

© Fondo de Cultura Económica

EL VACÍO Y SUS APLICACIONES

Autor: LAURA TALAVERA / MARIO FARÍAS

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [PREFACIO](#)
- [INTRODUCCIÓN](#)
- [I. EL PRINCIPIO DEL VACÍO](#)
- [II. LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA](#)
- [III. LA NECESIDAD DE HACER VACÍO](#)
- [IV. LOS DISPOSITIVOS PARA HACER VACÍO](#)
- [V. LOS MEDIDORES](#)
- [VI. LAS CÁMARAS, LOS SELLOS Y LAS VÁLVULAS PARA VACÍO](#)
- [VII. LAS APLICACIONES DE LAS TÉCNICAS DE VACÍO](#)
- [APÉNDICE A](#)
- [APÉNDICE B](#)
- [APÉNDICE C](#)
- [BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Inicio



EDICIONES

Primera edición, 1995

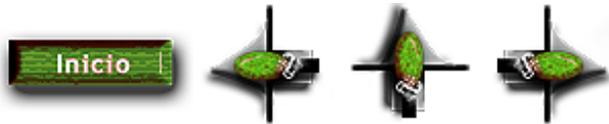
La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-4734-3

Impreso en México



PREFACIO

De manera lúcida y amena, Mario Farías y Laura Talavera presentan en este libro parte importante de las numerosas aplicaciones que tienen las tecnologías del bajo, alto y ultra alto vacío.

El vacío ha preocupado a los hombres desde hace miles de años. Demócrito (que nació en 470 a.C.) desarrolló la teoría atómica de la materia que consideraba al Universo formado por átomos y vacío. Epicuro (nacido en Grecia en 342 a.C.) nos dice que para producir el vacío basta separar con rapidez dos cuerpos planos que están bien unidos. Este fue el principio de los metalúrgicos de Egipto, el Cáucaso y China al inventar los fuelles y los pistones, con los que absorbían el aire y después lo comprimían al presionar el fuelle para así activar el fuego y producir las altas temperaturas necesarias para fundir el bronce y el hierro.

El descubrimiento de nuevos materiales ha cambiado la historia del mundo. La historia se divide en la Edad de la Piedra, la Edad del Bronce y la Edad del Hierro. En la actualidad son muchos los materiales de que disponemos, entre los que podemos mencionar el silicio, en el que se basa la electrónica, las cerámicas, el petróleo y los plásticos. En todos estos casos la tecnología del vacío tiene un papel fundamental.

En este libro, los autores nos describen con claridad las componentes que se emplean para producir el vacío así como algunas de las aplicaciones importantes de esta tecnología, que ha cambiado y continuará cambiando nuestro mundo.

FERNANDO ALBA ANDRADE



INTRODUCCIÓN

Cuando uno trata de imaginar el vacío, lo primero que viene a la mente son las regiones interestelares, en donde prácticamente no hay materia entre una galaxia y otra. Quizá pensemos así porque tenemos la idea de que en el vacío no existe nada, pero técnicamente se denomina vacío al lugar donde la presión que se mide es menor que la presión atmosférica normal. Hay diferentes clases de vacío: grueso o primario, medio, alto y ultra alto, y en cada caso, la presión es cada vez menor (o el vacío es cada vez más alto). Cada régimen de vacío tiene un comportamiento diferente, y sobre todo, un cierto tipo de aplicaciones, que son las que hacen del vacío algo tan importante.

Existe gran variedad de usos del vacío que son de importancia para muchas industrias y desarrollos tecnológicos, para la ciencia y para la vida diaria. El vacío se aprovecha en diversas industrias, que van desde la alimenticia hasta la automovilística, la aviación, la obtención de medicamentos, etc. Se puede decir que el área de influencia del vacío afecta a la mayoría de las industrias, lo cual le da un lugar preeminente en el desarrollo tecnológico de un país.

Hoy en día no podríamos imaginar un mercado sin productos enlatados, una casa sin focos, o la vida sin la radio o la televisión. ¿Dónde quedaría el avance médico sin el equipo de esterilización?, éstos y muchos otros productos requieren el uso del vacío en su proceso de fabricación.



I. EL PRINCIPIO DEL VACÍO

LOS filósofos griegos consideraban que *el vacío* significaba *falto de contenido* y esto fue un obstáculo para el entendimiento de los principios tecnológicos básicos del mismo.

Fue hasta mediados del siglo XVII cuando el italiano Gasparo Berti realizó el primer experimento con el vacío (1640). Motivado por un interés en diseñar un experimento para el estudio de los sifones, Berti pretendía aclarar el fenómeno como una manifestación de diferencia de presión de aire en la atmósfera. Creó lo que constituye, primordialmente, un barómetro de agua, el cual resultó capaz de producir vacío (Figura I.1).

Al analizar el informe experimental de Berti, Evangelista Torricelli captó con claridad el concepto de presión de aire, por lo que diseñó, en 1644, un dispositivo para demostrar los cambios de presión en el aire. Construyó un barómetro que en lugar de agua empleaba mercurio, y de esta manera, sin proponérselo, comprobó la existencia del vacío (Figura I.2).

El barómetro de Torricelli constaba de un recipiente y un tubo lleno de mercurio (Hg) cerrado en uno de sus extremos. Al invertir el tubo dentro del recipiente se formaba vacío en la parte superior del tubo. Esto era algo difícil de entender en su época, por lo que se intentó explicarlo diciendo que esa región del tubo contenía vapor de mercurio, argumento poco aceptable ya que el nivel de mercurio en el tubo era independiente del volumen del mismo utilizado en el experimento.

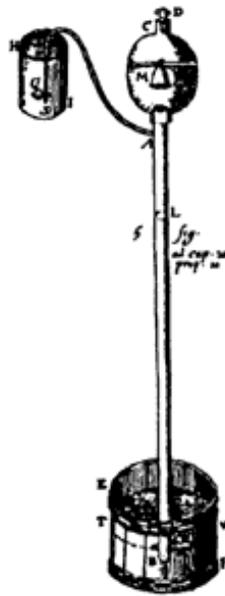


Figura I.1. Equipo que utilizó Berti para producir por primera vez vacío, alrededor de 1640.

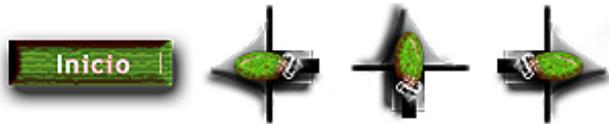
La aceptación del concepto de vacío se dio cuando en 1648, Blas Pascal, cuñado de Torricelli, subió un barómetro con 4 kg de mercurio a una montaña a 1 000 m sobre el nivel del mar. Sorprendentemente, cuando el barómetro estaba en la cima, el nivel de la columna de Hg en el tubo era mucho menor que al pie de la montaña. Analicemos lo sucedido.

Torricelli aseguraba la existencia de la presión de aire y decía que debido a ella el nivel de Hg en el recipiente no descendía, lo cual hacía que el tamaño de la columna de mercurio permaneciera constante dentro del tubo. Así pues, al disminuir la presión del aire en la cima de la montaña, el nivel de Hg en el recipiente subió y en la columna dentro del tubo bajó inmediatamente (se vació de manera parcial) (Figura I.2).



Figura I.2. Barómetro construido por Torricelli en 1644.

El paso final que dio Torricelli fue la construcción de un barómetro de mercurio que contenía en la parte vacía del tubo, otro barómetro para medir la presión de aire en esa región. Se hicieron muchas mediciones y el resultado fue que no había una columna de Hg en el tubo del barómetro pequeño porque no se tenía presión de aire. Esto aclaró que no existía vapor de mercurio en la parte vacía del tubo. Así, se puso en evidencia la presión del aire y, lo más importante, la producción y existencia del vacío.



Inicio

II. LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

SABEMOS que la presión atmosférica es la que ejerce la atmósfera o aire sobre la Tierra. A temperatura ambiente y presión atmosférica normal, un metro cúbico de aire contiene aproximadamente 2×10^{25} moléculas en movimiento (2×10^{25} es igual a 2 con 25 ceros) a una velocidad promedio de 1 600 kilómetros por hora.

Una manera de medir la presión atmosférica es con un barómetro de mercurio, su valor se expresa en términos de la altura de la columna de mercurio de sección transversal unitaria y 760 mm de alto. Con base en esto decimos que una atmósfera (atm) estándar es igual a 760 mm Hg (milímetros de mercurio). Utilizaremos por conveniencia la unidad *Torricelli* (torr) como medida de presión; 1 torr = 1 mm Hg, por lo que 1 atm = 760 torr; por lo tanto 1 torr = $1/760$ de una atmósfera estándar, o sea 1 torr = 1.36×10^{-3} atm (1×10^{-3} es igual a 0.001 o igual a un milésimo).

El aire está compuesto por varios gases, los más importantes son el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2), pero también contiene en menores concentraciones: bióxido de carbono (CO_2), argón (Ar), neón (Ne), helio (He), criptón (Kr), xenón (Xe), hidrógeno (H_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y vapor de agua (H_2O).

De acuerdo con la definición de la Sociedad Americana de Vacío (1958), el término *vacío* se refiere a cierto espacio lleno con gases a una presión total menor que la presión atmosférica, por lo que el grado de vacío se incrementa en relación directa con la disminución de presión del gas residual. Esto significa que en cuanto más disminuyamos la presión, mayor vacío obtendremos, lo que nos permite clasificar el grado de vacío. Entonces, podemos hablar de bajo, mediano, alto y ultra alto vacío, en correspondencia con intervalos de presiones cada vez menores. Cada intervalo tiene características propias.

1) *Bajo y mediano vacío*. El intervalo de presión atmosférica con estas características se manifiesta desde un poco menos de 760 torr hasta 10^{-2} torr. Con las técnicas usuales para hacer vacío (que se describen más adelante), los gases que componen el aire se evacúan a diferentes velocidades y esto altera la composición de gases del aire residual.

2) *Alto vacío*. El intervalo de presión se extiende desde cerca de 10^{-3} hasta 10^{-7} torr. La composición de gases residuales presenta un alto contenido de vapor de agua (H_2O).

3) *Ultra alto vacío*. El intervalo de presión va desde 10^{-7} hasta 10^{-16} torr. Las superficies internas del recipiente se mantienen *limpias* de gas. En este intervalo el componente dominante de los gases residuales es el hidrógeno.



III. LA NECESIDAD DE HACER VACÍO

EXISTEN diversas razones prácticas por las que es conveniente hacer vacío, a continuación referimos algunos casos:

- 1) La aspiradora es uno de los ejemplos más sencillos de sistemas que emplean vacío. Se usa para succionar objetos de varias decenas de gramos. Por lo general las aspiradoras son capaces de trabajar a una presión de 100-150 torr por debajo de la presión atmosférica del lugar (650-600 torr a nivel del mar).
- 2) La tecnología de vacío es utilizada para extraer la humedad de los alimentos, químicos, productos farmacéuticos, etc., y los gases ocluidos (disueltos) en aceites plásticos, y otros líquidos.
- 3) La producción de jugo de frutas y leche concentrada, son ejemplos de producciones a gran escala basadas en la concentración en vacío, para lo cual no se requiere de alta temperatura para evaporar el agua o solventes contenidos en los productos.
- 4) Para remover los constituyentes de la atmósfera que pudieran causar una reacción física o química, como puede ser la oxidación, durante un cierto proceso, por ejemplo, la fundición en vacío de metales reactivos como el titanio.
- 5) Para modificar una cierta condición de equilibrio que existe en condiciones ambientales normales, como para remover gas disuelto u ocluido o líquido volátil de la parte interna de un material, por ejemplo, en procesos de secado al vacío.
- 6) Para aumentar la distancia que un átomo, molécula o electrón debe viajar antes de chocar con otro, lo cual ayuda a que en un cierto proceso las partículas se muevan sin colisión entre la fuente y el blanco, por ejemplo, en recubrimientos al vacío, aceleradores de partículas, cinescopios de televisión y monitores de computadoras.
- 7) Para reducir el número de impactos de las moléculas del gas ambiental con una cierta superficie preparada en vacío, por ejemplo, en la preparación de películas delgadas puras, o en estudios de superficies limpias.
- 8) Para la producción de nuevos materiales y para el enriquecimiento o la separación de los isótopos de los elementos.



IV. LOS DISPOSITIVOS PARA HACER VACÍO

LOS egipcios y los chinos, con el invento del fuelle con válvulas para inyectar aire a los hornos, hacían vacío sin saberlo: al abrir el fuelle, se llenaba de aire por el vacío que se provocaba dentro de éste.

Viajemos un poco en el tiempo hasta el momento en que apareció la primera bomba de aire. En el siglo XVII, Otto von Guericke hizo una contribución importante a la ciencia con su invención de la bomba de aire, considerada como una de las cuatro invenciones del siglo (los otros inventos fueron: el telescopio, el microscopio y el reloj de péndulo).

Von Guericke adaptó en 1640 a un tonel de madera una bomba de agua, después lo llenó con agua y lo clausuró. Con la ayuda de varios hombres procedió a sacar el agua. El bombeo se prolongó después de vaciado el tonel, lo que causó la precipitación del aire a través de los poros de la madera. Este suceso lo motivó a ocuparse en otro experimento: la fabricación de una esfera de cobre a la que se le podía colocar una bomba. Omitió el agua y bombeó directamente el aire. Cuando había extraído aparentemente todo el aire, la esfera se deformó de manera repentina (sufrió un efecto de compresión) debido a la presión atmosférica.

A partir de estos experimentos llegó a crear la bomba de aire (Figura IV.1). Esta era esencialmente igual a una bomba de agua y tenía válvulas manuales. Contaba con una construcción más cuidadosa ya que estaba herméticamente sellada alrededor del cilindro y las válvulas. En principio, la única diferencia entre tales bombas para crear vacío y las usadas para extraer agua es que el trabajo se realiza jalando en lugar de empujando, con una correspondiente secuencia de válvulas.

El experimento más famoso de Von Guericke fue el llamado de *Los hemisferios de Maydeburgo*, que consistía en un par de semiesferas unidas y dentro de ellas se hacía el vacío. La esfera así formada era separada con gran dificultad por un equipo de ocho caballos en cada lado (Figura IV.2). Este experimento fue presentado ante un pequeño grupo de espectadores cerca de Reichstag, aproximadamente en 1654. Tiempo después el espectáculo se presentó ante el emperador y su corte y alcanzó tal fama que se llevó en exhibición por toda Europa.

Durante largo tiempo, las bombas de vacío no fueron llamadas bombas de vacío. Von Guericke las llamaba jeringas; Boyle, máquinas neumáticas; después el término de bomba de aire fue establecido. El uso de la palabra *bomba* para este invento, en vez de compresor de aire rarificado, se hizo relacionándolo con el agua.



Figura IV.1. Bombas de aire de Von Guericke usada en la demostración en Berlín y Magdeburgo.

En términos generales, la historia del desarrollo de las bombas de vacío puede ser trazada como sigue: primero, se realizó la modificación de las bombas de agua existentes con pistones y válvulas, las cuales dejaron de utilizarse a finales del siglo XIX. Entonces se volvió a un concepto más primitivo de bombas de *pistón* de mercurio líquido. Después se estableció el uso de bombas mecánicas rotatorias, seguidas de adaptaciones de bombas de vapor, turbomaquinaria y, por último, de bombas basadas en fenómenos de ionización, combinación química y adsorción

criogénica.



Figura IV.2. Experimento de hemisferios de Magdeburgo.

TABLA I. Historia de la bombas de vacío

<i>Año</i>	<i>Autor</i>	<i>Descubrimiento</i>
Siglo VIII	Hauskbee y Nollet	Mejoras a la bomba dde Von Guericke
1850	Geissler y Toepler	Bomba de columna de Hg
1865	Sprengel	Bomba de gota de Hg
1905	Wolfgang Gaede	Bomba de vacío o rotatoria
1913	Wolfgang Gaede	Bomba molecular de vacío
1915	Wolfgang Gaede	Bomba de difusión
1916	Irving Langmuir	Condensación-difusión
1923	F. Holweck	Bomba molecular
1935	Wolfgang Gaede	Bomba de balastra
1936	Kenneth Hickman	Bomba de difusión de aceite
1953	Schwartz y Herb	Bomba iónica Bomba criogénica

La tecnología actual del vacío permite obtener vacíos que van desde casi la presión atmosférica hasta 10^{-13} torr mediante una gran variedad de sistemas de bombeo. El dispositivo conveniente para hacer vacío depende de cuál sea la aplicación que se le quiera dar.

PARÁMETROS Y CLASIFICACIONES DE LAS BOMBAS DE VACÍO

La selección de la bomba de vacío que va a emplearse para un cierto proceso está definida por sus parámetros específicos, los cuales determinan sus propiedades. Los parámetros más importantes de los sistemas de vacío son: la presión más baja que puede lograr, el intervalo de presión, la velocidad de bombeo, la presión de descarga y el gas residual. Un ejemplo de la utilización de bombas en un sistema típico de alto vacío se ilustra en la figura IV.3.

