3 Camino libre medio.

Las moléculas tienen colisiones entre ellas y el recipiente que las contiene por estar en continuo movimiento, la distancia que recorre una molécula entre colisiones sucesivas es el camino libre, por lo tanto, el camino libre medio es el promedio de la distancia recorrida por las moléculas entre colisiones sucesivas; también se toma como el promedio de las distancias recorridas entre colisiones sucesivas por la misma molécula en un tiempo dado; al considerar la distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann se tiene:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi n c^2 \sqrt{2}} \quad (1.9)$$

donde $n = \frac{N}{V} = \frac{P}{KT}$, es la densidad del gas; c es el diámetro molecular, en cm; $\bar{\lambda}$ en m , depende de la temperatura y la presión.

Aquí se distinguen dos casos límites: cuando la presión es baja, predominan los choques de las moléculas con las paredes y se tiene el régimen molecular; sin embargo, cuando los choques se producen entre las moléculas, se tiene un régimen viscoso. Al conocer $\bar{\lambda}$ se puede decir en que régimen está la región.

1.4 Estados de un gas.

En un sistema de vacío el gas puede estar en un estado viscoso, intermedio o molecular.

En el estado viscoso, el camino libre medio de las moléculas es muy pequeño, tal que el flujo de gas dentro del sistema está limitado por la viscosidad.

En el estado intermedio, el camino libre medio es comparable a las dimensiones del recipiente que las contiene. A esta presión el flujo de gas está gobernado tanto por la viscosidad como por el fenómeno molecular.

En el estado molecular, el camino libre medio es mucho mayor que las dimensiones del recipiente que las contiene.

1.5 Intervalos de presión.

Al medir la presión dentro de un sistema de vacío se debe conocer el intervalo en que se encuentra, debido a que se presentan fenómenos específicos en cada uno de ellos; por convención, aquí se toman los siguientes intervalos: bajo, alto y ultra-alto vacío, comprendidos de la siguiente manera:

En el intervalo de bajo vacío, se tiene una región donde el número de moléculas del gas es grande comparado al que cubre las superficies del recipiente, el intervalo se extiende desde la presión atmosférica hasta 10^{-3} Torr. En esta región las moléculas se encuentran en estado viscoso.

En el intervalo de alto vacío, las moléculas chocan principalmente en la superficie del recipiente, consiste en evacuar o capturar

moléculas que se reflejan o se desprenden de las paredes de la cámara, el intervalo se extiende de 10^{-3} a 10^{-7} Torr. Aquí se tiene un estado molecular.

En el intervalo de ultra-alto vacío, el tiempo para formar una monocapa sobre la superficie es igual o mayor que el tiempo utilizado para medirla, por tanto se pueden preparar superficies limpias y así poder determinar sus propiedades antes de formarse una nueva monocapa. El intervalo se extiende de 10^{-7} a 10^{-13} Torr y mejora con el progreso de la tecnología. [Roth, 1978]

1.6 Velocidad de bombeo.

En un sistema de vacío, el gas se transporta de un lugar a otro con una rapidez determinada por la velocidad de bombeo y es la razón de cambio del volumen de gas, que la bomba extrae del sistema, por unidad de tiempo, a una presión dada, medido en la entrada de la bomba:

$$S_b = \frac{dV}{dt} \quad (1.10)$$

donde S_b es la velocidad de bombeo expresada en m^3/seg , es común utilizar lt/seg .

1.7 Gasto y Conductancia.

El gasto (Q) de gas que sale de un sistema de vacío es el producto de la velocidad de bombeo y la presión que se tiene a la entrada de la bomba,

$$Q = S_b P \quad (1.11)$$

donde P es la presión, en Pa; Q el gasto, en torr lt/seg o en Pa m³/seg.

La conductancia de un elemento que conecta regiones de un sistema de vacío es el cociente entre el flujo y la diferencia de presión entre ambos lados de la conexión:

$$C = \frac{Q}{\Delta P} \quad (1.12)$$

donde C es la conductancia, en lt/seg.

Si se conoce el regimen de flujo (viscoso o molecular), la forma geométrica y ésta se encuentra a temperatura ambiente, la conductancia se calcula de la siguiente manera:

Para flujo viscoso

$$C = 182 \left(\frac{d^4}{l} \right) \bar{P} \quad (1.12a)$$

donde d es el diámetro del conducto de sección circular, l la longitud y P la presión promedio.

Para flujo molecular

$$C = 12.1 \left(\frac{d^3}{l} \right) \quad (1.12b)$$

[Roth, 1978]

1.8 Sistema de vacío.

Un sistema de alto vacío esta formado por una cámara, una bomba de alto vacío y una bomba de apoyo, medidores de alto y bajo vacío y accesorios. Dentro de la cámara se llevan a cabo los experimentos o procesos al vacío, su diseño está determinado por su aplicación; las bombas de vacío reducen la densidad molecular dentro de la cámara y los medidores se utilizan para saber la presión dentro del sistema. La FIGURA 1.1 muestra un sistema de vacío.

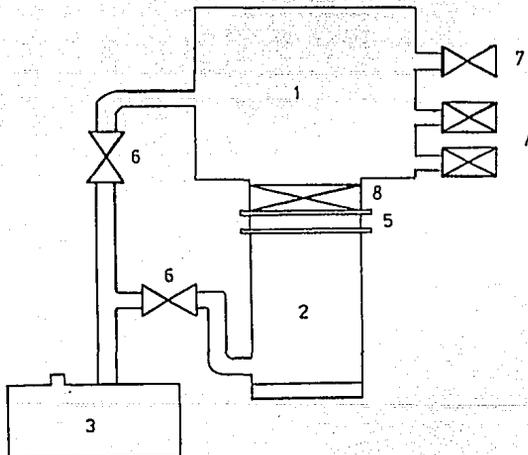


FIGURA 1.1

Sistema de vacío: 1. Cámara; 2. Bomba de alto vacío; 3. Bomba de apoyo; 4. Medidores alto y bajo vacío; 5. Trampa fría; 6. Válvula de vacío; 7. Válvula de admisión; 8. Válvula de alto vacío.

Bombas de vacío.

Las bombas de vacío se utilizan para disminuir la presión dentro de un sistema de vacío; se clasifican, de acuerdo a su principio de operación, en bombas de bajo vacío y alto vacío.

Las bombas de bajo vacío o bombas previas, reducen la presión desde la atmosférica hasta un valor en que las bombas de alto vacío comienzan a ser eficientes, su intervalo de operación es desde la presión atmosférica hasta 10^{-3} Torr. La más utilizada es la rotatoria de paletas, su principio de operación es la de compresión y expansión del gas, emplea aceite como lubricante y sello dinámico de cierre a la atmósfera.

Las bombas de alto vacío requieren de un vacío previo, ya que no son eficientes en el intervalo de bajo vacío. Su intervalo de operación es, en general, de 10^{-3} a 10^{-9} Torr. En este trabajo sólo se menciona la bomba de difusión que trabaja a partir de vapor de aceite, que imprime cantidad de movimiento en una dirección preferencial a las moléculas de gas haciendo que se desplacen a la región de bajo vacío para luego ser expulsadas por la bomba de apoyo.

Medidores de vacío.

Para medir presiones abajo de la atmosférica, se han desarrollado una variedad de medidores aprovechando las propiedades de los gases. Para presiones que van de la atmosférica hasta 10^{-3} Torr. Aquí sólo se mencionan dos tipos de medidores: de

conductividad térmica y de ionización.

