



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Evaluación teórico-experimental de la tasa de fuga de
agujeros micrométricos y tubos capilares**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A:

JOSÉ EDUARDO ELGUERO GALINDO

DIRECTOR DE TESIS:

**FIS. HÉCTOR DE JESÚS CRUZ-MANJARREZ
FLORES- ALONSO**



Ciudad Universitaria Cd. Mx. 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

Hoja de Datos

1. Datos del alumno

Apellido Paterno
Apellido Materno
Nombre(s)
Teléfono
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Carrera
Numero de cuenta

1. Datos del alumno

Elguero
Galindo
José Eduardo
5585491592
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
308009202

2. Datos del tutor

Grado
Nombre(s)
Apellido Paterno
Apellido Materno

2. Datos del tutor

Fis.
Héctor de Jesús
Cruz-Manjarrez
Flores-Alonso

3. Datos del sinodal 1

Grado
Nombre(s)
Apellido Paterno
Apellido Materno

3. Datos del sinodal 1

Dr.
Juan Carlos
Alonso
Huitrón

4. Datos del sinodal 2

Grado
Nombre(s)
Apellido Paterno
Apellido Materno

4. Datos del sinodal 2

Dra.
Beatriz Elizabeth
Fuentes
Madariaga

5. Datos del sinodal 3

Grado
Nombre(s)
Apellido Paterno
Apellido Materno

5. Datos del sinodal 3

Fis
Luis
Flores
Morales

6. Datos del sinodal 4

Grado
Nombre(s)
Apellido Paterno
Apellido Materno

5. Datos del sinodal 4

Dr.
Jesús Angel
Arenas
Alatorre

7. Datos del trabajo escrito

Titulo

Evaluación teórico-experimental de la tasa de fuga de agujero calibrados y tubos capilares

Numero de paginas

52

Año

2019

A mi mamá
A mi Abuela (QEPD)

Agradecimientos

A mi mamá Martha Galindo quien me enseñó con el ejemplo a no conformarme con poco y siempre querer más, que no existen los caminos cortos si no los caminos con perseverancia y trabajo duro. Sin su apoyo no habría llegado hasta aquí.

A mi abuela Rebeca Díaz (QEPD) quien con su amor formó a la persona que soy hasta estos días.

A mi tía Rebeca Galindo, a mi tío Eduardo Pérez y a mi prima Angélica Castillo, por ser un ejemplo de fortaleza, motivación y perseverancia.

Quiero agradecerle de forma especial a mi asesor de tesis Héctor de Jesús Cruz-Manjarrez Flores-Alonso por permitirme aprender de él, por su apoyo en todo momento como profesor y como persona, por su dedicación al ayudarme a crecer profesionalmente para que con ello pueda afrontarme a nuevos retos. Además de ser un gran motivante ya que con el ejemplo me enseñó que la física aplicada e instrumentación es una gran herramienta que vincula mis conocimientos de física con la industria.

Al Fis Luis Flores Morales por todo el apoyo brindado durante y fuera del periodo que estuve en el Laboratorio de Alto Vacío de la Facultad de Ciencias realizando pruebas con el detector de helio.

A mis sinodales Dr. Juan Carlos Alonso Huitrón, Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga, Dr. Jesús Ángel Arenas Alatorre por tomarse el tiempo de revisar mi trabajo.

A mis amigos Omar, Mario, Karen y Cesar por su amistad y por el apoyo que siempre obtengo de ellos.

Índice

Introducción	5
Capítulo 1	
El gas ideal.	
1.1 Variables macroscópicas	6
1.2 Leyes del gas ideal	8
1.2.1 Ley de Boyle	8
1.2.2 Ley de Charles	9
1.2.3 Ley de Gay Lussac	9
1.2.4 Ley general de los gases	10
1.2.5 Ley de gas ideal	11
1.3 Teoría cinética de los gases	12
1.3.1 Presión	13
1.3.2 Temperatura	15
1.3.3 Camino libre medio (λ)	16
1.4 Flujo de un gas	16
1.4.1 Flujo de gas en el régimen viscoso	18
1.4.2 Flujo de gas en el régimen molecular	18
1.5 Conductancia	19
1.5.1 Conductancia en tubos	20
1.5.1.1 Régimen viscoso	20
1.5.1.2 Régimen Molecular	21
1.5.2 Conductancia en orificios	22
1.5.2.1 Para el régimen viscoso	22
1.5.2.2 Régimen Molecular	23
1.6 Sistemas cerrados	23
1.6.1 Sistemas al vacío	23
1.6.2 Sistemas a presión	24
1.7 Tipos de fugas	24
1.7.1 Fugas reales	24
1.7.2 Fugas virtuales	24
Capítulo 2	
Las fugas reales y la condición de “hermeticidad”	
2.1 Flujo másico en el tiempo	25
2.2 Tasa de fuga máxima permitida	26
2.3 Hermeticidad como característica de un sistema cerrado	26
2.4 Métodos de evaluación y detección de fugas	27
2.4.1 Método por aumento de presión	27
2.4.2 Método de inmersión	28

2.4.3 Método de Ultrasonido	28
2.4.4 Uso de solventes	28
2.4.5 Detección y evaluación de fugas con un gas trazador	29
2.5 Detector de Helio	29

Capítulo 3

Metodología y diseño experimental

3.1. Diseño y arreglo experimental	32
3.2 Método por Aumento de Presión	32
3.3 Evaluación una fuga con Detector de Helio	36

Capítulo 4

Resultados y Conclusiones

4.1 Resultados	40
4.1.1 Aumento de Presión	40
4.1.2 Detector de Helio (Varian 979)	42
4.1.3 Resultados Teóricos	42
4.2 Discusión	45
4.3 Conclusiones	46

Bibliografía	47
---------------------	-----------

Anexo A	48
----------------	-----------

Anexo B	50
----------------	-----------

Introducción

Los sistemas cerrados no son perfectos, ya que tienen diversas fugas reales en diferentes lugares y de diferentes dimensiones, en la industria uno de los factores mas importantes en algunos procesos es la “hermeticidad” de los sistemas cerrados, ya que se requieren especificaciones estrictamente controladas para garantizar que el producto tenga la tasa máxima aceptable de fuga y así lograr que un sistema se mantenga en un intervalo de presión específico de acuerdo a la aplicación durante la vida útil del producto.

