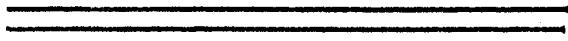


20

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE CIENCIAS



MEDIDORES DE VACIO EN EL INTERVALO  
DE 1 ATM, a  $10^{-6}$  mm de Hg.

T E S I S  
Que para obtener el título de:  
F I S I C O  
P r e s e n t a:

Silvia de Jesús González Pérez Sandi





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## PROLOGO

En la actualidad la investigación para el desarrollo de las técnicas de vacío tiene una gran importancia; ya que el uso de sistemas de vacío en diversas áreas de la investigación científica, así como de la industria, es cada vez más numeroso. Ejemplos claros de esto son los sistemas de vacío usados en los aceleradores de partículas, en el crecimiento de cristales ó en su estudio por medio de difracción y en la construcción de fotoceldas, en la industria se tienen en la producción de acero y en la conservación de alimentos, entre otros.

Ahora, la mayoría de los instrumentos de los que consta un sistema de vacío son poco accesibles y la tecnología asociada a ellos está poco desarrollada en el país. De la gran variedad de instrumentos que componen un sistema de vacío se escogió el área de medidores para desarrollar el presente trabajo.

En esta área existen una gran variedad de transductores, y he optado por dos de ellos para desarrollar y construir. Tomando como modelo la experiencia obtenida por diversas firmas, cuyos aparatos son efectivos. Con lo que pretendo en cierta manera, desarrollar una tecnología propia adecuada a las necesidades de nuestro medio.

Los medidores construidos son un termopar con intervalo de trabajo de 760 mm de H<sub>g</sub> a 10<sup>-3</sup> mm e H<sub>g</sub> y uno de cátodo frío con intervalo de 10<sup>-3</sup> mm de H<sub>g</sub> a 5 x 10<sup>-6</sup> mm de H<sub>g</sub>. Ambos realizados en materiales resistentes a atmósferas reductoras, fueron

hechos y probados en el Instituto de Física de la U.N.A.M.

Quiero agradecer a las personas que de una u otra forma  
tuvieron que ver en la realización de éste trabajo.

**Silvia González**

## INDICE

I.-Antecedentes.....	1
1.1 ¿Que es vacío?.....	1
1.2 Camino libre medio.....	3
1.3 Fenómenos de transporte.....	4
1.4 Ionización.....	10
II.-Medidores de vacío.....	12
2.1 Sistemas de vacío.....	12
2.2 Medidor termopar.....	17
2.3 Medidor de cátodo frío.....	26
III.-Construcción y resultados.....	31
3.1 Termopares.....	31
3.2 Cátodo frío.....	39
3.3 Fuentes.....	45
IV.-Conclusiones.....	49
Apéndices	
A.-Demostración de mv eV.....	54
B.-Fenómenos físicos asociados a las bombas.....	55
C.-Fenómenos físicos asociados a los medidores.....	57
D.-Potencial de contacto interno (teoría clásica).....	60
E.-Descripción de los aparatos.....	63
F.-Operación de un sistema de vacío con bomba difusora..	67
Bibliografía.....	69

## CAPITULO I

### Antecedentes

#### 1.1 - ¿Qué es el vacío?

Para la pregunta anterior no se tiene una respuesta única, ya que en el diccionario la palabra vacío se define como un espacio en el cual no hay materia, pero esto no es posible realizarlo. Por lo tanto, en la práctica, se define al vacío como "Un espacio ocupado por un gas a una presión menor que la presión atmosférica".

La historia del vacío comienza a principios del siglo XVII con la observación de Galileo al hecho de que el agua no puede ser sacada de un pozo profundo con una bomba aspiradora, ya que el agua no puede ser elevada más allá de 18 codos. Torricelli continúa con las investigaciones comenzadas por Galileo. El sustituyó al agua por mercurio y construyó un tubo que tenía un extremo cerrado, el cual lo llenó de mercurio y lo invirtió en una cubeta que contenía el mismo líquido: al quitar el dedo que impedía que el mercurio se saliera observó que "el tubo se vaciaba parcialmente". Para saber si el espacio que dejaba el mercurio libre estaba "solo", llenó dos de sus tubos con mercurio y los invirtió sobre la cubeta, agregó agua sobre el mercurio de la cubeta y comenzó a sacar uno de ellos; al a'canzar el agua, el mercurio se vació y el tubo se llenó de agua completamente, Torricelli dedujo por lo tanto que el vacío existía. Con ésto y la -

hipótesis de que el aire pesa, Torricelli construyó su barómetro, en 1643. Siete años después Von Guericke construye la primera bomba de vacío.

La aplicación de las propiedades de los gases a bajas presiones y el comportamiento de ciertas sustancias a temperaturas bajas, hizo posible el desarrollo tecnológico en el área de vacío. En la ingeniería de vacío se usan estas propiedades y comportamientos para hacer una subdivisión de acuerdo con el intervalo de presión por debajo de la presión atmosférica.

Bajo vacío	760 a $10^{-3}$ torr
Vacío medio	$10^{-3}$ a $10^{-5}$ torr
Alto vacío	$10^{-5}$ a $10^{-8}$ torr
Ultra alto vacío	$10^{-8}$ a $10^{-11}$ torr
Ultra alto vacío extremo	menor de $10^{-12}$ torr

La siguiente tabla muestra las unidades usuales de trabajo y sus equivalencias

	atm	mm de Hg	micron	bar	pascal
1 atm	1	760	$760 \times 10^3$	1.01325	101330
1 mm de Hg y torr	$1315 \times 10^3$	1	$10^3$	$1.33 \times 10^{-3}$	133.3
1 micron	$131 \times 10^6$	$10^{-3}$	1	$1.33 \times 10^{-6}$	$133.3 \times 10^{-3}$
1 bar	0.9869	750.06	$750 \times 10^3$	1	$10^5$
1 pascal	$9869 \times 10^{-5}$	$7.50 \times 10^{-3}$	7.50	$10^{-5}$	1

Tabla 1.1 Unidades y equivalencias\*

\* Una tabla más completa puede consultarse en Vacuum technology, A. Roth. p.p 42-43

Ya que los fenómenos físicos que se presentan a baja presión son utilizados en el diseño de instrumentación para el vacío, se verán a continuación algunos de ellos.

### 1.2.- Camino libre medio

Se llama camino libre a la distancia que atraviesa una molécula entre colisiones sucesivas. Si se les saca el promedio a las distancias que recorren las moléculas de un gas, se tendrá el camino libre medio  $\lambda$ .

La definición anterior habla de las moléculas como si éstas fueran rígidas, las colisiones entre ellas y con las paredes son elásticas y no sufren fuerzas entre sí, por lo que se mueven en línea recta. Estas consideraciones llevan a

$$\lambda = 1/n\sigma \quad 1.1$$

$$\sigma = \pi r^2 \quad 1.2$$

$\sigma$ .- el área blanco de una molécula,  $n$ .- el número de moléculas por unidad de volumen,  $r$ .- el radio de exclusión

A " $\sigma n$ " se le conoce como sección eficaz. Como se supone que el gas es ideal se tiene

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 P} \quad 1.3$$

$k$ .- constante de Boltzmann,  $T$ -Temperatura,  $P$ -presión.

De la ecuación 1.3, se puede observar que para bajas



presiones se tendrá que la mayor parte de las moléculas chocan con las paredes del recipiente y no entre ellas.

Las magnitudes de los coeficientes de viscosidad, de conducción de calor y de difusividad, están relacionados con el camino libre medio.

### 1.3 Fenómenos de transporte

Los fenómenos de transporte son propiedades de un gas, estos son: viscosidad, conducción de calor, difusión y transpiración térmica.

#### a) Viscosidad

Un gas que fluye en un tubo, experimenta una resistencia al flujo, esto es, la velocidad del flujo decrece del centro hacia las paredes. Cada capa de gas paralela a la dirección del flujo ejerce una fuerza tangencial en la capa adyacente, lo que ocasiona que la capa viaje más lentamente. A este fenómeno se le conoce como viscosidad interna.

La fuerza tangencial es el resultado de la transferencia de momento, y tiene la expresión siguiente

$$F = \eta \frac{du}{dy}$$

1.4

Nota: En este trabajo se usará sistema de unidades MKS, a menos que se especifique otro

F- fuerza en unidad de área,  $\frac{du}{dy}$  razón de cambio de la velocidad del gas con respecto a la distancia de las superficies

A.  $\eta$  se le conoce como coeficiente de viscosidad y se llega a la siguiente definición: es la fuerza tangencial en la unidad de área entre la unidad de gradiente de velocidad, y viene expresado por

$$\eta = \frac{1}{3} m n v \lambda \quad 1.5$$

m-masa de la molécula, v-velocidad media de las moléculas.  $\lambda$  - camino libre medio (distancia entre las capas ver.Fig.1)

La viscosidad interna depende del fluido, de la rugosidad de las superficies, así como del gradiente de velocidades del gas.

De la ec. 1.4 se desprende que la viscosidad no depende de la presión. Mas este resultado solo es válido para un intervalo limitado de presión. Una teoría más completa lleva a que la fuerza es

$$\eta = \frac{P m v}{4 k T} \frac{u_i}{\beta} \quad 1.6$$

P-presión,  $u_i$ -velocidad de la capa,  $\beta$ -constante, k.-cte de Boltzmann donde  $\frac{P m v}{4 k T}$  es conocido como viscosidad molecular

libre, La constante  $\beta$  está relacionada con el deslizamiento de las moléculas en la capa de gas.

Para la mayoría de los gases  $\beta \approx 1$

### b) Difusión

El efecto de difusión fue descrito por T.L. Ibbotson\* como: Si un gradiente de temperatura es aplicado a una mezcla de dos gases de concentración uniforme hay una tendencia para las moléculas más grandes y pesadas (masa  $m_1$  y diámetro  $\delta_1$ ) a moverse al lado frío, y para las moléculas pequeñas y ligeras ( $m_2$  y  $\delta_2$ ) a moverse al lado caliente. El efecto de separación de difusión térmica (coeficiente  $D_T$ ) es finalmente balanceado por el efecto mezclador de la difusión ordinaria ( $D_{12}$ ) hasta que se llega a un estado estable y un gradiente de concentración quede asociarse con el gradiente de temperatura.

Se define el coeficiente de separación térmica  $K_T$  por

$$K_T = \frac{D_T}{D_{12}} = \frac{-df_1}{d \ln T} = \frac{df_2}{d \ln T} \quad 1.7$$

$$\downarrow \quad f_1 + f_2 = 1$$

$f_{1,2}$  - proporciones del gas pesado y del gas ligero.

Este coeficiente proporciona el monto de separación térmica obtenida por los efectos de difusión térmica y ordinaria. El coeficiente depende de la razón  $m_1/m_2$  y del campo de fuerzas que existan entre moléculas.

### c) Transpiración Térmica

\* Dushman p.p 67

Cuando 2 cámaras A y B a diferentes temperaturas y presiones,  $(T_A, P_A)$  y  $(T_B, P_B)$  respectivamente, son conectadas por un tubo u orificio, sus presiones relativas se modifican en función de  $\frac{\lambda}{d}$ , donde  $\lambda$  es el camino libre medio y  $d$  el diámetro del tubo u orificio.

Para  $\lambda \ll d$ , se infiere de la ley del gas ideal

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{T_A}{T_B} \quad 1.8$$

ya que las colisiones entre moléculas predominan sobre las colisiones con la pared.

Cuando  $\lambda \gg d$  y se está en equilibrio termodinámico, se tiene

$$\frac{P_A}{P_B} = \sqrt{\frac{T_A}{T_B}} \quad 1.9$$

Esta ecuación sirve para calcular el valor de la presión de un recipiente que está a una temperatura distinta a la que se encuentra el medidor.

#### d) Conducción de calor

La conducción de calor es explicada por la teoría cinética de una manera análoga a la usada para la viscosidad

Sea un recipiente, el cual tiene una de sus caras a una temperatura  $T_1$  y la cara opuesta a la anterior esta a una temperatura  $T_2$ . La explicación de conducción de calor se tendrá al notar que las moléculas que se mueven en dirección a la super

ficie caliente portan menos energía que las que se mueven hacia la superficie más fría.

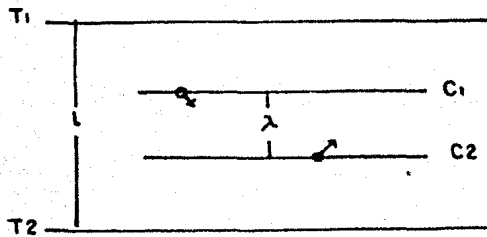


Fig. 1.- el movimiento de las moléculas entre copas a distintas temperaturas produce la conducción del calor.

La relativa caída de temperatura entre las capas  $C_1$  y  $C_2$  es

$$\Delta T = 2 (T_1 - T_2) \frac{\lambda}{l} \quad 1.10$$

En un gas se tiene que  $\frac{1}{6} nv$  es el número de moléculas que cruza una unidad de área en unidad de tiempo de donde se tiene que el calor transferido en unidad de área en unidad de tiempo

$$E = \frac{1}{6} nv \cdot 2 mc_v (T_1 - T_2) \frac{\lambda}{l} \quad 1.11$$

y se define el coeficiente de conducción de calor

$$\chi = \frac{1}{3} m n v \lambda c_v = \eta c_v \quad 1.12$$

$\eta$ .- viscosidad,  $l$ .- distancia de separación de las superficies,  $c_v$ .- calor específico a volumen constante,  $m$ .- masa del gas,  $v$ .- velocidad media de las moléculas.