El medidor termopar o de conductividad térmica, consiste de un filamento que es calentado eléctricamente, al hacerle pasar una corriente de intensidad constante, su temperatura es medida directamente por medio de un termopar. Como la presión aumenta, la conducción de calor a través del gas aumenta y la temperatura del filamento disminuye; el termopar responde a la temperatura del filamento y produce una lectura directa de la presión. Registra presiones desde la atmosférica hasta 10^{-3} Torr. [Roth, 1978]

El medidor de ionización tipo Bayard-Alpert, tiene como principio de funcionamiento la ionización del gas por electrones emitidos mediante un filamento caliente; consta de tres electrodos que son: filamento, rejilla y colector, el filamento caliente emite electrones que son acelerados por un potencial entre el filamento y la rejilla, los electrones ionizan las moléculas de gas, estos iones son detectados por el colector que se mantiene a un voltaje negativo respecto al filamento. Registra presiones desde 10^{-4} a 10^{-10} Torr. La FIGURA 1.2 muestra los medidores termopar y de ionización Bayard-Alpert. [Notas, 1972]

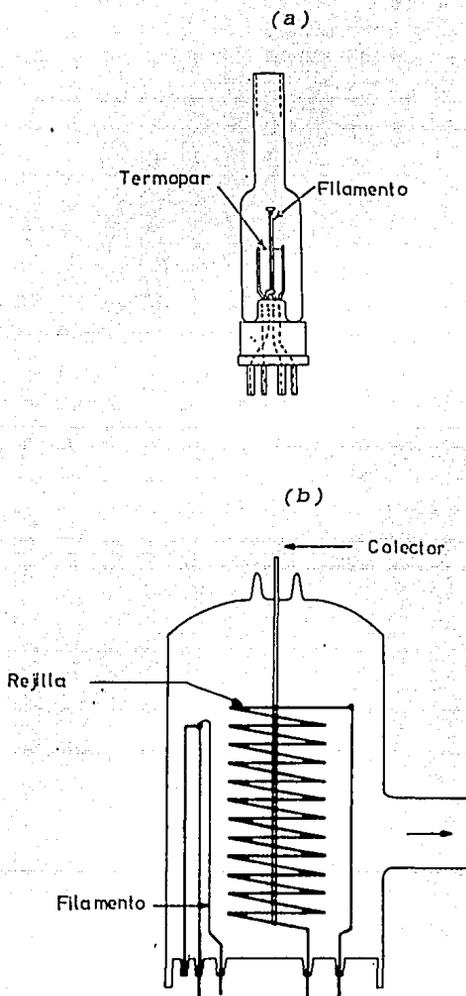


FIGURA 1.2

(a) Medidor termopar. (b) Medidor de ionización Bayard-Alpert.

Accesorios.

Las trampas frías con frecuencia se usan en sistemas de alto vacío. Su función principal es condensar gases, vapor de agua y en especial los vapores de aceite cuando se trabaja con bombas de difusión. [Notas, 1972]

Las válvulas de vacío se usan para aislar diferentes partes del sistema, por medio de ellas se controla el flujo de gas.

Existen dos tipos: válvulas de admisión, soportan la diferencia de presiones entre la cámara y la atmosférica; válvulas que sólo mantienen el exceso de presión que se ejerce en una sola dirección. [Guthrie, 1949]

Los sellos para vacío se utilizan para unir un elemento del sistema con otro, que proporciona un mejor contacto y evita la entrada o salida de gases. Se usan en uniones de partes desmontables, tienen la ventaja de existir en diversos materiales, de acuerdo a los requerimientos y necesidades. [Kaminski, 1980]

CAPITULO 2

BOMBA DE DIFUSION DE ACEITE

En este capítulo se describen los componentes de una bomba de difusión y su funcionamiento. Posteriormente se discute el concepto de velocidad de bombeo, así como las fuentes de gas, que son determinantes para obtener la presión última.

Gaede inventó y desarrolló una bomba que emplea un chorro de vapor para arrastrar las moléculas de gas. Langmuir consideró la salida de este chorro de vapor al hacerlo pasar por una tobera y proyectarlo hacia una pared, previamente enfriada, para ser condensado. La ranura que da paso al vapor, proveniente del interior del tubo hacia el exterior, debe ser aproximadamente igual al camino libre medio de las moléculas de vapor.

La bomba de difusión de aceite atrapa las moléculas que viajan al azar. El aceite es evaporado, asciende por las toberas y sale con velocidades supersónicas, estos chorros de vapor atrapan las moléculas de gas imprimiéndoles una cantidad de movimiento y las arrastra a la parte inferior donde son comprimidas y expulsadas por la bomba de apoyo.

Para poner en funcionamiento una bomba de difusión se requiere una presión de $1 \cdot 10^{-9}$ Torr dentro del sistema, esto debido a su principio de funcionamiento, que se logra con una bomba de apoyo.

2.1 Componentes.

La FIGURA 2.1 muestra las componentes de una bomba de difusión. Se integra por un cuerpo formado, generalmente, por un cilindro; en la parte superior se localiza la entrada de la bomba que contiene una brida para su montaje; alrededor del cuerpo hay un serpentín de enfriamiento, utiliza agua como refrigerante; en el fondo está el calefactor y a un lado, el puerto de salida que comunica con la entrada de la bomba mecánica; en su interior se encuentran las toberas que proporcionan al chorro de vapor una dirección; las bombas de difusión utilizan una trampa fría que ayuda al bombeo ya que tiene la capacidad de atrapar vapores del sistema.

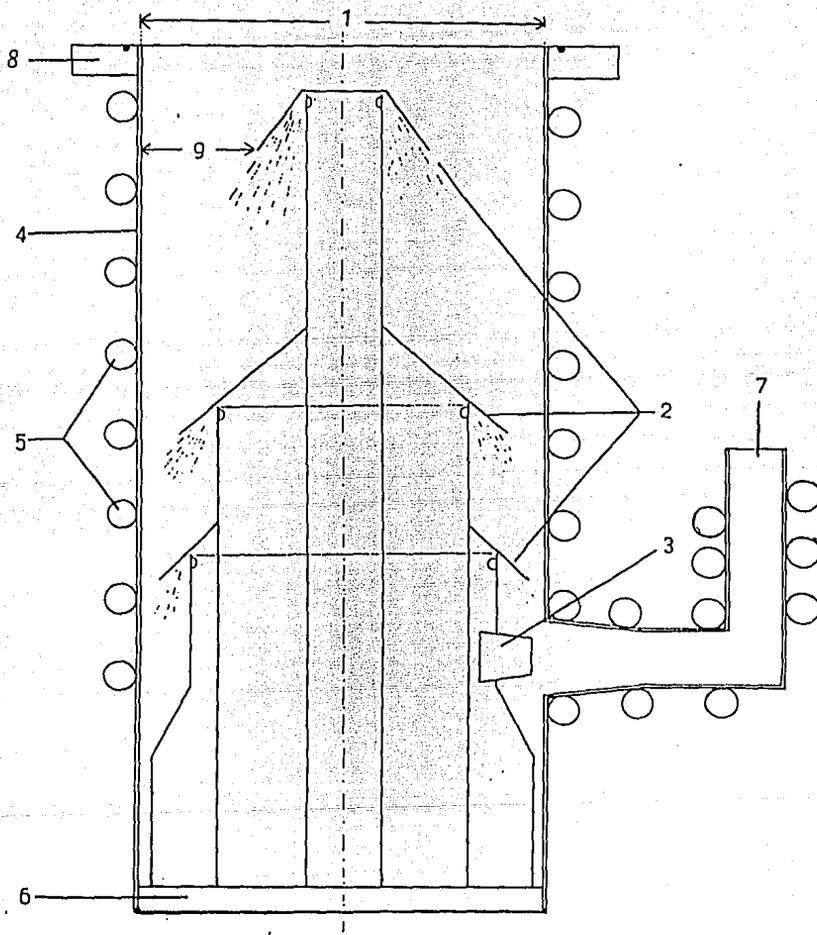


FIGURA 2.1 Esquema de la bomba de difusión: 1. Entrada de la bomba; 2. Toberas 3. Eyector; 4. Cuerpo de la bomba; 5. Serpentin de enfriamiento; 6. Calefactor; 7. Salida de la bomba; 8. Brida; 9. Garganta.

2.2 Mecanismo de bombeo.

El funcionamiento de la bomba de difusión es el siguiente: Cuando se logra una disminución en la presión dentro del sistema de vacío, (vacío previo), se pone a funcionar el sistema de enfriamiento; se enciende el calefactor y se calienta el aceite hasta una temperatura donde comienza a generarse vapor que asciende por los tubos y sale por las toberas en forma de chorros que se expanden, las moléculas que forman el vapor chocan con las moléculas de aire y les transmiten cantidad de movimiento y son arrastradas hacia la región de bajo vacío donde son removidas a través de la línea de vacío previo por medio de la bomba mecánica. El chorro de vapor que llega a las paredes de la bomba, previamente enfriadas, se condensa y retorna al fondo donde nuevamente es evaporado, creándose un ciclo. En la parte superior de la bomba se localiza una trampa fría que condensa el vapor de aceite para regresarlo al fondo. Cuenta con varios estados o etapas de bombeo diferencial, la tobera superior está diseñada para trabajar a la presión más baja, este estado junto con el siguiente producen un efecto de compresión. Un alto vacío no se logra al emplear un sólo estado diferencial.