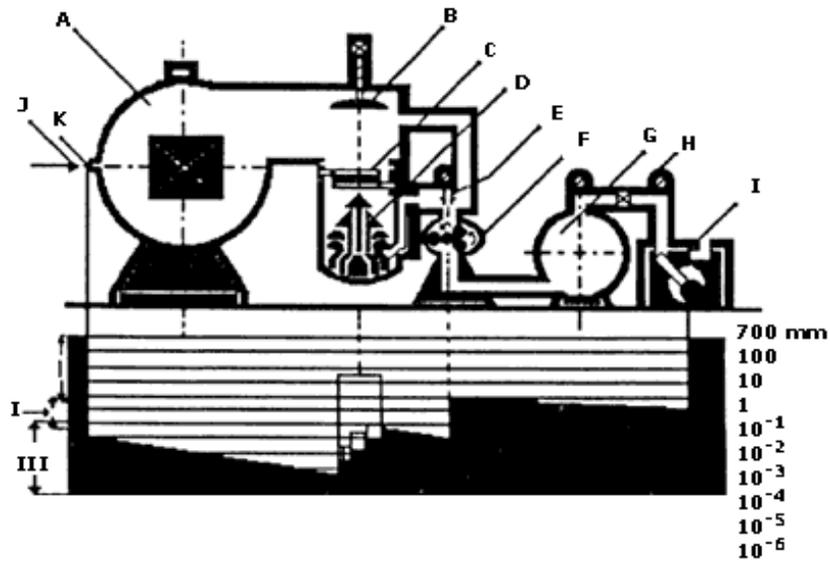


Figura IV.3. Sección transversal esquemática de un sistema industrial de vacío.

Por otra parte, la clasificación de las bombas de vacío se presenta en la figura IV.4 de acuerdo con su intervalo de presión.

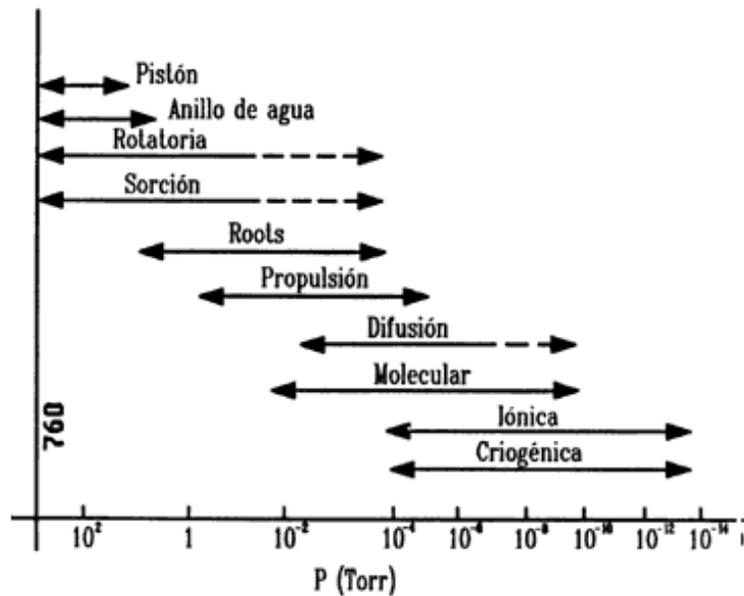


Figura IV.4. Rasgos de presión para bomba de vacío.

DESCRIPCIÓN BREVE DE ALGUNAS BOMBAS DE VACÍO

Las bombas mecánicas. Una de las primeras fue la bomba de Sprengel, que hoy en día tiene sólo interés histórico. Fue usada en la primera fábrica de lámparas. Esta bomba se basa en el principio ilustrado en la figura IV.5. Las gotas de mercurio introducidas en el capilar capturan entre ellas burbujas de aire; de esta manera, el sistema evacua el aire del lado del tubo C, llevándolo a través del mercurio hacia la parte de abajo, a la atmósfera.

Hoy en día existen otros tipos de bombas mecánicas como las bombas de pistón, bombas de anillo de agua, bombas de paleta rotatoria, bomba tipo Roots, etc. Las bombas de paleta rotatoria son un ejemplo claro del funcionamiento de este tipo de bombas, éstas consisten en un espacio cilíndrico (estator) que alberga a un cilindro de diámetro menor que gira dentro de él (rotor). En el rotor, las paletas se encuentran sujetas por medio de un resorte.

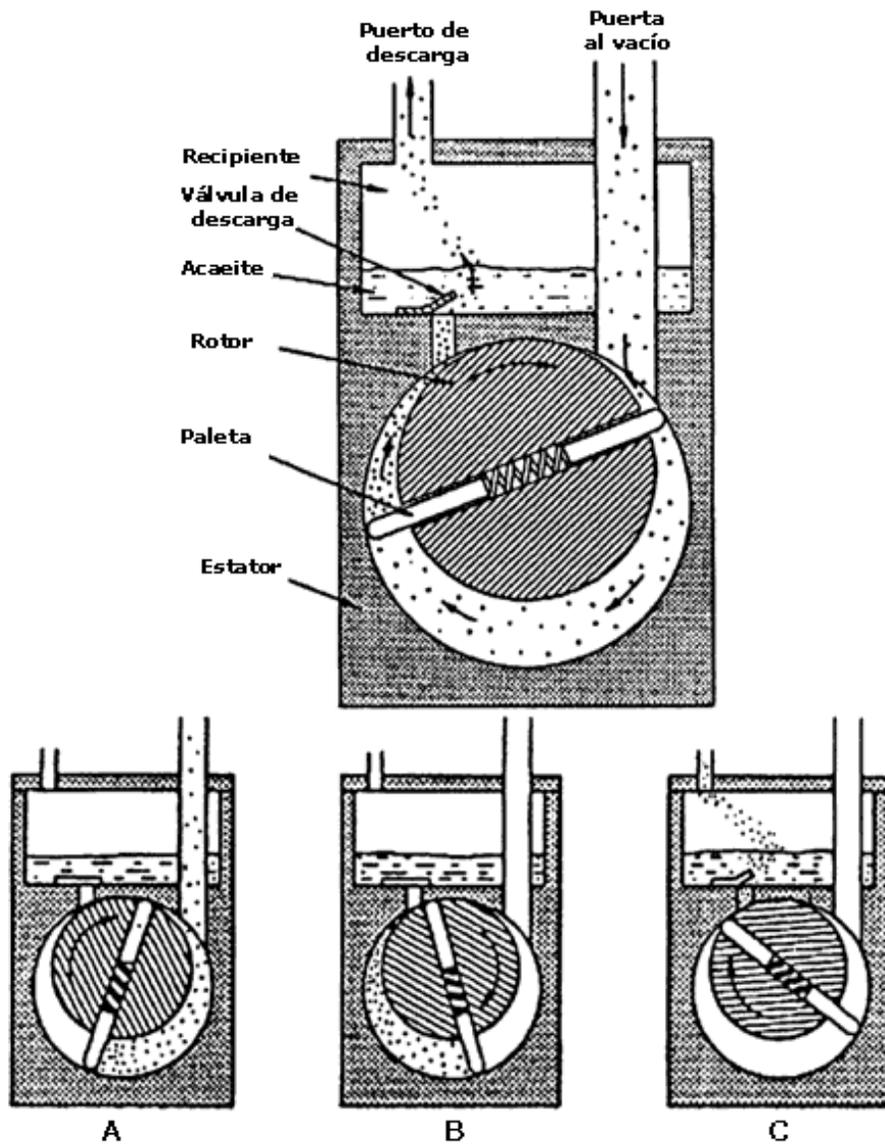


Figura IV.6. Bomba mecánica de paleta rotatotia en acción. *A)* Las paletas deslizantes se mueven cuando el rotor gira. El volumen entre la entrada y la paleta inferior es incrementado; esto causa que el gas se mueva dentro de esta área desde la entrada. *B)* El gas ha sido aislado del sistema de vacío y comienza a empujarse hacia la válvula de descarga. *C)* El gas se comprime ligeramente arriba de la presión atmosférica. La válvula de descarga se abre y el gas es expulsado fuera de la bomba a través del aceite en el recipiente.

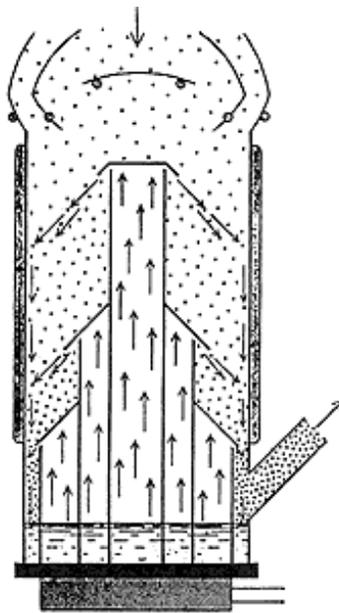


Figura IV.7. Bomba de difusión. El fluido de bombeo se calienta hasta que se evapora mediante un calentador situado al fondo de la bomba. El vapor se eleva y es defluido hacia abajo, trayéndose consigo las moléculas de gas de la cámara (puntos negros).

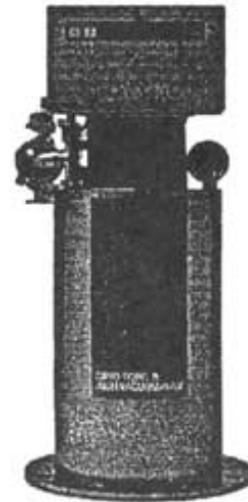
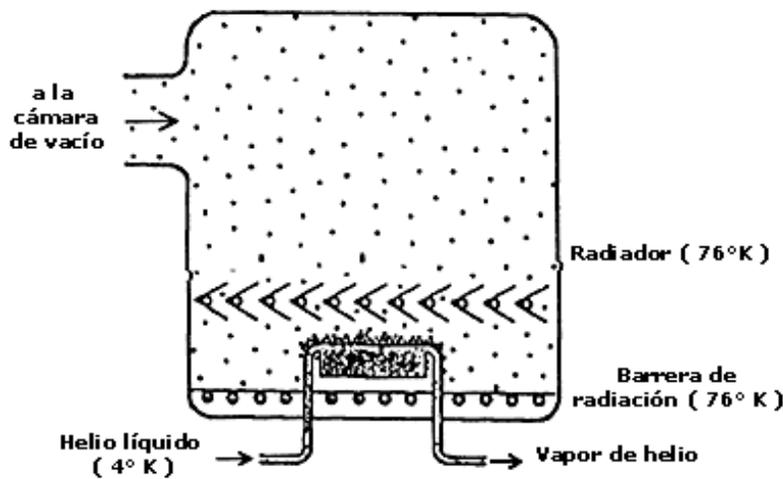


Figura IV.8. Bomba criogénica.

Los aceites usados como fluidos de bombeo están hechos de compuestos a base de silicio y pueden producir presiones del orden de 10^{-7} torr.

Las bombas de mercurio son usadas cuando se quiere evitar contaminación de hidrocarburos que afecten al sistema.

Las bombas criogénicas (de baja temperatura). Se usan en aplicaciones específicas de ultra alto vacío. Una criobomba es una bomba de vacío que tiene una superficie interna enfriada a temperaturas menores a los 120°K , donde los gases y vapores se condensan. En esta superficie se inmovilizan las moléculas de gas, lo cual disminuye la presión del sistema. La superficie fría está colocada dentro de la cámara de vacío.

Existen varios mecanismos mediante los cuales se capturan los gases sobre la superficie fría, los más importantes se pueden representar por medio de las criotampas y la criosorción.

Una trampa de vapor enfriada con nitrógeno líquido actúa como una criobomba. El término criotrampa se usa para la *condensación de gases* difícilmente condensables, por ejemplo el H_2 , Ar, CH_4 , CO_2 , NH_3 y los hidrocarburos pesados.

La criosorción se refiere a la captura de un gas con bajo punto de ebullición (difícil de condensar), efectuada por la adsorción sobre un gas condensado de alto punto de ebullición (fácilmente condensable). Un ejemplo es la criosorción de H_2 sobre un sólido condensado de NH_3 (Figura IV.8).



V. LOS MEDIDORES

A TRAVÉS del tiempo el hombre ha sentido la necesidad de medir y clasificar todo cuanto le rodea, desde las distancias intergalácticas, hasta el tamaño de un átomo. Era de esperarse que después de encontrar el vacío lleno y poder producirlo, el siguiente paso fuera medirlo, con lo cual podría calcularse la cantidad de partículas que se manejarían en el contenedor, y de esta manera controlar la atmósfera adecuada para los propósitos del caso.

En 1643, Evangelista Torricelli fabricó el barómetro de mercurio y tiempo después Otto von Guericke creó la bomba de aire. La combinación de estos dos experimentos fue llevada a cabo antes de 1660 por Robert Boyle, dando como resultado la *máquina boyleana*, que es considerada como el primer medidor de presiones subatmosféricas. Boyle logró obtener una presión de aproximadamente 6 mm Hg (6 torr), y su diseño experimental fue durante dos siglos la única forma disponible para medir vacío (Figura V.1).

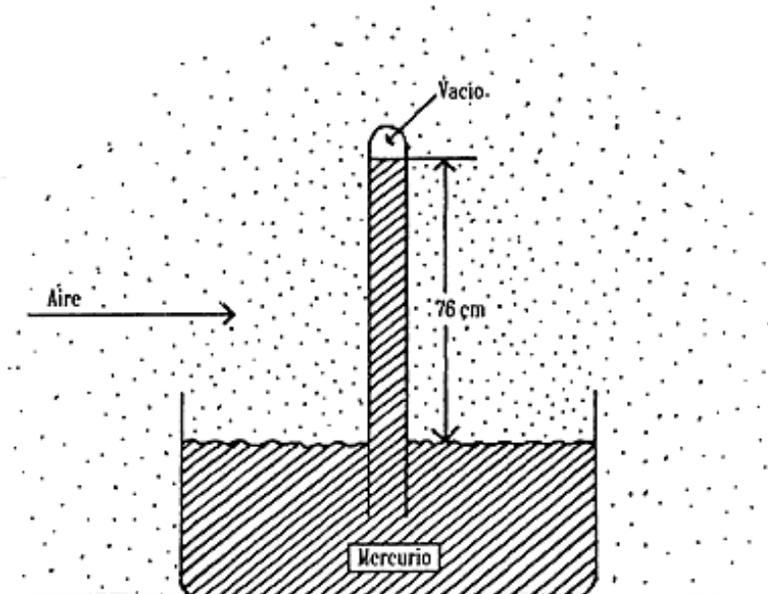


Figura V.1. Medidor de mercurio (Hg) de Boyle. Barómetro de Torricelli cuyo recipiente de Hg estaba al vacío en un vaso de cristal.

La ley de Boyle establece que a bajas presiones, la presión de un gas es inversamente proporcional al volumen cuando la temperatura del sistema se mantiene constante:

$$P \propto (1/V) \text{ o } P = (k / V) \quad (1)$$

donde k es una constante, V el volumen y P la presión.

El siguiente paso significativo en la producción de un medidor óptimo, fue en 1874, cuando McLeod presentó un dispositivo basado en la posibilidad de comprimir el volumen de gas a una proporción conocida. Usando una columna de mercurio, consiguió que las altas presiones pudieran ser medidas con facilidad, mientras que las bajas se podían calcular con la ayuda de la ley de Boyle. Técnicamente, el medidor funciona en un intervalo de 1 a 10^{-6} torr (Figura V.2).

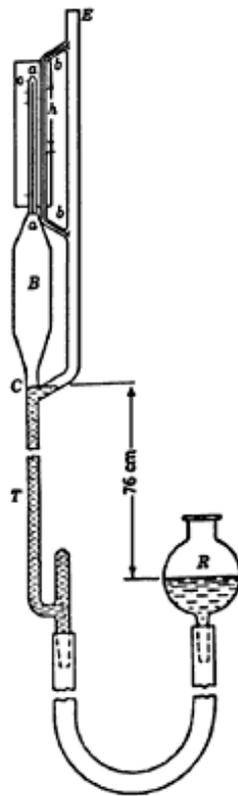


Figura V.2. Medidor de presión de McLeod.

Se ha desarrollado desde entonces otro tipo de medidores de presión; éstos varían no sólo en forma o tamaño, sino sobre todo en el concepto teórico en el cual se basan. Por ejemplo, el medidor de presión creado por Langmuir usa una fibra de cuarzo que debe oscilar en el gas, y la disminución de amplitud en dichas oscilaciones nos da la medida de la presión del gas. Este dispositivo trabaja en un intervalo de presión entre 10^{-2} y 10^{-7} torr (Figura V.3).

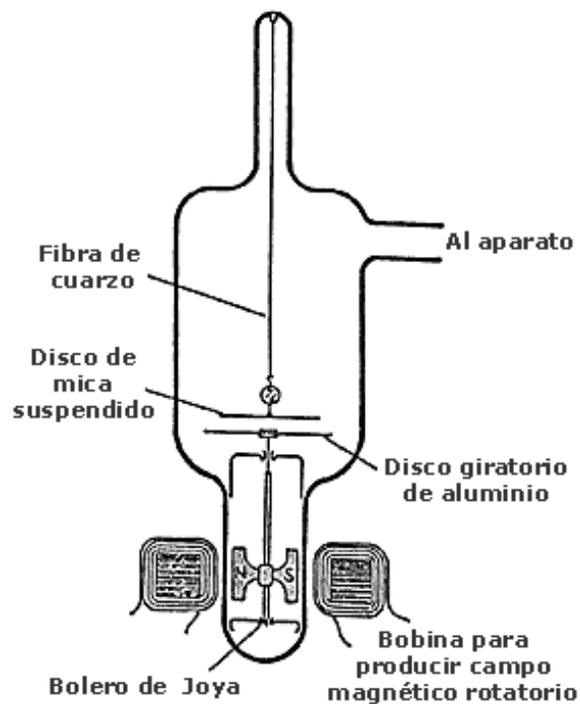


Figura V.3. Medidor de Langmuir.

El medidor de Pirani, diseñado en 1906, nos da una medida de la presión a través de la variación de la conductividad térmica del gas. Este dispositivo consta de un filamento metálico suspendido en un tubo en el

sistema de vacío y conectado a una fuente de voltaje o corriente constante. El alambre puede ser de tungsteno u otro material cuya resistencia varíe mucho con la temperatura. Al aumentar el vacío, se reduce la pérdida de calor por conducción a través del gas y aumenta la temperatura y la resistencia del conductor, que se mide con un aparato adecuado (Figura V.4). En el apéndice A se describen mayores detalles históricos y tecnológicos.