Si se toma en cuenta la transferencia de energía vibracional y rotacional da

$$\chi = \frac{1}{4} (9\gamma - 5) \eta c_v \quad 1.13$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

$C_p$ .- calor específico a presión constante

De estas consideraciones se tiene que  $\chi$  no depende de la presión mientras el camino libre medio  $\lambda$  sea pequeño comparado con las dimensiones del recipiente, ésto ocurre en el intervalo en el que se presenta el flujo molecular.

El estudio de la conductividad térmica a baja presión muestra que ésta decrece linealmente con la presión. La parte teórica ha sido desarrollada desde dos puntos de vista. El primero, desarrollado por Knudsen\*, envuelve una consideración del mecanismo de transferencia de energía por moléculas individuales

\* Dushman (Knudsen p.p.51, Smoluchowski 54)

que inciden sobre una superficie caliente. El segundo punto de vista lo desarrolló M. Von Smoluchowski\* y se basa en el concepto de una discontinuidad de temperatura.

En ambas teorías se llega a que el calor transferido de un alambre caliente de radio  $a$  situado a lo largo del eje de un cilindro de radio  $r$  es

$$E_0 = \frac{\chi(T_1 - T_0)}{\alpha \ln\left(\frac{r}{a}\right) + \beta' \lambda \left(\frac{\alpha}{\gamma} + 1\right)} \quad 1.14$$

$$\beta' = \frac{2 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{2}{\gamma + 1} \cdot \frac{9\gamma - 5}{4}$$

$T_1$  - temperatura del alambre.  $T_0$  - temperatura del recipiente,  $\alpha$  - coeficiente de acomodación.

El coeficiente de acomodación no depende mucho del material, sino de la limpieza y rugosidad de éste, así como de la absorción del gas en él

De lo que se mencionó se ve que la diferencia entre viscosidad, conducción de calor y difusión, está en que la primera depende de la transferencia de momento, la segunda de la transferencia de energía y la tercera de la transferencia de masa

#### 1.4.- Ionización.

La ionización es el resultado de arrancar o ceder electrones a un átomo o molécula. El proceso de ionización por bombardeo se explica a continuación

\* Dushman (Knudsen p.p.51, Smoluchowski 54)

La energía cinética adquirida por un electrón que pasa a través de una diferencia de potencial  $V$  (ver apéndice A), es

$$\frac{1}{2} m v^2 = e V \quad 1.15$$

Cuando esta energía excede un cierto valor crítico  $V_i$ , existe una probabilidad definida, la cual varía con  $V$  y con la naturaleza del gas, que colisiones entre electrones y moléculas lleve a la formación de iones positivos, o sea, la de expulsar electrones de la molécula

Para un valor constante de voltaje de aceleración mayor a  $V_i$ , el número de iones positivos formados por electrones, dentro de ciertos límites, debe variar linealmente con la presión, siendo mínimo a bajas presiones, ya que el electrón generalmente colisiona una vez al ir del cátodo al ánodo

Este hecho motiva a idear una forma de medir la presión, ya que la concentración de moléculas es proporcional a la presión, si se supone que la temperatura y el volumen permanecen constante.

#### Referencias

- 1) A USER'S GUIDE TO VACUUM TECHNOLOGY, JOHN F.O HANLON : USA, Wiley-Interscience, 1980
- 2) Scientific Foundations of VACUUM TECHNIQUE, S.DUSHMAN USA, Wiley-J.M.Lafferty, 1962
- 3) TECNICAS DE VACIO, NOTAS IFUNAM, 1974

Nota: Para ampliar la información sobre fenómenos de transferencia "Transport Phenomena", Bird, Steward y Lightfood U.S.A. Ed.Wiley, 1960.



## CAPITULO II

## Medidores de Vacío

## 2.1 - Sistemas de Vacío

Como se mencionó en el capítulo anterior, se han hecho varias subdivisiones en los intervalos de vacío, a decir: Bajo vacío, Vacío medio, Alto vacío, Ultra alto vacío y Ultra alto vacío extremo. Estas subdivisiones obedecen a una elección del fenómeno físico que se explora para lograr el vacío deseado o requerido.

	Bajo vacío	Vacío medio	Alto vacío	Ultraaltovacío
Intervalo de Presión	$760$ a $10^3$ TORR	$10^2$ a $10^{-2}$ TORR	$10^3$ a $10^{-4}$ TORR	$10^{-9}$ a $10^{-11}$ TORR
No. de partículas en $cm^3$	$10^{19}$ a $10^{13}$	$10^{12}$ a $10^{11}$	$10^{11}$ a $10^8$	$10^8$ a $10^5$
Tipo de flujo	flujo continuo	Cambia a flujo molecular	flujo molecular	flujo molecular
Camino libre medio	$6.6 \times 10^{-6}$ cm a 3 cm	5cm a 5m	5m a 5 km	5 km a $5 \times 10^3$ km
Factor determinante para la elección de bomba	Volumen del recipiente a evacuar	Volumen y forma del recipiente	tamaño y estado de la superficie	Tamaño y estado de la superficie

Tabla 2.1 Características de los intervalos de vacío

Como se observa en la Tabla 2.1 para obtener un vacío deseado, es necesario diseñar un sistema de vacío, esto es, seleccionar las componentes que una vez colocadas en forma congruente con sus tubos, codos y accesorios, permitan encontrar las condiciones reales de vacío que se tendrán en la cámara.

Las componentes y accesorios en el sistema son:

a) Las válvulas

Las válvulas son necesarias en un equipo de vacío, ya que permiten la operación adecuada del equipo, es decir, dividen al sistema en subsistemas, con lo cual al cerrar las válvulas asociadas a un subsistema lo aíslan del resto del sistema. Existen varios tipos de válvulas como: De fuelle, de mariposa, de aguja etc.

#### b) Trampas de vacío

Estas se forman de una superficie en general metálica, que estando fría y siendo colocada en el flujo de vapores ó cerca de ellos, los atrapa, es decir, los captura por condensación, aumentando el vacío en la cámara y manteniéndola limpia.

#### c) Bombas

En la tabla 2.1 se observa que para el intervalo de vacío que se requiere, se debe seleccionar la bomba adecuada, ya que es necesario tomar en cuenta factores como: tiempo de bombeo, tiempo de reciclaje, desgasificación de las paredes y materiales que se pondrán en el sistema.

Se han diseñado una gran cantidad de bombas, utilizando los fenómenos físicos que son propios para obtener vacíos (ver apéndice B).

Se usan dos criterios para clasificar las bombas: El primero toma en cuenta el hecho de que si la bomba expulsa el gas absorbido a la atmósfera ó lo retiene. El segundo se basa en si la bomba necesita una bomba de apoyo para obtener un cierto prevacío antes de empezar a funcionar ella misma.

En la tabla 2.2 se ha resumido los principales tipos de

bombas y el intervalo en el que trabajan (Una tabla de las bombas más comunes en el mercado y sus características principales puede consultarse en "Técnicas de Vacío" Notas IFUNAM, 1974, pp.25).

La bomba mecánica (como la rotatorio de paletas en aceite) no requiere de bomba de pre-vacío y la salida de los gases, en general, es a la atmósfera, si los gases no son tóxicos.

La bomba de adsorción, no necesita una bomba de apoyo y ella retiene los gases y según sea el gas por adsorber, es la cantidad de sorbente que se requiere.

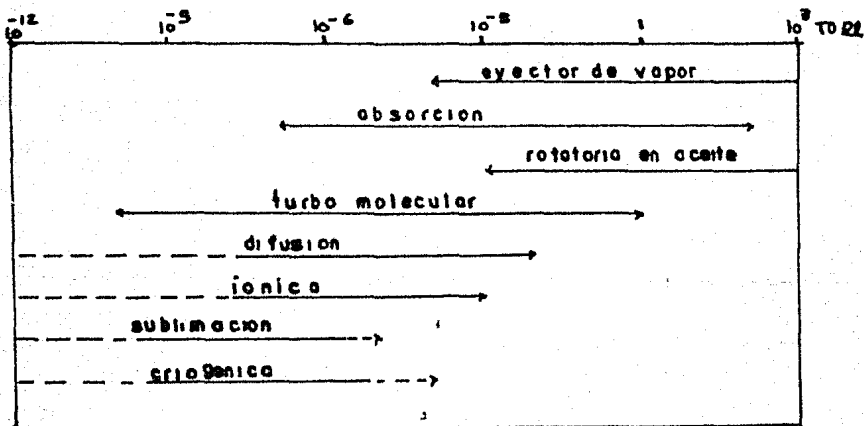


tabla.2.2. bombas de vacío y su intervalo de trabajo

La bomba difusora no descarga directamente a la atmósfera por lo que necesita una bomba de apoyo.

Bomba iónica, retiene los gases y necesita de una bomba de pre-vacío. Junto con éstas se usan las bombas de sublimación.

Se puede considerar como una bomba criogénica a la unión de una trampa fría con una bomba mecánica y la difusora, ya que el resultado es el mismo.

#### d) Medidores

Los medidores forman una parte importante en un sistema de vacío, ya que son indicadores del vacío que se tiene en cierto momento en la cámara ó en algún subsistema. Un ejemplo de su uso se puede ver con las bombas que necesitan una bomba de apoyo, ya que si la bomba principal es prendida antes de obtener el vacío que requiere para funcionar, algunos de sus componentes pueden sufrir algún daño.

Como se mencionó en el capítulo I, existen fenómenos que ocurren cuando se está a una presión menor de la atmosférica y estos han sido utilizados para el desarrollo de medidores de vacío (ver apéndice C); estos dependen de la presión y del gas, a estos medidores se les denomina indirectos. Los medidores de presión, denominados directos ó absolutos, solo dependen de su geometría y proporcionan directamente la presión.

Un problema que se presenta en el diseño de un sistema de vacío es la selección del medidor adecuado. Una elección correcta depende de los conocimientos de los principios básicos en los que se basa el medidor, el intervalo de presión en el que se va a usar y la seguridad de éste en ese intervalo.

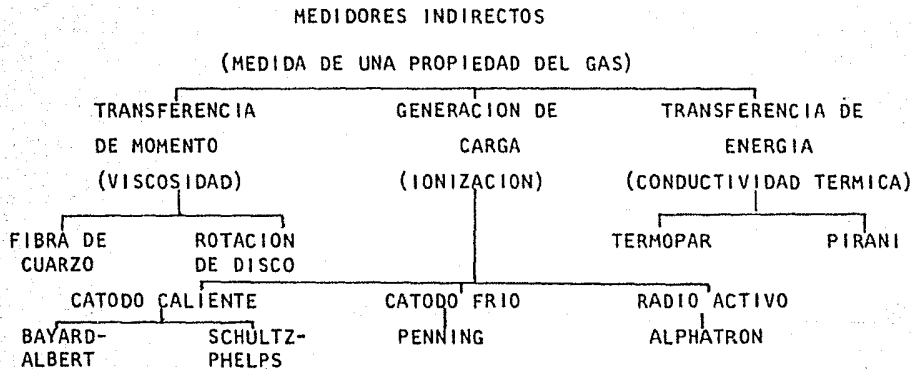
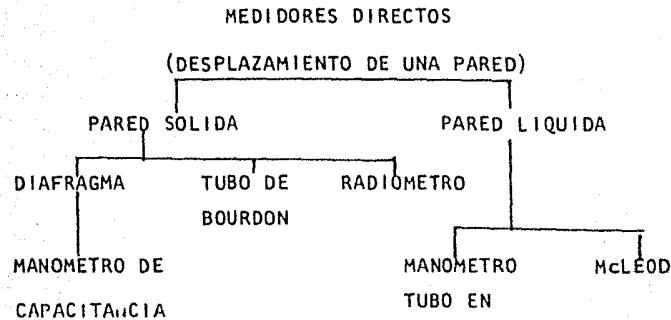


TABLA 2.3.- PRINCIPALES MEDIDORES



ventajas y desventajas, las cuales deben tenerse en cuenta para saber si es lo que se desea. Las principales ventajas y desventajas del termopar son

Ventajas	Desventajas
1) Tamaño pequeño	1) Su calibración debe de terminar la relación temperatura-voltaje inducido que se supone seguirá
2) Conveniencia de Montaje	2) Deben evitarse gradientes de temperatura
3) Bajo costo	3) El mínimo de operación es 20°C
4) Amplio intervalo	4) No pueden usarse desnudos en un flujo
5) Un grado de exactitud aceptable, su calibración se verifica fácilmente	5) Los alambres no homogéneos causan FEM difíciles de detectar
6) Su señal puede usarse para manejar registradores	6) Requieren un amplificador en la mayoría de las mediciones
7) Son factibles grandes distancias de transmisión	7) El trabajo a bajas temperaturas afecta su calibración
8) No representan peligro de contaminación	8) Se calibra para cada gas
9) Respuesta rápida	
10) Buena reproducibilidad por largo tiempo	

Las ventajas y desventajas enumeradas arriba son consecuencia directa de los materiales usados, así como del uso que

se le de al medidor. Sin embargo varias de ellas son consecuencia de los efectos físicos que se presentan en el medidor, por ej. grandes distancias de transmisión, los alambres no homogéneos causan FEM difíciles de detectar, etc.