2.3 Velocidad de bombeo.

La velocidad de bombeo de una bomba de difusión se puede determinar en relación a la presión parcial de cada tipo de gas a bombear; otra forma es a partir de las dimensiones de la entrada de la bomba.

Velocidad de bombeo a partir del tamaño del claro de la entrada de la bomba y el Factor-Ho:

El claro de la entrada de la bomba es la región de área A, se determina por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi (D - t)^2}{4} \quad (2.1)$$

donde D es el diámetro del puerto de entrada en cm; t/2 es el tamaño de la garganta de la bomba en cm.

Sea un gas de peso molecular M y temperatura T que pasa a través de esta área en una razón de flujo mediante:

$$S_{\max} = 3.64 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} A \quad (2.2)$$

El cociente entre la admitancia y la razón de flujo máximo, ecuación (2.2), se conoce como el Factor-Ho:

$$H = \frac{S}{S_{\max}} \quad (2.3)$$

varía entre 0.3 y 0.45; las bombas de difusión modernas tienen un factor de 0.5.

Por tanto, la velocidad de bombeo esta dada por la relación:

$$S = HS_{\max} = 3.64 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} H A \quad (2.4)$$

[Roth,1978].

La velocidad de bombeo permanece constante para valores cercanos a 10^{-3} Torr y comienza a disminuir cuando se aproxima a la presión última, esto ocurre cuando el número de moléculas de gas que se extraen por segundo, es igual al número de moléculas que entran provenientes de la cámara, éstos últimos se conocen como fuentes de gas y pueden ser fugas o desorción provenientes de la superficie de la cámara o de la misma bomba de difusión. Las fuentes de gas más comunes son:

- Desgasificación de las paredes, causada por desorción de las superficies desde el interior del sólido hacia la superficie y por difusión del gas debido a la penetración del gas a través del sólido.
- Difusión inversa, es la difusión de gas de la región de vacío previo a través del chorro de vapor; depende del número de estados y del diseño de la bomba.
- Entrada de los productos de descomposición del aceite en la región de alto vacío.
- Migración inversa, es la transferencia del vapor a la región de alto vacío por reevaporación de las paredes y la trampa fría.
- Retroflujo de vapor del fluido de bombeo, es el paso directo de las moléculas de vapor desde la tobera superior hasta la entrada de la bomba de difusión; éste fenómeno se ha tratado de entender a partir de experimentos hechos por varios autores, la mayor fuente que origina la migración del fluido se localiza en el borde de la tobera superior, otras causas son: la penetración del vapor dentro de la tobera; la evaporación a partir de la condensación de las

paredes de la bomba; la intercolisión de las moléculas de vapor particularmente en la tobera superior; el calentamiento del fluido dentro de los tubos al mandar gotas de aceite por ellos. Hablanian reporta una reducción del retroflujo en la tobera superior al enfriarlo por medio de un anillo, en otro caso se describe el uso de una capucha sobre la misma tobera enfriada con agua obteniendo una considerable reducción, se menciona un mejoramiento adicional al colocar un disco horizontal en la orilla de la capucha que cubre a la tobera provocando que las gotas de la capucha fría caigan al fondo de la bomba previniendo la evaporación de las mismas. [Hablanian, 1972]

2.4 Fluidos de bombeo.

Una gran variedad de aceites sintéticos, a base de silicones, han sido utilizados como fluidos de trabajo en bombas de difusión. Los criterios para la selección de los fluidos son: baja presión de vapor a temperatura ambiente, estabilidad térmica, químicamente inerte; no tóxico; alta temperatura de degradación y explosión; viscosidad razonable a temperatura ambiente; bajo calor de vaporización; y bajo costo. Ver APENDICE B.

En las primeras bombas de difusión era común el empleo de mercurio como fluido de bombeo, se utilizaba con el objeto de minimizar la contaminación de moléculas.

CAPITULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LOS COMPONENTES

Se plantea como punto principal en esta tesis, el diseño y construcción de una bomba de difusión de aceite. Dado que la construcción fue por medio de piezas de cobre, se dan algunas características de este material. Posteriormente, a partir de un modelo propuesto se sugiere la forma del cuerpo de la bomba y para la construcción se procedió de dos maneras: primera, deformando el tubo de cobre por medio de presión; segunda, soldando piezas prefabricadas. Para la construcción de las toberas se utilizaron tubos y discos, del mismo material.

3.1 Características del cobre.

Los metales poseen algunas características comunes como son: resistencia cercana a la temperatura máxima de operación; baja presión de vapor a cierta temperatura; baja permeación; químicamente inertes.

Las piezas de cobre se fabrican, en su mayoría, por un proceso de refinación electrolítica, esto hace que contenga inclusiones de oxígeno; su temperatura de recristalización es a

200°C, después queda extremadamente suave y forma óxidos. Al combinarse el calor y el vacío, el hidrógeno se puede mezclar con las inclusiones de oxígeno del cobre y formar agua, esto daña a la superficie que ocasiona poros y rupturas.

Existe otro cobre de nueva calidad llamado cobre de alta conductividad libre de oxígeno, (Cu OFHC), sus características son: producto libre de porosidad; contiene 3 ppm de oxígeno; pureza de 99.98%. [Kare, 1983]

3.2 Descripción del prototipo.

La idea es obtener un prototipo de bomba de difusión económico. A partir del modelo de una bomba de tipo comercial se sugiere lo siguiente: que el cuerpo de la bomba sea de forma cilíndrica y que decrezca, longitudinalmente, su diámetro hacia la base; las toberas sean dos tubos de diferentes dimensiones y en la parte superior tengan cuatro cavidades, sobre las cuales colocan los deflectores, de forma cónica, con ángulos de inclinación de entrada y salida con respecto a los tubos, el ángulo de salida del tubo superior debe ser menor que el ángulo de salida del tubo inferior; las toberas deberan estar centradas y fijas por medio de un tornillo sujeto en el fondo de la bomba; que utilice una cantidad mínima de aceite, para ello se debe contar con un contenedor de aceite que almacene aproximadamente 20 cm³. En la FIGURA 3.1 se muestra la comparación entre las bombas de difusión (a) modelo comercial, (b) modelo propuesto.

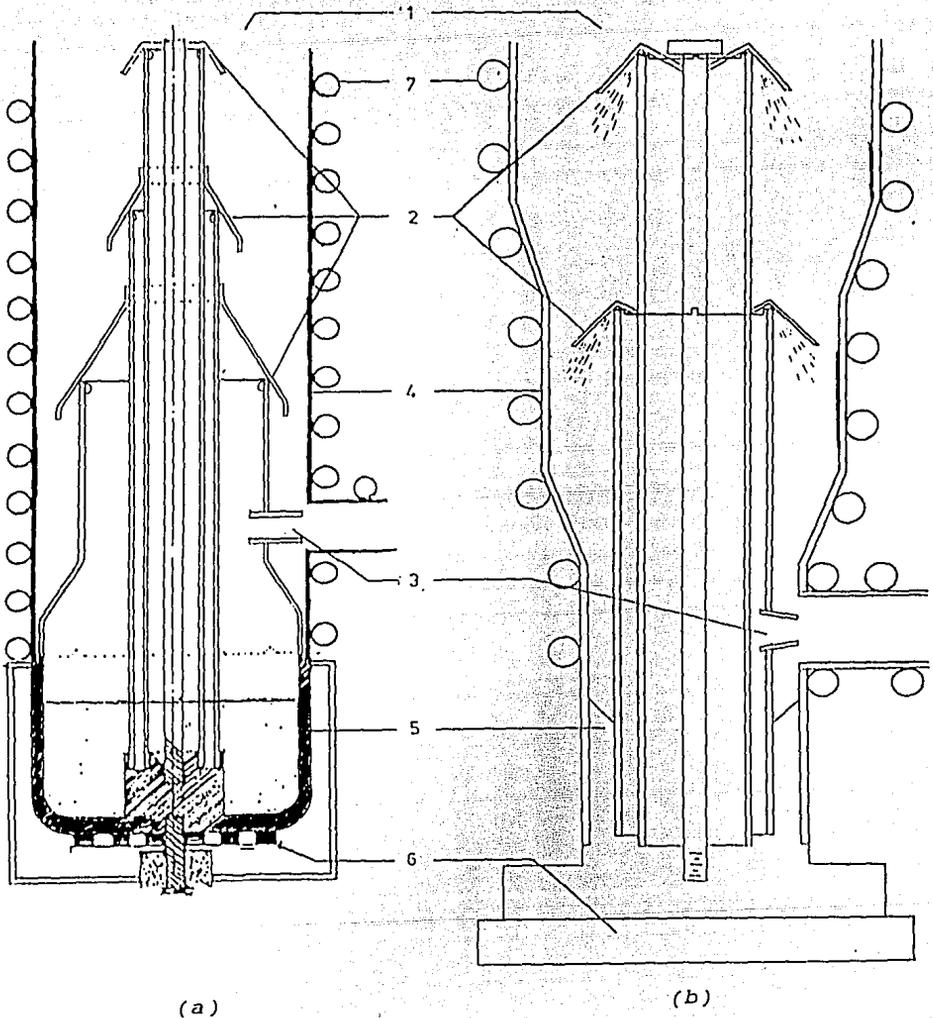


FIGURA 3.1 Esquema de las bombas de difusión (a) modelo comercial, (b) modelo propuesto. 1 Entrada de la bomba. 2 Toberas. 3 Eyector. 4 Cuerpo de la bomba. 5 Contenedor de aceite. 6 Calefactor. 7 Serpentin de enfriamiento.