Entonces podemos decir que el sistema es “hermético” si la tasa de fuga total del sistema es menor a la tasa máxima aceptable de fuga para la aplicación específica del contenedor, ya que esto se traduce en tener una mejor calidad, garantía y costo del producto final.

Para encontrar las mejores condiciones en el proceso de producción puede tener una gran utilidad tomar en consideración, la relación que puede haber del tamaño de la fuga con la tasa de fuga (pérdida o ganancia de masa en un tiempo).

Por esto se hizo un arreglo experimental y para hacer dos pruebas de evaluación de fugas por el método de aumento de presión y con un detector Varian 979. Con estas pruebas y con resultados teóricos se quiso encontrar una relación entre la tasa de fuga y el tamaño de la fuga.

Capítulo 1

El Gas Ideal.

Cuando se considera un gas es necesario tener en cuenta las variables de las que depende y de los modelos a los cuales se ajusta su comportamiento. En la vida real un gas esta lejos de comportarse como un gas ideal, a no ser que se encuentre a presiones menores que la presión atmosférica, este modelo toma en cuenta las variables macroscópicas del gas como son: temperatura, presión, volumen y numero de partículas.

Pero también hay que tener en cuenta la parte microscópica, por la cual el modelo de Teoría Cinética de un gas considera al gas como un conjunto de partículas llamadas moléculas.

Con estos dos modelos podemos entender los conceptos físicos para un gas que fluye, y así cuantificar la cantidad de materia que se mueve de un sistema en presencia de una diferencia de presiones.

1.1 Variables macroscópicas

Las variables de estado son aquellas que describen a un sistema, en el cual cada una de ellas está relacionada entre sí, esto quiere decir que el cambio en una variable afecta a todas las variables por igual. Para un sistema en estado gaseoso se tiene que las tres variables asociadas a este sistema son:

- **Volumen [V]**

El espacio que ocupan las moléculas del gas. [m³]

- **Presión [p]**

La presión se define como $\frac{\text{Fuerza [N]}}{\text{Area [m}^2\text{]}}$. En la superficie terrestre, hay una fuerza por unidad de área llamada presión atmosférica, la cual es generada por el peso de una columna de aire.

El cual esta constituido por los siguientes porcentajes (Leybold, 2007)

- Nitrógeno (N₂): 78.08%
- Oxígeno (O₂): 20.9%
- Helio (He): 0.00052%
- Otros: 1.01%

Al nivel del mar y a cero grados centígrados se define como atmosfera estándar.

1 Atm Estándar = 101325 Pascales = 760 Torr = 1013 mbar = 14.7 PSI

Esto en Kg es igual a 10 toneladas / m²

- **Temperatura [T]:**

Se utiliza la temperatura absoluta [Kelvin], en esta escala existe teóricamente el cero absoluto.

- **Número de partículas**

Está en función del número de moles (n) de la sustancia. $N = nN_A$ donde N_A es el número de Avogadro, es decir bajo las mismas condiciones de presión y de temperatura, todos los gases tienen el mismo número de moléculas en volúmenes iguales, las cuales se llaman moles.

Un mol de cualquier gas tiene:

$$N_A = 6.022045 \times 10^{23} \text{ moléculas}$$

Este número solo es bajo condiciones estándar (760 torr, 273 K) ocupando 22.4 litros el cual se le conoce como Volumen Molar (Halliday, Resnick, & Jearl., 2017)

1.2 Leyes del gas ideal

Existen varias leyes empíricas que fueron construyendo la ecuación de estado de un gas ideal, estas leyes se pueden aplicar para predecir su comportamiento, a partir de las variables macroscópicas

1.2.1 Ley de Boyle

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Esta ecuación relaciona la presión y el volumen de un gas cuando un mismo sistema se encuentra a temperatura constante y cuyo número de partículas contenidas no cambia. En otras palabras, si se le aplica una presión al sistema, el volumen disminuirá, estos nos dicen que la relación $P \cdot V = \text{cte.}$ esta relación es una relación de energía, ya que el cambio de presión provoca el mismo cambio en la energía cinética de las moléculas (Figura 1.1) (Varian Associates, Basic Vacuum Practice, 1992).

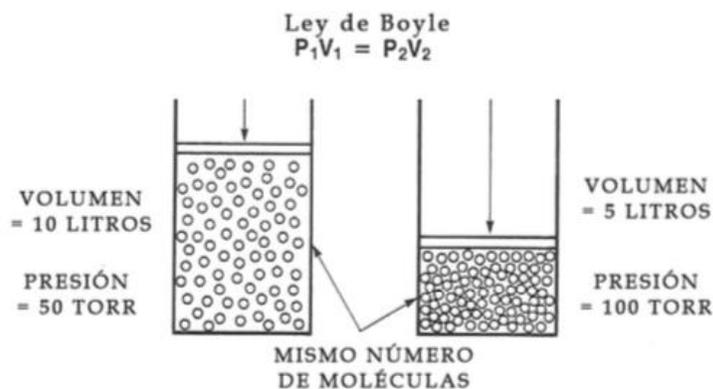


Figura 1.1 Ley de Boyle

1.2.2 Ley de Charles

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Esta ley relaciona el volumen con la temperatura de un sistema cuando la presión constante y el número de moléculas no varía. Esto quiere decir que si la temperatura aumenta su volumen hará lo mismo. Se ejemplifica en la Figura 1.2 (Varian Associates, Basic Vacuum Practice, 1992)

Por lo tanto

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

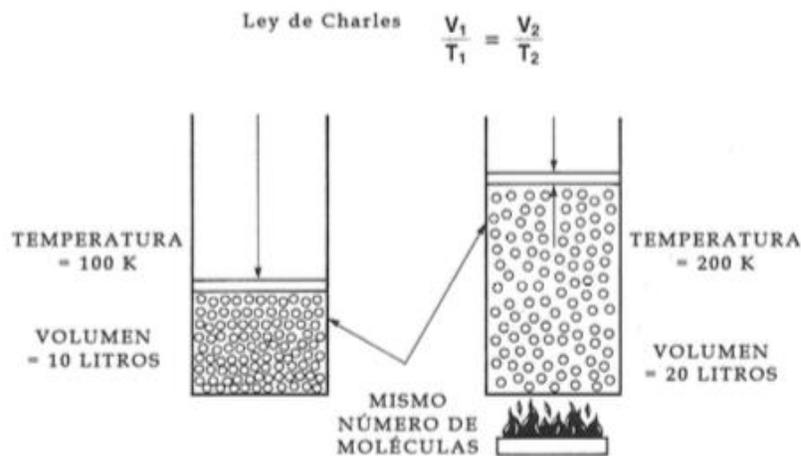


Figura 1.2 Ley de Charles

1.2.3 Ley de Gay Lussac

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Esta ley relaciona la presión con la temperatura, cuando el volumen y el número de moléculas permanece constante. Y nos dice que la presión es proporcional a la temperatura, lo que quiere decir es que, si la presión

aumenta, la temperatura aumentara en la misma proporci3n. (Figura 1.3)
 (Varian Associates, Basic Vacuum Practice, 1992)
 Por lo tanto