Se dijo que si el fenómeno de conducción no existiera, no se podría medir la presión con el termopar, ahora se verá que es necesario que existan tres efectos y tres leyes termoeléctricas para que el fenómeno de termopar exista.

En 1821, T.J. Seebeck descubre en un circuito compuesto de dos metales (A y B) soldados en sus extremos (ver Fig. 2), que al calentar una de las uniones soldadas, se induce una corriente eléctrica, y esto persiste mientras exista una diferencia de temperatura entre las dos uniones

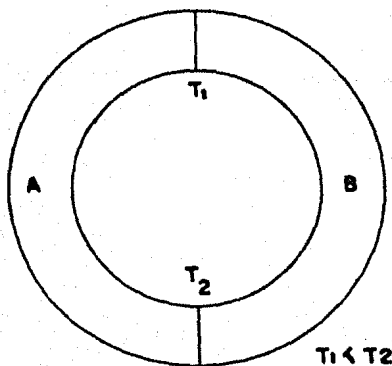


Fig.2. circuito formado por dos metales para el estudio de la fem de seebeck

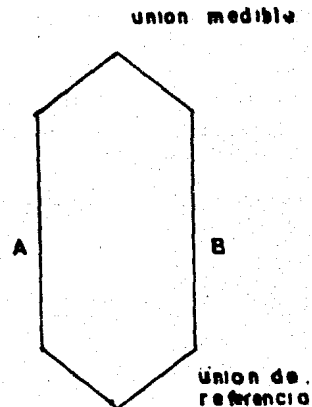


Fig3 - Identificación de las uniones en un circuito de dos metales.

$$\Delta Q = e I$$

$$e = T (\epsilon_A - \epsilon_B)$$

2.1

2.2



La FEM que produce esta corriente es llamada FEM térmica de Seebeck. También fue establecido por Seebeck que la magnitud de la corriente inducida varía como una función de la diferencia de temperaturas entre las uniones y de las propiedades térmicas de los metales usados como se verá mas adelante.

En 1934, J.A.Peltier encuentra que al pasar una corriente a través de una unión de referencia, la unión medible es calentada ó enfriada, dependiendo de la dirección del flujo de corriente. El calor liberado ó absorbido es directamente proporcional a la magnitud de la corriente que pasa através de la unión medible, donde  $\Delta Q$ .-calor absorbido ó liberado,  $p$ -coeficiente de Peltier,  $i$ -corriente,  $T$ -temperatura de la unión medible  $\epsilon_{A,B}$ -coeficiente de Seebeck. (ecuaciones 2.1 y 2.2)

Al fenómeno de calor liberado ó absorbido se le conoce como efecto Peltier; este efecto es el inverso al efecto Seebeck. El enfriamiento ó calentamiento de la unión medible produce la FEM de Seebeck.

Sir W.Thomson, en 1847, observa que conductores eléctricos simples que conducen una corriente presentan un gradiente térmico. En ciertos conductores, el calor es absorbido cuando la corriente fluye de la parte fría a la caliente del metal y el calor es liberado cuando la corriente fluye de la parte caliente a la fría.

$$\Delta Q = - \sigma I \Delta T \quad 2.3$$

$$\sigma = - T \frac{d\epsilon}{dT} \quad 2.4$$

$\sigma$ - coeficiente Thomson,  $\Delta T$ . -diferencia de temperaturas

Roeser establece las leyes termoeléctricas.

1) Ley de los circuitos homogéneos. Una corriente eléctrica no puede ser eliminada de un circuito construido con un mismo material, variando el área por la aplicación de calor.

2) Ley de los metales intermedios.- La suma algebraica de las fuerzas termoelectromotivas (FEM) en un circuito cerrado compuesto de algun número de metales diferentes es cero si todo el circuito esta a una temperatur uniforme.

Ahora, si la relación térmica de dos metales distintos es conocida con respecto a un tercer metal, entonces la relación de los dos primeros con ellos mismos puede ser encontrada.

3) Ley de las temperaturas Intermedias.- Si dos metales distintos homogéneos producen una FEM  $E_1$ , cuando las uniones están a las temperatura  $T_1$  y  $T_2$ , una FEM  $E_2$ , si las uniones se encuentran a  $T_2$  y  $T_3$ , entonces cuando las uniones están a  $T_1$  y  $T_3$  se tiene una FEM igual a  $E_1 + E_2$ .

Una combinación de las tres leyes termoeléctricas puede leerse: La FEM neta generada en algún circuito cerrado que conste de metales homogéneos y distintos es una función de la temperatura de las uniones solamente. Esto es, al ser los metales homogéneos se sabe por la primera ley termoeléctrica, que si por el circula una corriente esta no podrá ser eliminada si se somete todo el circuito a un aumento de temperatura, ahora como es cerrado si esta sometido a una temperatura uniforme, por la segunda ley, la FEM es cero, por lo tanto, si en las uniones se tienen

a distinta temperatura, la FEM neta sera debido a esta diferencia de temperaturas (ver ecuaciones 2.8 y 2.9).

De lo anterior se tiene que:

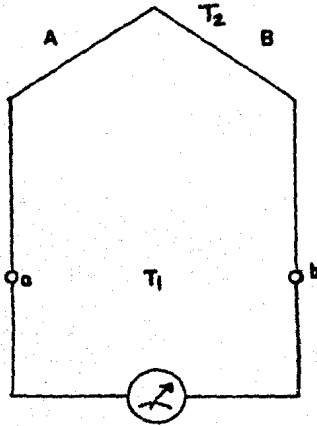


Fig 4 medidor termopar de dos materiales homogéneos A y B

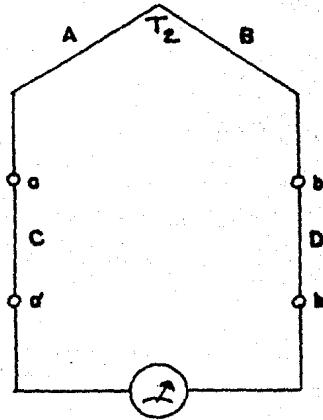


Fig 5 medidor termopar de cuatro metales homogéneos A, B, C y D.

El instrumento medidor debe leer la FEM proporcional a  $T_2 - T_1$ , si a y b están en  $T_1$ ; La lectura no debe depender de la naturaleza del gradiente a lo largo de A y B si los alambres son homogéneos (Fig.4)

La FEM debe ser la misma que en el ejemplo anterior, si a, a', b y b' están a la misma temperatura  $T_1$ , (Fig 5). Ningún error aparece por el gradiente a lo largo de los alambres, si todos son homogéneos. La FEM no es afectada por metales disímiles C y D en el circuito.

La existencia de los efectos mencionados, así como la validez de las leyes termoeléctricas son soportadas por los experimentos, solo una base teórica aproximada ha sido desarrollada.

Aquí se hará mención a la teoría clásica ya que el aspecto físico del proceso se revela claramente, aunque los resultados cuantitativos no son exactos, estos serían más exactos si se tomaran en cuenta efectos cuánticos.

En 1797, Volta descubrió que al poner en contacto dos metales diferentes surge entre ellos una diferencia de potencial, conocida como diferencia de potencial de contacto. Esta diferencia en realidad es la suma de dos potenciales, a decir, el potencial de contacto externo y el potencial de contacto interno (ver Fig.6), al observar la figura se ve que el par de punto (3,4) es la unión de los metales, cada metal tiene un número de cargas libres diferente, esto tiene como consecuencia la creación de una diferencia de potencial (contacto interno), mientras que los puntos (1,2) y (5,6) tienen una diferencia de potencial debida a la diferencia de cargas libres entre el metal y el vacío, por lo tanto la diferencia de potencial de contacto externo es la diferencia creada entre el vacío y los metales.

Se define como:

Potencial de contacto externo:

$$V_{AB}' = V_A - V_B = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{e} \quad 2.5$$

$\varphi_{A,B}$  .- función trabajo del metal A y B,  $e$ .-carga del electrón. Esto es, el potencial de contacto entre el punto 2 y el punto 5 es expresado por el trabajo realizado para arrancar un electrón del material entre la carga del electrón.

Potencial de contacto interno (Ver apéndice D).

$$V_{AB}'' = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} \quad 2.6$$

$k$ -constante de Boltzmann,  $T$ -temperatura absoluta de los metales  $\alpha$ .-carga del electrón,  $n_{0A,B}$ .-número de cargas libres.

Por lo tanto, al recorrer el circuito, la diferencia de potencial viene dada por

$$V_{AB} = V_{AB}' + V_{AB}'' \quad 2.7$$

La diferencia de potencial de contacto interno es muy pequeña comparada con la diferencia de potencial de contacto externo, por lo cual muchas veces se desprecia el primero si la temperatura es la misma para todo el circuito.

Cuando se colocan una serie de metales distintos  $A, B$  y  $C$ , la diferencia de potencial final solo depende del primero y último, si se desprecia el potencial de contacto interno.

$$V_{AC} = V_{AB} + V_{BC} = (V_B - V_A) + (V_C - V_B) = V_C - V_A \quad 2.8$$

De lo anterior se deduce que si se tiene un circuito cerrado de diferentes metales conectados en serie, Fig 7, la suma de diferencias de potencial de contacto de estos materiales no crea en el circuito ninguna FEM resultante, si las uniones están a la misma temperatura

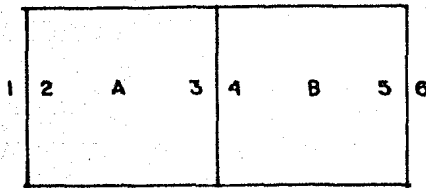


Fig. 6 los pares de puntos (1,2) y (5,6) tiene diferencial potencial externo y el (3,4) potencial interno.

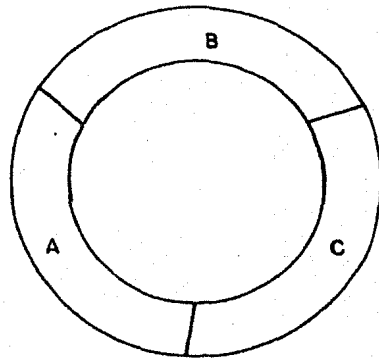


Fig. 7. circuito cerrado de tres metales distintos A, B, y C.

En un circuito como el anterior en el que las uniones no están a la misma temperatura, la FEM resultante es debida al potencial de contacto interno.

Para ver el efecto Seebeck, se tiene dos metales conectados en serie y en circuito cerrado (Fig 2).

Si se supone que  $n_{0A}$ ,  $n_{0B}$ ,  $V_A$  y  $V_B$  no dependen de la temperatura y que  $T_1 < T_2$  se tiene

$$\mathcal{E} = V_{AB} + V_{BA} = V_B - V_A + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} + V_A - V_B + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{0B}}{n_{0A}} \quad 2.9$$

$$\mathcal{E} = \frac{k}{e} (T_2 - T_1) \ln \frac{n_{0B}}{n_{0A}} \quad \cdot$$

El efecto Peltier se explica por haber una diferencia de potencial de contacto. Si el campo eléctrico creado en la sol-

dadura, acelera los electrones, se desprende una cantidad de calor complementaria en la unión, mientras que si el campo eléctrico frena a los electrones se absorbe calor.

### 2.3 Medidor de cátodo frío.

Con el medidor de termopar se cubre un intervalo de 760 mm de Hg a  $10^{-3}$  mm de Hg. El siguiente intervalo de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  mm Hg es cubierto por varios medidores, uno de los cuales, el medidor de cátodo frío, se verá aquí. Este medidor tiene como fenómeno físico asociado; la ionización.

En 1858, J. Plücker observó que una descarga eléctrica desaparece gradualmente, conforme se va haciendo vacío en el tubo. Si se aumenta el voltaje la corriente puede mantenerse, pero existe una presión en la que ya no se le puede observar. Esto se debe a que el camino libre medio aumenta conforme la presión baja (ec.1.3), y el número de iones producidos en una colisión disminuye.

El número de iones producidos por un electrón viene expresado como

$$n^+ = n \sigma_i = \frac{273}{T} \frac{P}{P_0} P_i \quad 2.10$$

$n$  es la densidad molecular a temperatura (T) y presión (P) dadas  $\sigma_i$  - sección eficaz para la colisión de una molécula con un electrón,  $P_i$  - probabilidad de ionización donde:

$$P_r = n_0 \sigma_i \quad n_0 = \frac{P_0}{kT_0} \quad 2.11$$

con  $P_0 = 1$  torr,  $T_0 = 273^\circ\text{K}$ ,  $k$ -cte de Boltzmann

En base a la ec.2.10 la corriente de iones positivos es

$$i_+ = n^+ i_- \quad 2.12$$

$i_+$  - corriente de iones positivos,  $i_-$  - corriente de iones negativos

La corriente como función de la presión permite la construcción de medidores de ionización. En el medidor de cátodo frío se utiliza, además, el hecho de que la probabilidad de ionización sea función del camino libre medio (ec.1.1)

Para ampliar el intervalo en el que se pueda medir la corriente de ionización, es necesario diseñar un dispositivo que conste de dos planos (cátodos) y un anillo (ánodo) paralelos entre si, que tienen una diferencia de potencial alta ( $\sim 2000\text{v}$ ), que se encuentran sumergidos en un campo magnético que es normal al plano del ánodo. A este dispositivo se le conoce como medidor de cátodo frío (Fig.8)

Los electrones son producidos por los cátodos (por emisión fría), y la trayectoria que siguen en su viaje hacia el ánodo no es recta, ya que el campo eléctrico y el campo magnético se conjugan para que el electrón siga una curva tipo hélice (Fig. 9).