3.3 Construcción del cuerpo de la bomba.

A partir del modelo propuesto, (FIGURA 3.1(b)), se enuncian dos métodos para construir el cuerpo de la bomba: (1) deformación del tubo de cobre al usar alta presión hidráulica; (2) la unión de piezas de cobre comerciales con la geometría deseada.

3.3.1 Por deformación del tubo de cobre.

La primera idea es construir moldes de fierro con la geometría propuesta para después intentar la deformación plástica del tubo por medio de una prensa hidráulica que inyecta aceite a alta presión.

Dentro de los moldes de fierro, (ver APENDICE A para los cálculos de los esfuerzos), se introdujo un tramo de tubo de cobre de $1\frac{1}{2}$ " = 3.81 cm de diámetro interno, 17.4 cm de longitud y pared de 0.14 cm de espesor.

Se hicieron dos pruebas: la primera consistió en someter escalonadamente al tubo a una cierta presión por un tiempo fijo para después bajar la presión. La segunda prueba fue similar, salvo que la pared del tubo fue de menor espesor.

De las pruebas anteriores, en el primer caso, el tubo no sufrió deformación ni daño alguno; en el segundo, el tubo se agrietó sin presentar deformación apreciable, no se logró construir el cuerpo de esta manera, por lo que se continuó con el segundo método.

3.3.2 Por medio de piezas de cobre prefabricadas.

El segundo procedimiento para construir el cuerpo de la bomba es por medio de la unión de piezas de cobre prefabricadas comerciales, de fácil adquisición, en el comercio se conocen como reducciones de tubería, y, concuerdan con la forma del modelo propuesto.

Para formar el cuerpo se necesitaron: (a) dos reducciones de $2\frac{1}{2}$ " a 2" = 7.6 cm a 5.4 cm de diámetro, 8.5 cm de longitud, y, de 2" a $1\frac{1}{2}$ " = 5 cm a 4.15 cm de diámetro, 4.5 cm de longitud, para su unión; deben acoplarse los diferentes diámetros de cada pieza; (b) un tubo de cobre de $1\frac{1}{2}$ " = 4.13 cm de diámetro externo y 0.14 cm de pared; (c) contenedor de aceite, (ver sección 3.4.1); (d) un codo de $\frac{5}{8}$ " = 1.6 cm de diámetro.

CONSTRUCCION DEL CUERPO.

Se formaron la parte superior y media del cuerpo al acoplar las reducciones, la mayor sobre la menor, en ésta última se agregó el tubo de $1\frac{1}{2}$ ", el cual tiene una perforación de 1.2 cm de diámetro; en la base se colocó el contenedor de aceite, finalmente se unió el codo en la parte lateral del tubo; todas las piezas se unieron con soldadura de plata (1020).

DETECCION DE FUGAS.

Al concluir la unión de las piezas, se realizaron las pruebas para detectar fugas, tapando la entrada del cuerpo y la salida conectada a una compresora de aire, todo el cuerpo se sumergió en un balde de agua y se inyectó aire a alta presión, no se formaron

burbujas, al obtener un cuerpo sin fugas se colocó el serpentín de enfriamiento.

Para el serpentín de enfriamiento se utilizó tubo de cobre de $1/4" = 0.63$ cm de diámetro, desde la parte superior hasta la altura del codo, en cada vuelta se tiene una separación de 2 cm, también se colocó en el codo para condensar el vapor de aceite que pueda salir por ese conducto. En la FIGURA 3.2 se muestra el cuerpo de la bomba ensamblado a partir de las piezas.

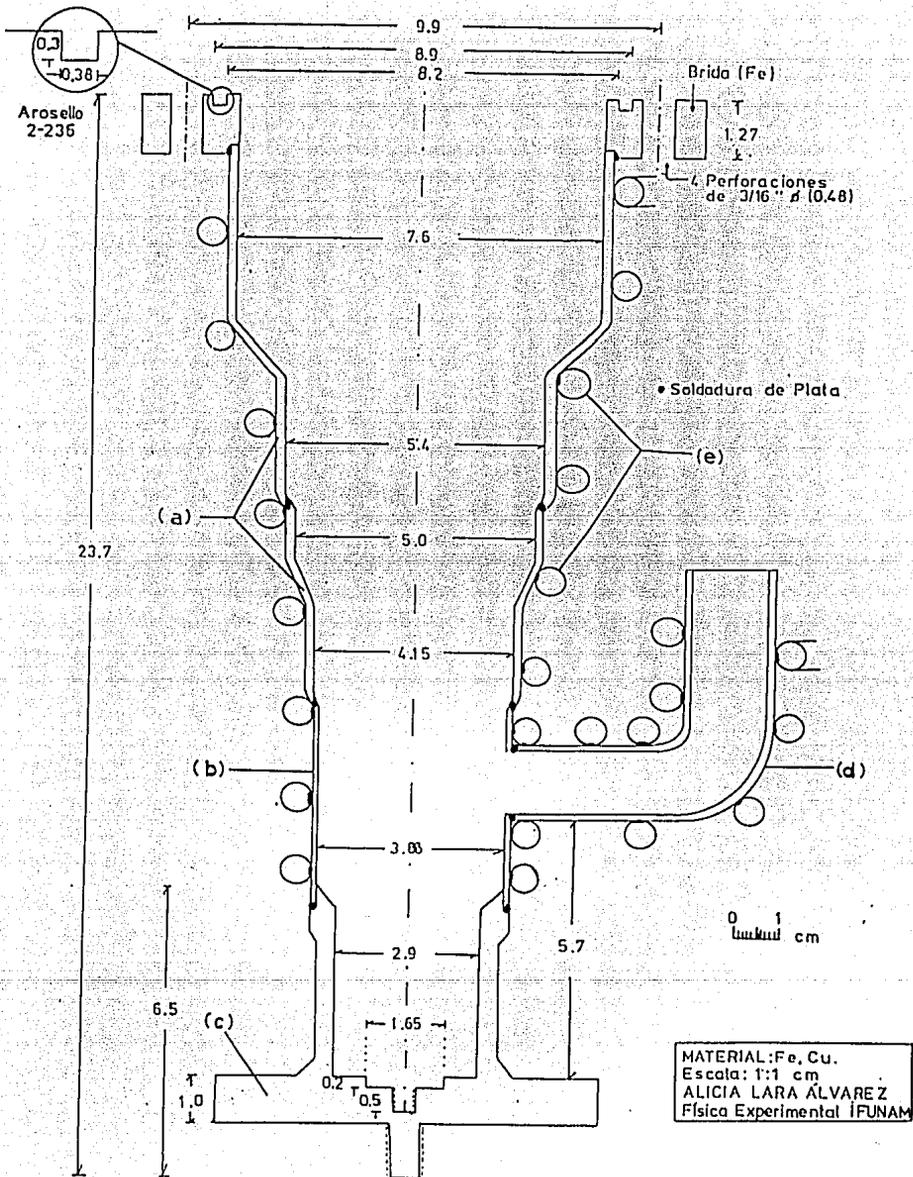


FIGURA 3.2

Esquema del cuerpo de la bomba de difusión a partir de piezas de cobre; (a) reducciones de tubería, (b) tubo, (c) contenedor de aceite, (d) codo, (e) serpentín de enfriamiento.