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

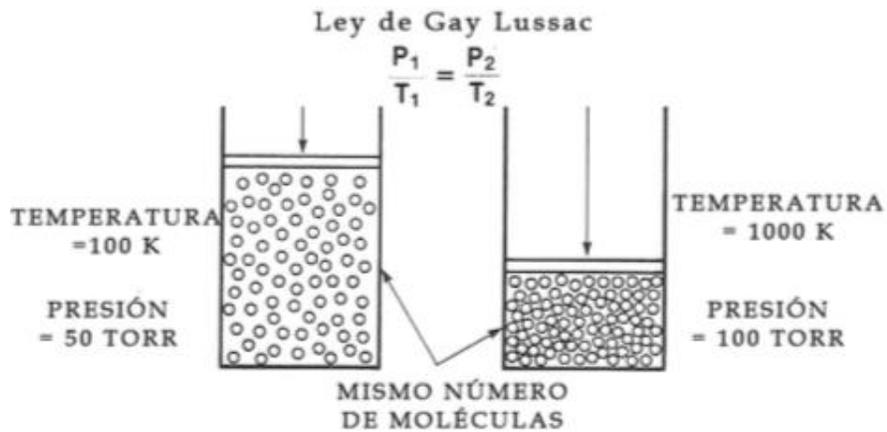


Figura 1.3 Ley de Gay Lussac

1.2.4 Ley general de los gases

Esta ley une las leyes descritas anteriormente y relaciona las variables de ambos sistemas al variar o dejarlas constantes.

$$\frac{pV}{nT} = \text{cte} = R$$

teniendo que esta constante es la **Constante Universal de los Gases Ideales** la cual tiene un valor de (Halliday, Resnick, & Jearl., 2017):

$$R = 8.314472 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$$

1.2.5 Ley de gas ideal

La constante universal de los gases (R) se asocia con el número de moléculas que hay en un mol por otra constante llamada constante de Boltzmann cuyo valor es:

$$k = 1.380648 \text{ J/K} = 1.38 \times 10^{-16} \text{ ergios/K} = 1.03 \times 10^{-22} \text{ Torr} \cdot \text{litro/K}$$

entonces tenemos que:

$$R = kN_A$$

y como el número de moléculas puede ser:

$$N = nN_A$$

y con estas dos relaciones tenemos que:

$$pV = NkT$$

El modelo de gas ideal es un gas teórico compuesto de un conjunto de partículas puntuales con desplazamiento aleatorio que no interactúan entre sí. (Halliday, Resnick, & Jearl., 2017)

1.3 Teoría cinética de los gases

El modelo para describir el comportamiento de las moléculas que constituyen a un gas de forma individual se conoce como Teoría Cinética de los Gases y para aplicarla a un gas ideal contenido en un volumen determinado, se toman las siguientes consideraciones:

1. Consta de partículas que siguen un movimiento aleatorio y que obedecen las leyes del movimiento de Newton. Las partículas pueden ser átomos individuales, o grupos de átomos. En uno o en otro caso les llamaremos moléculas. Estas se mueven en todas direcciones y con velocidades diferentes.
2. Todas las colisiones son elásticas y de duración insignificante. Esto nos dice que la energía cinética total de las moléculas es constante, y que también su energía potencial total de las moléculas es constante.

Una molécula le imprime momento a una pared de su contenedor cuando rebota contra ella. Suponemos que las moléculas son suficientes que la rapidez con que se imprime momento a una superficie de área A del contenedor es prácticamente constante

3. El volumen ocupado por las moléculas es una fracción muy pequeña del que ocupa el gas, así la separación media entre ellas es muy grande
4. Sobre las moléculas no pueden actuar fuerzas salvo durante una colisión, ya sea con las paredes del contenedor o con otra molécula.
5. Todas las moléculas son iguales.

Tomando esto en cuenta, podemos encontrar una expresión para la presión y la temperatura considerando un modelo microscópico (Halliday, Resnick, & Jearl., 2017)

1.3.1 Presión

La presión es proporcional al número de moléculas por unidad de volumen y la energía cinética media de las moléculas.

Por Newton:

$$F = \frac{d\rho}{dt}$$

ρ como el momento de una partícula

entonces;

$$F = \frac{d\rho}{dt} = \frac{mv_x^2}{L}$$

esto es la rapidez con la que se le da momento a las paredes.

Ahora, como la presión está dada como:

$$p = \frac{F}{A}$$

Considerando a F_x como la suma de todos los momentos de cada partícula y L^2 el área de la pared.

$$p = \frac{F_x}{L^2} = \left(\frac{m}{L^3}\right) (v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xN}^2)$$

con N igual al número de moléculas que conforman el gas.