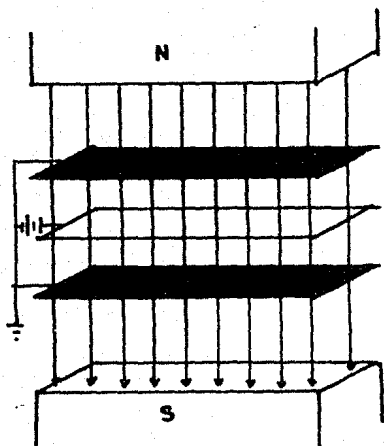


Fig. 8 medidor de catodo frío

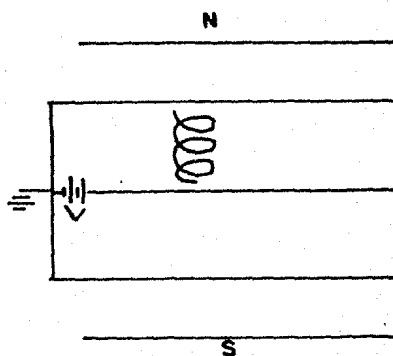


Fig. 9. trayectoria de los electrones sometidos a campos electromagnéticos

La forma de la curva que sigue el electrón permite que ionice más moléculas al pasar varias veces a través del plano del ánodo, esto sucede mientras tenga energía suficiente, cuando esto ya no ocurre el electrón es atrapado por el ánodo.

Los electrones al chocar con el ánodo producen rayos X principalmente, mientras que los iones positivos, que siguen una trayectoria directa hacia los cátodos, producen electrones, a los que se les conoce como emisión secundaria y que también contribuyen en la ionización de moléculas.

El mantenimiento de la corriente en el gas envuelve un complicado conjunto de interacciones; donde los electrones, iones positivos y rayos X participan activamente. Es por esto que no

siempre la corriente de salida en un cátodo frío es lineal con respecto a la presión, es decir, la descarga es inestable, lo cual produce saldos impredecibles en la calibración. Si no se requiere una seguridad mayor al 80 ó 90 % en la medida, este medidor es el adecuado.

Como todo medidor, presenta ventajas y desventajas, las que se enumeran en seguida:

Ventajas	Desventajas
1) Circuito eléctrico simple	1) Su seguridad en la medición es inferior a la del caliente
2) Construcción áspera	2) Un magneto es requerido (tener cuidado con su manejo)
3) Tiene un intervalo de operación que cubre parte del de termopar y parte del de cátodo caliente	3) Se utiliza un alto voltaje
4) La exposición a la atmósfera no le causa daños	4) El contenedor actúa como una bomba de más alta rapidez que un termiónico
5) Resistencia alta a choques mecánicos	
6) Larga vida	
7) Relativamente fácil de limpiar	
8) Mide la presión total	

#### Referencias

- 1) Técnicas de Vacío, Notas IFUNAM, 1974
- 2) Curso de Física General, S. Frish y A. Timoreva, Moscu, MIR, 1968

- 3) Process Instruments and Controls Hand book. Douglas M. Considine (ed.en Jefe). Mc.Graw-Hill, 1974
- 4) Vacuum technology. A.Roth. Netherlands. North Holland, 1978

## CAPITULO III

## Construcción y Resultados

## 3.1 - Termopares

El par termoeléctrico es actualmente el sensor eléctrico de temperatura ampliamente usado. El termopar ordinario consiste de dos diferentes alambres, cada uno de los cuales debe estar hecho de un metal ó aleación homogénea. Los alambres se unen en un extremo para formar una punta de medición, normalmente llamada junta caliente. Los extremos libres se conectan al instrumento medidor para formar una trayectoria cerrada por la cual fluye la corriente. El punto donde los alambres del termopar se unen al instrumento medidor se designa como punta de referencia ó junta fría.

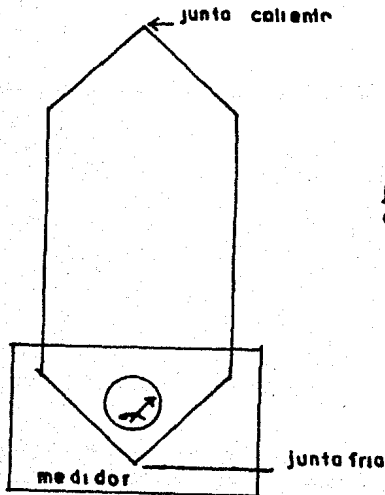


Fig. 10. esquema del termopar ordinario

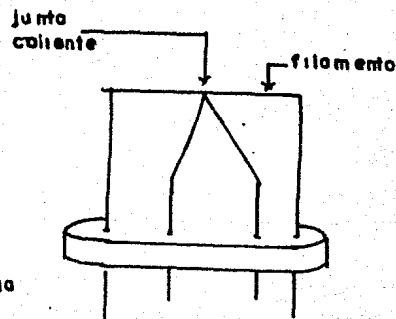


Fig. 11. esquema del medidor termopar construido

Existen factores que determinan la utilidad de los metales en un termopar.

- 1) Temperatura de fusión; mientras más alta sea su temperatura de fusión, el intervalo de operación sera más amplio.
- 2) Voltaje de salida termoeléctrica en combinación; para diferentes combinaciones de metales se tienen diferentes voltajes de salida, el escoger aquellos que tienen mayor voltaje de salida evitara ruidos en amplificaciones
- 3) Reacción a varias atmósferas; el comportamiento que tiene cada par termoeléctrico al estar en contacto con sustancias diversas es importante ya que puede afectar su rendimiento.
- 4) Conductancia eléctrica; a mayor conductancia menor FEM de salida
- 5) Estabilidad
- 6) Repetibilidad
- 7) Costos
- 8) Facilidad de manejo y fabricación

El termopar que se construyó durante el desarrollo de éste trabajo es un nicromel (80% Ni, 20% Cr)-Constantan (45% Ni, 55% Cu) (comercialmente conocido como tipo E), el cual trabaja en una atmósfera reductora (deficiente en Oxígeno) y un intervalo de temperaturas entre  $-196^{\circ}\text{C}$  y  $760^{\circ}\text{C}$ , en el cual se tiene una relación de fuerza electromotriz a temperatura casi constante; en este intervalo se obtendrá un trabajo satisfactorio.

Como se mencionó, el fenómeno de conducción de calor y los efectos termoeléctricos hacen posible el uso del par termoeléct

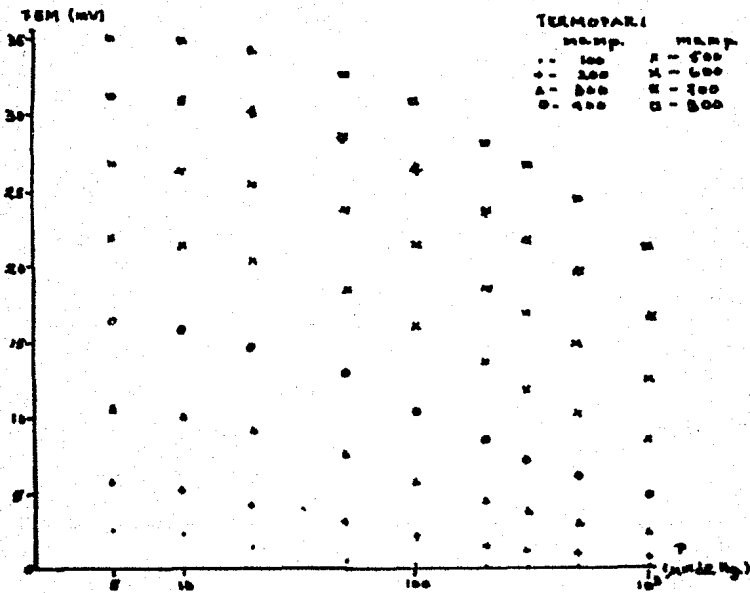
trico para medir la presión, sin embargo es necesario agregarle un filamento que se encontrará a una temperatura dada, producida por el paso de una corriente fija. Este filamento es agregado por que sin el, el intervalo de operación del termopar, como medidor de presión, sería pequeño comparado con el que se tiene al tener el filamento, como instrumento usado para este fin, es burdo. La junta caliente esta soldada al punto medio del filamento. Así la FEM producida por la diferencia de temperaturas se mantendrá constante si la presión se mantiene invariante.

Se construyeron tres tipos diferentes de termopares (Fig. 11) tipo E, cuya diferencia entre sí, es el área del filamento y alambres de la junta. El cambiar el área causa una variación en la resistencia y en la conducción térmica a través del filamento y del termopar.

Lo que se traduce en que a distintos grosores se tenga que pasar por el filamento una corriente diferente para obtener una FEM semejante. El filamento es de nicromel.

El primer termopar que se construyó presenta las siguientes características: en el filamento se tiene una resistencia de  $R = 0.877 \pm 10.001 \Omega$  una longitud de  $l = 1.525 \text{ cm} \pm 0.005 \text{ cm}$ , un ancho  $a = 0.056 \text{ cm} \pm 0.0005 \text{ cm}$  y un espesor  $\epsilon = 0.005 \text{ cm} \pm 0.0005 \text{ cm}$  para la junta se tiene  $R = 1.597 \pm 0.001 \Omega$ ,  $a_{nz} = 0.056 \pm 0.0005 \text{ cm}$ ,  $a_{cn} = 0.056 \pm 0.0005 \text{ cm}$  y  $\epsilon_{nz} = 0.005 \pm 0.0005 \text{ cm}$ ,  $\epsilon_{cn} = 0.005 \pm 0.0005 \text{ cm}$ .

La gráfica siguiente muestra la FEM de salida del termopar en función de la presión, para varias corrientes constantes en el filamento

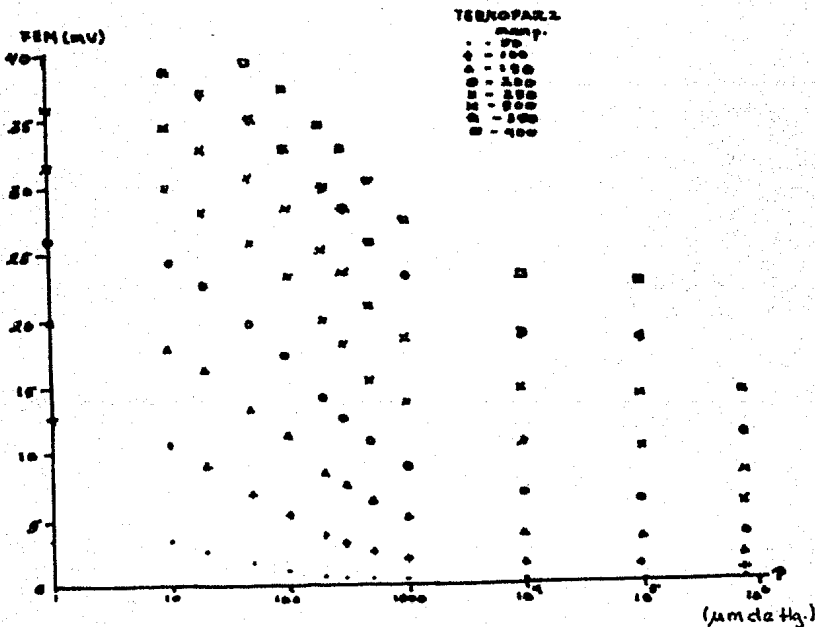


Gráfica 3.1 Fem-Log Presión para distintas corrientes

El siguiente tipo de termopar que se armó tiene el filamento y un alambre de la junta (nicromel) más delgados, si se observan los resultados obtenidos con este termopar y se comparan con el anterior, se notará que las curvas son semejantes y que la diferencia principal se tiene en las corrientes de alimentación del filamento. Para este termopar se tiene:

$R = 4.3 \pm 0.001 \Omega$ ,  $l = 1.7 \pm 0.005 \text{ cm}$ ,  $\alpha_{\text{fil}} = 0.025 \pm 0.0005 \text{ cm}$  y  $\epsilon_{\text{fil}} = 0.002 \pm 0.0005 \text{ cm}$ , en la junta,  $R = 5.06 \pm 0.001 \Omega$ ,  $\alpha_{\text{cm}} = 0.06 \pm 0.0005 \text{ cm}$  y  $\epsilon_{\text{cm}} = 0.005 \text{ cm}$ .

Como se puede observar (Gráfica 3.2) el número de puntos para las corrientes de alimentación de 350 y 400 m Amp. no son los mismos que para las otras corrientes. Esto se debe a que la FEM producida por la junta no era estable y pasaba de



Gráfica 3.2 Fem-Log Presión para distintas corrientes.