3.4 Componentes.

En el modelo propuesto, (FIGURA 3.1(b)), se muestra el contenedor de aceite y las toberas, compuestas de dos tubos de cobre de diferentes dimensiones y dos discos de cobre que se van a deformar, finalmente se menciona la trampa fría.

3.4.1 Contenedor de aceite.

La FIGURA 3.2, muestra el contenedor de aceite; éste se construyó mediante una barra de cobre, la parte interna tiene las dimensiones del tubo de la tobera inferior, $1\frac{1}{8}$ " = 2.9 cm de diámetro, además se le hizo un roscado de $\frac{3}{16}$ " = 0.48 cm de diámetro en el centro, para sujetar las toberas; está diseñado para almacenar 20 cm³ de aceite; su diámetro exterior coincide con el diámetro externo del tubo de cobre $1\frac{1}{2}$ " = 4.13 cm.

3.4.2 Toberas.

Para formar las toberas, superior e inferior, se requirieron dos tubos y dos discos de cobre. Uno de $\frac{5}{8}$ " = 1.6 cm de diámetro y 17 cm de longitud, con pared de 0.11 cm; otro de $1\frac{1}{8}$ " = 2.9 cm de diámetro y 12.5 cm de longitud, con pared de 0.13 cm; para formar los deflectores se construyeron moldes de fierro con la geometría propuesta para deformar los discos.

En la parte superior, de cada tubo se hicieron las cavidades para permitir la salida del vapor de aceite; los ángulos de inclinación, interno y externo, de la tobera superior tomados con respecto del tubo fueron de 45° y 40°, respectivamente; para la tobera inferior, los ángulos fueron de 45° y 50° respectivamente,

finalmente se colocaron en la parte superior de cada tubo; las toberas se sujetaron con el tornillo centrador al contenedor de aceite. La FIGURA 3.3 muestra las toberas.

3.4.3 Trampa fría.

La trampa fría también se diseñó y construyó en el IFUNAM, está formada por laminillas de cobre sobrepuestas, sujetas a un tubo que es refrigerado por agua. Se notó que la disposición de las laminillas reduce el retroflujo a la cámara. En la FIGURA 3.4 se muestra la trampa fría.

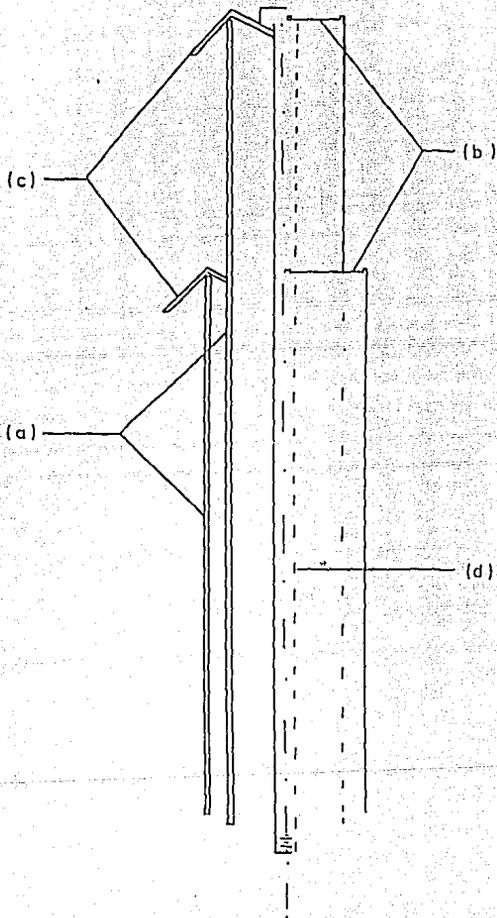
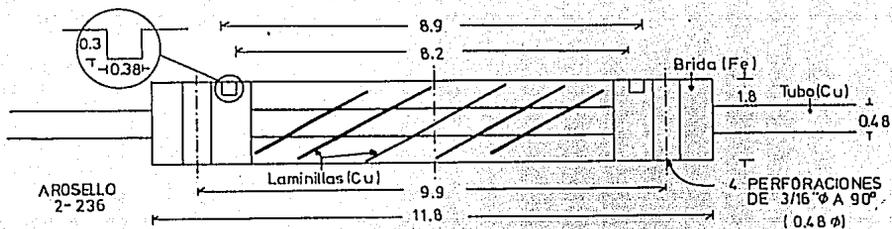


FIGURA 3.3

Toberas: (a) tubos, (b) cavidades, (c) deflectores, (d) tornillo central.

(a)



(b)

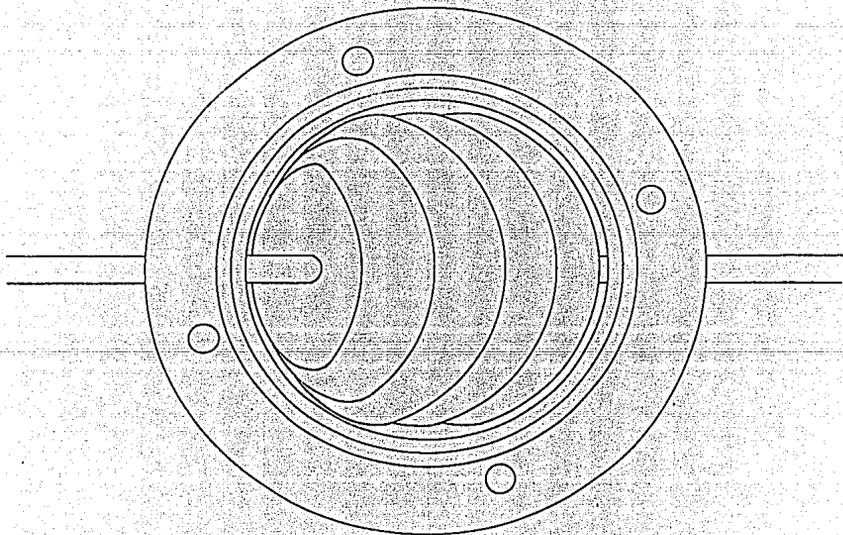


FIGURA 3.4 Esquema de la trampa fría: (a) corte transversal, (b) vista frontal.

CAPITULO 4

PRUEBAS Y CARACTERIZACION

En este capítulo se describe el proceso de desgasificación de la bomba de difusión para después acoplarla a un sistema y detectar las fugas. Finalmente se hace la caracterización y se presentan los resultados así como la curva de bombeo, de presión con respecto del tiempo.

4.1 Limpieza.

El primer factor a considerar es la limpieza de cada uno de los componentes de la bomba, deben estar libres de contaminantes, ya que su presencia impide obtener la presión mínima buscada en el sistema, por lo tanto, hay que pulir el interior del cuerpo y desgrasarlo con acetona y alcohol; los tubos, deflectores y el tornillo de fijación también se debe lavar y desgrasar con acetona y alcohol, al término de la limpieza se introducen las toberas y se sujetan con el tornillo de fijación al contenedor de aceite, una vez terminado el ensamble de la bomba se monta en un sistema de alto vacío y se procede a desgasificarla. La FIGURA 4.1 muestra la bomba de difusión en su conjunto.