Pero como $N = nN_A$ y $(v_x^2)_{\text{prom}}$, el valor promedio del cuadrado de las componentes x de todas las velocidades moleculares

$$p = \frac{nMN_A}{L^3} (v_x^2)_{\text{prom}}$$

Sin embargo mN_A es la masa Molar del gas y L^3 el volumen de la caja

$$p = \frac{nM}{V} (v_x^2)_{\text{prom}}$$

Se toma en consideración que para todas las moléculas del gas $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ y como todas se mueven en direcciones aleatorias, los valores promedio de los cuadrados de sus componentes de velocidad son iguales, entonces; $v^2 = \frac{1}{3} v^2$, y considerando que $\sqrt{(v_x^2)_{\text{prom}}} = v_{\text{rms}}$,

Por lo tanto;

$$p = \frac{nMv_{\text{rms}}^2}{3V}$$

Despejando v_{rms}^2 se obtiene la **velocidad térmica** de un gas (Halliday, Resnick, & Jearl., 2017):

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

1.3.2 Temperatura

Considerando que la energía cinética de translación de un gas en cualquier instante es $\frac{1}{2} mv^2$, entonces su energía cinética promedio está dada como:

$$K_{\text{prom}} = \left(\frac{1}{2} mv^2 \right)_{\text{prom}} = \frac{1}{2} mv_{\text{rms}}^2$$

Ahora sustituyendo v_{rms} en $\frac{1}{2} mv_{\text{rms}}^2$:

$$K_{\text{prom}} = \left(\frac{1}{2} m \right) \frac{3RT}{M}$$

Ahora, si $\frac{M}{m}$ la masa molar entre la masa de una molécula es el numero de Avogadro (N_A) y $k = \frac{R}{N_A}$

Por lo tanto;

$$K_{\text{prom}} = \frac{3}{2} kT$$

Esto quiere decir que a una temperatura T , todas las moléculas de un gas ideal, sin importar cuales sean sus masas, tienen el mismo promedio de energía cinética de translación, es decir cuando medimos la temperatura de unas, estamos midiendo también el promedio de energía cinética de translación de sus moléculas (Halliday, Resnick, & Jearl., 2017)

1.3.3 Camino libre medio (λ)

Está definido como el promedio de distancia recorrida por una molécula entre 2 colisiones sucesivas. Es inversamente proporcional con $\frac{N}{V}$, también varía de manera inversa con el tamaño de las moléculas. Por lo tanto, entre más grande es la molécula menor será el camino libre medio. (Leybold, 2007)

El camino libre medio resulta ser:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 N/V}$$

siendo

d^2 = diámetro de la molécula [m] y N/V = densidad de moléculas

Cuando la presión de un gas es alta, la densidad de moléculas es muy grande, pero si reducimos la presión manteniendo el volumen constante, la densidad de partículas decrece. Por convención se considera que $\lambda < 1 \text{ cm}$ es régimen viscoso y $\lambda > 1 \text{ cm}$ es régimen molecular. Estos regímenes se describirán más adelante. (Leybold, 2007)

1.4 Flujo de un gas

Para que un gas fluya se necesita una diferencia de presión, y la dirección de ese flujo va del sistema de mayor presión al sistema de menor presión, esto quiere decir que:

$\Delta P \gg 0$ la cantidad de materia que fluye será mayor y conforme ΔP se vaya haciendo mas pequeña, la cantidad de materia que se mueve será menor.

Esta diferencia de presión en un sistema cerrado es la de su presión interna con respecto a la presión atmosférica, ya sea más alta o más baja de una Atmosfera

Ahora bien, es necesario entender el comportamiento de las variables macroscópicas en el tiempo, cuando tenemos una diferencia de presiones y por lo tanto un flujo de gas. Evaluando la ecuación del gas ideal en el tiempo

$$\frac{d}{dt}(pV) = \frac{d}{dt}(NKT)$$

Desarrollando se obtiene;

$$\frac{dp}{dt}V + p\frac{dV}{dt} = KT\frac{dN}{dt} \quad (1.1)$$

El primer término $\frac{dp}{dt}V$ es el cambio de presión con el volumen constante, esto se aplica en el sistema de bombeo, se reduce la cantidad de materia dentro del volumen, y por lo consiguiente se reduce la presión.

El segundo término $p\frac{dV}{dt}$ es el volumen de gas que fluye en un intervalo de tiempo. En sistemas de bombeo, se le conoce como velocidad de bombeo (S)

Los términos $NT\frac{dK}{dt} = NK\frac{dT}{dt} = 0$, ya que K es una constate y la Temperatura en un sistema que está al vacío la temperatura no cambia.

El ultimo término $KT\frac{dN}{dt}$ es el cambio del número de partículas en el tiempo, por esa diferencia de presión. Y a esta expresión se define como gasto (Q).

Por lo tanto:

$$Q = KT\frac{dN}{dt}$$

con $p = \text{cte}$:

$$Q = p\frac{dV}{dt} \quad (1.2)$$

Esta ecuación dice que el flujo de gas Q que atraviesa una superficie es el producto del volumen que pasa en un intervalo de tiempo, multiplicado por la presión.

Ahora bien, con el volumen constante de (1.2):

$$Q = \frac{\Delta p}{\Delta t} V \quad (1.3)$$

Ya que pV es una energía; por tanto, Q constituye una potencia o flujo de energía. Pero en este caso lo que interesa es el flujo de masa, es decir, el número que atraviesa a una superficie en un tiempo determinado. A esta Q se denomina **Flujo másico**

Las dimensiones de Q son $\left[\frac{\text{torr} \times \text{litro}}{\text{segundo}} \right]$ y una Q estándar esta definida como (Leybold, 2007):

$$Q = 1 \text{ Sccs} = 1 \text{ Atmósfera estándar por centímetro cúbico en un segundo} \\ = 1.29 \text{ mgr/segundo}$$

1.4.1 Flujo de gas en el régimen viscoso.

En el régimen viscoso, el recorrido libre medio es pequeño comparado con las dimensiones del volumen que lo contiene (Figura 1.4) (Varian Associates, Basic Vacuum Practice, 1992), es decir sus partículas están muy cerca la una de la otra, por lo consiguiente el gas en este caso, puede ser tratado como un fluido, esto quiere decir que se considera como si fuera continuo. Además, si estas líneas de flujo viajan casi paralelas, se considera que es un flujo viscoso laminar.

1.4.2 Flujo de gas en el régimen molecular.

En este régimen, el número de moléculas es menor que en el régimen viscoso por lo tanto el choque entre ellas y con las paredes del recipiente que las contienen es mínimo, (Figura 1.5) (Varian Associates, Basic Vacuum Practice, 1992). A escala molecular las paredes tienen una rugosidad, y esto hace que la reflexión de las partículas sea en todas direcciones.