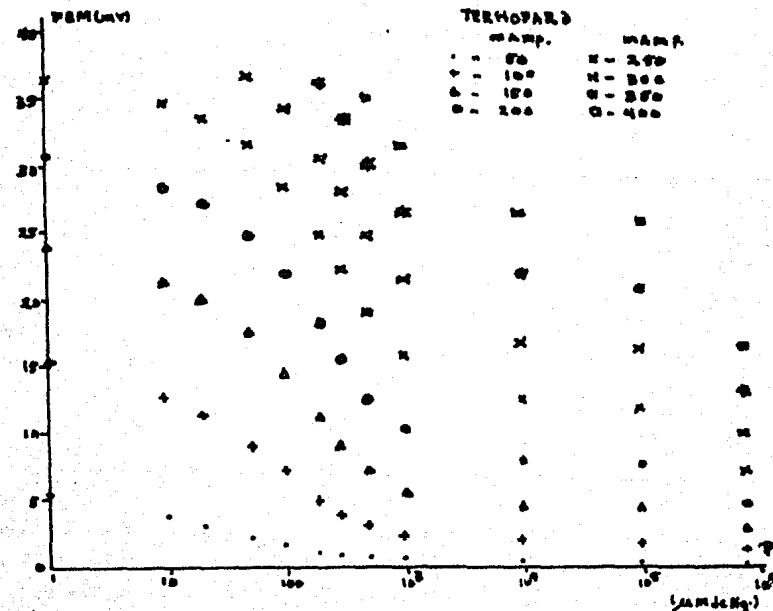
un valor de 40 mV. Se puede decir que en estos puntos el filamen-



to no solo perdía calor por conducción sino que la radiación empezaba a jugar un papel importante.

El último termopar que se construyó (Gráfica 3.3), es distinto al anterior en el hecho de que al alambre de constantan se le disminuyó el área, así como se formó un resorte con él, se explicara el porque en las conclusiones.

Filamento:  $R = 4.62 \pm 0.001 \Omega$ ,  $\ell = 1.5 \pm 0.005 \text{ cm}$ ,  $a = 0.025 \pm 0.0005 \text{ cm}$ ,  $E = 0.002 \pm 0.0005 \text{ cm}$  y la junta,  $R = 16.48 \pm 0.001 \Omega$ ,  $a_{R1} = 0.025 \pm 0.0005 \text{ cm}$  y  $E_{R1} = 0.002 \pm 0.0005 \text{ cm}$ ,  $a_{c0} = 0.05 \pm 0.0005 \text{ cm}$  y  $E_{c0} = 0.004 \pm 0.0005 \text{ cm}$



La obtención de los distintos grosores de los alambres se logran haciendo que un alambre de radio  $r_0 = 0.01 \pm 0.0005 \text{ cm}$  pasara a un radio  $r_1 = 0.007 \pm 0.0005 \text{ cm}$  por medio de un adelgazamiento obtenido al pasar el alambre por una serie de "Dados" donde el radio del primer dado usado es mayor que el radio del dado que la sigue. Para el 2° y 3° termopar se usó un alambre de nicromel obtenido de un potenciómetro helicoidal de  $r = 0.004 \text{ cm}$ , el cual es más delgado que el obtenido por medio del procedimiento anterior. Además de adelgazar los alambres, se les aplanó, transformándolos en cintas para tener una mayor área expuesta al gas, así como un fácil manejo.

La junta y el filamento tienen solo un punto de contacto el cual se logró colocando los alambres de la junta en el punto medio del filamento y con una punteadora se les aplica cierta corriente, quedando soldados los tres juntos. La unión entre alambres y postes se hizo de igual forma, salvo que la corriente usada en estos casos fue mayor a la usada en la unión de los alambres.

El procedimiento para la construcción del termopar es el siguiente: Lo primero con lo que se ha de contar es con los alambres deseados, después se cortarán los postes del tamaño deseado, que está condicionado a la altura del contenedor. Estos son de acero especial para vacío. Estos postes son aplanados un poco en los extremos para poderlos soldar fácilmente. Se unen al soporte por medio de una punteadora. El siguiente paso es colocar el filamento. Para evitar dificultades al soldar los tres a-

lambres a los del termopar se unen con la punteadora<sup>\*</sup>; este punto se coloca por encima del filamento, procediendo a puntearlos (Fig 13). Por último se unen los alambres del termopar a sus postes.

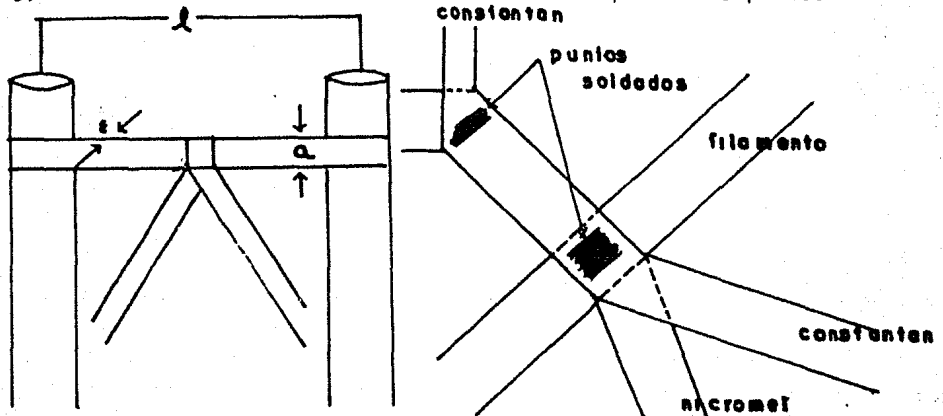


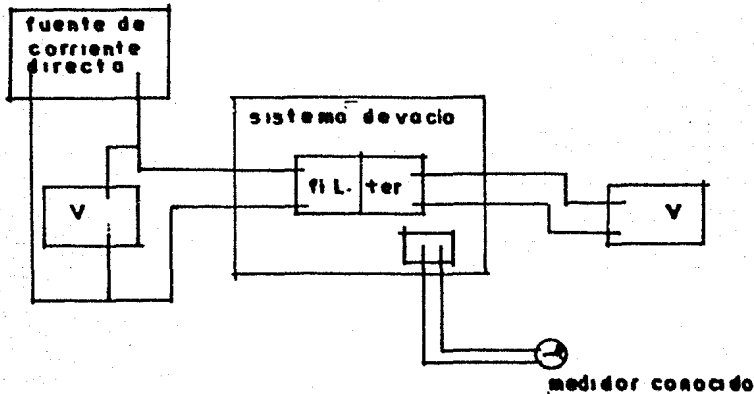
Fig 12 características del termopar Fig 13 puntos soldados  
El sistema de vacío usado para obtener las presiones

deseadas se describe en el apéndice E y la forma como se opera viene en el apéndice F

La obtención de las gráficas se logró al unir el termopar al sistema de vacío; a las patas correspondientes se les conectó a una fuente de corriente y las patas del termopar a un multímetro digital (voltímetro). Para el 2° y 3° se conectó un voltímetro al filamento. Teniendo todo en orden se ponía a funcionar el sistema de vacío, la presión se medía con dos termopares que se usan como referencia de calibración. Cuando se tenía la presión deseada, se prendía la fuente de corriente aplicando cierta intensidad (se comenzaba con la más baja) y se me-

<sup>\*</sup> (Unitek modelo 1-016-03, escala de 1 a 40 watts-second)

día la FEM que producía el termopar (se dejaba estabilizar la medida), teniendo ésta se procedía a aumentar la corriente, así hasta que se llegaba a la más alta. Teniendo todas las medidas de las corrientes a una presión dada, se variaba la presión, lo que se lograba cerrando o abriendo una válvula calibrada.



**Fig.14. diagrama de bloques de los aparatos usados**

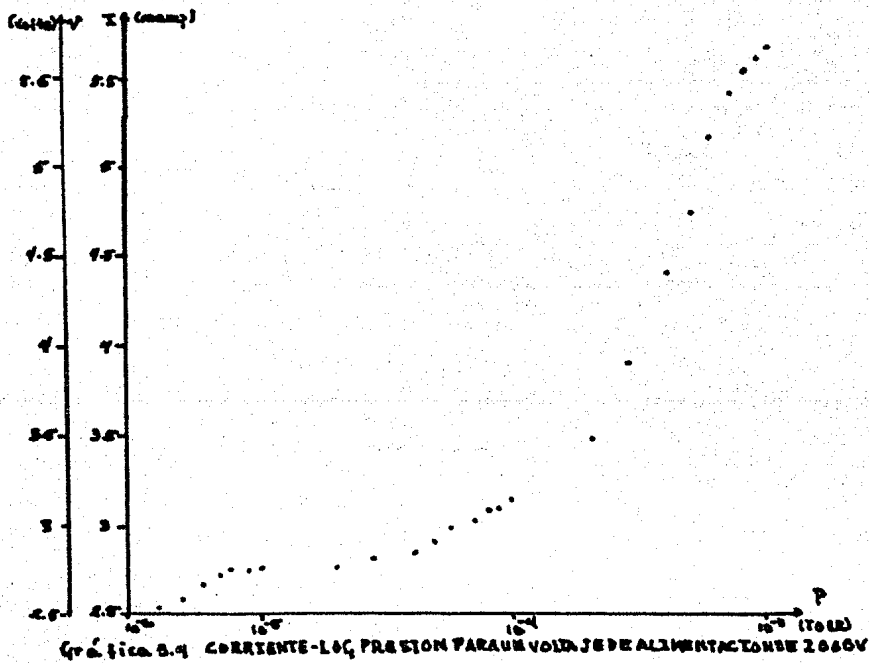
El voltímetro conectado al filamento, sirve para saber si la resistencia del filamento cambia con la temperatura, ya que si esto sucede cambia la corriente que atraviesa el filamento.

### 3.2 - Cátodo frío.

Este medidor es considerado de poca precisión ya que algunas veces se tienen descargas incontrolables que producen saltos en la calibración, sin embargo, es posible obtener una gráfica continua corriente-presión asociada al medidor (gráfica 3.4)

En el capítulo II sección 3 se hizo mención a un tipo de medidor de cátodo frío para explicar los fenómenos que ocu-

ren y son usados para medir la presión (fig 8). El medidor diseñado para esta tesis difiere del citado en la forma del cátodo y ánodo, ya que las dos placas (cátodos) son remplazadas por un cilindro que a la vez es el contenedor y el anillo (ánodo) se sustituye por una banda de forma elíptica (fig 15)



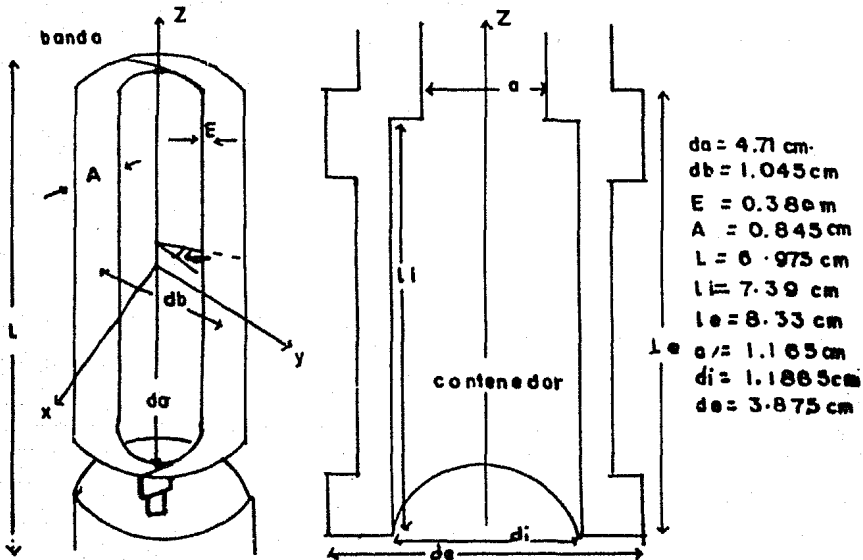


Fig.15 banda y contenedor del medidor de carodo frío

Aún con los cambios, su comportamiento es similar al mencionado en el capítulo anterior. El campo eléctrico producido por la diferencia de potencial se encuentra al resolver la ec.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad 3.1$$

Con las condiciones siguientes

$$V = V_0 \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} r = r_b = \frac{d_b}{2} \\ \varphi \in [0, \varphi_0] \text{ y } [180, 180 + \varphi_0] \\ z \in [-r_a = -\frac{d_a}{2}, r_a = \frac{d_a}{2}] \end{array} \right.$$

que corresponde a la banda que se encuentra a  $V_0$  y que físicamente ocupó ese espacio descrito matemáticamente en coordenadas cilíndricas y

$$V=0 \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} r = r_c = \frac{d_c}{2} \\ \varphi \in [0, 2\pi] \\ z \in \left[ -\frac{l_c}{2}, \frac{l_c}{2} \right] \end{array} \right.$$

que corresponde al contenedor que se encuentra a un potencial cero (ver Fig.15). La ecuación 3.1 se utiliza dado que se tiene una densidad de carga  $\rho$  entre los electrodos, debido a los electrones emitidos.