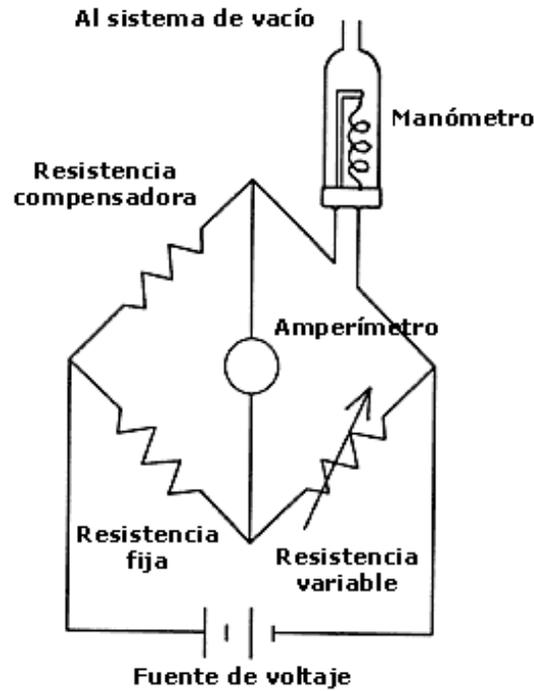


Figura V.4. Medidor de Pirani.

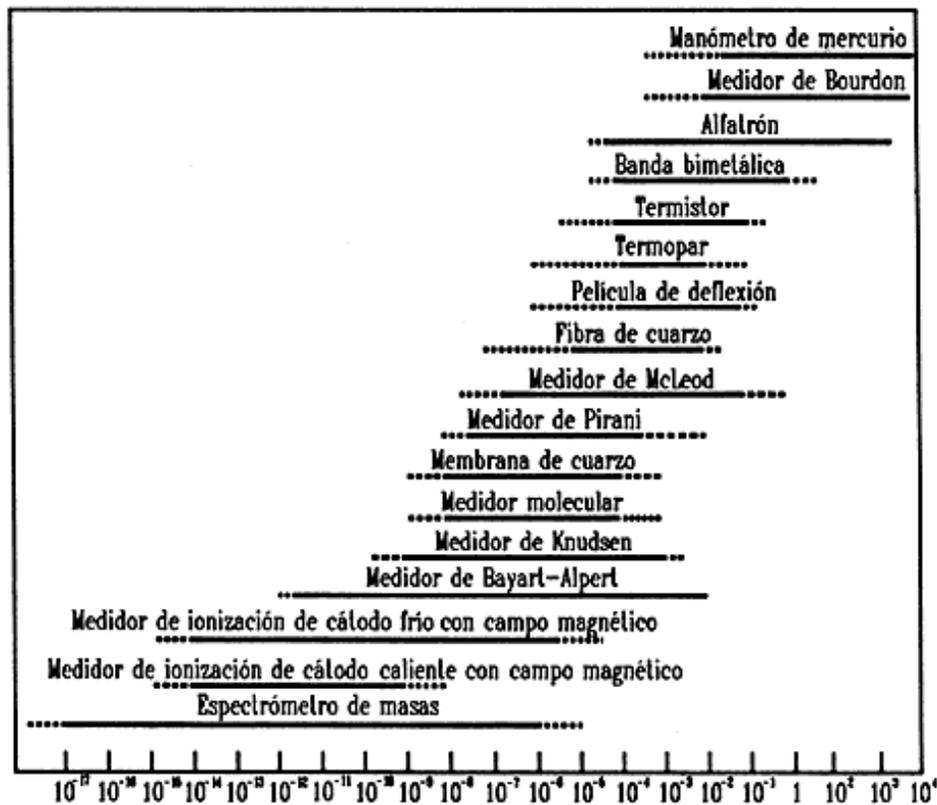


Figura V.5. Intervalos de presión en los medidores de vacío.

En la selección de un medidor de presión es importante considerar de antemano el tipo de sistema con el cual se cuenta, el trabajo a realizarse, y las condiciones necesarias para medir la presión. Una manera sencilla de elegir el

medidor adecuado a nuestros propósitos es tomar en cuenta los siguientes cinco puntos:

- 1) El intervalo de presión para el cual es requerido el medidor.
- 2) ¿Qué es importante saber?, la presión parcial de cada componente del gas o la presión total.
- 3) Considerar si la lectura del medidor depende del tipo de gas existente en la cámara.
- 4) La exactitud necesaria al medir.
- 5) El tipo de montadura del medidor.

Para dar una idea de la variedad de medidores que existen y los diferentes intervalos de presión en que trabajan, en la figura V.5 presentamos una gráfica con tales datos.

En general, se acostumbra llamar barómetros a los instrumentos que sirven para medir la presión atmosférica, y manómetros a los que miden la presión de cualquier gas o vapor.



VI. LAS CÁMARAS, LOS SELLOS Y LAS VÁLVULAS PARA VACÍO

LAS CÁMARAS

LAS *cámaras* o *contenedores* en los sistemas de vacío se construyen por lo general de vidrio o acero inoxidable. La característica principal que debe tener el material de la cámara es su resistencia a la fuerza ejercida sobre ella por la presión atmosférica. Esto es claro si se considera que la presión atmosférica ejerce una fuerza de un 1 kg/cm^2 en el área superficial de la cámara. Por ejemplo, una cámara con una superficie de 1 m^2 debe resistir 10 toneladas de peso.

Las cámaras de metal son hechas, por lo general, en secciones de forma cilíndrica, porque así la cámara puede resistir con mayor facilidad la presión externa. Enrollando una hoja gruesa de metal, los extremos de la cámara cilíndrica son convenientemente cerrados con placas planas de metal (Figura VI.1).

La capacidad de un cilindro para no colapsarse por la presión externa depende de su diámetro, espesor de las paredes, y la firmeza del material. Después de construida la cámara, es necesario hacerle un electropulido a la superficie que será expuesta al vacío, para minimizar la cantidad de gas absorbido en las paredes del contenedor.

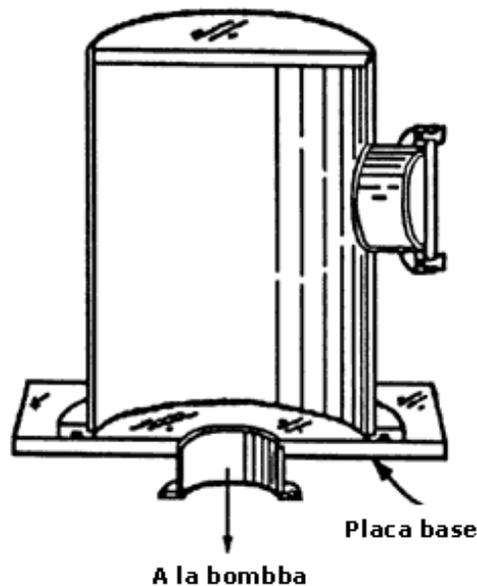


Figura VI.1. Tipo más común de cámara de metal.

Se puede utilizar la cámara después de someterla a una limpieza que consta de los siguientes pasos: 1) estregar con gran cantidad de detergente (puede usarse detergente líquido para trastes); 2) enjuagar con agua caliente; 3) enjuagar con agua destilada, y 4) enjuagar con metanol puro.

De esta manera podemos tener un sistema limpio de grasa, aceites y residuos de metal, para obtener la presión deseada. Después de montado todo el equipo es necesario someter la cámara a calentamientos a diferentes temperaturas para propiciar el degasamiento de las paredes.

Un contenedor puede tener diferentes extensiones (conexiones), en éstas se pueden colocar medidores de presión, calefactores, conexiones eléctricas o electrónicas, fuentes de voltaje, rayos X, ventanas, las diferentes bombas para hacer vacío, espectrómetros de masas, manipuladores de muestras, etc. Todo cuanto sea necesario para trabajar con comodidad, y lo más importante, las herramientas útiles para resolver los problemas que se presentan durante el desarrollo de cierto proceso industrial o algún experimento de interés científico o tecnológico.

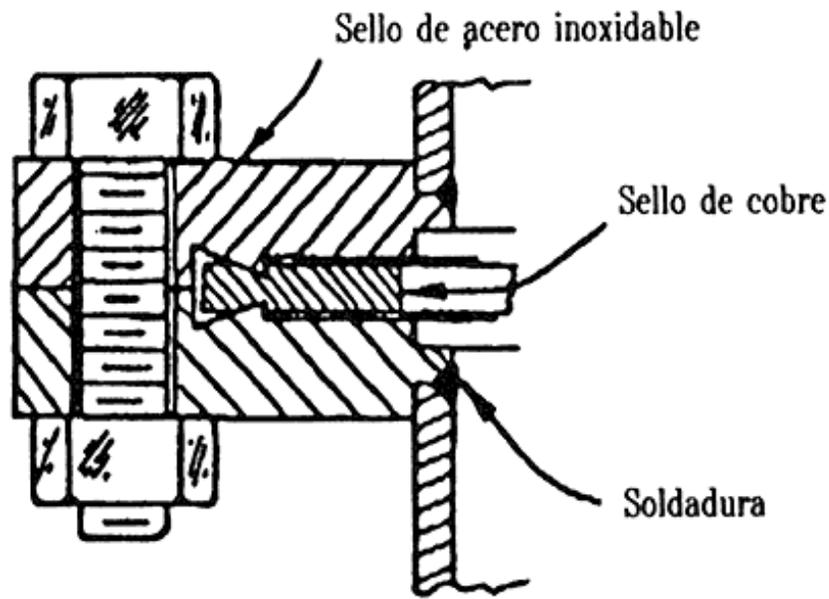


Figura VI.2. Bridas.

LOS SELLOS

Las extensiones en las cámaras de vacío son cilíndricas y de diferentes diámetros. Todo tipo de artefactos a introducirse en la cámara vienen montados en las bridas, las cuales funcionan como tapaderas de las extensiones (Figura VI.2). Para cerrar el sistema, entre las bridas y las extensiones existe una franja triangular para colocar los sellos (Figura VI.3). En los sistemas de vacío los sellos son en forma de anillos circulares con sección transversal rectangular o circular; son fabricados de materiales de vitón, neopreno o metálicos. Existen sellos estáticos (inmóviles) y sellos mecánicos (movibles dentro del sistema).

Para presiones menores a 10^{-7} torr, los sellos de las conexiones de vacío se elaboran de una variedad de elastómeros, los más usuales son Buna-N, caucho sintético y Vitón-A. El Buna-N puede ser calentado hasta 80°C y no soporta largos periodos de compresión, mientras que los sellos de Vitón-A soportan temperaturas superiores a los 250°C y no son muy deformables por lo que soportan largos periodos de compresión. Otro tipo de sellos usados con frecuencia a presiones inferiores a 10^{-7} torr, son los de cobre y aluminio. La ventaja de éstos es que el sistema puede ser horneado a altas temperaturas ($\sim 450^{\circ}\text{C}$) sin que el sello presente problemas de elongación o deformación. Otra ventaja resulta de su bajo índice de degasamiento.

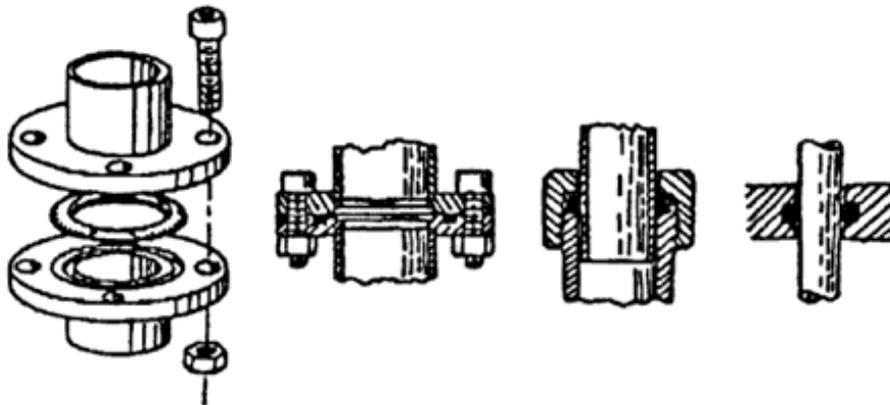


Figura VI.3. Sellos de anillo.

Los diámetros internos de los sellos varían de 2-3 mm de d. i. (diámetro interno) hasta varios metros, lo cual da cuenta de la gran variedad de tamaños que se usan.

LAS VÁLVULAS

Para el uso en sistemas de vidrio, sistemas de metal en alto vacío y ultra alto vacío existe poca variedad de válvulas en el mercado, ya que por lo general las válvulas de vacío son tan complejas que resulta incosteable para un laboratorio fabricarlas, y son las grandes compañías de equipo para vacío las que las producen.

Las dos válvulas de vidrio más comunes se ilustran en la figura VI.4. Se emplean principalmente en sistemas para producción de vacío primario. En la figura VI.5 se ilustran válvulas de metal: *a*) la válvula de este tipo se hace de acero inoxidable con sellos de vitón y puede calentarse hasta 200°C; se usa comúnmente en sistemas con bombas de difusión en pequeños sistemas de alto vacío. Las válvulas de metal de la figura VI.5*b*) y *c*) se usan para aislar bombas de difusión o bombas iónicas de una cámara de alto vacío; se elaboran con aluminio o acero inoxidable y tienen una apertura interna de 5 a 25 centímetros.

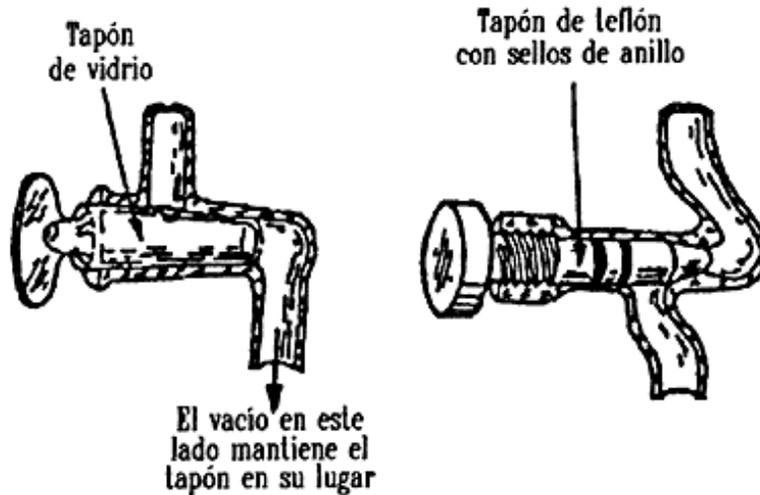


Figura VI.4. Válvulas de vidrio.

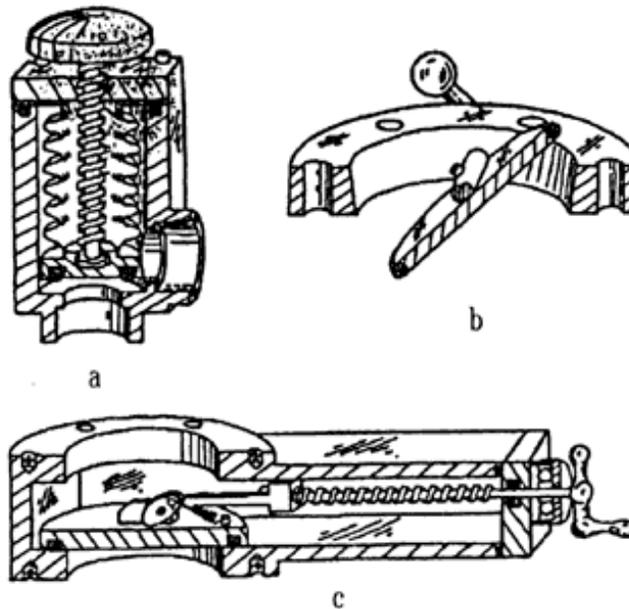


Figura VI.5. Válvulas de metal.



VII. LAS APLICACIONES DE LAS TÉCNICAS DE VACÍO

LA IMPORTANCIA del vacío no estriba tanto en su generación, ni en el significado físico que tiene, sino en su gran utilidad que lo hace acreedor de un número enorme de estudios y usos. Dependemos del vacío desde en el proceso fundamental de respirar, hasta en los más grandes adelantos industriales y científicos. Debido a esto, en el presente capítulo nos proponemos dar una idea general de su amplio campo de aplicación.

En la tabla II se presenta una descripción de las aplicaciones del vacío, y a continuación se exponen de manera breve varias de ellas con la finalidad de profundizar un poco en los respectivos temas.

LA MECÁNICA DE LA RESPIRACIÓN

El acto respiratorio depende por completo del hecho de que la cavidad torácica, que es la caja formada por las costillas, es en efecto un compartimento cerrado, cuya única abertura al exterior es la tráquea, que es el conducto que va a la garganta. Por consiguiente, cuando aumenta el volumen de la cavidad torácica, disminuye la presión en la misma, y el vacío generado da lugar a que el aire sea aspirado hacia el interior por la tráquea; cuando disminuye el volumen, aumenta la presión en la cavidad ocasionando la expulsión del aire. La respiración consiste sencillamente en expansiones y contracciones periódicas de la cavidad torácica producidas por contracciones intermitentes de los músculos respiratorios y retracciones pasivas de los pulmones elásticos.

TABLA II. Aplicaciones de las técnicas de vacío.