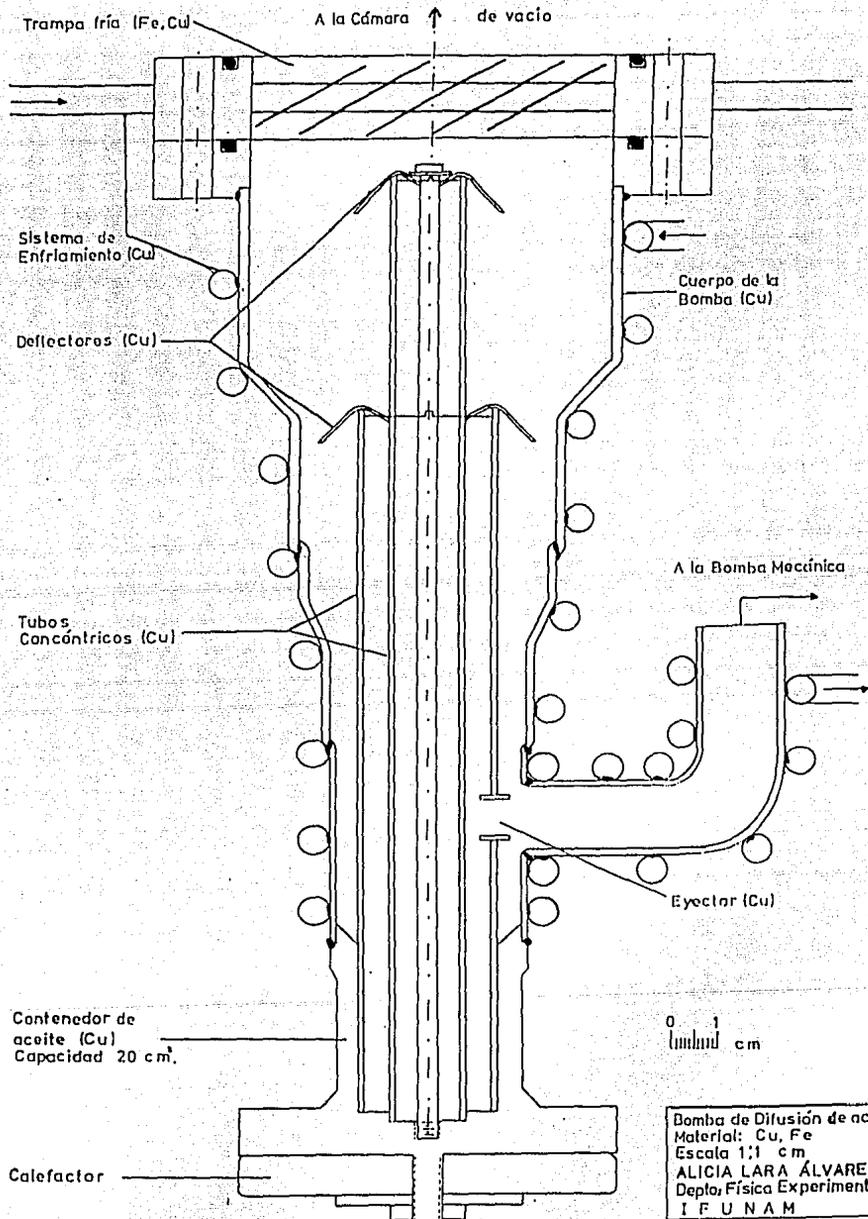


FIGURA 4.1 Esquema de la bomba de difusión en conjunto.

4.2 Proceso de desgasificación.

El siguiente objetivo es desgasificar la bomba de difusión, para tal caso se toma la bomba como si fuera una cámara a la cuál se le va a hacer alto vacío por medio de un sistema formado por una bomba de difusión (Leybold-Herause), una bomba mecánica (Leybold-Herause), medidores de vacío y una trampa fría.

El proceso de desgasificación es el siguiente:

El sistema con bombeo mecánico se llevó a cabo por 12 horas y se registró una presión de $1 \cdot 10^{-3}$ Torr; con el vacío previo se evacuó el sistema al alto vacío con la bomba de difusión y al obtener una presión del orden de 10^{-6} Torr, se gasificó la pared de la cámara al calentarla con una cinta calefactora, colocada a su alrededor, durante 30 minutos a 200°C , después se desgasificó por 2 horas más y la presión final fue de $1 \cdot 10^{-6}$ Torr. Al término de este proceso, se desmonta la cámara y se cubre la entrada y salida para tener la mínima contaminación.

4.3 Montaje de la bomba.

Se hizo el montaje de la bomba de difusión a un sistema para su prueba. El sistema estuvo integrado por una bomba mecánica FELI-WELCH 1405, la bomba de difusión a probar; la trampa fría; la tapa que contiene los medidores de bajo y alto vacío, (termopar y Bayard-Alpert, respectivamente), y accesorios.

MECANISMO DE MONTAJE.

En la entrada de la bomba de difusión se colocaron la trampa fría y la tapa con sus respectivos arosellos lubricados con grasa

DOW CORNING (APENDICE B), en el puerto de salida se conectó la bomba mecánica por medio de una manguera para vacío, el serpentín de enfriamiento está alimentado por agua, al igual que la trampa fría; la resistencia está en la base del cuerpo conectada a una fuente variable. En la parte externa y a la altura de la base está colocado un termopar tipo K (CROMEL-NIQUEL). Los atravesadores de la tapa tienen conectado otro termopar tipo K (CROMEL-NIQUEL), que registra la temperatura del aceite. [Peacock, 1983] La FIGURA 4.2 muestra el diagrama del sistema de vacío.

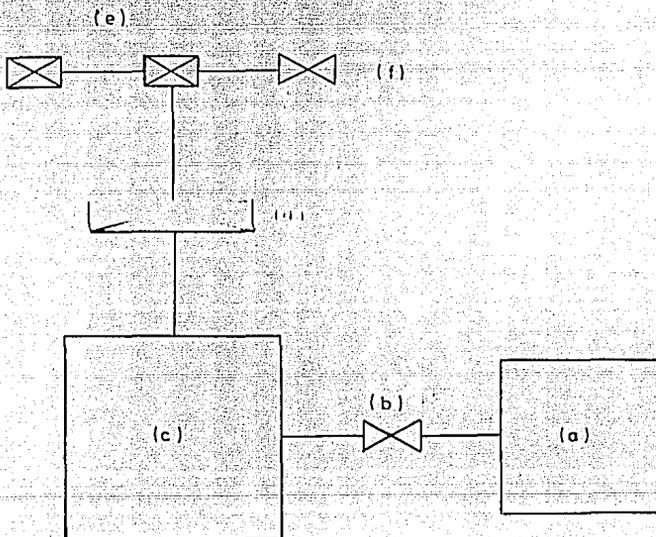


FIGURA 4.2

Diagrama del sistema de vacío. (a) Bomba mecánica; (b) Válvulas; (c) Bomba de difusión; (d) Trampa fría; (e) Medidores: termopar y de ionización (Bayard-Alpert); (f) Válvula de admisión.

4.3.1 Fugas.

Después del montaje de la bomba, se realizó la detección de fugas, el método de localización fue el siguiente: en el intervalo de bajo vacío, al lograr una presión mínima, se aplicó acetona en los lugares susceptibles de fuga, como uniones con soldadura, uniones con arosellos, atravesadores y cuerdas; si se observa alguna variación en la lectura del termopar hay fuga, éstas al estar bien localizadas se corrigieron de acuerdo a su ubicación.

4.3.2 Intervalo de operación.

En la bomba de difusión se vertieron 18 cm^3 de aceite y después del vacío previo se calentó el aceite, las temperaturas del aceite y la base de la bomba se registraron con los dos termopares tipo K (CROMEL-NIQUEL). Al inicio de éste proceso de calentamiento hubo una variación en la presión y al aumentar la temperatura del aceite hasta su punto de ebullición disminuyó la presión, ésto significó que la bomba de difusión comenzó a trabajar. La presión final fue del orden de 10^{-5} Torr.

4.4 Caracterización.

Para el desarrollo de la bomba de difusión se consideraron los siguientes factores:

Dimensiones reducidas.

Mínimo volumen de aceite.

Material de fácil adquisición (comercial).

Bajo costo.

Dimensiones reducidas. Debido a que se planeó el desarrollo de esta bomba para construir tubos de rayos-X, vistas como cámaras de dimensiones pequeñas, se puede considerar que se necesita un sistema de alto vacío para evacuar volúmenes pequeños.

Mínimo volumen de aceite. Como se recordará, el aceite que se utiliza en este tipo de bombas tiene características especiales, los hay de diferentes tipos que varían de acuerdo a los requerimientos de las bombas y al volumen de las mismas. Para estas pruebas, se utilizaron dos tipos de aceite, DC-704 y DIFFOIL-20, (APENDICE B).

Material de fácil adquisición. El material que se eligió para la construcción de la bomba de difusión fue de cobre (comercial), debido a que es maquinable y de fácil adquisición, se han fabricado bombas de difusión de cobre y sólo se han utilizado en laboratorios para evacuar volúmenes pequeños; para la utilización de este material se debe hacer un tratamiento de desgasificación o utilizar cobre tipo OFHC.

Bajo costo. Considerando el costo de la construcción de un equipo de vacío, es necesario hacer la evaluación de los materiales a emplear; en este trabajo para la construcción de la bomba se utilizó el cobre, que es de fácil manejo, adquisición, y bajo costo.

Los materiales y la técnica de soldadura que se emplearon para la construcción de la bomba de difusión, permiten predecir la presión última que alcanzará el sistema.