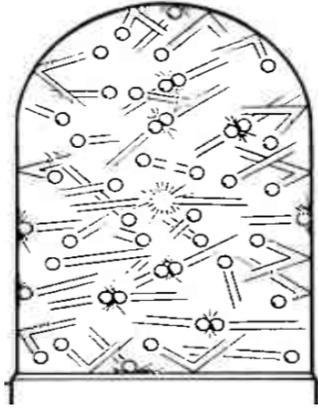


Figura 1.4 Flujo Viscoso

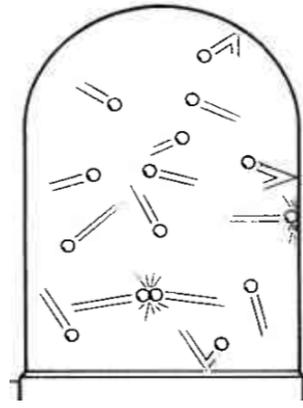


Figura 1.5 Flujo Molecular

1.5 Conductancia

Cuando hay un flujo de gas, también hay una resistencia a ese flujo cuyo inverso tiene el nombre de conductancia. Y esta es la habilidad de transportar gas por una tubería de geometría determinada. Y está determinada como (Gerhard, 1972):

$$C = \frac{Q}{\Delta P} \quad (1.4)$$

El análogo a esta magnitud es la resistencia o la impedancia en un sistema eléctrico. La característica de un tubo o de un orificio es su conductancia.

Como ya se dijo el análogo entre el flujo de gas y la corriente de gas es notorio, donde C corresponde a la conductividad eléctrica y ΔP corresponde a la diferencia de potencial.

Entonces con esto se puede intuir las reglas para el cálculo de la conductancia en serie o en paralelo

$$C = C_1 + C_2 \text{ EN PARALELO}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \text{ EN SERIE}$$

1.5.1 Conductancia en tubos

1.5.1.1 Régimen viscoso

Considerando un tubo de longitud L y diámetro D ; y se hace circular gas a través del tubo.

Si el flujo es laminar, la viscosidad del gas hace que la velocidad se reduzca en las proximidades de las paredes. Por la ecuación de Poiseuille para flujo viscoso en un tubo circular, se supone que el gas es incompresible. Esta condición es satisfecha con suficiente rigor si (Gerhard, 1972):

$$Q < \frac{10^{-3}}{12} \pi D^2 p v \text{ torr} \times \text{litros /segundo}$$

v = velocidad del sonido [cm/s]; $3.44 \times 10^4 \text{ cm/seg}$ para aire a 20°C

D = diámetro en centímetros, p = Presión en torr

La conductancia para un tubo largo en régimen viscoso esta dado como (Gerhard, 1972):

$$C_{\text{viscoso}} = \frac{\pi D^4}{128 \eta L} \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) \quad (1.5)$$

L = longitud del tubo η = Viscosidad

Para aire a 20°C tenemos que (Gerhard, 1972):

$$C = 135 * \frac{d^4}{l} * \bar{p} \quad (1.6)$$

d = diametro interior del capilar. $\bar{p} = \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right)$

Estas ecuaciones no son aplicables a tubos cortos, ya que se requiere de una longitud $l = 0.227 \text{ mQ}/\pi\eta kT$ a partir de la entrada para que el flujo se establezca completamente.

Para un tubo corto, la ecuación se convierte en (Gerhard, 1972):

$$C_{\text{viscoso}} = \frac{\pi D^4 P}{128 \eta L} \left(1 + 1.14 \frac{m Q}{8 \pi \eta k T L} \right)^{-1}$$

Esta ecuación es válida para $L > 0.304 \frac{mQ}{\pi \eta k T}$

1.5.1.2 Régimen Molecular

Al igual que en el régimen molecular se hace circular un gas a través de un tubo de longitud L y diámetro D ; al circular el gas se produce una transferencia de cantidad de movimiento entre el gas y las paredes del tubo en el sentido del movimiento.

La fuerza necesaria para vencer el rozamiento externo es igual a la requerida para empujar el gas a través del tubo.

La conductancia en el régimen Molecular está dada como (Gerhard, 1972):

$$C_m = 3.8 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \frac{D^3}{L} \text{ litros /segundo} \quad (1.7)$$

Para aire a 20 °C tenemos que :

$$C = 12.2 \frac{D^3}{L} \quad (1.8)$$

Si el tubo es corto, no puede despreciarse la conductancia del orificio de entrada, y la conductancia queda de la siguiente manera:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_m} + \frac{1}{C_{\text{orificio}}}$$

1.5.2 Conductancia en orificios.

1.5.2.1 Para el régimen viscoso

Suponiendo que el orificio es muy delgado y de bordes afilados; de esta manera pueden desprejarse los efectos de las paredes debidos a la viscosidad. El flujo depende de la relación $r = P_2 / P_1$ de presiones en los extremos del tubo. La ecuación para la conductancia en un orificio en régimen viscoso está dada como (Gerhard, 1972):

$$Q = \left[\frac{2\gamma k T_1}{m(\gamma - 1)} \right]^{1/2} r^{1/\gamma} \left[1 - r^{(\gamma-1)/\gamma} \right]^{1/2} P_1 A$$

Donde $\gamma = C_p / C_v$ es la relación de calores específicos del gas.

el flujo tiene un máximo para:

$$r = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/\gamma-1}$$

Por debajo de un valor crítico de r , la ecuación no es válida. Para valores pequeños de r , el gas fluye con la velocidad del sonido y el flujo es independiente de P_2 . Para aire a 20°C, existen tres regiones que indican a continuación (Gerhard, 1972):

$$C = 76.6 r^{0.712} \sqrt{1 - r^{0.288}} \frac{A}{1 - r} \frac{\text{litros}}{\text{seg}} \quad r \geq .052. \quad (1.9)$$

$$C \approx 20 \frac{A}{1 - r} \text{ litros /seg} \quad r \leq 0.52 \quad (1.10)$$

$$C \approx 20A \frac{\text{litros}}{\text{seg}} \quad r \leq 0.1 \quad (1.11)$$

1.5.2.2 Régimen Molecular

Para calcular la conductancia de un orificio de área A, se tendrá en cuenta el hecho de que las corrientes de gas que atraviesan el orificio en ambos sentidos no interfieren entre sí. Y está dada como (Gerhard, 1972):

$$C = 3.64(T/M)^{1/2} A \left(\frac{\text{litros}}{\text{segundo}} \right) \quad (1.12)$$

Para aire a 20°C

$$C = 11.7A \quad (1.13)$$

1.6 Sistemas cerrados

1.6.1 Sistemas al vacío

Son aquellos sistemas que se encuentra por debajo de la presión atmosférica, a los cuales se le extrae materia mediante con una bomba de vacío. Al bajar la presión a un valor determinado y el sistema se cierra, en teoría el sistema debería permanecer a la misma presión en cualquier intervalo de tiempo, pero como no existen sistemas perfectos, esto no es posible.