<i>Situación física</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Aplicaciones</i>
Baja presión	Obtener una diferencia de presión	Levitar, moldear, levantar, transportar
Baja densidad molecular	Remover constituyentes activos de la atmósfera	Lámparas (incandescentes, fluorescentes, tubos eléctricos), fundición, recocido, empaquetado, encapsulado, detección de fugas
	Remover gases ocluidos o disueltos	Secado, deshidratación, concentración, degasamiento, liofilización, impregnación
	Disminuir la transferencia de energía	Aislamiento térmico, aislamiento eléctrico, microbalanza de vacío, simulación espacial
Camino libre medio grande	Evitar colisiones	Tubo de electrones, rayos catódicos, televisión, fotoceldas, fotomultiplicadores, rayos X, aceleradores, espectrómetros de masas, separadores de isótopos, soldadura de haz de electrones, calentamiento, microscopio electrónico, recubrimiento, destilación molecular
Periodos largos para la formación de monocapas	Obtener superficies limpias	Fricción, adhesión, estudios de emisión, pruebas de materiales para uso especial

Ahora bien, los músculos respiratorios se clasifican en inspiratorios y expiratorios. Los inspiratorios van desde el cuello y brazos, hasta las costillas y desde una costilla hasta la siguiente. Cuando se contraen, levantan las costillas empleando la cavidad torácica. El descenso de la base del tórax también provoca inspiración; esta acción la realiza el músculo respiratorio más importante: el diafragma, que aunque a menudo se piensa que es sólo un tabique que separa el abdomen del tórax, en realidad es un órgano de notable diseño y prodigiosa actividad, capaz de mantener una respiración adecuada cuando todos los otros músculos respiratorios están paralizados (Figura VII.1). Al contraerse la fibras del diafragma en la inspiración, se aumenta la dimensión vertical de la cavidad torácica.

La expiración es primordialmente un acto pasivo debido a la reacción elástica de los pulmones. Los cambios de presión durante

la respiración tranquila son pequeños, pero suficientes para mover el aire hacia dentro y hacia fuera. Al final de la inspiración, la tendencia de los pulmones a retraerse hace que la presión en la pleura, que es la bolsa que rodea a los pulmones, descienda de 760 torr hasta 751 torr y se genera con ello un vacío ligero. La diferencia de presión es pequeña, pero el área es grande y la fuerza es suficiente para provocar los movimientos respiratorios.

La tecnología de vacío, por otro lado, ha contribuido al avance médico, y un ejemplo de esto es el equipo utilizado en la *respiración artificial*. Cuando el acto de la respiración ha cesado, se puede renovar el aire en los pulmones con este método mecánico, el cual comprende dos técnicas denominadas *resucitadores* y *respiradores corporales* ("pulmones de acero"). Un resucitador ventila los pulmones aplicando de manera alternada presiones positivas y negativas (con respecto a la presión ambiental) mediante una máscara facial o una sonda traqueal. Este dispositivo es empleado a menudo por bomberos y salvavidas que atienden casos agudos de deficiencia respiratoria en sitios alejados de un hospital (Figura VII.2)

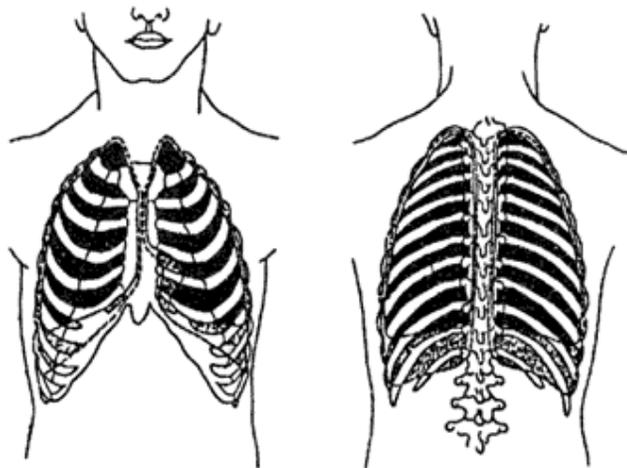


Figura VII.1. Pulmones humanos.

Un "pulmón de acero" difiere de un resucitador en que opera sobre el fuelle torácico, no mediante la aplicación de presión sobre la nariz y la boca, sino mediante la aplicación directa de presiones positivas y negativas alternadas sobre todo el tórax. Para hacerlo, se coloca al sujeto en una cámara cerrada, cilíndrica, de presión, que deja salir sólo la cabeza del individuo, con un collar de hule perfectamente ajustado al cuello. La presión dentro de la cámara se aumenta y disminuye alternadamente por medio de una bomba eléctrica. Las presiones alternas expanden y comprimen el tórax, sustituyendo con éxito los movimientos respiratorios normales. Este tipo de aparato ha mantenido con vida a muchas personas durante años después de una falla respiratoria.

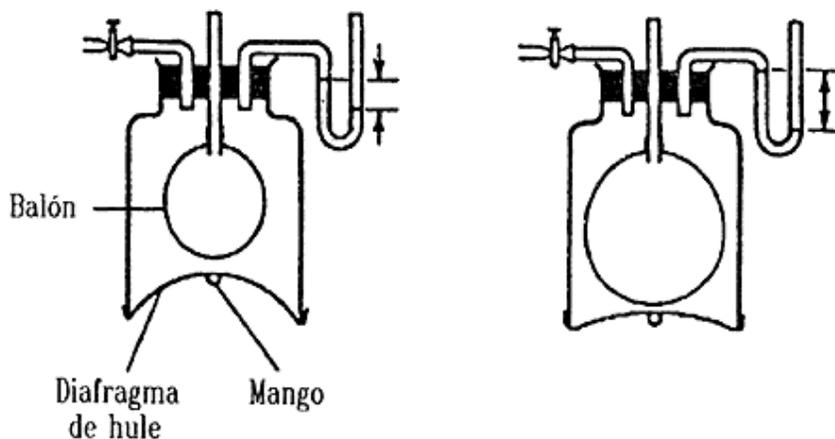


Figura VII.2. Pulmón artificial.

LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR

Aproximadamente 85% del azúcar de caña obtenida en el campo se produce en forma "cruda", la cual requiere un proceso de refinamiento (Figura VII.3). Dicho tratamiento se inicia al moler la caña y obtener el jugo, éste se purifica mediante calentamiento, agregando una suspensión de hidróxido de calcio. Acto seguido, se envía a un clarificador continuo de jugo donde es separado en un jugo claro y uno turbio. El primero se manda a un evaporador y el segundo a un filtro continuo rotatorio de vacío. Los filtrados son agregados al jugo claro y se envía al evaporador. Esta nueva mezcla de miel cruda se concentra en un horno de vacío hasta que se cristaliza la azúcar formando un nuevo concentrado conocido como masacote. Por

último, los cristales de azúcar se separan del masacote por medio de un centrifugador. Es importante la producción de azúcar "cruda" por el uso que tiene en la elaboración de productos como comidas preparadas, almíbares, bebidas, alcohol, azúcar de uso casero y dulces.

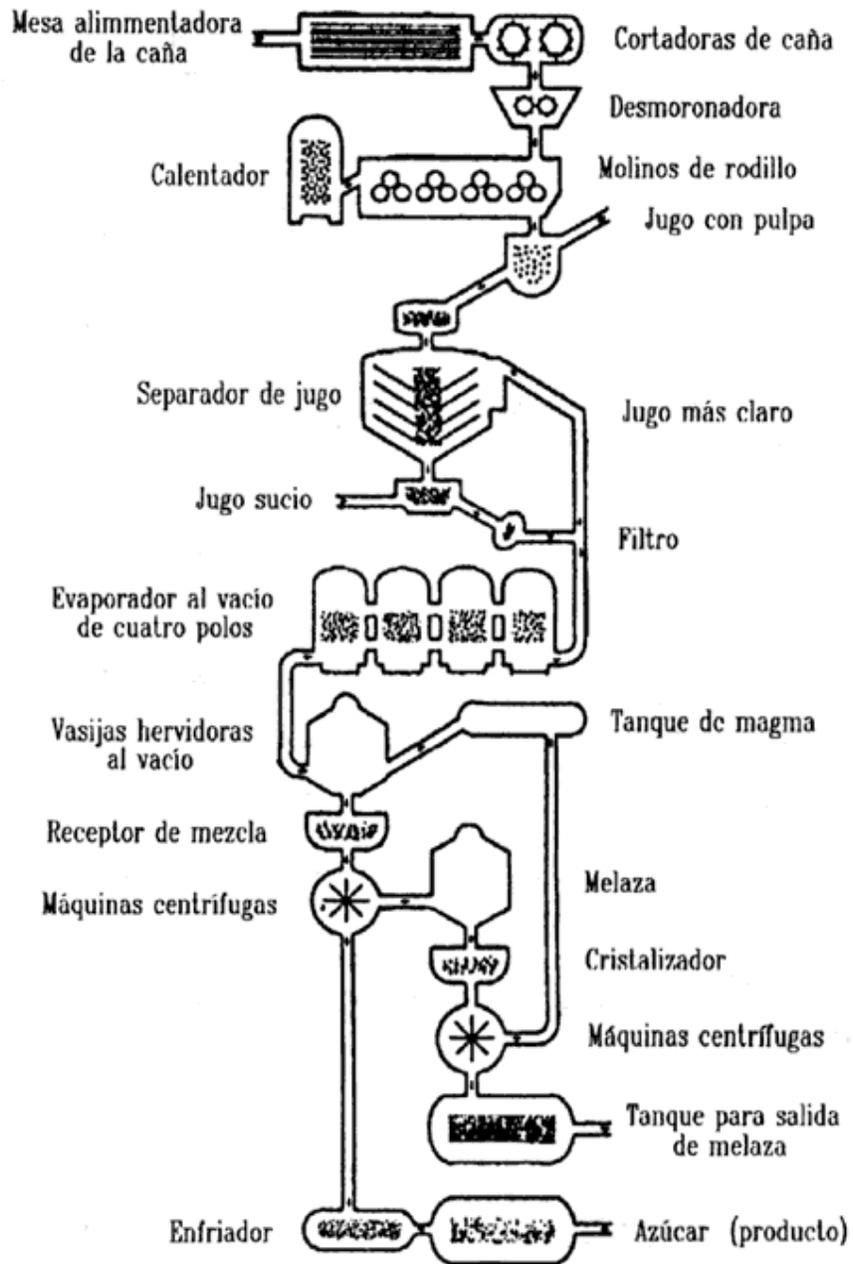


Figura VII.3. proceso de refinamiento del azúcar.

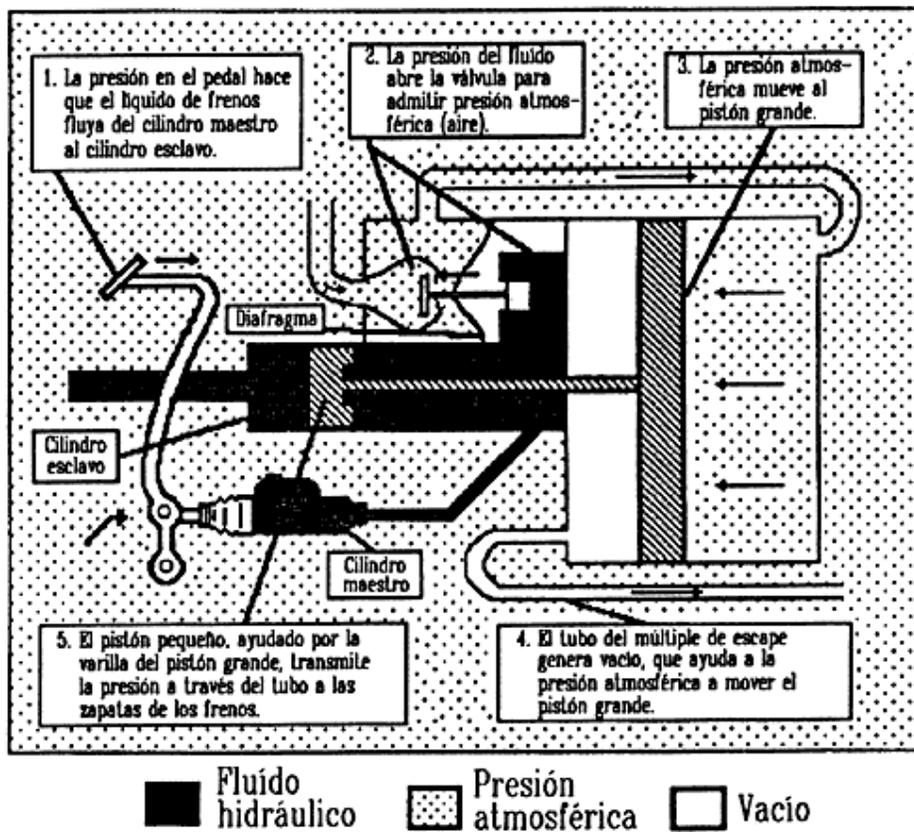


Figura VII.4. Corte esquemático de un sistema de frenos de potencia activado mediante vacío.

LOS FRENOS EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

La mayoría de los frenos automotrices constan de dos semicírculos que tienen una superficie de fricción y son presionados contra el interior del tambor, al cual está sujeto el aro de la llanta del vehículo.

El incremento en la velocidad y peso de los vehículos de los años cincuenta hizo difícil la operación eficaz de los frenos hidráulicos, por lo que la mayoría de los vehículos fueron equipados con sistemas de frenos de potencia; éstos se diferencian de los frenos hidráulicos en que el pistón del cilindro maestro es operado por un pistón y cilindro entre los cuales existe vacío, en lugar de la presión ejercida sobre el pedal del freno (véase la figura VII.4). El cilindro maestro y el cilindro de vacío forman una unidad. Cuando el conductor empieza a oprimir el pedal del freno, la válvula de control cierra los puertos atmosféricos. Al seguir oprimiendo, el pedal abre el puerto que conecta la entrada del vacío con el cilindro de vacío a la izquierda del pistón. La tubería de vacío está conectada a la entrada del múltiple de escape, y cuando la válvula de vacío abre el puerto se forma un vacío en el lado izquierdo del pistón. La presión atmosférica que actúa en el lado derecho del pistón causa que éste se mueva hacia la izquierda, ejerciendo así presión sobre el pistón del cilindro esclavo, lo cual ocasiona que las llantas frenen.

LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS

El proceso de liofilización (secado mediante congelamiento) se usa para conservar ciertos productos químicos delicados, sustancias biológicas o tejidos. En este proceso, el material es congelado y en condiciones de alto vacío se elimina el agua sublimándola a vapor mientras el material se mantiene congelado. Esto permite establecer condiciones de temperatura y presión específicas para mantener el material sólido en el mejor nivel para una exitosa deshidratación y para favorecer una satisfactoria rehidratación.

Durante el proceso de liofilización la estructura celular de muchos materiales se mantiene esencialmente intacta y se preserva la característica básica del producto; mientras que en el caso de otros productos, su forma cambia a la de un polvo, aunque se conservan sus características básicas. Este proceso es necesario para ciertos materiales en extremo delicados, pero también se usa en la elaboración de comida procesada. Por ejemplo, el primer uso importante fue en la producción de un mejor café instantáneo, seguido por el desarrollo de comida preparada, como carne. Ésta puede ser liofilizada y transformada en un material de apariencia esponjosa que cuando es reconstituido al agregar agua, tiene mucho de la apariencia y sabor del material original.

Por último mencionaremos la aplicación en la transportación de verduras, las cuales se enfrían mediante un sistema de enfriamiento al vacío, produciendo la rápida evaporación de pequeñas cantidades de agua con el fin de evitar su pronta descomposición durante el transporte; algunos ejemplos de verduras que se someten a este proceso son: espinacas, lechugas y repollo.

EL TERMO

El termo es un recipiente de pared doble en el que el espacio entre ambas paredes es evacuado (está al vacío). Fue inventado por el físico y químico James Dewar en la década de 1890. Un recipiente se considera un termo cuando el envase de vidrio se protege con una cobertura metálica.

El termo se creó para preservar gases licuados y evitar la transferencia de calor del medio ambiente al líquido. El espacio entre las paredes de vidrio prácticamente no conduce el calor; la radiación se reduce a un mínimo mediante el aluminizado de las paredes internas del termo. La vía principal por la cual se puede comunicar calor al interior de la botella es por el cuello, que es la única unión entre las paredes, el cual, en consecuencia, se hace del menor tamaño posible (Figura VII.5).

El aislamiento térmico se aplica tanto para conservar el frío como el calor, y por este medio es posible mantener la temperatura de un líquido por un periodo largo de tiempo.

LOS ENVASES

Los envases se fabrican dependiendo de las características del producto que se va a envasar; al diseñarlos se toman en cuenta cuatro aspectos importantes: el tipo de producto, su mercado, el problema de la producción y el costo de operación.

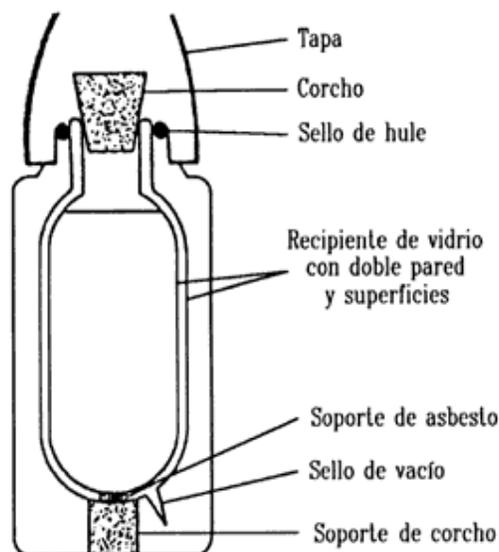


Figura VII.5. Envase al vacío.