De la ecuación 1.15 se tiene

$$v = \sqrt{2eV/m}$$

que es la velocidad de una partícula cargada en una región donde existe una diferencia de potencial. Además se tiene que la densidad de corriente puede expresarse por:

$$J = ev$$

de donde

$$e = \frac{J}{v} = J \sqrt{m/2eV} \quad 3.2$$

al sustituir la ec. 3.2 en la ec. 3.1 se tiene

$$\nabla^2 V = -\frac{J}{\epsilon_0 v} = -\frac{J}{\epsilon_0} \sqrt{m/2eV} \quad 3.3$$

resolviendo la ec. anterior se obtiene el campo eléctrico como:

$$E = -\nabla \psi$$

3.4

Un esquema de las líneas de campo eléctrico en el centro de la banda, despreciando los efectos en la parte superior de ella, se presenta en la Fig.16. La Fig. 17 muestra las líneas del campo magnético.

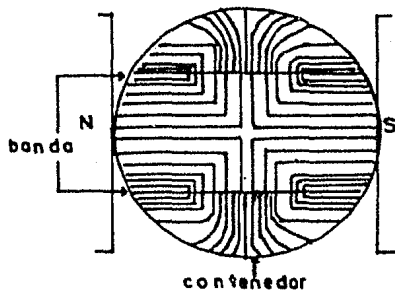
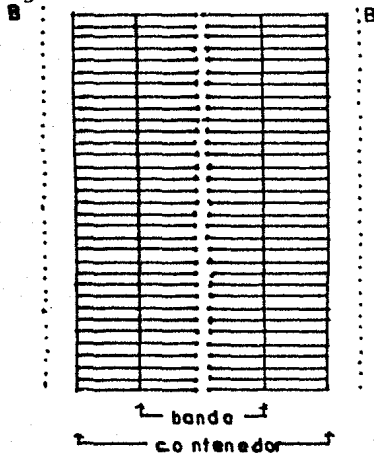
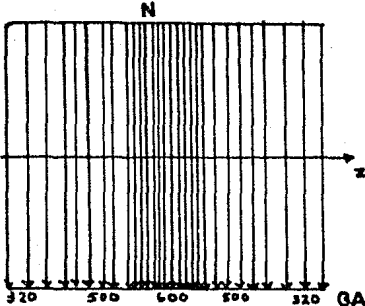


Fig.16. líneas del campo eléctrico

a lo largo del contenedor



a lo ancho del contenedor

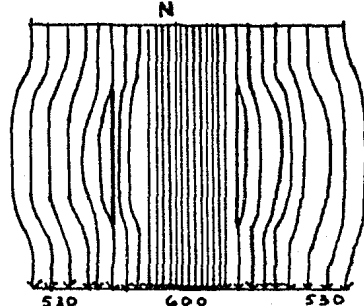


Fig.17. líneas del campo magnético

En la construcción se usaron diferentes materiales: para el contenedor, aluminio; los Magnetos son de cerámica y la ban-



da de monel (65% Ni, 33% Cu, 2% Fe), se escogió este material por ser resistente a la corrosión. Antes de comenzar a trabajar con el medidor, es necesario cuidar de: la banda y el contenedor no tengan picos ni rayones donde se pueda acumular carga, ambos deben estar desgrasados y ser sometidos a desgasificación.

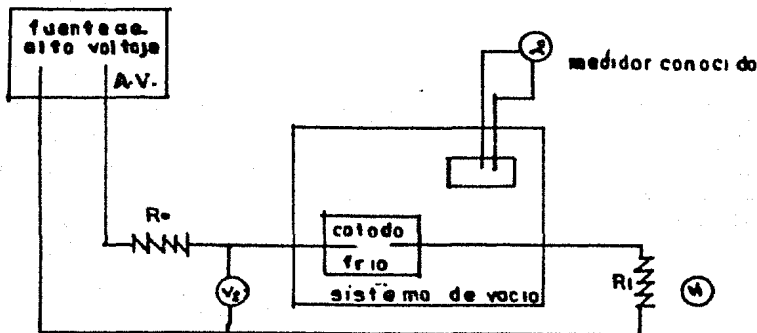


Fig. 18-diagrama de bloques de los aparatos usados

La Fig. 18 muestra el diagrama de bloques del sistema que se usó para obtener la gráfica 3.4. La fuente de alto voltaje (A.V.) proporciona el potencial de alimentación del medidor, la resistencia que presenta el medidor es variable, la que ocasiona que la diferencia de potencial entre sus terminales no sea la que la fuente proporciona; por esto se colocó  $R_0$ , resistencia de carga. Como  $R_1$  es pequeña comparada con  $R_{med}$ , el voltímetro digital  $V_1$  proporciona el voltaje real en el medidor. El voltímetro colocado en paralelo con  $R_1$  ( $V_2$ ), proporciona una medida indirecta de la corriente que circula por  $R_1$  y que es debida a la ionización que se tiene en el medidor.

El sistema de vacío usado es el mismo que el descrito en el apéndice E. Se tiene como medidor conocido uno de cátodo

frío y uno de cátodo caliente que forma parte del sistema de vacío

Cuando en el sistema de vacío se tiene una presión de  $10^{-2}$  mbar se encienden los aparatos eléctricos, y se procede a tomar los puntos voltaje-presión para obtener la gráfica.

$R_f = 1k\Omega$ ,  $R_o = 50k\Omega$  la gráfica se obtuvo con un voltaje de 2000 V.

### 3.3. Fuentes

En las secciones anteriores se presentó la construcción de los medidores de termopar y de cátodo frío. Para complementar los instrumentos fue necesario diseñar y construir las "fuentes de alimentación y el transductor que convierta la señal medida a la variable deseada. Para el termopar es imprescindible una fuente de corriente constante y el transductor debe de pasar la FEM a una medida de presión. En el medidor de cátodo frío, se requiere de una fuente de alto voltaje y la señal medida es corriente directa, siendo la variable deseada unidades de presión.

La Fig. 19 muestra el diagrama de la fuente de alimentación y el transductor para el termopar, dividida por líneas discontinuas en varias secciones. La sección marcada con A es la fuente de alimentación o fuente de corriente constante, las puntas de salida marcadas con Fil. van conectadas al filamento del termopar. La sección B es un (sustractor) diferenciador, en este lugar se encuentra la junta fría del termopar y es aquí donde se registra la FEM producida; las puntas señaladas con TER. van co-

nectadas al termopar. Cada una de estas secciones contiene un amplificador operacional, la sección C es un circuito para quitar la señal de salida, del operacional de la sección B, cuando no se tiene señal de entrada, ya que es importante tener solo el voltaje producido por el termopar. En la última sección es el lugar donde se asocia a la señal medida la variable deseada, o sea, a un cierto voltaje se le asocia una presión.

Las fuentes de voltaje usadas para alimentación del circuito de la Fig. 19 son integradas al aparato y su diagrama se presenta en la Fig.20.

La calibración del sistema electrónico se llevó a cabo como sigue: primero se comprobó el funcionamiento de la fuente de alimentación midiendo la corriente que se tiene en las puntas marcadadas con Fil, después se verificó las secciones que componen el transductor, para esto se puso en corto las puntas marcadas con ter, y se procedió a calibrar el potenciómetro que se encuentra en la sección C para que la señal de salida fuese cero, cuando en las puntas marcadas con Ter se tiene el voltaje debido a la mínima presión, el medidor debe marcar escala completa, esto se logró con la resistencia variable de la sección D.

Una vez delimitados los extremos, se pueden marcar los puntos intermedios, ya que, como se dijo antes, cada presión tiene un voltaje asociado.

La Fig. 21 muestra el circuito eléctrico de la fuente del cátodo frío. Como se puede observar, consta de dos secciones, la fuente de alimentación que proporciona un voltaje de 2000 v y

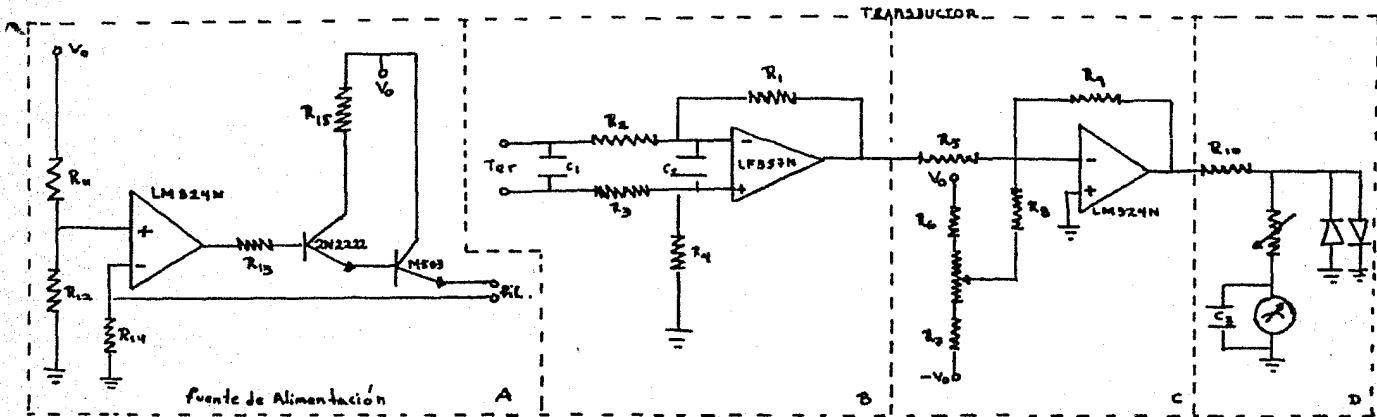


Fig.19 FUENTE DE ALIMENTACION Y TRANSDUCTOR PARA ULTRATERMOPAR

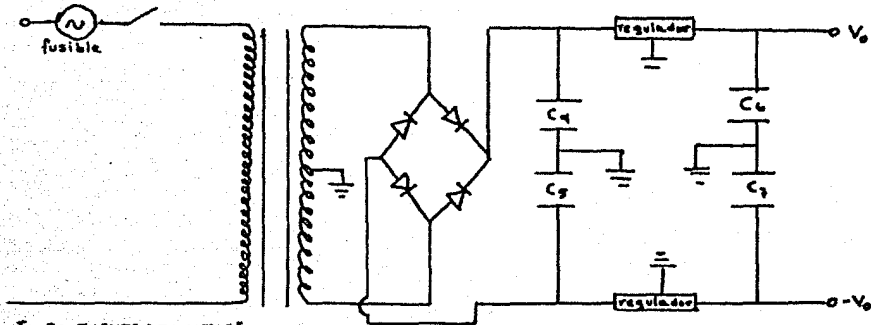


Fig.20 FUENTE DE VOLTAGE

- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| $R_1 = 10k\Omega$     | $R_2 = 1k\Omega$      |
| $R_3 = 1k\Omega$      | $R_4 = 10k\Omega$     |
| $R_5 = 10k\Omega$     | $R_6 = 2200\Omega$    |
| $R_7 = 2200\Omega$    | $R_8 = 100k\Omega$    |
| $R_9 = 10k\Omega$     | $R_{10} = 2.7k\Omega$ |
| $R_{11} = 6.8k\Omega$ | $R_{12} = 1k\Omega$   |
| $R_{13} = 3.9k\Omega$ | $R_{14} = 10\Omega$   |
| $R_{15} = 1k\Omega$   | $C_1 = 0.15\mu F$     |
| $C_2 = 330pf$         | $C_3 = 100\mu F$      |
| $C_4 = 1000\mu F$     | $C_5 = 1000\mu F$     |
| $C_6 = 10\mu F$       | $C_7 = 10\mu F$       |

el transductor que dá el valor de la presión a cambio de medir la corriente.

Como el medidor no es de precisión, la fuente construída no produce un voltaje constante ya que presenta rizo. Para calibrar el medidor se ajustó la resistencia variable de forma del que marque escala completa cuando se tiene máxima presión o corriente.