Y esto se debe por micro agujeros y defectos en las uniones o por gases atrapados en el sistema. A este tipo de problemas se le conoce como Fugas reales y Fugas virtuales respectivamente.

1.6.2 Sistemas a presión

Son aquellos que se encuentra por arriba de la presión atmosférica, cuando se le aumenta la presión al sistema a un valor determinado, este se cierra, e igual que en el sistema de vacío se esperaría que mantenga su presión, en

el tiempo. Pero no es así, ya que el sistema empieza a disminuir su presión interna en un intervalo de tiempo determinado.

Tanto como para el sistema al vacío como el sistema a presión es necesario poder cuantificar la cantidad de materia que sale o entra del sistema. En los capítulos siguientes se abordará el tema, pero primero clasifiquemos los dos tipos de fugas que hay.

1.7 Tipos de fugas

1.7.1 Fugas reales

Son aquellas que son causadas por defectos físicos del contenedor, como grietas, micro agujeros o fisuras en las uniones del sistema los cuales permiten la entrada o salida de materia y estas afectan tanto sistemas al vacío como a sistemas a presión. En este tipo de fugas influyen mucho el tamaño del hoyo, su geometría las diferencias de presión entre el sistema y la atmósfera y el gas que pasa a través de este (Varian Associates, Basic Vacuum Practice, 1992).

1.7.2 Fugas virtuales

Este tipo de fugas solo se presentan en sistemas al vacío y son causadas por la desgasificación de gases atrapados en poros, entre las cuerdas de tornillos, por gases pegados por adsorción en las paredes o por suciedad dentro del sistema. Este tipo de fugas puede evitar que un sistema alcance la presión o vacío esperado (Varian Associates, Basic Vacuum Practice, 1992).

Capítulo 2

Las fugas reales y la condición de “hermeticidad”

En la vida real los sistemas cerrados están muy lejos de ser perfectos, esto quiere decir que tienen fugas reales de dimensiones variables en alguna parte del sistema, como en las uniones fijas o desmontables o pequeños defectos en las paredes del contenedor o en soldaduras frías entre otras: Además, si consideramos que el sistema puede tener más de una fuga real y cada una con dimensiones diferentes, entonces podemos decir que el sistema es “hermético” si la tasa de fuga total del sistema es menor a la tasa máxima aceptable de fuga para la aplicación específica del contenedor.

Para tener claro cómo se puede evaluar la “hermeticidad”, es necesario especificar la presión de trabajo del sistema; Para un sistema al vacío se tiene tanto régimen viscoso como molecular, a diferencia de los sistemas a presión, que solamente se consideran en régimen viscoso.

2.1 Flujo másico en el tiempo

El flujo másico es la cantidad de materia que entra o sale otra vez de una fuga real, de un tamaño, así como de una geometría determinada, cuando existe una diferencia de presión entre el sistema y la presión atmosférica. Cuando determinamos la cantidad de materia que entró o salió al sistema en un tiempo determinado, le llamamos **Tasa De Fuga [Q]** que está dada por la ecuación (1.3).

$$Q = \frac{\Delta p}{\Delta t} V$$

Además, por la ecuación (1.4) (Leybold, 2007):

$$Q = C * \Delta P \quad (2.1)$$

Con estas dos ecuaciones se determina el flujo másico o tasa de fuga tomando en cuenta variables diferentes. Por un lado, la ecuación (1.3) solo toma en cuenta la cantidad de materia que entra o sale de un área

determinada, y la (2.1) toma en cuenta otros factores como el tipo del gas, pues esta considera la conductancia que tiene la fuga.

Teniendo en cuenta que cada sistema necesita cumplir con un cierto valor de tasa de fuga, dependiendo de la aplicación, se necesita definir la cantidad de materia que puede perder o ganar en un tiempo definido, para así poder definir si es apto o no para el uso que se le tiene estipulado.

2.2 Tasa de fuga máxima permitida

La tasa de fuga se puede deber a una o más fugas reales en todo el sistema. La suma de los defectos es la fuga total del sistema, la cual se escribe como:

$$Q_T = \Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + \dots$$

Esta Q_T no tiene que exceder el valor estipulado de acuerdo al uso que se le dará al sistema. Si se establece la tasa de fuga máxima permisible para el contenedor y su aplicación, se podrá obtener el cambio de la presión dentro del sistema, y así podemos asignarle la condición de hermeticidad para el uso establecido.

2.3 Hermeticidad como característica de un sistema cerrado.

Siempre que se quiera tener un sistema hermético, se debe de partir de la premisa de que **“NO EXISTE UN SISTEMA PERFECTO”**

Partiendo de lo anterior, se necesita saber la aplicación del sistema, así como su tasa de fuga máxima permisible Q_{MP} .

Para establecer si el sistema es hermético se aplica la siguiente condición (Leybold, 2007):

Si $Q_T < Q_{MP}$, el sistema es hermético

Si $Q_T \geq Q_{MP}$, el sistema no es hermético

Teniendo en cuenta esto, es necesario describir los diferentes métodos que existen para la detección y evaluación de fugas en sistemas cerrados, así como sus sensibilidades.

2.4 Métodos de evaluación y detección de fugas

En los procesos de detección de fugas, los métodos usados dependen del tamaño de las fugas que se quieran detectar. Ya que cada método tiene ciertos límites de detección. También es importante el uso que tenga el sistema, así como factores económicos y de tiempo para realizar la prueba ya que estos factores son muy importantes en la industria

A continuación, se describirán algunos métodos de detección de fugas:

2.4.1 Método por aumento de presión

Este método de evaluación de fugas aprovecha el hecho de que una fuga permitirá que una cantidad de gas (que permanece uniforme durante un período de tiempo) ingrese a un sistema al vacío y a su vez la cantidad de gas liberado de las paredes del recipiente y de los materiales utilizados para el sellado (si no están suficientemente libres de desgasificación) disminuirá con el tiempo, ya que prácticamente siempre serán vapores condensables para los cuales se alcanza una presión de equilibrio en algún momento.