En la industria alimenticia, el empaquetado y embotellado de los diferentes alimentos requiere varios tipos de envases para los productos resultantes del procesamiento, la esterilización, la pasteurización, así como deshidratación y congelamiento rápido.

Los envases metálicos o "latas", como comúnmente se conocen, y los contenedores de plástico como botellas y tarros se llenan al vacío (entre otras técnicas de llenado). Esto se hace con la intención de conservar las propiedades químicas y físicas del producto y evitar un crecimiento microbiológico contaminante en el mismo.

El llenado al vacío es la forma más limpia, eficiente y económica de manejar muchos productos. Por ejemplo, a pesar del cuidado que se tiene en la fabricación y en la limpieza de las botellas, siempre existe un porcentaje de agujeros, astillas y agrietamientos. Las máquinas para llenar al vacío detectan de manera automática estos defectos.

El sistema de vacío requiere de un tanque de alimentación que se encuentra por debajo del nivel de las botellas que serán llenadas; del tanque de alimentación sale la tubería que se une al conector que hará contacto con la boca de la botella, así como la línea del receptor de sobreflujo. Cuando la máquina se enciende, se crea un vacío en el receptor de sobreflujo y hace succión sobre el conector. Cuando la boca de la botella entra en contacto con el conector se forma un vacío dentro de la botella

(siempre y cuando la botella no tenga imperfecciones). El vacío succiona el líquido del tanque de alimentación a través del conector, llenando la botella. Al llegar el líquido al receptor de sobreflujo, automáticamente se corta el vacío, causando la detención inmediata del líquido. Entonces, el conector se separa de la botella y ésta pasa a la siguiente etapa. Con este sistema no es necesario lavar o limpiar la parte externa de las botellas antes de etiquetarlas, ya que pone la cantidad correcta de producto sin derramarlo.

LOS CONCRETOS

El concreto es un producto endurecido creado al mezclar material granular (arena, grava o piedra) químicamente inerte, con cemento y agua. Ha sido empleado como material de construcción durante siglos, pues en la mayoría de las civilizaciones han existido depósitos naturales de cemento. En vestigios encontrados de civilizaciones de la zona mediterránea se descubrieron restos de concreto del tipo usado en las construcciones romanas, los cuales se consideran los primeros indicios de construcciones de concreto.

Los diversos tipos de concretos para propósitos estructurales diferentes se identifican por la naturaleza del agregado, el cemento y ciertos atributos especiales o tratamientos. Entre los tipos de concreto existentes se encuentra uno que es elaborado en condiciones de vacío, llamado "concreto tratado al vacío".

Este concreto es sometido a una succión inmediatamente después de haber sido puesto en un molde. En tal proceso se extrae parte de la humedad dejando un concreto más seco que, pasado un tiempo, alcanzará una dureza mucho mayor que la del concreto común. Esto hace que se use ordinariamente un proceso de vacío en la fabricación de losas de concreto y productos similares hechos con prensas hidráulicas.

LA CERÁMICA INDUSTRIAL

La cerámica industrial comprende todo tipo de materiales sólidos, que no sean metálicos u orgánicos, usados en la industria. Dentro de las diferentes estructuras químicas de las cerámicas están: policristalinas, vidrios, combinaciones de multicristales con fases cristalinas, o cristales simples. Algunas de las propiedades de la cerámica que la hacen tan útil son su durabilidad química (a temperaturas normales y elevadas) además de su bajo deterioro por agua líquida o vapor, oxígeno, ácidos, bases, sales en altas concentraciones y solventes orgánicos, así como la posibilidad de ser decorada con una amplia gama de colores, texturas y dibujos.

Los materiales primarios que se usan para hacer la cerámica se preparan por lo general mediante reacciones químicas que involucran precipitación, filtración, calcinación y reacciones de estado sólido, así como mediante la técnica de secado por congelamiento. Esta última técnica supone un procesamiento al vacío, similar al que se explicó con anterioridad para el caso de la conservación de alimentos. La cerámica ha sido de gran utilidad en la industria química, eléctrica, nuclear, automotriz, aeroespacial y electrónica.

LAS CENTRÍFUGAS

Una centrífuga es una máquina en la cual se separan partículas sólidas o líquidas con diferentes densidades, por rotación a alta velocidad en un recipiente cilíndrico. En la actualidad está muy extendido el uso de estas máquinas para la concentración y purificación de materiales en suspensión o disueltos en fluidos.

La concentración de materiales en suspensión se logra debido a que las partículas sólidas son, en general, más densas que las líquidas. Al girar el recipiente, el líquido tiende a viajar a la periferia en donde encuentra el rápido desalojo del sistema, mientras que las partículas sólidas se agrupan en el centro de rotación.

En términos generales, las centrífugas se clasifican en tres categorías dependiendo de si la escudilla del vaso rotatorio tiene pared sólida, perforada o si es una combinación de ambas. En la industria hay varias clases de centrífugas, como las centrífugas de botella, las centrífugas tubulares, las centrífugas tipo disco, las de filtro, y las ultracentrífugas al vacío.

Las centrífugas industriales funcionan mediante el giro de un rotor, estando el material a presión atmosférica. Al aumentar la velocidad del rotor, la temperatura puede llegar a aumentar por arriba del punto de ebullición del agua, lo que afecta el sistema y la sustancia con que se está trabajando. Esto hace que se usen a velocidades moderadas.

Las ultracentrífugas, que es el caso que atañe a nuestro estudio, funcionan al vacío. La presión que rodea al rotor es ahora menor que 10^{-6} torr y por medio de un termostato en la cámara de vacío se controla la baja temperatura existente ($\sim 1.5^{\circ}\text{C}$), por

lo que la cámara queda libre de gradientes térmicos. Este tipo de ultracentrífugas es indispensable en laboratorios donde se necesita purificar sustancias de importancia en bioquímica, biofísica, biología y medicina. La ultracentrífuga presentada en la figura VII.6 puede tener dos usos: para determinar pesos moleculares de varias proteínas y para purificar materiales biológicos que no pueden ser separados con facilidad por medio de otras técnicas.

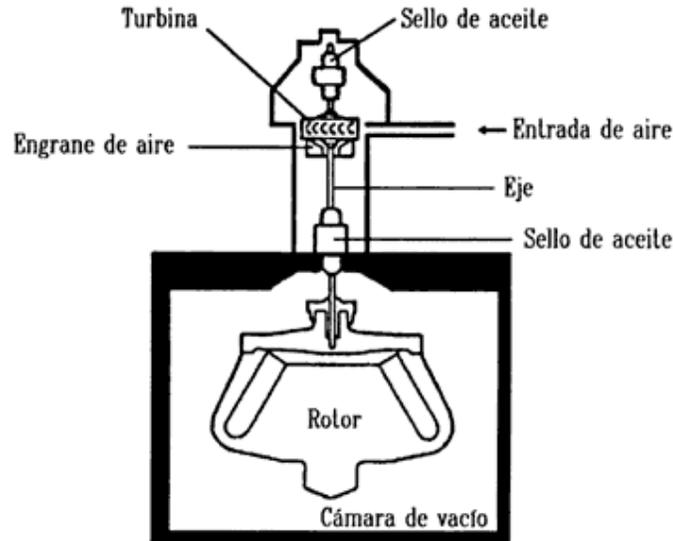


Figura VII.6. Ultracentrífuga de tipo vacío.

LOS CIRCUITOS INTEGRADOS

Un circuito integrado es una combinación de elementos electrónicos interconectados, tales como transistores y diodos, que están inseparablemente asociados con una base continua de material (sustrato). Generalmente los elementos de un circuito son de tamaño microscópico, por lo que también se usa el término de microcircuitos. Los beneficios de los circuitos eléctricos incluyen: menor tamaño, bajo consumo de energía, mayor velocidad de operación y reducción de costo.

Los tres tipos básicos de circuitos integrados que existen son: el circuito integrado monolítico, el circuito integrado multichip y los circuitos integrados en película, cuyos elementos son películas formadas sobre sustratos aislados. Las películas se hacen evaporando el material que la formará en un sistema aislado, al vacío, que también contendrá al sustrato. El material se vaporiza y se condensa sobre el sustrato. Este tipo de circuitos se utilizan para la fabricación de componentes para electrónica pasiva; por ejemplo, arreglos de resistencias (partes que impiden el flujo de corriente eléctrica) y capacitores (partes para restaurar la carga eléctrica). Este tipo de circuitos puede ser de películas gruesas o de películas delgadas, dependiendo principalmente de la técnica empleada para el depósito (Figura VII.7).

EL MOTOR DE GASOLINA

La máquina de combustión interna surgió en el siglo XIX, un siglo después de las primeras máquinas de vapor que impulsaron la Revolución Industrial. La máquina de gasolina es una forma especializada de la máquina de combustión interna, obtiene su potencia al quemar una mezcla de vapor de gasolina y aire. Por sus aplicaciones y usos ha sido la máquina de combustión interna de más éxito a través del tiempo, y el motor de los automóviles es su aplicación más importante. La potencia que se obtiene con este tipo de motores va desde poco menos de un caballo de potencia, hasta equipos que pueden producir arriba de los 35 000 caballos de potencia.

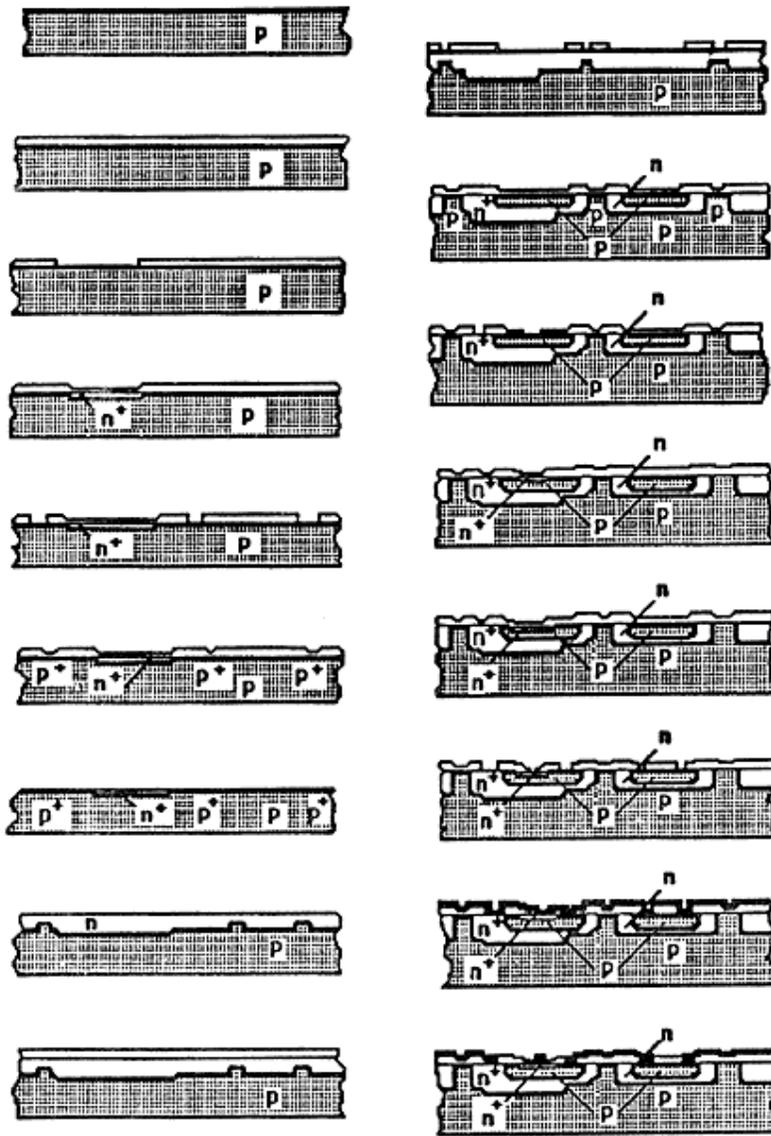


Figura VII.7. Sección transversal de un circuito integrado hecho a base de películas delgadas en un sistema vacío.

De las diferentes técnicas para recobrar la potencia de un proceso de combustión, la más importante ha sido el *ciclo de cuatro tiempos*, el cual se ilustra en la figura VII.8. Con la válvula de entrada abierta, primero desciende el pistón durante el tiempo de entrada. Entonces, debido al vacío parcial creado, se introduce al cilindro una mezcla explosiva de vapor de gasolina y aire. Se comprime la mezcla cuando el pistón asciende durante el tiempo de compresión con ambas válvulas cerradas. Casi al final de este proceso, se enciende la carga mediante una chispa eléctrica. Esto inicia el tiempo de potencia, que continúa con ambas válvulas cerradas fijamente, y la presión del gas, creada por la expansión del gas encendido, que presiona sobre la cabeza del pistón. Durante el tiempo de evacuado, al ascender el pistón obliga a los productos de la combustión a salir a través de las válvulas de evacuado abiertas. El proceso se vuelve a repetir requiriendo de los cuatro tiempos del pistón (entrada, compresión, potencia y evacuado).

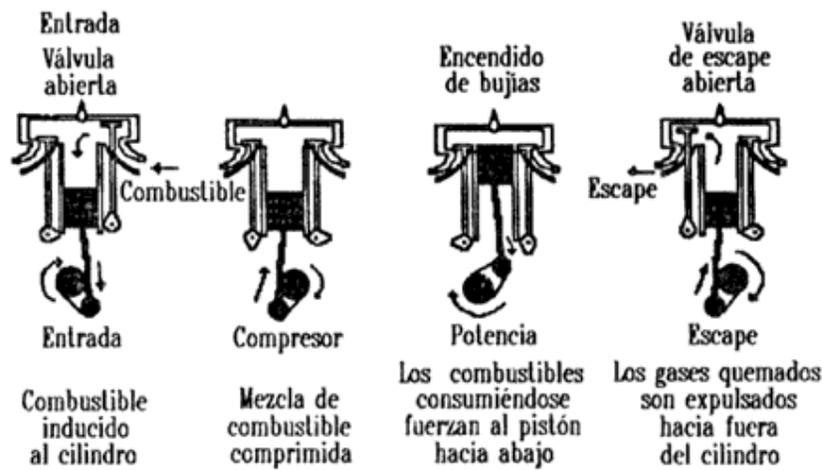


Figura VII.8. Pasos de un ciclo de cuatro tiempos.

LA METALURGIA

Se denomina procesos metalúrgicos a los procesos relacionados con la purificación de los materiales extraídos de los minerales. Los procesos metalúrgicos constan de una serie de pasos por los cuales las impurezas minerales que tienen que ser aisladas se reducen a metales, refinamientos o aleaciones. La separación se logra ya sea por extracción o por revestimiento mineral, haciéndolos disponibles con ciertas especificaciones. La manera antigua de hacerlo era por medio de cambios químicos que rompían o descomponían las impurezas minerales dentro de sus componentes metálicas y no metálicas. Los pasos que se siguen para recobrar metales de los minerales son normalmente seleccionados con base en varias consideraciones, entre ellas, la naturaleza química de los propios minerales, los cuales pueden ser sulfitos, óxidos, carbonatos, silicatos u otras especies. Existen tres clases de métodos: 1) la pirometalurgia, que hace uso del calor; 2) la electrometalurgia, que usa la electricidad, y 3) la hidrometalurgia, que hace uso del agua.

Analizaremos una parte del proceso de la pirometalurgia que involucra técnicas de vacío en su desarrollo, como es el fundido inducido por vacío. La pirometalurgia es cualquier proceso metalúrgico extractivo en que se utilizan altas temperaturas, resultantes de la acción del calor de algún combustible como gasolina, aceite o energía eléctrica.

A continuación explicamos la técnica de fundido inducido por vacío. Primero que nada, diremos que la preparación de metales en el estado líquido es una fase distinta en la mayoría de los procesos metalúrgicos. El fundido es el inicio de una serie de operaciones por las cuales el metal se lleva hasta su forma final. El fundido inducido por vacío se usa principalmente en tratamientos de metales reactivos, como el titanio, que debido a su afinidad con gases de nitrógeno, oxígeno e hidrógeno, debe ser fundido y tratado bajo condiciones de vacío o en presencia de un gas inerte.

En el fundido inducido por vacío, la carga con que se calienta el material, previamente puesto al vacío, se aplica de forma externa. Iniciado el proceso los gases son removidos de la cámara, sosteniendo así la presión establecida para el tratamiento. La cámara tiene a su vez un sistema de circulación de agua fría que limita la contaminación entre el fundido y las paredes de la cámara. Este método se usa mucho en la consolidación de metales reactivos y refractarios, así como en la producción de altas temperaturas y energías para la formación de aleaciones.

LOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Un acelerador de partículas es un sistema que produce un haz de rápido movimiento, eléctricamente cargado, con partículas atómicas y subatómicas. La efectividad de un acelerador se caracteriza por la energía cinética con que se mueven las partículas. La unidad de energía que se emplea es el electrón voltio (eV), trabajando con energías desde 1.2 MeV (millones de eV) hasta 1.2 GeV (miles de millones de eV), según el acelerador. Una característica importante de las partículas aceleradas es que son de masa muy pequeña, por lo que la energía cinética en este rango corresponde a velocidades muy altas. Por ejemplo, la velocidad de un haz pequeño de iones acelerados es de aproximadamente 8 000 kilómetros por segundo. Las partículas que son aceleradas son los electrones, positrones o átomos ionizados, tales como hidrógeno ionizado y helio ionizado.