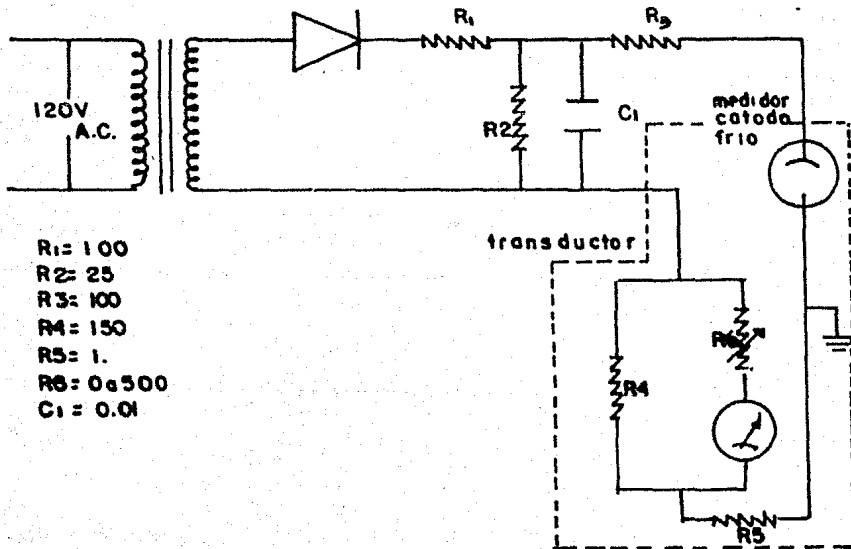


Fig 21 fuente del medidor de cátodo frío

## CAPITULO IV

## Conclusiones

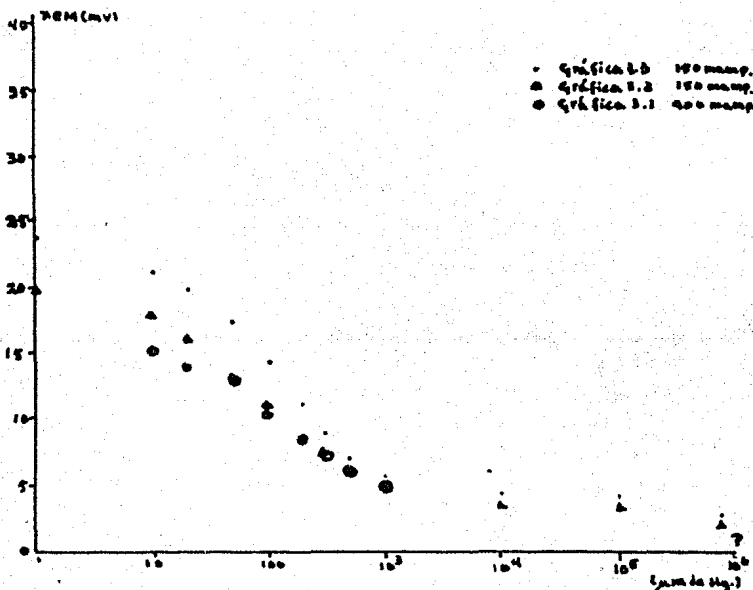
En los capítulos anteriores se revisó la teoría asociada con el funcionamiento de dos instrumentos capaces de efectuar mediciones de presión por métodos indirectos, así mismo como su construcción y pruebas.

Para que el medidor de termopar sirva como instrumento medidor de presión, es necesario que ocurra el fenómeno de conducción de calor y la FEM producida por la diferencia de temperaturas en la junta del par.

En el Capítulo III se mencionó la construcción de tres termopares que presentan distintas características. Para escoger uno de ellos como el medidor deseado fue necesario analizar su comportamiento. En el Capítulo III sección I, se tiene la gráfica obtenida de cada termopar, analizando la gráfica 3.3 se encontró que para corrientes bajas en el filamento, la diferencia de voltajes entre dos presiones dadas es pequeña, por lo que sería difícil distinguir una presión de otra; para corrientes altas, se ve, que al tener presiones del orden de  $100 \mu\text{m de Hg}$ , el fenómeno de radiación empieza a ser importante y es imposible obtener la medida de la presión real en estas condiciones. Teniendo en cuenta lo anterior, quedan solamente las curvas asociadas a las corrientes de 150, 200 y 250 mamp. Para escoger la curva en la cual al termopar resulta más eficiente, se analizan las diferencias de voltaje entre presiones sucesivas. En la región de pre

siones de  $10^{-3}$  mm de Hg se tiene que la curva de 150 mamp es la que presenta mayor diferencia entre voltajes, no siendo así para presiones cerca de 1 atm donde la mejor curva es la de 250 mamp. Se escogió la curva de 150 mamp por ser de mayor interes una buena medida en la región de presiones cercanas a los  $10^{-3}$  mm de Hg.

Si se procede a analizar las gráficas 3.1 y 3.2 de la misma forma, se tendrá una curva preferencial en cada gráfica, las cuales se presentan a continuación.



Gráfica 4.1 Fem-Log Presión para distintos termopares.

Para escoger el termopar se compararon entre sí las curvas de la gráfica anterior, así como su durabilidad. Como se puede observar la curva de 400 mamp (Gráfica 3.1) y la curva de 150 mamp (Gráfica 3.2) tiene un comportamiento similar, por lo tanto, se puede rechazar el termopar 1, por no contar con datos cerca del atm. En las curvas asociadas a los termopares 2 y 3 se ve que en la región de presiones mayores a  $10^3 \mu$  m de Hg, ambos termopares tienen la señal de salida similar, mientras que para regiones con presión menor a  $10^{-3}$  m m de Hg, el termopar 3 tiene mayor voltaje de salida que el par termoeléctrico 1; esto se debe a que hay menos pérdidas de calor, debido a que los alambres tiene menor resistencia y por lo tanto se disipa menor cantidad de energía.

Como se dijo en el capítulo III, al par termoeléctrico 3 se le introdujo una modificación con respecto a los otros; se hizo un resorte con el alambre de constantan. El objeto de hacer un resorte es el disminuir el esfuerzo sobre el filamento, aumentando en esto la vida de la cinta.

Analizadas las gráficas de respuesta a diferentes condiciones, se decidió que el mejor termopar construido es el 3°. Sus características son las siguientes: Se necesita una corriente de 150 mamp. que pase por el filamento, la resistencia de éste es del orden de  $4.62 \Omega$  con una longitud de 1.5 cm, con espesor de 0.002 cm y ancho de 0.025 cm y está construido con nicromel. La junta es de nicromel-constantan, donde el alambre de nicromel tiene el mismo ancho y espesor que el filamento, y el alambre de constantan tiene un ancho de 0.05 cm y el espesor es de



0.004 cm.

Para el medidor de cátodo frío se escogió un voltaje de operación de 2000 V; esto se decidió después de hacer pruebas a voltajes menores (800-1500v), en éstos la corriente producida por el medidor no era continua, es decir, se presentaban saltos esporádicos.

Como se ha mencionado antes, el medidor resulta de baja precisión ya que los datos obtenidos presentan errores del 20%, por lo cual solo se podrá especificar el intervalo en el que se encuentra el sistema de vacío, esto es, no se podrá decir si se tiene una presión de  $7 \times 10^{-4}$  mm de Hg. sino que se dirá que el sistema está en la región de  $5 \times 10^{-4}$  mm de Hg. a  $10^{-3}$  mm de Hg.

Se piensa que el intervalo del medidor puede ser ampliado por debajo de  $10^{-6}$  mm de Hg, pero esto todavía no se ha podido comprobar debido a las limitaciones del sistema de vacío con que se contaba.

Las fuentes no presentan dificultad en su realización, ya que las partes que la forman están descritas en los libros de electrónica y se encuentran en el comercio nacional.

Se sabe que todo instrumento puede ser mejorado, por lo que se sugiere lo siguiente:

#### Termopar

a) La pérdida de calor del filamento no solo depende de la presión, sino que también de la diferencia de temperaturas entre el filamento y el tubo que lo contiene; al cambiar la temperatura del contenedor cambia la pérdida de calor por lo

tanto conviene estudiar la variación para saber entre que intervalos de temperatura del contenedor no es necesario calibrar de nueva cuenta el medidor.

b) Sería deseable, conseguir alambres de sección más pequeña (mientras más pequeña sea el área, su resistencia es mayor) y comparar sus características con las obtenidas en este trabajo.

#### Cátodo frío

a) La variación del diámetro del tubo que conecta el sistema de vacío con el medidor ocasiona variaciones en su eficiencia; sería conveniente estudiarlo.

b) El aumentar ó disminuir el campo magnético trae consigo variaciones importantes en la corriente producida: estudiando este efecto llevaría a conseguir una mayor eficiencia.

Por lo anterior se puede decir que los resultados obtenidos son positivos y forman una base para la iniciación de estudios más profundos en los sistemas de vacío.

## APENDICE A

Demostración de  $\frac{1}{2} m v^2 = eV$ 

El trasladar una partícula cargada a través de un campo electrostático, lleva consigo la realización de un trabajo, definido por:

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

$$= \int_A^B q \vec{E} \cdot d\vec{x} \quad \text{donde } \vec{F} = q\vec{E}$$

Sin perder generalidad, se puede suponer que el campo eléctrico y la trayectoria de la partícula tienen la misma dirección

$$W = \int_A^B q E dx$$

pero el campo eléctrico puede ser expresado por

$$E = - \frac{dV}{dx}$$

de donde

$$W = -q \int_A^B \left( \frac{dV}{dx} \right) dx = -q \int_{V(A)}^{V(B)} dV$$

$$= -q (V(B) - V(A))$$

para un electrón  $q = -e$  y  $V(B) = V$ ,  $V(A) = 0$

$$W = eV$$

si la partícula esta inicialmente en reposo, al llegar al punto B tendrá una energía cinética igual al trabajo realizado sobre ella

$$\frac{1}{2} m v^2 = eV$$

## APENDICE B

## Fenómenos físicos asociados a las bombas

Como se mencionó, las subdivisiones en el intervalo de presiones por debajo de la presión atmosférica, se debe a la elección del fenómeno físico que se emplea para lograr el vacío deseado. Así, toda bomba de vacío tiene asociado un principio físico.

El principio físico asociado a las bombas mecánicas es la compresión-expansión de un gas, ya que estas bombas absorben gas del sistema, lo comprimen hasta que tiene una presión mayor a la atmosférica, y al abrir una válvula al medio ambiente, el gas se expande por esta diferencia de presiones.

La viscosidad es usada en los eyectores de vapor: las moléculas en el sistema son arrastradas por el vapor que tiene una velocidad alta y son llevadas a una parte de la bomba por donde salen a la atmósfera.

En las bombas de difusión, el principio utilizado es la difusión de un vapor, cuyas moléculas son más pesadas que el gas del sistema al que se le desea hacer vacío.

Se ha observado que las moléculas al chocar contra una pared, no sufren una colisión elástica, esto se explica diciendo que las moléculas se "condensan" sobre la superficie y después de cierto tiempo son "reevaporadas" en una dirección distinta a la inicial, si la superficie esta en movimiento, a la molécula se le aplica una componente de velocidad, a esto se le llama

ma arrastre molecular. Esto es usado en las bombas tubo moleculares.

Los efectos de ionización son aplicados a las bombas iónicas, las moléculas del gas son sacadas de la circulación en el sistema sin ser lanzadas fuera de la bomba, por medio de 2 procesos: combinación química y por "enterramiento" del gas en la superficie de la bomba. En ambos procesos la molécula es ionizada primeramente por electrones emitidos por el cátodo.

Las bombas de adsorción utilizan la propiedad de ciertas sustancias que al encontrarse a bajas temperaturas, adsorben el gas del sistema, liberándolo al regresar a temperatura ambiente.

Mayor información en los libros de Guthrie y A.Roth, citados en la bibliografía

## APENDICE C

### Fenómenos físicos asociados a los medidores

Se tienen dos clases de medidores, a decir: los que miden la presión directamente y los medidores indirectos.

Los medidores directos ó absolutos dependen de su geometría y la fuerza que ejerce un gas sobre una pared móvil. Esta pared puede ser sólida ó líquida.

i) Los medidores en los que una pared sólida cambia su posición son:

- a) Los medidores de Diafragma, en estos se mide la distancia que se movió la pared, la forma como se mide es por medios mecánicos ópticos o eléctricos. En este último caso, la pared móvil forma parte de un capacitor y como se sabe, al variar la distancia entre los platos, varía la capacitancia.
- b) Tubo de Bourdon, este medidor consiste de un tubo en forma helicoidal el cual al variar su curvatura da la medida de presión.
- c) Radiómetro (medidor Knudsen), este medidor consiste de dos platos, uno de los cuales es calentado, el plato que está a temperatura ambiente esta sostenido de tal forma que pueda ser medida cualquier pequeña fuerza que actue sobre él. La fuerza será producida por las moléculas que viajan del plato calentado al plato no calentado.

ii) Para los medidores de pared líquida se utiliza la variación de la altura de un líquido confinado en un tubo.

a) Para el manómetro de tubo en U la presión viene expresada por  $P = P_0 - \rho g h$ , donde  $P_0$  es la presión atmosférica,  $\rho$  la densi-

dad del líquido,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $h$  la diferencia entre las alturas de las 2 ramas del tubo

b) El McLead, la ley de Boyle es la que se aplica  $P_1 V_1 = P_2 V_2$  si la temperatura se mantiene constante.

En los medidores indirectos, los fenómenos que presentan los gases a baja presión son los que se usan para obtener la medida.

i) Medidores que usan la transferencia de momento (viscosidad): La presión se mide por medio de los cambios que sufre un objeto en su movimiento. En el medidor de fibra de cuarzo, el cambio se observa en la longitud de onda con la que vibra la fibra. En el medidor de rotación de un disco, la medida de presión se obtiene por la torca que se forma entre 2 discos, uno de los cuales gira a 10,000 rpm y el otro esta en reposo inicialmente, esta torca se debe al arrastre molecular (ver apéndice B, bomba turbo molecular).

ii) Medidores de transferencia de energía (conductividad térmica): Estos medidores se basan en la pérdida de calor de un objeto caliente al encontrarse en un cierto vacío. El termopar mide la FEM producida por 2 distintas temperaturas en las uniones. El pirani consiste de una resistencia que varía con la temperatura.

iii) Medidores de generación de carga (ionización): La corriente producida da la medida de la presión.

a) Cátodo Caliente, la ionización es producida por los electrones que emite un filamento caliente.

- b) Cátodo Frío, la ionización es producida por los electrones que son producidos por emisión fría, esto es, los electrones son arrancados de un metal al someterlo a un campo eléctrico fuerte.
- c) Los medidores radiactivos, estos medidores utilizan materiales radiactivos que emiten partículas Alfa y Beta, estas causan la ionización. El medidor Alpha tron utiliza sustancias que emiten partículas alfa.