La válvula en el extremo de la bomba del recipiente de vacío evacuado se cerrará en preparación para las mediciones de aumento de presión.

Luego se mide el tiempo durante el cual la presión aumenta una cierta cantidad.

Este método está limitado aproximadamente a fugas de 10^{-4} sccs.

Colocado en un gráfico con escalas lineales, la curva para el aumento de la presión debe ser una línea recta para una fuga real, incluso a presiones mayores. Si el aumento de presión se debe a que el gas se libera de las paredes (debido en última instancia a la contaminación), entonces el aumento de presión disminuirá gradualmente y se acercará a un valor final y estable.

En la mayoría de los casos, ambos fenómenos ocurrirán simultáneamente, por lo que separar las dos causas es a menudo difícil, si no imposible. Estas relaciones se muestran esquemáticamente en la (Figura 2.1).

Una vez que queda claro que el aumento de la presión se debe únicamente a una fuga real, entonces la tasa de fuga se puede determinar cuantitativamente a partir del aumento de la presión, trazada en función del tiempo, de acuerdo con la ecuación (1.3) (Leybold, 2007)

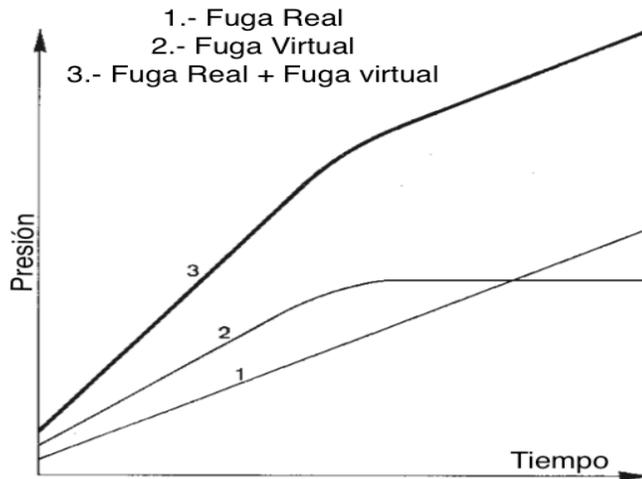


Figura 2.1 Comportamiento de la presión en el tiempo con escalas lineales

2.4.2 Método de Inmersión

Es uno de los métodos mayormente utilizados en la industria, este método consiste en presurizar el sistema de prueba y sumergirlo en agua y buscar si hay salida de aire en forma de burbujas. Este método es sensible aproximadamente a agujeros de 1×10^{-3} sccs (Authors, 2013)

2.4.3 Método de Ultrasonido

En este método se utiliza el sonido que produce el gas al escapar del sistema, cuando este se encuentra a una presión alta, este método es sensible para fugas del orden de 10^{-2} sccs, cabe señalar que este método no funciona para sistemas que estén al vacío (Authors, 2013)

2.4.4 Uso de solventes

En sistemas al vacío, se aplican solventes de alta presión de vapor en zonas externas donde se piensa que hay fuga. Cuando el solvente entra, hay un aumento importante de la presión, este aumento, se puede ver con mayor facilidad si se utilizan sensores de conductividad térmica. Este método tiene una sensibilidad aproximada de 10^{-2} (Authors, 2013).

2.4.5 Detección y evaluación de fugas con un gas trazador

En este método de detección, se utiliza un espectrómetro de masas calibrado para detectar la cantidad de helio que entra o sale del sistema (Varian Associates, Introduction To Helium Mass Meter Leak Detection, 1980)

Usar Helio como gas trazador tiene muchas ventajas como son:

- Químicamente inerte
- No es tóxico
- Es un gas noble
- Presente en el aire en una concentración de solo 5 ppm por lo tanto:
 $1 \text{ Scgs de aire} = 1.29 \text{ mgr/s} \rightarrow 1 \text{ Scgs de Helio} = 0.17 \text{ mgr/s}$
- No permea metales.

2.5 Detector de Helio

Un detector de Helio es un espectrómetro de masas, se utilizan este tipo de detectores es por que es un proceso que no contamina en comparación de los métodos antes mencionados además de ser el método con mayor sensibilidad a la hora de medir una tasa fuga de hasta 1×10^{-11} scgs

El funcionamiento del espectrómetro de masas consiste en lo siguiente.

Se producen electrones con un filamento caliente dentro de la cámara de ionización y colisionan con moléculas de gas, creando así gas ionizado, ya que es necesario para acelerar y deflectar estos iones en un campo eléctrico o magnético, estos iones son expulsados atreves de la rendija de salida por un campo repelente.

Las placas de enfoque y la rendija rectificadora colima el haz de iones para que se dirija al campo magnético, los iones de todas las especies gaseosas están presentes en la cámara de iones y si se coloca un colector de iones en este punto, su voltaje seria proporcional a la presión total en la cámara de iones.

Sin embargo, cuando los iones pasan a través de un campo, se desvían en proporción a su relación masa/carga. Esto se ajusta para que cuando una molécula de hidrógeno pase a través del campo, se desvíe 135° , los iones de Helio 90° y los de otras partículas mas pesadas se desvien un ángulo menor a 90° , en consecuencia, solo los iones de Helio atraviesan el campo y pasan por la ranura y llegan al colector, la corriente del colector por tanto es proporcional a la presión parcial de iones de Helio. La figura 2.2 muestra un esquema del espectrómetro de masas en el detector. (Varian Associates, Introduction To Helium Mass Meter Leak Detection, 1980)