4.5 Resultados.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos experimentalmente al usar dos tipos de aceite, DC-704 y DIFFOIL-20, se utilizaron resistencias de 650 Watts a 120 volts y 400 Watts a 120 volts, respectivamente. Al graficar los datos de presión en función del tiempo, resulta la curva de bombeo.

La FIGURA 4.3 muestra la curva de bombeo de la bomba; al efectuar el bombeo mecánico, la curva presentó un descenso exponencial ($P = P_0 \cdot \exp((s/v) \cdot t)$), llegando hasta la presión de $1 \cdot 10^{-3}$ Torr; al poner en operación la bomba de difusión, se registró un aumento de presión debido a la alimentación de la resistencia, incrementando el voltaje mediante una fuente variable, fue por la gasificación de las paredes y los vapores atrapados en el manejo del sistema, al llegar el aceite a su temperatura de trabajo comenzó a bombear, consiguiendo bajar nuevamente la presión, la curva muestra una meseta; la presión siguió disminuyendo hasta llegar al orden de 10^{-5} Torr; puede decirse que la bomba de difusión comenzó a trabajar cuando pudo disminuir la presión alcanzada por la bomba mecánica.

La curva presentada con el símbolo (+) representa la curva de bombeo para el aceite DC-704, la presión última fue de $3 \cdot 10^{-5}$ Torr y se realizó en 140 minutos.

La curva presentada con el símbolo (*) corresponde a la curva de bombeo para el aceite DIFFOIL-20, la presión última fue de $7 \cdot 10^{-5}$ Torr y se realizó en 165 minutos.

La diferencia entre ambas curvas es debido a varios factores: el calentamiento de la resistencia fue gradual, el punto de trabajo de cada aceite es diferente, la gasificación producida por las uniones, medidores, accesorios, y, principalmente la soldadura y el tipo de material que se utilizó para su construcción, hicieron que este sistema estuviera desgasificando constantemente.

VELOCIDAD DE BOMBEO.

Primero se determina el claro de la entrada de la bomba a partir de la ecuación (2.1); si $D = 7.6$ cm y $t = 3.1$ cm, entonces:

$$A = 37.82 \text{ cm}^2$$

La razón de flujo máximo se calcula a partir de la ecuación (2.2); para el aire, a $T = 20^\circ\text{C}$, se obtiene:

$$S_{\text{max}} = 440 \frac{\text{lt}}{\text{seg}}$$

La razón entre la entrada de la bomba y el tamaño de la garganta es del orden de 3, es decir, $t = \frac{D}{3}$

Supóngase que el valor de el Factor-H está en el mínimo, es decir, $H = 0.3$

La velocidad de bombeo esta dada por la ecuación (2.4); si $H = 0.3$ y $S_{\text{max}} = 440 \frac{\text{lt}}{\text{seg}}$, se obtiene:

$$S = 135 \frac{\text{lt}}{\text{seg}}$$

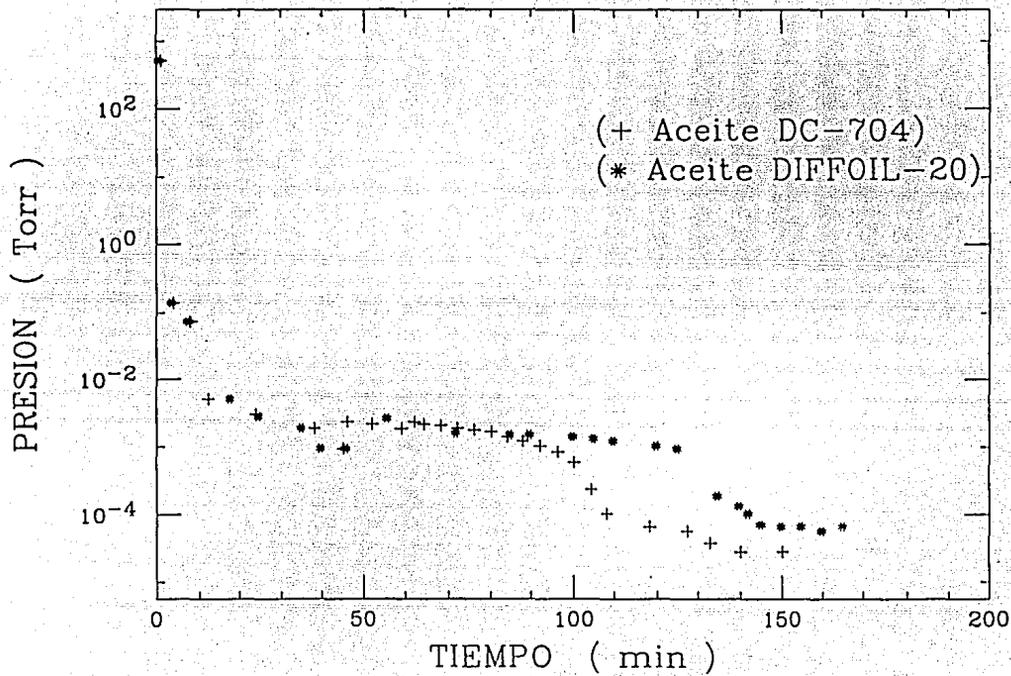


FIGURA 4.3 Curva de bombeo de la presión en función del tiempo: 1. Aceite DC-704; 2. Aceite DIFFOIL-20.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó y construyó la bomba de difusión de aceite, a partir de los resultados obtenidos, se presentan las conclusiones y sugerencias.

Se desarrolló un prototipo de bomba de difusión y se construyó a partir de piezas de cobre prefabricadas, la unión de estas piezas se hizo con soldadura de plata (1020), que contribuye a la desgasificación.

En las primeras pruebas la bomba se desgasificó al bajo vacío, esto no fue suficiente para continuar las pruebas al alto vacío; se requirió un tratamiento de desgasificación al alto vacío, al término de éste se continuó con la evacuación del sistema, obteniendo mejores resultados al efectuar el bombeo mecánico.

Para realizar la prueba con el aceite DC-704 se utilizó una resistencia comercial de 650 Watts a 120 volts, debido a su temperatura de trabajo que es de 215°C, al llegar a esa temperatura comenzó a disminuir la presión, fue cuando la bomba empezó a ser eficiente.

Para el aceite Diffoil-20 se utilizó una resistencia de 400 Watts a 120 volts, al llegar el aceite a su temperatura de trabajo se observó un descenso en la presión.

La cantidad de aceite que se utilizó para las primeras pruebas fue de 18 cm³ y el volumen final de 17 cm³, esta cantidad no puede asegurarse que sea la adecuada pues el depósito de aceite no aceptaba más de 20 cm³.

Al término de su operación, se verificó que el aceite realmente haya evaporado y además si ascendió por los tubos, resultó cierto al encontrar aceite condensado en el interior de las paredes de los tubos, en el cuerpo y en la trampa fría.

En vista de lo anterior, sugiero que para la construcción de la bomba, el cuerpo sea de acero y las toberas de aluminio, debido a que el cobre requiere de un tratamiento de desgasificación, o bien utilizar Cu OFHC.

El depósito de aceite debe tener mayor capacidad para hacer pruebas con diferentes volúmenes y determinar la cantidad óptima.

La resistencia se puede conectar a la línea de voltaje normal (120 volts), se recomienda utilizar las de tipo comercial; por ejemplo, de 400 Watts a 120 volts.

Se recomienda utilizar un aceite con temperatura de trabajo menor a los 200°C , ya que el cobre recristaliza a esa temperatura.

La resistencia cuente con una capucha para que el calor se concentre en la base.

APENDICE A

CALCULO PARA LA CONSTRUCCION DEL CUERPO A PARTIR DE MOLDES DE FIERRO

En la construcción de los moldes, al intentar la deformación del tubo de cobre, fue necesario conocer los esfuerzos que se aplican en los materiales, por lo tanto, se hicieron algunos cálculos de resistencia de materiales:

(a) *Cálculo de los moldes para el cuerpo de la bomba.*

La fuerza que se ejerce en el centro, con diámetro D_1 , se obtiene al emplear la ecuación:

$$F = P A = 5\ 000\ \text{kg} \quad (\text{A.1})$$

donde A es el área del círculo mayor y P la presión del aceite.