Los aceleradores de partículas se utilizan en la investigación científica de la estructura del núcleo, la naturaleza de las fuerzas nucleares y las propiedades del núcleo que no se encuentran en elementos naturales; como los presentes en los elementos inestables. En medicina los aceleradores se usan en la producción de radioisótopos, terapias contra el cáncer, esterilización de materiales biológicos; mientras que en la industria se aplican en la obtención de radiografías industriales y polimerización de plásticos. Se tienen, por sus diferentes usos, aceleradores de distintas características, como el betatrón, ciclotrón, acelerador lineal de electrones o protones, microtrón, etcétera.

Un acelerador de partículas tiene tres componentes esenciales: una fuente de las partículas que serán aceleradas, una cámara de vacío donde se acelerarán, y una fuente de campo eléctrico necesaria para el efecto de aceleración (Figura VII.9).

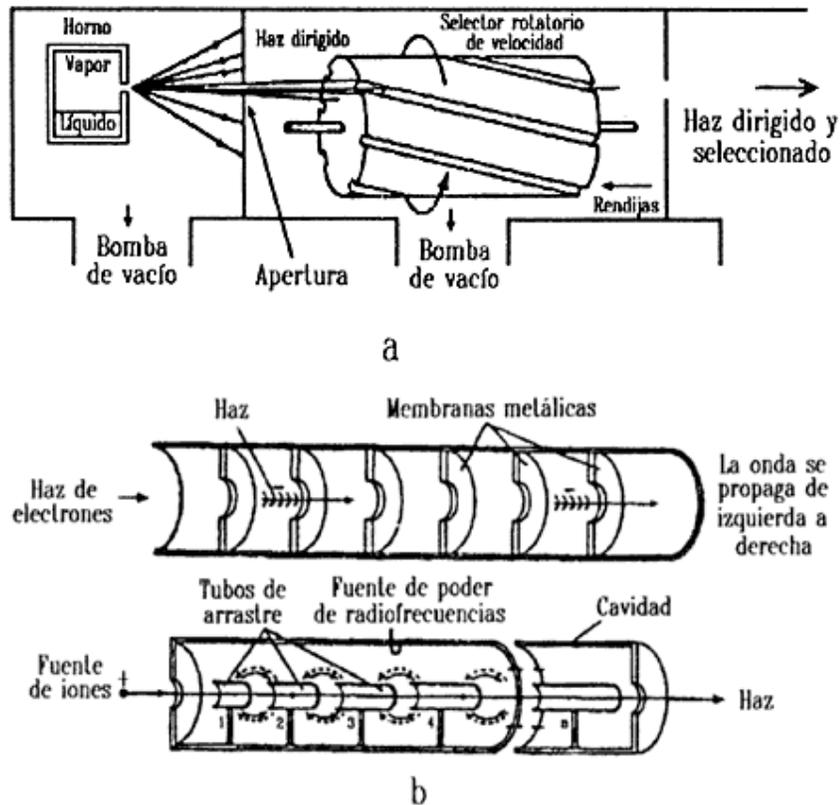


Figura VII.9. a) Acelerador de partículas; b) forma distinta de colimar un haz.

LA DESTILACIÓN DEL PETRÓLEO AL VACÍO

El petróleo se encuentra en la naturaleza y consiste en una mezcla compleja de hidrocarburos, que son compuestos que contienen hidrógeno y carbón. En el proceso de refinamiento de petróleo se obtiene gasolina, aceite de motor y petroquímicos, entre una gran variedad de sustancias.

Según la región de donde se obtiene el crudo, se ha encontrado que cada petróleo es diferente y, por lo tanto, puede utilizarse para distintos propósitos. Por ejemplo, el petróleo mexicano es pesado por ser rico en asfalto, mientras que el crudo argelino es ligero comparado con éste.

La separación del petróleo en sus componentes se hace por medio de la destilación fraccional, conocida como proceso primario de refinamiento, a cual puede ser seguida por otros métodos de separación física. La extracción de solventes es un ejemplo de ello, donde una cantidad de lubricantes son extraídos por medio de un solvente.

En la figura VII.10 vemos los principios de operación de una unidad de destilación fraccional. Una unidad de destilación fraccional es de forma cilíndrica y tiene aproximadamente 45 m de alto. Tiene entre 30 y 40 placas perforadas que la dividen en intervalos rectangulares, donde el petróleo es primero bombeado hasta la cima del destilador, y después desciende dentro de él, expuesto a diferentes temperaturas durante el descenso. Los hidrocarburos que forman el petróleo tienen distintos puntos de ebullición, y cada uno de éstos determina el producto que se obtiene. Por ejemplo, el punto de ebullición de la gasolina es de 25-95°C; el de la naftalina es de 95-150°C; el del keroseno, 150-230°C, y el del aceite, 230-340°C. El residuo de esta destilación es el asfalto.

La destilación al vacío se hace utilizando un destilador del tipo fraccional pero con menor diámetro en la columna para mantener comparable la velocidad de vapor a presión reducida. El vacío se produce mediante expulsores de vapor en la destilación al vacío. Esta técnica es importante dentro de los procesos de destilación, pues por medio de ella se ha logrado que componentes menos volátiles puedan ser destilados sin aumentar la temperatura al intervalo en el que ocurre el rompimiento, como sucedería a presión atmosférica. Esto significa que podemos destilar sin exponer el destilador a altas temperaturas, lo cual trae consigo ahorros considerables en el gasto de energía.

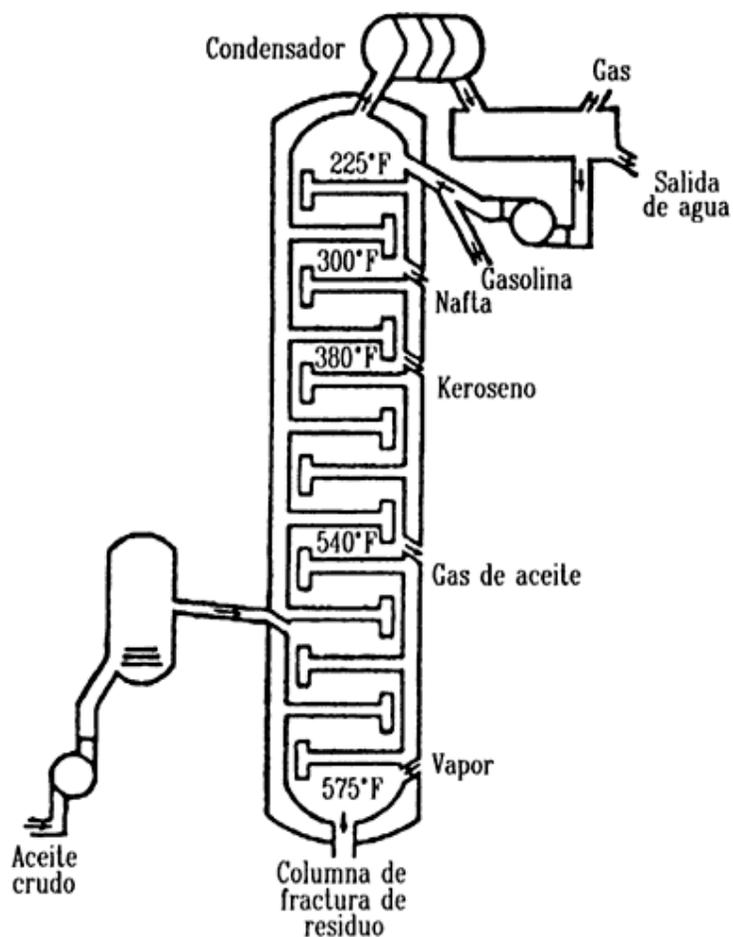


Figura VII.10. Unidad de destilación fraccional.

LA MANUFACTURA Y FABRICACIÓN DE PLÁSTICOS

El procesamiento de plásticos requiere de materiales de diversos tipos, éstos se pueden dividir en: 1) componentes naturales, como la celulosa, los productos derivados del petróleo y el hule; 2) componentes químicos, y 3) aditivos, como estabilizadores, antioxidantes y colorantes.

Las técnicas básicas para el procesamiento de plásticos suponen un equipo especial para su fabricación y terminado. Las máquinas para este tipo de operación son máquinas mecánicas, soldadoras, proceso de radiación, metalización al vacío, electroplateado, impresos, pintura y decoración.

La metalización al vacío es uno de los métodos más sencillos para hacer recubrimientos metálicos sobre plásticos. Básicamente consiste en la evaporación del metal, usualmente aluminio, sobre la superficie del plástico dentro de una cámara de alto vacío. Una cámara común mide 2 m de diámetro y contiene manipuladores para rotar las piezas de plástico con la finalidad de obtener un recubrimiento uniforme. Se utiliza un filamento de tungsteno para la evaporación del metal. En el filamento se deposita el material a evaporarse, se calienta y con esto se provoca la evaporación. La metalización al vacío se lleva a cabo en un ambiente de muy baja presión atmosférica, entre 10^{-7} y 10^{-10} torr (Figura VII.11). El metalizado de plásticos se usa en procesos de decoración, en la formación de capacitores eléctricos y cortes finos para placas metálicas.

LA MANUFACTURA DE SAL

Desde hace mucho tiempo, la sal comercial se ha producido por medio de la evaporación de agua de mar o usando rocas de sal (las rocas de sal se forman en sitios cercanos al mar donde el clima es seco y el verano largo). Actualmente también se puede obtener mediante salmueras (aguas que son introducidas en lugares altamente salinos y que al procesarlas sueltan la sal). En la manufactura de sal a partir de la salmuera o el agua de mar se usa la evaporación; ésta se logra por medio del Sol o por calentamiento artificial, que es el caso que interesa al tema de nuestro estudio.

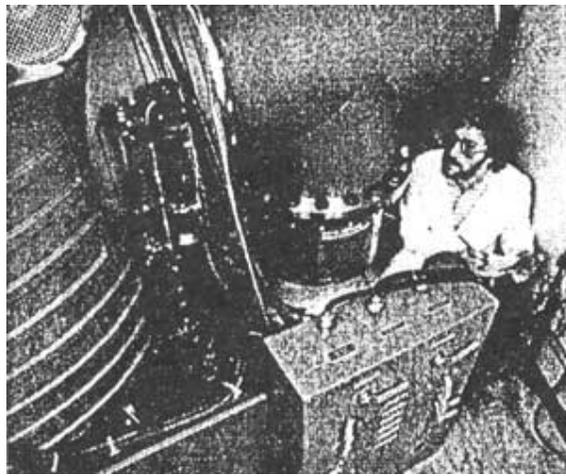


Figura VII.11. Equipo para recubrimientos metálicos.

El calentamiento artificial se lleva a cabo a partir de efectos múltiples en evaporadores al vacío, y el producto obtenido forma cristales de sal, que son utilizados en la industria para el procesamiento de alimentos. La salmuera o el agua de mar es bombeada a tanques de asentamiento, donde los componentes de calcio y magnesio son removidos mediante tratamientos químicos, y después se pasa a otro depósito donde es evaporada. La evaporación al vacío ocurre sobre la superficie del líquido, formándose entonces el cristal de sal. La evaporación al vacío es un proceso similar al de liofilización de alimentos. La forma de aumentar la eficacia de la evaporación es colocar tres tanques para evaporación; la característica principal es que el vapor del primer tanque sea lo suficiente para provocar la ebullición de la salmuera o agua de mar, la cual se envía al segundo tanque, y el vapor del segundo, suple el calor para operar el tercer recipiente (Figura VII.12).

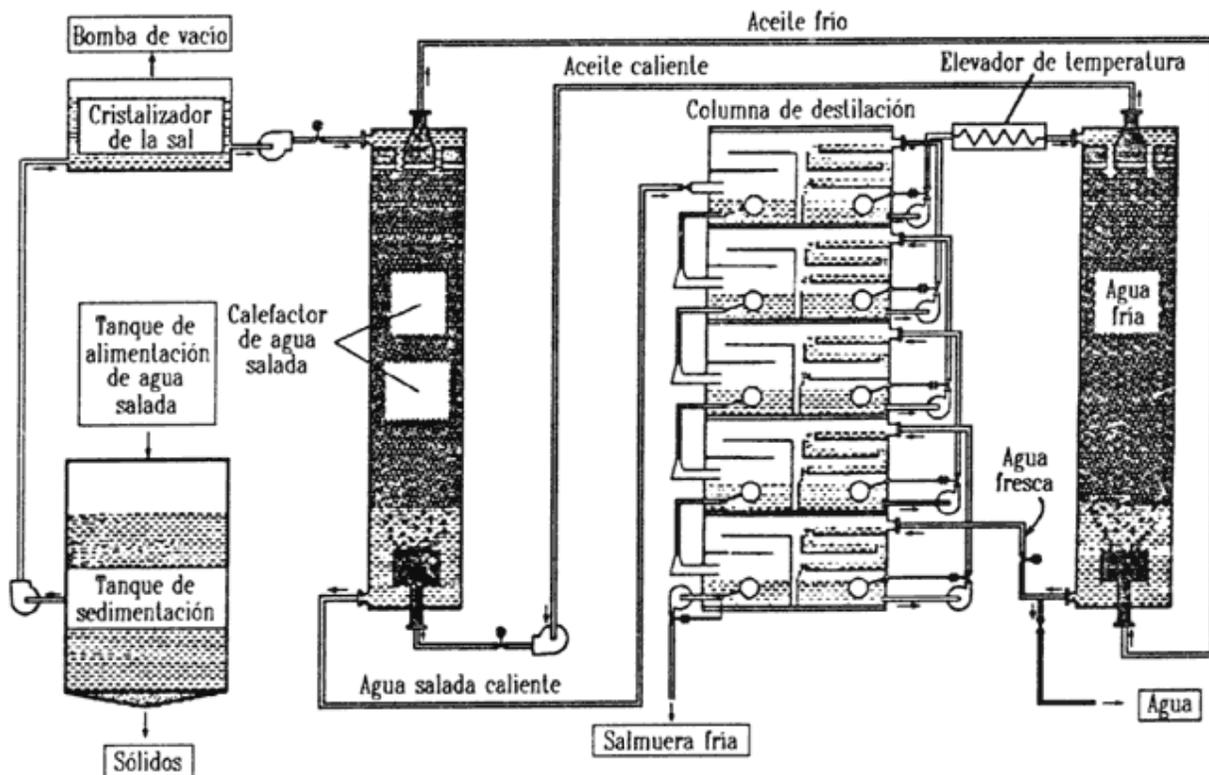


Figura VII.12. Procesamiento de sal.

La diferencia entre estos métodos de evaporación es la siguiente: mientras en la evaporación por medio del Sol se requiere alrededor de 4 500 a 5 400 kg de vapor para producir 900 kg de sal, en la evaporación por medio de tanques al vacío la cantidad de vapor se reduce a 630 kg para obtener una tonelada de sal.

En nuestro país no tenemos necesidad de evaporar por medio de la técnica al vacío, ya que contamos con la salina natural más grande del mundo, situada en Guerrero Negro, Baja California, la cual no sólo abastece nuestro territorio sino que proporciona un producto para la exportación. El problema para otros países no es, empero, trivial. Imagine el lector la dificultad que supondría obtener sal en un país alejado del mar, donde la producción de sal se limitara a la explotación minera y este recurso no fuera suficiente a sus necesidades; sería necesaria una planta para evaporar de manera artificial, lo que implica la necesidad de alta tecnología y grandes costos.

LOS HACES MOLECULARES O ATÓMICOS

Un haz molecular o atómico es un grupo de moléculas o átomos moviéndose a altas velocidades y viajando en la misma dirección. Se generan en mecanismos al vacío y viajan dentro de un sistema también al vacío. El estudio de estos haces se lleva a cabo para obtener un conocimiento más amplio acerca del comportamiento molecular o atómico del haz, así como de las interacciones entre el haz y materiales sólidos, gases y campos eléctricos o magnéticos.

La deflexión del haz en campos eléctricos o magnéticos nos da información acerca de la estructura y propiedades (como rotación y espín) de las moléculas, o átomos, en el haz. El estudio de la interacción del haz con la materia se conoce como espectroscopía de haz molecular. Mediante haces moleculares podemos limpiar imperfecciones en superficies, o conocer su constitución química y física.

LA PRODUCCIÓN DE ACERO INOXIDABLE

El horno eléctrico tiene un uso muy extendido en la producción de aceros con un alto porcentaje de cromo, especialmente en la de acero inoxidable, que contiene arriba del 5% de dicho elemento. Las temperaturas ordinarias para fabricar el acero son alrededor de 1 600°C. Este tipo de horno no es práctico por la pérdida de cromo que sufre el acero durante su manufactura. Otra manera más eficaz de procesar el acero inoxidable que con el horno eléctrico es mediante su *procesamiento al vacío*, que se explica a continuación.

Si el acero líquido viene en contacto con humedad o agua, el hidrógeno del agua se puede disolver en el metal debido a la reacción resultante. El nivel usual de hidrógeno encontrado es una porción de una a diez partes por millón de su peso. Cuando el acero se sobreenfría, la solubilidad del hidrógeno en el acero disminuye; y si el acero es enfriado muy rápidamente, el hidrógeno emigra a la superficie y escapa, debido a lo cual se pueden presentar pequeñas rupturas en la superficie del acero.

Para eliminar el hidrógeno y con él las rupturas en el acero inoxidable cuando se solidifica, se necesita poner el acero líquido en una cámara de vacío, lo cual permite que el hidrógeno sea bombeado y reducido de 1.5 a 2 partes por millón. Si el acero no entra en contacto con humedad antes de ser solidificado, el problema de las rupturas internas puede ser eliminado.

El oxígeno también disminuye por el bombeo en la cámara de vacío, ya que en combinación con el carbón forma monóxido de carbono, que es un gas y se bombea. Además, de esta forma evitamos las pérdidas de cromo que puede haber durante el proceso en el horno eléctrico debido a la combinación del cromo con el desoxidante.