Mayor información en los libros A.Roth y en el Guthrie que son citados en la bibliografía.



APENDICE D

Potencial de contacto interno (teoría clásica)

El siguiente análisis se puede hacer debido a que los niveles energéticos de los electrones en el metal están muy próximos unos de otros y no están ocupados por completo.

Se supone que no hay una línea divisoria entre los metales, sino que hay una zona de transición en la cual el número de electrones en unidad de volumen varía constantemente desde

Según la hipótesis de Lorentz, los electrones libres forman en el metal un gas electrónico que corresponde a los conceptos fundamentales similares a la teoría cinética de los gases.

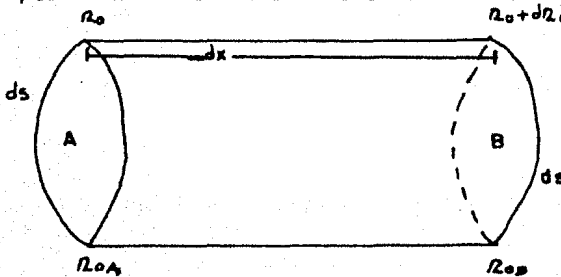


Fig. D.1. ZONA de transición con una variación constante de electrones en unidad de volumen.

Sea  $\eta_0 + d\eta_0$  el número de electrones libres por unidad de volumen en la región B (Fig D.1) y  $\eta_0$  lo correspondiente a A.

La presión del gas electrónico sobre la base A es

$$P = \frac{2}{3} \eta_0 \bar{w} \quad D.1$$

donde

$$\bar{w} = \frac{3}{2} kT \quad D.2$$

sustituyendo D.2 en D.1 se tiene

$$P = \eta_0 K T \quad \text{D.3}$$

Sobre la base B se tiene

$$P + dP = (\eta_0 + d\eta_0) K T \quad \text{D.4}$$

Restando D.3 de D.4 se obtiene

$$dP = K T d\eta_0$$

donde se ha supuesto que sobre las dos caras se tiene la misma temperatura y  $\eta_0$  no depende de la temperatura.

Debido a la diferencia de presiones los electrones empiezan a desplazarse de la base B a la base A. Este desplazamiento acarrea un transporte de carga, y por consiguiente, la creación de una diferencia de potencial  $dV$  entre A y B, que impide el desplazamiento ulterior de electrones. El equilibrio dinámico tendrá lugar cuando la fuerza del campo eléctrico sea igual a la fuerza debida a la diferencia de presión.

El número de electrones del volumen del cilindro que se examina, es igual a  $\eta_0 dx ds$ , de donde la fuerza debida al campo eléctrico que actúa sobre estos electrones será:

$$d\bar{F} = \eta_0 e E dx ds$$

ya que

$$|E| = \frac{dV}{dx}$$

se tiene al sustituir la ecuación anterior en

$$|d\bar{F}| = \eta_0 e \frac{dV}{dx} dx ds$$

y en el equilibrio dinámico

$$|d\bar{F}| = dP ds$$

ó

$$\eta_0 e dV ds = kT \eta_0 ds$$

al despejar de la ecuación anterior a  $dV$  se tiene

$$dV = \frac{kT}{e} \frac{d\eta_0}{\eta_0}$$

Para encontrar la diferencia de potencial entre la cara A y la cara B, se integra la ecuación

$$V_{AB} = \int_{\eta_{0A}}^{\eta_{0B}} \frac{kT}{e} \frac{d\eta_0}{\eta_0} = \frac{kT}{e} \ln \frac{\eta_{0B}}{\eta_{0A}}$$

Esta ecuación es la base para encontrar la FEM de - Seebeck.

Mayor información en el Frish y Timoreva, citado en la bibliografía.

## APENDICE E

### Descripción de los aparatos

Para llevarse a cabo la toma de datos para el diseño de los medidores, se requirió un sistema de vacío que consiste de una bomba mecánica, una bomba difusora, dos fugas calibradas, una trampa fría una cámara, medidores de vacío y válvulas. (Fig.E.1)

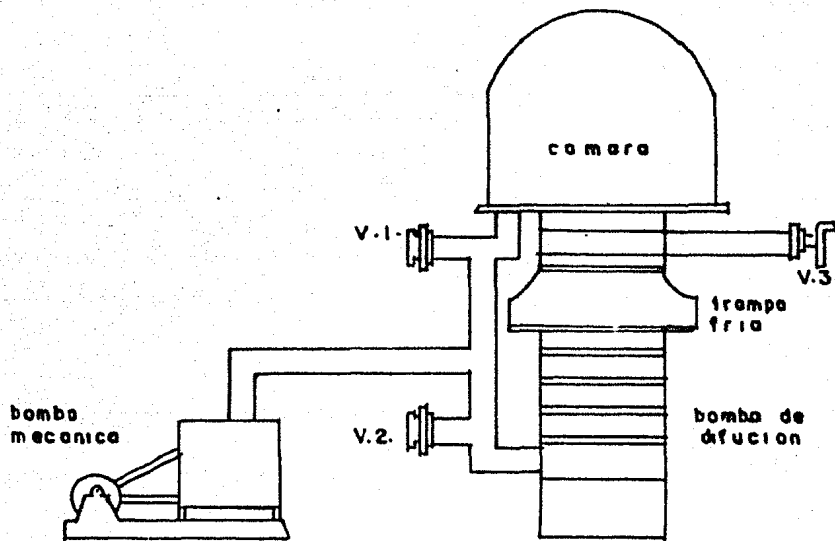


Fig E.1. sistema de vacío

El grado de vacío que se quiere, influye en la decisión de elegir los elementos que forman el sistema para un buen funcionamiento. Una descripción de las propiedades de los elementos de la Fig E.1. se presenta a continuación.

**Bomba Mecánica.**- Esta bomba no requiere de una bomba de pre-vacío

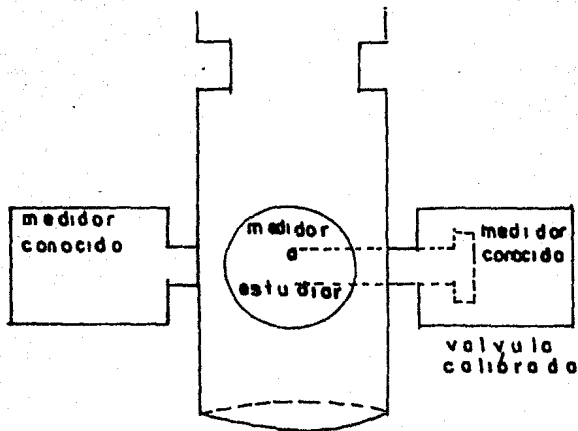
ya que su intervalo de operación va de 1 atm a  $10^{-3}$  mm de Hg. La salida de los gases que extrae se hace a la atmósfera en la mayoría de las veces.

Bomba Difusora.- Esta bomba no puede descargar directamente a la atmósfera, así como les es imposible comenzar a funcionar sino se encuentra en su intervalo de operación, por esto requiere de una bomba de apoyo, en general una bomba mecánica. Su intervalo de operación es de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  mm de Hg.

Las válvulas son los elementos que permiten una operación adecuada del sistema; éste contiene cuatro válvulas: dos de fuelle, una válvula de aguja, que funciona como fuga calibrada y una válvula de cortina, que aísla la cámara de la bomba difusora.

El tipo de cámara que tiene el sistema de vacío es demasiado grande para el uso que se le dió. Una de las ventanas que posee, fue cubierta con una placa del mismo material que la cámara, la que cuenta con una pequeña abertura.

Para el termopar, el dispositivo consta de una cámara cilíndrica que tiene cuatro entradas; a una de ellas se le adopta el par termoeléctrico a estudiar, otra es para una fuga calibrada (válvula de aguja, de mayor precisión que la que contiene la cámara) y las otras dos para medidores conocidos (Fig. E.2)



**Fig E 2 dispositivo conectado al sistema de vacío para el estudio del termopar**

En el medidor de cátodo frío se utiliza una cámara cilíndrica mayor a la anterior que consta de dos aberturas. Una de ellas es para el medidor a estudiar y la otra para un medidor conocido (Fig.E.3)

Para un mejor uso del sistema se requiere comprobar que no existen fugas en ninguna de sus partes. Esto se realiza con un detector de fugas y helio. Se coloca el detector de fugas a la manguera que une la bomba mecánica con el ducto de unión de las válvulas 1 y 2. Manteniendo todas las válvulas cerradas se procede a rociar helio sobre la manguera, después se abre la válvula 1 y se rocia helio en el subsistema correspondiente. Cerrando ésta se abre la válvula 2 y se comprueba en la misma forma. Si el sistema tiene fugas se sellan con el material adecuado.

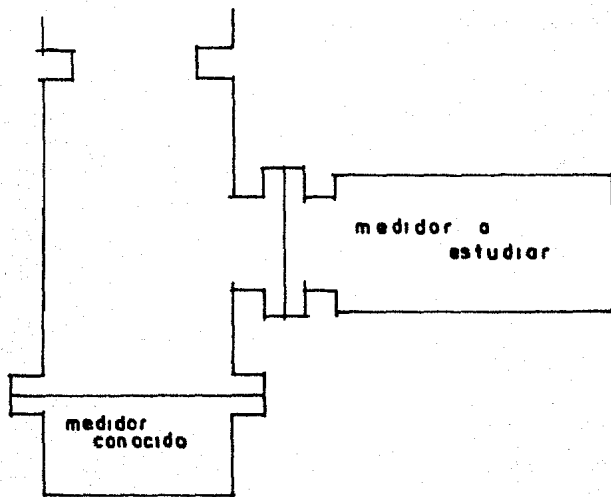


Fig.E.3. dispositivo usado para el estudio del medidor de celado frio

## APENDICE F

## Operación de un sistema de vacío con bomba difusora

El sistema corresponde al descrito en el apéndice E (ver Fig E.1).

## Encendido del sistema:

1) Comprobar que las bombas han sido llenadas con las cantidades y con los tipos de aceite requeridos.

2) Se cierran las válvulas 1, 2 y 3

3) Se enciende la bomba mecánica y se deja trabajar hasta que el ruido disminuya notablemente.

4) Se abren las válvulas 2 y 3 y se espera hasta que el medidor de presión se encuentre entre 100 y 50 micrones de Hg. Se cierra la válvula 3. Se conecta el sistema de enfriamiento de la bomba difusora, en este caso, el agua y se enciende la bomba difusora.

5) Se espera 30 minutos aproximadamente antes de abrir la válvula 3; cuando esto se lleva a cabo el medidor marca una mayor presión, se vuelve a cerrar la válvula 3 y se espera otro poco más.

6) Cuando se abre de nuevo la válvula 3 y el medidor muestra una disminución de presión, se espera hasta que alcance la presión deseada. Dado que el sistema alcanza una presión de  $10^{-6}$  mm de Hg, es necesario abrir una válvula calibrada para conseguir una presión mayor.

7) Para alcanzar la presión de  $10^{-6}$  mm de Hg es necesario agregarle aire líquido a la trampa fría.



Apagado del sistema:

1) Se cierra la válvula 3 y se apaga la bomba difusora, dejando encendido el sistema de enfriado.

2) Si se utilizó aire líquido, es necesario cerciorarse que se ha evaporado, antes de dejar entrar aire al sistema, esto es, la trampa debe encontrarse a temperatura ambiente. De no operar así se atraparía humedad dentro del sistema.

3) Cuando la bomba difusora ya está fría (esperar un mínimo de 30 min desde que se apagó), se apaga el sistema de enfriamiento y la bomba mecánica.

4) Se admite aire en la región de la bomba difusora y la bomba mecánica. Si se quiere admitir aire en la cámara se abre la válvula 1.

## Bibliografía

Brunner Jr., W.F. and Batzer, T.H.

Practical Vacuum Techniques, U.S.A., Robert E. Krieger  
Publishing Co., 1974.

Considine, Douglas M. (Editor en Jefe)

Process Instruments and Controls Hand book,  
U.S.A. McGraw-Hill, 1974.

Dushman, S.

Scientific Foundations of Vacuum Technique  
U.S.A, J.M.Lafferty Ed.Wiley, 1962

Frish, S. y Rimoreva, Q.

Curso de física general, Moscú, M.I.R., 1968

NANMAC

Temperature Handbook. 1981/82

NOTAS IFUNAM

Técnicas de Vacío, 1974

O'Hanlon, John F.

A USER'S GUIDE TO VACUUM TECHNOLOGY,  
U.S.A, Wiley-Interscience, 1980.

Robinson, N.W.

The physical principles of Ultra-high vacuum  
Sistems and equipment, Gran Bretaña,  
Chapman and Hall, 1968.

Rodríguez López, César

Notas del departamento de ingeniería y ciencias  
químicas, U.I.A.

Roth, A.

Vacuum technology, Netherlands, North Holland, 1978.

Rutledge LaPelle, Rolland.

Practical Vacuum Systems, U.S.A, McGraw-Hill, 1972.

Zemansky.

Calor y termodinámica, España, Ed.Aguilar, 1973.

Applications manual for operational amplifiers for modelling  
measuring manipulating and much else, U.S.A, Philibrich/  
Nexus Research and a Teledyne Company, 1968