Para calcular el espesor mínimo que debe tener la pared del molde a la altura del diámetro D_1 , se emplea la ecuación:

$$\sigma = \frac{P d}{2 e} \quad (\text{A.2})$$

donde σ es el esfuerzo de tensión a la ruptura, P la presión, $d=D_1$ el diámetro y e el espesor. De la ecuación (A.2) se obtiene:

$$e = 0.3\ \text{cm}$$

(b) *Cálculo de los moldes de las tapas.*

La fuerza que debe soportar cada tapa está dada por la ecuación (A.1), al sustituir se obtiene:

$$F = 1\ 620\ \text{kg}$$

La fuerza en la tapa se sostiene por medio de tornillos y cada uno soporta:

$$F/6\text{tor} = 270\ \text{kg/tor}$$

El esfuerzo de tensión para cada tornillo está dada por la ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{A.3})$$

Si $F = 270 \text{ kg}$ y A es el área transversal del tornillo, entonces:

$$\sigma = 960 \text{ kg/cm}^2$$

Para el diseño de alojamientos se utiliza la relación:

$$1.18 A_o = A_n \quad (\text{A.4})$$

donde $A_o = \frac{\pi w^2}{4}$ y $A_n = l_1 l_2$, áreas del arosello de grosor w y de la caja de lados l_1 y l_2 , respectivamente, w diámetro del arosello, por tanto, la caja para el arosello tiene las dimensiones:

$$l_1 = 0.3 \text{ cm} \quad l_2 = 0.385 \text{ cm}$$

(c) *Cálculo de los moldes de las bridas.*

Las bridas soportan la fuerza que se aplica en el centro del molde, se sujeta con tornillos y cada uno resiste una carga de:

$$F/8 \text{ tor} = 630 \text{ kg}$$

El esfuerzo de tensión en el tornillo está dado por la ecuación (A.3), por lo tanto:

$$\sigma = 1.000 \text{ kg/cm}^2$$

Para el equilibrio entre los esfuerzos de compresión y tensión que actúan en la brida, se emplea la relación:

$$C = \tau = \frac{M h}{2 I} \quad (\text{A.5})$$

donde C esfuerzo de compresión, τ esfuerzo de tensión, M momento flexionante, h altura de la brida e I momento de inercia, al sustituir se obtiene:

$$\sigma = 230 \text{ kg/cm}^2$$

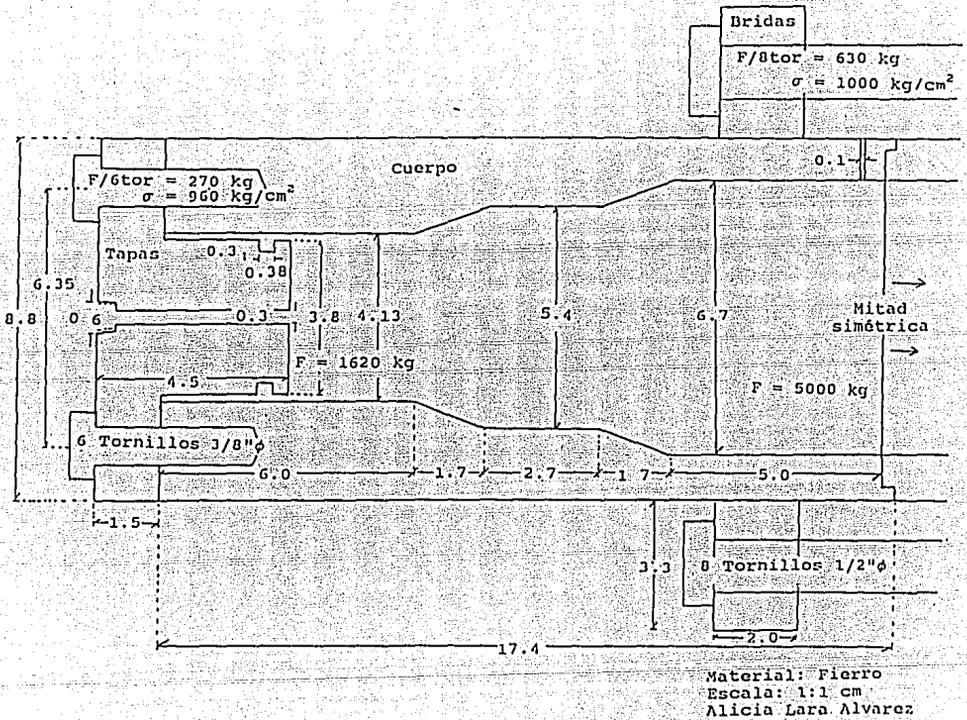


FIGURA A.1 Se muestra el corte transversal del molde completo para el cuerpo de la bomba.

APENDICE B

CARACTERISTICAS

En este apéndice se dan las características de algunos componentes utilizados en este trabajo.

Arosellos.

Los arosellos son medidos por su sección o grueso (W) y su diámetro interior (D.I.).

| W | 0.139" ± 0.004 pulg. | | | | |
|---------------|----------------------|-------|----------------------|--------|-----|
| | 3.530 ± 0.100 mm. | | | | |
| Número Parker | Pulg. | mm. | Nominales (Pulgadas) | | |
| | (Exactas) | | | | |
| | D.I. | D.E. | D.I. | D.E. | W |
| 2-219 | 1.296 | 32.92 | 1 5/16 | 1 9/16 | 1/8 |
| 2-236 | 3.234 | 82.14 | 3 1/4 | 3 1/2 | 1/8 |

Grasa.

DOW CORNING DC 976.

| Material | Presión | Temp. | Punto de Fusión |
|----------|-----------|-------|-----------------|
| Silicón | 10^{-6} | 20°C | 215°C |

Aceites sintéticos.

| DATOS TECNICOS | | DIFFOIL-20 | DC-704 |
|----------------------------|--------|-------------------|-------------------|
| Presión de vapor (Torr) | a 25°C | $1 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-8}$ |
| Temperatura de ebullición | °C | 143 | 215 |
| Temperatura de degradación | °C | 249 | 221 |
| Temperatura de combustión | °C | 269 | |

Bomba Mecánica.

Feli-Welch 1405

| | | |
|---------------------------|------|-------------------|
| Presión mínima | Torr | $1 \cdot 10^{-4}$ |
| Potencia del motor | HP | 1/2 |
| Rapidez del motor | rpm | 1725 |
| Rapidez de giro de bombeo | rpm | 525 |
| Capacidad de aceite | lts | 1 |

Soldadura de plata (1020).

| | | |
|------------------------|----------------------------------|-----|
| Temperatura de fusión | °C | 960 |
| Temperatura de fluidez | °C | 960 |
| Composición | % | 100 |
| Fundente | Cl ₂ , H ₂ | |

[Tecnología, 1982]

Torr Seal. (Resina)

| | | |
|------------------------|------|-------------------|
| Presión de trabajo | Torr | 10^{-9} o menos |
| Temperatura de trabajo | °C | -45 a 120 |

[Catálogo Varian, 1991]

REFERENCIAS

[Roth, 1978]

A. Roth; *Vacuum Technology*. North Holland, Amsterdam, 1978.

[O'Hanlon 1978]

F.J. O'Hanlon; *A User's Guide to Vacuum Technology*. Wiley New York, 1978.

[Dushman, 1966]

Saul Dushman; *Scientific Foundations of Vacuum Technique*. Wiley, New York, 1966.

[Notas, 1972]

Técnicas de Vacío; *Notas*. Instituto de Física, Lab. Van de Graaff, UNAM, 1972.

[Guthrie, 1949]

A Guthrie and R. K. Wakerling; *Vacuum Equipment and Techniques*. McGraw-Hill, New York, 1949.

[Kaminsky, 1980]

M. S. Kaminsky and J. M. Lafferty; *Dictionary of Terms Vacuum Surface Science*. A. V. S. American Institute of Physics, New York, 1980.

[Hablanian, 1972]

M. H. Hablanian and J. C. Maliakal; *Advances in Diffusion Pump Technology*. *J. Vac. Sci. & Technol.*, 10, 1, 1973.

[Gerhard, 1972]

Lewin Gerhard; *Fundamentos de la Ciencia y Técnica del Vacío*. Aguilar, España, 1972.

[Kare, 1983]

Kare W. R. Johnson; *Curso: Propiedades de materiales para sistemas de vacío*. Otorgado a la Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío A. C., A. V. S., 1983.

[Peacock, 1983]

R. N. Peacock; *Curso: Técnicas de Unión para Vacío*. Otorgado a la Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío A. C., A. V. S., 1983.

[Catálogo, 1991]

Catálogo; *Vacuum by Varian*. Lexington, Massachusetts, 1990/1991.