LOS EXPULSORES DE VAPOR

El expulsor de vapor hace uso de la energía cinética desarrollada mediante una descarga de vapor a través de un conector, para producir vacío. En las plantas modernas de energía, los expulsores de vapor se utilizan para remover gases no condensables de las superficies condensadoras. Los expulsores de vapor también se usan en las operaciones donde el producto debe ser expuesto al vacío.

El agua puede ser refrigerada por el uso de un expulsor de vapor. Para esto se rocía el agua dentro de la zona de vacío generada por el expulsor de vapor, y después puede ser empleada en sistemas de aire acondicionado o procesos de enfriamiento.

INNOVACIONES A LOS TRANSPORTES FERROVIARIOS

El ferrocarril ha sido uno de los transportes colectivos más usados durante el presente siglo. Ya en los umbrales del siglo XXI, se han propuesto varias ideas para el mejoramiento del sistema ferroviario con la finalidad de aumentar su comodidad y, aún más importante, la seguridad del viaje y la rapidez de su realización. Una de estas ideas ha venido tomando forma por la accesibilidad a nuevas tecnologías: el sistema de tubo gravedad-vacío. Este nuevo modelo supone un concepto que data del siglo XIX: un tren que pueda ser acelerado y frenado por una combinación de gravedad y presión atmosférica. El tren habrá de tener una sección transversal circular y será mucho más largo que la mayoría de los actuales. Con las ruedas ubicadas entre los

carros, un tren de este tipo formará una especie de empaque para sellar con las paredes del tubo, el cual podrá descender de cada estación y ascender a la siguiente. La gravedad reforzará la fuerza ejercida por la presión atmosférica mientras se genera vacío en la porción del tubo enfrente del tren. El bajo costo de construcción del tren hace atractivo el proyecto, aunque el problema a enfrentar es la elaboración de frenos óptimos para el sistema. La figura VII.13 ilustra un prototipo.

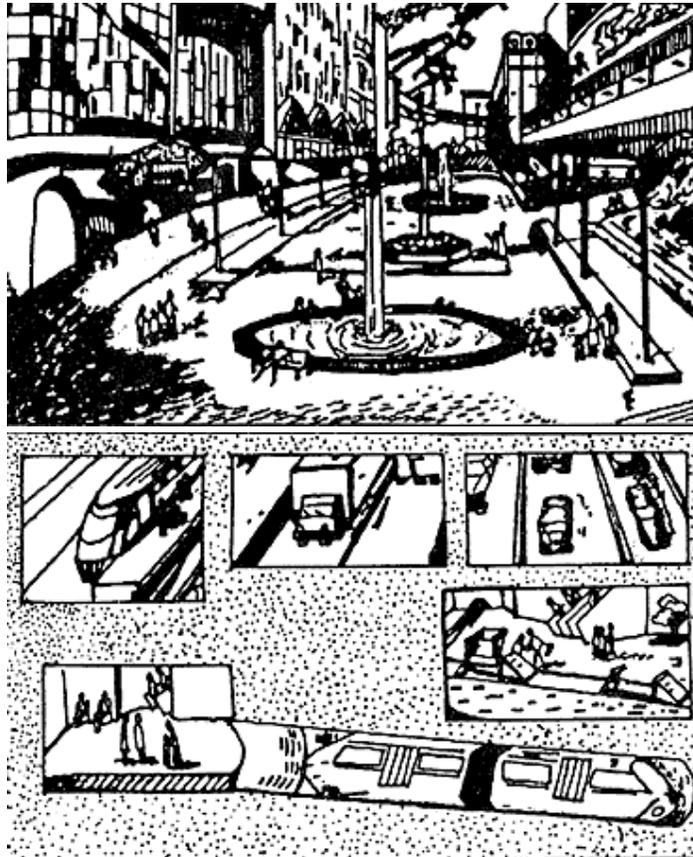


Figura VII.13. Transporte ferroviario.

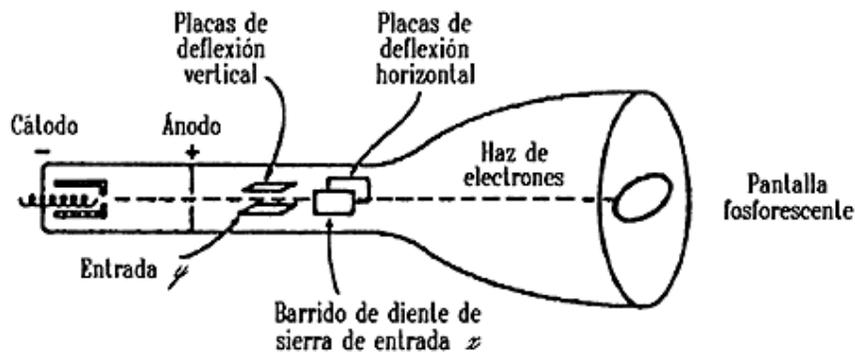


Figura VII.14. Diagrama de un tubo de rayos catódicos.

EL TUBO DE RAYOS CATÓDICOS

Los tubos de rayos catódicos están al vacío y contienen un circuito eléctrico para la emisión de electrones. El circuito consta de un cátodo, un ánodo y un filamento conectados a una fuente de voltaje. En algunos casos, en vez de vacío se emplea un gas a baja presión.

El tubo de rayos catódicos es de gran utilidad en la industria y sus aplicaciones son muy variadas. Con él se ha creado la televisión, que sirve para amplificar señales débiles de radio o audio, generando oscilaciones eléctricas para radiofrecuencias o tonos de audio. También se usan para la producción de rayos X, así como en los osciloscopios, etc. Agregando un gas al tubo de rayos catódicos podemos obtener lámparas incandescentes, las lámparas de neón, por ejemplo.

Los electrones en los tubos de rayos catódicos se producen por emisión termoiónica de un cátodo. En este proceso se calienta

un metal (cátodo) a altas temperaturas, lo cual provoca que los electrones de dicho metal se exciten, adquiriendo la energía necesaria para escapar de la superficie metálica. La dirección que toma el haz de electrones se controla con el ánodo (Figura VII.14).

Algunas aplicaciones del tubo de rayos catódicos

Televisión. La pantalla de la televisión se encuentra en la parte interna de uno de los extremos del tubo de rayos catódicos (sección transversal mayor), y está compuesta de dos materiales fluorescentes, los cuales brillan con luz amarilla o azul por el choque de electrones sobre la pantalla. Dichos electrones provienen del extremo delgado del tubo. Para un viaje más eficiente de los electrones desde su fuente a la pantalla se necesita que el ambiente se encuentre a presiones mucho menores que la atmosférica, de otra forma chocan con las moléculas de gas y se desvían. El mismo principio se emplea en pantallas de computadora, y de una forma un poco más compleja, en la televisión a colores (Figura VII.15).

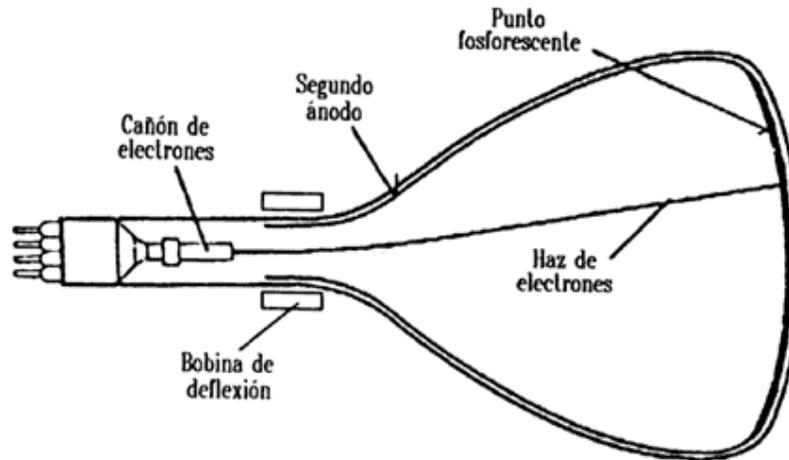


Figura VII.15. Elementos básicos de una pantalla monocromática.

Lámparas incandescentes. Cuando se le agrega un gas a un envase después de haber estado al vacío, es conveniente conocer la especie del gas de que se trata para aprovechar las características específicas del gas. Al aplicar una corriente eléctrica al filamento localizado dentro del envase, se puede crear en él una pequeña corriente de electrones que al chocar con el gas contenido en el envase produce iones. Los iones producidos viajan en dirección del cátodo (que se mantiene a temperatura alta por el calentador), y el impacto de los iones con el cátodo nos produce la emisión de electrones termoiónicos que al chocar con las partículas del gas producen nuevamente iones. Cuando la cantidad de electrones termoiónicos es suficiente para producir los iones necesarios que generarán a su vez electrones suficientes para sostener el proceso, el gas en el tubo comienza a brillar obteniéndose así la descarga incandescente (Figura VII.16).

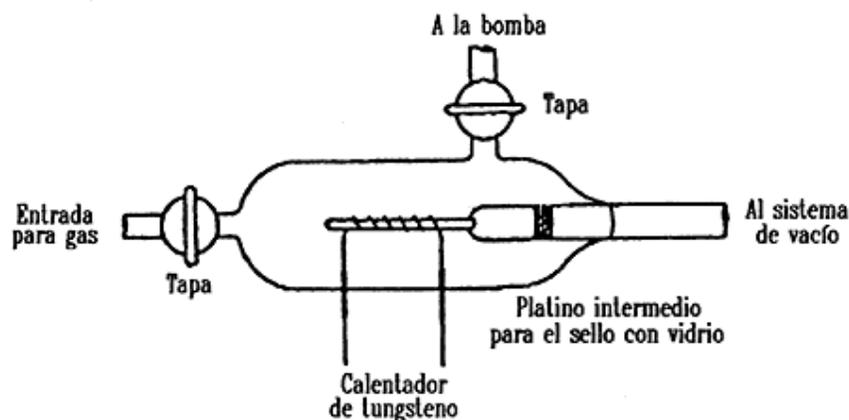


Figura VII.16. Lámparas incandescentes.

LA SIMULACIÓN ESPACIAL

El vacío en el espacio

Sabemos que la presión atmosférica a nivel del mar es de 760 torr, y que la presión decrece con la altitud. Cerca de los 90 km de altitud la presión decrece a 10^{-3} torr (troposfera y estratósfera). A los 1 000km, la presión es de aproximadamente 10^{-10} torr. Se calcula que después de esta altura la presión decrece en proporciones pequeñas, por lo que a los 10 000 km la presión es =

10^{-13} torr. Por esta razón son importantes para la tecnología espacial las técnicas de ultra alto vacío, que ayudan en las pruebas de naves espaciales, trajes, materiales, satélites, autotransportes, equipo y herramienta en condiciones extremas de baja presión y microgravedad. La simulación espacial se hace en cámaras especiales, proporcionando un conocimiento más claro de los efectos obtenibles en el espacio y de la confiabilidad en el equipo con que se cuenta para este campo (Figura VII.17).

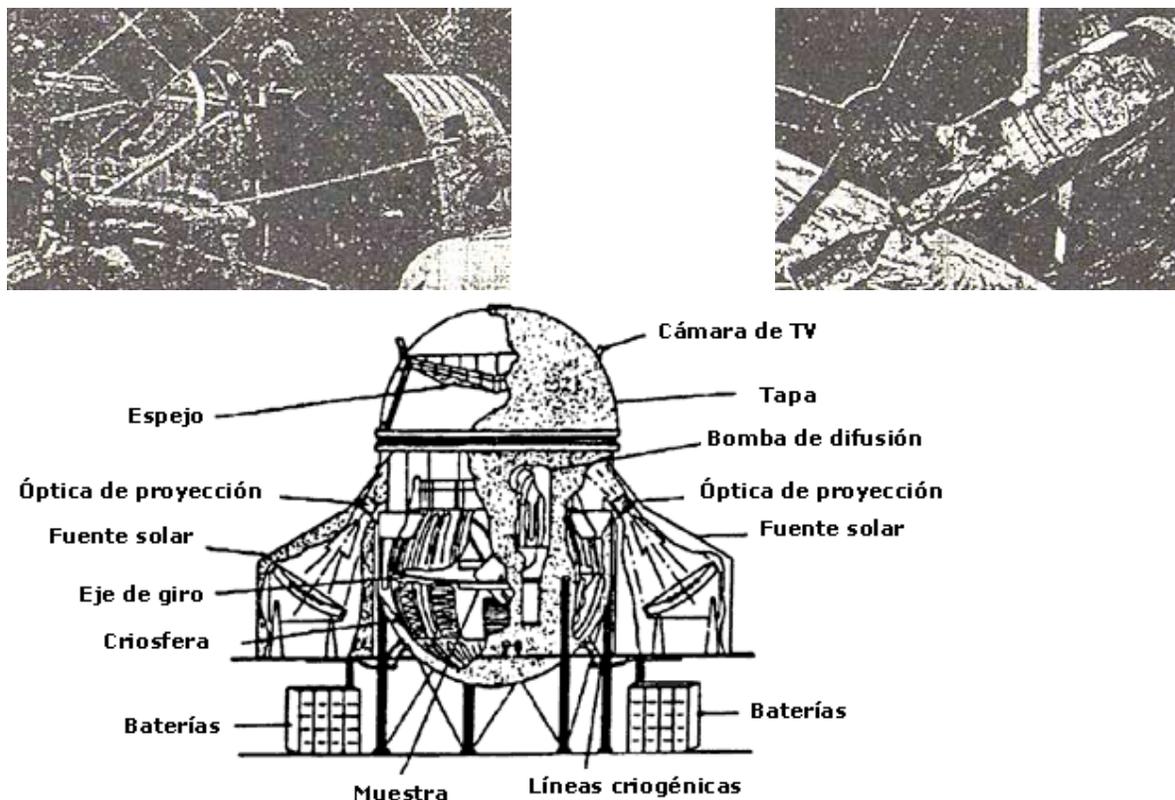


Figura VII.17. Simulación espacial.



APÉNDICE A

LOS MEDIDORES DE BAJA PRESIÓN

En este apéndice exponemos en la tabla III una reseña histórica del desarrollo de los medidores de vacío como función de los diferentes elementos físicos aprovechados. También presentamos una descripción más técnica del medidor de vacío por ionización de cátodo caliente, el cual por sus características se utiliza con frecuencia en los sistemas de alto vacío.

TABLA III. Desarrollo de los medidores de vacío: 1660-1983

ELEMENTO FÍSICO APROVECHADO: PRESIÓN				
<i>Clase</i>	<i>Tipo</i>	<i>Intervalo (torr)</i>	<i>Inventor</i>	<i>Notas</i>
Columna líquida	Manómetro de Hg	760-10 ⁻¹	Boyle (1660)	Tubo U inclinado diferencial
Mecánico	Boutdon	760-20		No depende del tipo de gas
	Diafragma	760-10 ⁻¹		No depende del tipo de gas
	Mnómetro de capacitancia	10-10 ⁻⁴	Olsen y Hirst (1929)	
Compresión	McLeod	10-10 ⁻²	McLeod	Dependencia parcial, no lee presiones de vapor
De elemento suspendido	Medidor de torsión	1-10 ⁻⁴	Sutherland (1897)	Mide la viscosidad del gas
	Fibras oscilantes	1-10 ⁻⁴	Langmuir (1913)	Dependen del tipo de gas
	Medidor de decremento	1-10 ⁻⁴		
	Rotación molecular	1-10 ⁻⁴		
	Medidor de resonancia	1-10 ⁻⁴		
ELEMENTO FÍSICO APROVECHADO: TRANSFERENCIA DE MOMENTO				
<i>Clase</i>	<i>Tipo</i>	<i>Intervalo (torr)</i>	<i>Inventor</i>	<i>Notas</i>
Radiómetro	Knudsen	10-10 ⁻³	Knudsen (1910)	No depende del tipo de gas
ELEMENTO FÍSICO APROVECHADO: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA				
<i>Clase</i>	<i>Tipo</i>	<i>Intervalo (torr)</i>	<i>Inventor</i>	<i>Notas</i>
	Pirani	760-10 ⁻⁴	Pirani (1906)	Depende del tipo de gas

Termopar 760-10⁻⁴ Voege (1906) Menor sensibilidad a menor presión
 Termistor

ELEMENTO FÍSICO APROVECHADO: IONIZACIÓN

<i>Clase</i>	<i>Tipo</i>	<i>Intervalo (torr)</i>	<i>Inventor</i>	<i>Notas</i>
Cátodo caliente	Colector largo	10 ⁻³ -10 ⁻⁸	V. Baeyer (1909)	Producción de iones positivos
	Bayard-Alpert	10 ⁻⁴ a 4 x 10 ⁻¹²	Bayard y Alpert (1950)	Utilizado a baja presión
	BAG modulado	10 ⁻⁴ - 10 ⁻¹³	Readhead (1960)	
	Extractor	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹⁶	Readhead (1966)	
	De haz doblado	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹⁶	Helmer y Hayward (1964)	Dependen del tipo de gas
Cátodo frío	Magnetron	10 ⁻⁶ a 3 x 10 ⁻¹⁸	Conn y Daghish (1954)	
	Magnetron invertido	10 ⁻⁴ a 3 x 10 ⁻⁶	Beck y Brisbane (1952)	
	Penning	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	Penning (1937)	Descargas eléctricas en el campo magnético
	Magnetron	10 ⁻⁵ a 5 x 10 ⁻¹³	Readhead (1959)	
	Radioactivo	200 a 5 x 10 ⁻⁴	Downing y Mellen (1946)	Dependen del tipo de gas

EL MEDIDOR DE IONIZACIÓN DE CÁTODO CALIENTE

El medidor por ionización de cátodo caliente consta básicamente de un filamento (cátodo), una rejilla y un colector (de iones). Su funcionamiento se puede explicar de la siguiente manera: cuando se hace pasar una corriente por el filamento, éste emite electrones que golpean la rejilla; la rejilla a su vez emite rayos X suaves, y estos rayos provocan la fotoemisión de electrones en el colector de iones. Este es un proceso que no depende de la presión (Figura A.1).

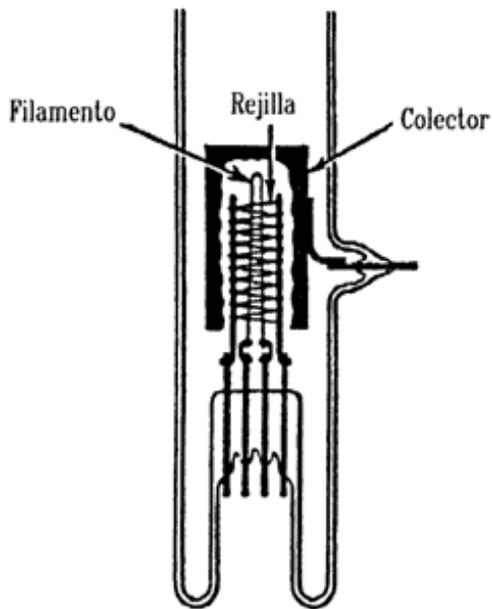


Figura A.1. Medidor de cátodo caliente convencional.

En un gas de bajas presiones (menores de 10^{-4} torr), el número de iones positivos producidos por el paso de una corriente de electrones es linealmente proporcional a la densidad de las moléculas del gas. Una medición en la corriente de iones es una medición de la presión a una temperatura dada.

El número de ionizaciones hechas por un electrón que pasa a través de un gas, depende del tipo de gas y de la energía cinética de los electrones. Por estudios de ionización en diferentes gases se sabe que la probabilidad mayor de ionización para casi todos los gases ocurre alrededor de los 150 volts, por esta razón, la energía de los electrones en un medidor de este tipo se fija en 150 volts.

Los medidores de ionización por cátodo caliente fabricados hasta 1950 podían medir valores de la presión de aproximadamente 10^{-8} torr. En 1950 Bayard y Alpert hicieron una modificación en el medidor de ionización de cátodo caliente para poder medir presiones menores que 10^{-8} torr. Ellos reemplazaron el colector cilíndrico de iones positivos por un alambre muy fino (0.01 mm) localizado dentro de la rejilla. Además, el filamento del medidor Bayard-Alpert se coloca afuera de la estructura de la rejilla, en forma diferente al medidor de cátodo caliente (Figura A.2).

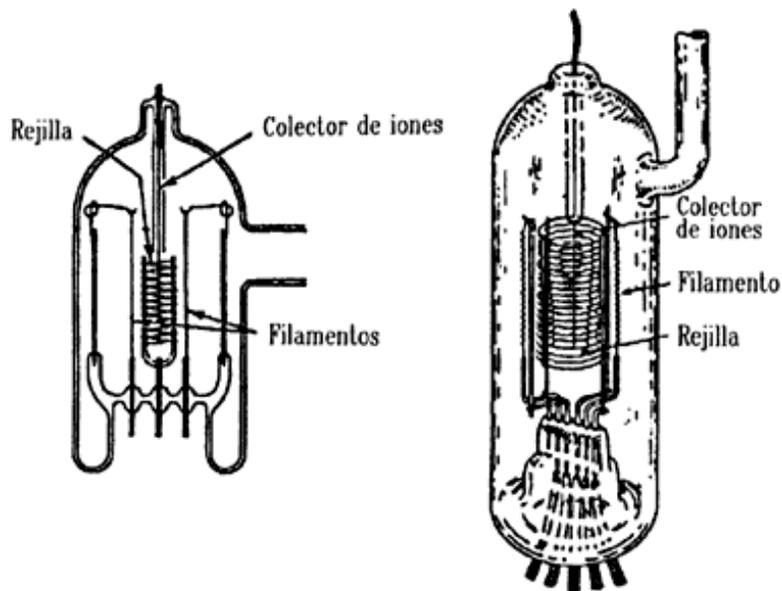


Figura A.2. Modificación hecha por Bayard y Alpert.

La existencia del efecto de los rayos X fue demostrada por Bayard y Alpert comparando la corriente de iones en el colector con el voltaje de la rejilla, y encontraron que en su medidor se reducía dicho efecto hasta una presión de 5×10^{-12} torr.

Este medidor es efectivo para sistemas comunes de vacío. Sin embargo, para los laboratorios de simulación espacial no es útil, ya que el espacio se encuentra a una presión de $\sim 10^{-16}$ torr. Los medidores que se requieren son ahora una modificación de espectrómetros de masas con un multiplicador de electrones hecho por W. D. Davis en 1962, y que funcionan como analizadores del gas residual de las cámaras, dando medidas de presión menores que 10^{-18} torr.



LOS MATERIALES AL VACÍO

Es importante para la tecnología el desarrollo y estudio de materiales que puedan ser utilizados a presiones menores que la presión atmosférica. Cada material tiene características propias, y algo fundamental de éstas es que varían según las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesto. Los materiales utilizados en los sistemas de vacío se seleccionan cuidadosamente, considerando de antemano sus propiedades. Los siguientes son algunos parámetros que se toman en cuenta:

Degasamiento. Este término indica la evolución natural de gases absorbidos (moléculas de gas dentro de un material) o adsorbidos (adhesión de moléculas de gas a la superficie del material) en vacío, y puede provenir de tres fuentes diferentes: evaporación (o descomposición química), desorción de superficies, y difusión fuera del material. Todos estos pasos elementales forman una reacción química sobre una superficie. El degasamiento es, en este caso, una de las interacciones entre una superficie y un gas (Figura B.1).

Se pueden calcular las proporciones de evaporación (cambio de fase de sólido o líquido a vapor) y equilibrio de la presión de vapor de los metales elementales a partir de relaciones termodinámicas.

Las proporciones de evaporación para aleaciones no son predecibles como en el caso de los elementos simples, aunque las proporciones de evaporación de los metales que componen la aleación nos dan una base de estimación. En la fabricación de equipo para alto vacío se usan metales que tienen una baja presión de vapor; los más utilizados son el acero inoxidable, el cobre, el bronce, el acero y el aluminio.



Figura B.1. Esquema de procesos elementales durante las interacciones gas-superficie.

El proceso de desorción de la superficie es la expulsión de una molécula adsorbida en la superficie, con lo cual se propicia el degasamiento del material.

La difusión fuera del material es la emigración de átomos o moléculas adsorbidas a lo largo de una superficie hasta que abandonan dicho material.

Permeabilidad. La permeabilidad de un material es una medida de la cantidad de gas (a una temperatura dada) que podrá difundirse a través de él por unidad de tiempo. Hasta hoy, no es posible obtener un valor absoluto de permeabilidad para cada material, ya que es afectada por las diferencias de presión, temperatura, pureza y las condiciones de superficie del material. Para determinar la permeabilidad en los materiales se hacen exámenes en condiciones ambientales controladas.

Propiedades de adhesión (pegamento). Para unir las componentes y formar un sistema de vacío, es necesario considerar el tipo de materiales que nos pueden servir para soldar, fundir o enlazar de manera que no tengamos una reacción química desfavorable en nuestro sistema. En general, para obtener un vacío óptimo lo que se pretende es no tener fugas (entradas de aire).

Economía. Los costos son un factor fundamental al considerar los materiales con los que fabricaremos un sistema de vacío, ya que existen materiales de bajo costo inicial, pero de alto costo al procesarlos, lo que los hace totalmente incosteables.

Los materiales usados con más frecuencia en las técnicas de vacío se presentan en la siguiente clasificación:

Generales

1) *Acero.* El acero templado es un acero sin tratamientos térmicos y de bajas concentraciones de carbón. Estos tipos de acero templado con bajo contenido de azufre son usados con frecuencia en sistemas de vacío. Se encuentran disponibles en diferentes formas y pueden ser unidos, fundidos o soldados. Se utilizan en los sistemas de vacío por su baja presión de vapor y como recubrimiento en las bombas de mercurio, ya que no es afectado por el vapor de Hg. Sin embargo puede ser afectado por la corrosión debido a la adsorción de vapor de agua.

2) *Acero inoxidable.* Es más resistente a la corrosión que el acero. Es una aleación de cromo y acero y se emplea en forma de tubos, platos, cámaras y extensiones. Para trabajos de vacío no es recomendable el acero inoxidable de la serie 303 ya que contiene azufre. Por otra parte, la serie 300 es muy utilizada en sistemas de ultra alto vacío; su conductividad térmica y eléctrica es baja, no es magnético, y las temperaturas a que se exponen los sistemas de este tipo no deben de exceder los 1 000°C, porque el cromo se comienza a evaporar a los 1 200°C.

3) *Aluminio.* Es de poco peso, fuerte, resistente a la corrosión con una baja presión de vapor, barato, fácil de trabajar, y fácilmente obtenible en las formas más comunes, como tubos, hojas, barras, etcétera.

4) *Bronce.* Es esencialmente una aleación de cobre y estaño. Es fácil de trabajar y con él se construyen algunas válvulas.

5) *Cobre.* Ocasionalmente se usa para electrodos no magnéticos, sirve también para sellos anulares de vidrios y bridas. Tiene una densidad de 8.8 a 8.9 g/cm. Su punto de fusión es de 1083°C.

6) *Vidrio.* El vidrio más comúnmente usado en los laboratorios de sistemas de vacío es un borosilicato conocido como Pyrex. Se construyen envases, cámaras, ventanas; etcétera.

Metales especialmente refractarios

1) *Molibdeno.* Tiene un punto de fusión alto (2 620°C), por ello se usa con frecuencia para filamentos, botes, y depósitos en los cuales el material será evaporado al vacío. Otro uso es para bombear metal activo a muy bajas presiones. El molibdeno se oxida con rapidez cuando se calienta en el aire.

2) *Tungsteno.* Su punto de fusión está catalogado como el más alto de cualquier metal (3 382°C). Es difícil de trabajar, pero se encuentra disponible en hojas y alambres que pueden ser procesados en frío para tiras de calentadores y filamentos. El tungsteno se oxida rápidamente cuando es calentado en la atmósfera, y emite electrones a temperaturas superiores a los 2 000°C. Se usa con frecuencia como filamento en los medidores de presión por ionización, electrodos y anticátodos para tubos de rayos X. Tiene una densidad de 19-19.4 g/cm.

3) *Tántalo.* Es más dúctil que el molibdeno y el tungsteno pero más costoso. Resiste el ataque de ácidos y se utiliza en la construcción de botes, chalupas y filamentos para depósito de películas delgadas en vacío, además de calentador de elementos en vacío y actúa como colector de los 600 a los 1 000°C. Tiene un punto de fusión de 2 996°C.

Cerámicas

Las cerámicas son usadas como aislantes térmicos o eléctricos en altas temperaturas. Se emplean para sostener piezas que van a calentarse en la construcción de cámaras para alto vacío. También son aislantes en las tapas de acero de las cámaras, donde se colocan las barras de metal que atraviesan la cámara conectando el interior de la misma con el exterior.

Los tipos de cerámica más usados en sistemas de vacío son: alúmina, porcelana, lava y zafiro. A continuación se da una descripción breve de estos tipos de cerámica.

1) *Zafiro*. Es la presentación más pura del óxido de aluminio, Se puede obtener en forma transparente para usarse como ventanas en sistemas de vacío, las cuales se pueden exponer a temperaturas de 1 900°C. La transmisión infrarroja del zafiro es mejor que la de otros materiales. El zafiro es producido en forma de monocristales y puede ser sellador de vidrio.

2) *Porcelana*. Contiene tres ingredientes principales: arcilla, pedernal y feldespato; variando las proporciones de estos materiales, cambian ciertas propiedades de la cerámica, como su resistencia a choques térmicos, resistencia dieléctrica o mecánica. La porcelana se encuentra disponible en diámetros y longitudes estándar con roscas de tornillo en las puntas. La temperatura máxima a la cual opera la porcelana es cercana a los 1 000°C.

3) *Lava*. Cerámica hecha de talco natural, puede operar a temperaturas entre los 1 000 y 1 200°C.

Otro tipo de materiales importantes en la tecnología de vacío son los plásticos y los cauchos. Para los plásticos se consideran las condiciones a las que serán expuestos, la cantidad de uso ha de dárseles, cómo y dónde se emplearán, la temperatura a la que estarán expuestos y si formarán una parte permanente o temporal en el sistema. Algunos plásticos especiales que tienen una alta presión de vapor son los acrílicos y los fluorocarbonos.

Los cauchos se dividen en caucho natural y caucho sintético. Algunos de los cauchos sintéticos son: nitrilo, neopreno, butil y GR-S.



APÉNDICE C

FUGAS

Una fuga (entrada de aire) sube la presión base del sistema y deteriora el vacío. Cuando ocurre una fuga a presiones arriba de 10^{-6} torr, es común encontrarla en lugares como la pared externa de la cámara. Para localizarla se usa un líquido o vapor para el cual la sensibilidad del medidor o la velocidad del bombeo son muy diferentes a la del aire bombeado. Con una piseta de acetona o alcohol etílico, o una lata de aerosol de freón líquido se moja la superficie que se quiere probar. Estos líquidos usualmente causan un cambio abrupto en la presión indicada mientras fluyen por la fuga. Una desventaja de este método es que el solvente puede contaminar o dañar los sellos circulares.

En sistemas de alto y ultra alto vacío se puede usar helio para detectar fugas, ya que los medidores de ionización son poco sensibles a este gas y la presión decae al ser introducido el gas por la fuga.

En un sistema de vidrio, una fuga que sube la presión a un valor entre los 10 militorr y varios torr puede ser localizada a través de una bobina tesla. La superficie del vidrio es barrida con la descarga de la bobina. La descarga será dirigida preferencialmente hacia la fuga y unas manchas brillantes blancas darán a conocer su localización al pasar la descarga por ella, aunque no es conveniente usar este método en paredes delgadas o en uniones de metal y vidrio, porque la descarga puede agujerar el vidrio.

Para fugas muy pequeñas en sistemas de ultra alto vacío se necesita utilizar un espectrómetro de masas como detector.



BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Andrew, Guthrie, *Vacuum Technology*, John Wiley & Sons, 1963.

Beck, A., *Fisiología: molecular, celular y sistemática*, Publicaciones Culturales, 1983.

Beckwith, T. G. y N. Lewis Buck, *Mechanical Measurements*, Addison-Wesley, 1973.

Dushman, Saul, *Vacuum Technique*, John Wiley & Sons, 1960.

Encyclopaedia Britannica, Encyclopedia Britannica, 1982.

Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, 1966.

Madey, Theodore E. y William C. Brown, *History of Vacuum Science and Technology*, publicado para la American Vacuum Society por el American Institute of Physics, 1984.

O'Hanlon, John F., *A User's Guide to Vacuum Technology*, John Wiley & Sons, 1980.

Roberts y Vanderslice, *Ultrahigh Vacuum and its Applications*, Series in Solid State Physical Electronics, 1963.

Roth, A., *Vacuum Technology*, North-Holland, 1982.

Weissler, G. L. y R. W. Carlson, *Methods of Experimental Physics: Vacuum Physics and Technology*, Academic Press, vol. 14, 1979.

Inicio



COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de octubre de 1995 en la Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calzada de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F. La formación y composición es de Miguel Navarro. Se tiraron 7 000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS.



Inicio



CONTRAPORTADA

Cuando se piensa en el vacío, no dejan de venir a la mente las regiones interestelares en las que, prácticamente, no hay sino vacío entre una galaxia y otra. Sin embargo, en la práctica, los físicos llaman vacío al lugar donde la presión que se mide es menor que la presión atmosférica normal. Por supuesto, éste se halla sujeto a graduaciones: grueso o primario, medio, alto y ultra alto. En cada caso la presión va siendo menor. Todo lo anterior se analiza porque los físicos le han ido descubriendo con el tiempo un gran número de aplicaciones. Así, a mediados del siglo XVII, Gasparo Berti fabricó un dispositivo cuyo fin era entender el principio del sifón y que derivó en una máquina para hacer el vacío.

En este camino lo siguieron Torricelli, inventor del barómetro, mediante el cual se captó claramente el concepto de lo que es la presión del aire; Pascal, quien fue uno de los físicos que insistieron en que se aceptara la idea del vacío, hasta llegar a Otto von Guericke, con su famoso experimento de los hemisferios de Magdeburgo, un par de semiesferas unidas en las que se hacía el vacío y a las que no podía separar un tiro de 8 caballos en cada extremo. La tecnología actual permite obtener vacíos que van desde casi la presión atmosférica hasta 10^{-13} torr, y esto porque hay gran variedad de usos del vacío que van del laboratorio a la industria.

En el presente libro, sus autores ofrecen en forma amena y clara las relaciones entre el hombre y el vacío, las muy cercanas: cada vez que respiramos hacemos un vacío, y las tecnológicas. Así, nos encaminan por entre los vericuetos de los mil y un usos del vacío y de las formas como se logra, por no mencionar sus innumerables aplicaciones.

Laura Talavera cursó su licenciatura en física en la Escuela Superior de Ciencias de la Universidad Autónoma de Baja California. Actualmente cursa su maestría en la Universidad de Puerto Rico. Mario Farías hizo su licenciatura en ingeniería mecánica y eléctrica en el ITESO, su maestría y su doctorado en ciencias, física, en el CINVESTAV-IPN. Es investigador de tiempo completo en el Instituto de Física de la UNAM, Laboratorio de Ensenada, Baja California.

Portada: experimento de los hemisferios de Magdeburgo. (Grabado del siglo XVIII.)