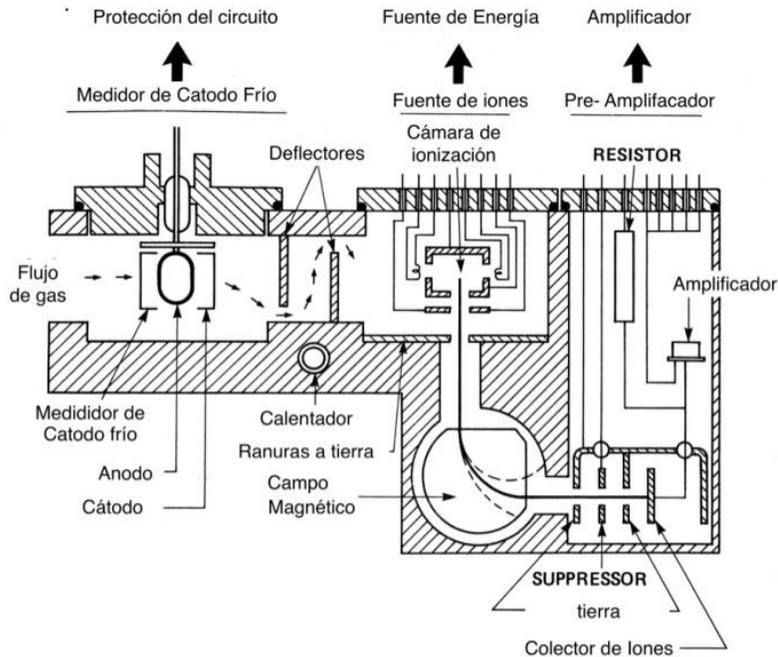


Figura 2.2 Partes de un Espectrómetro de masas

Los procesos de evaluación y detección de fugas con un detector de helio se dividen en dos:

- **Vacío**

Con este método, el volumen de prueba se conecta directamente al detector de fugas, el cual le baja la presión al sistema, hasta 1×10^{-3} torr, con la diferencia de presiones entre el sistema y la presión atmosférica, los gases atmosféricos circundantes tienden a entrar al sistema, por los defectos o fugas que tiene. Pero cuando se aumenta la cantidad de helio en una zona donde haya fuga, por medio de una fuente externa de helio, este trazador de gas entra al sistema y así el detector reconoce que hay una fuga. (figura 2.3) (Varian Associates, Introduction To Helium Mass Meter Leak Detection, 1980)

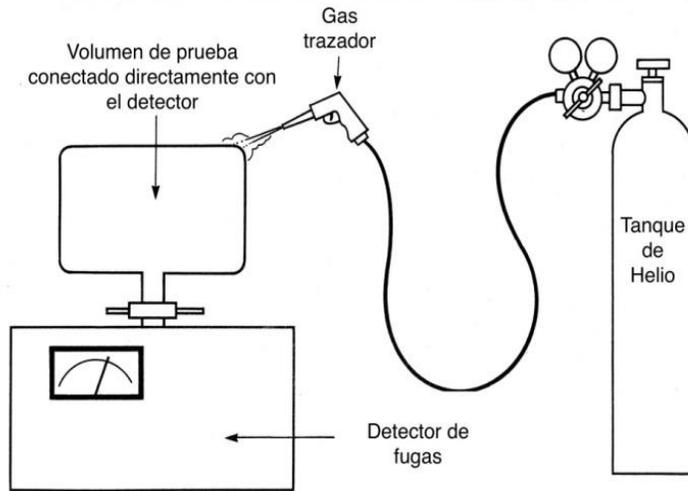


Figura 2.3 Proceso de evaluación de fugas por el método de vacío

- **Sniffer**

Con este otro método, ahora se conecta una sonda de prueba en el puerto del detector. El volumen de prueba se presuriza con helio, y al estar a una presión mayor que la presión atmosférica, sale por los defectos del sistema como se muestra en la figura 2.4. Cuando la sonda se acerca a la fuga, se registra una señal. Este método es menos preciso que el anterior, ya que este método es más útil para localizar la fuga, pero no para determinar la tasa de fuga de esta, ya que solo una pequeña porción del trazador entra por la sonda. (Varian Associates, Introduction To Helium Mass Meter Leak Detection, 1980)

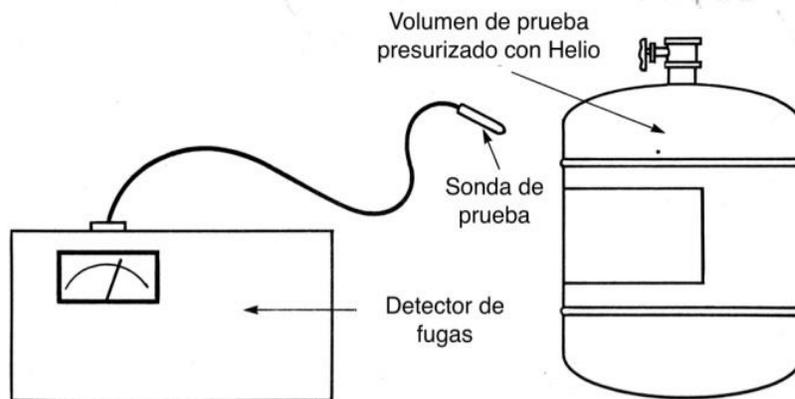


Figura 2.4 Proceso de evaluación de detección de fugas por sniffer

Capítulo 3

Metodología y diseño experimental

En muchas áreas de la industria, la condición de hermeticidad de los productos que fabrican se relaciona directamente con la calidad, la garantía y costo, es por estas razones que la clasificación de la tasa de fuga es cada vez más rigurosa e importante, ya que para sistemas cerrados se requieren especificaciones estrictamente controladas para garantizar que el producto tenga la tasa máxima aceptable de fuga y así lograr que un sistema se mantenga en un intervalos de presión específico de acuerdo a la aplicación durante la vida útil del producto. Para alcanzar las condiciones óptimas de los productos puede ser importante considerar la relación del tamaño del hoyo (fuga) con la tasa de fuga (pérdida o ganancia de masa en un tiempo).

También para los procesos en condiciones de vacío, requieren de un control de las “fugas” en los equipos de producción o para la investigación en donde se busca tener un equipo con fugas que sean menores a la velocidad de bombeo de las bombas de vacío instaladas en los sistemas de proceso, y la consecuencia directa será optimizar los procesos en el tiempo y en calidad.

En este capítulo presento la metodología experimental que propongo para encontrar una relación de la tasa de fuga de un sistema cerrado con la fuga de agujeros y capilares de dimensiones conocidas.

3.1. Diseño y arreglo experimental.

La parte experimental consistió en medir la tasa de fuga por dos métodos diferentes, el de aumento de presión y el otro utilizando un detector de Helio Varian 979.

3.2 Método “Aumento de Presión”

En el laboratorio de alto vacío y películas delgadas del IF está disponible una cámara de procesos con un volumen de 60 litros; esta cámara se mantiene conectada a una bomba mecánica de 5 m³/ hr y a una bomba turbo molecular de 100 lt/s como se observa en la figura 3.2.

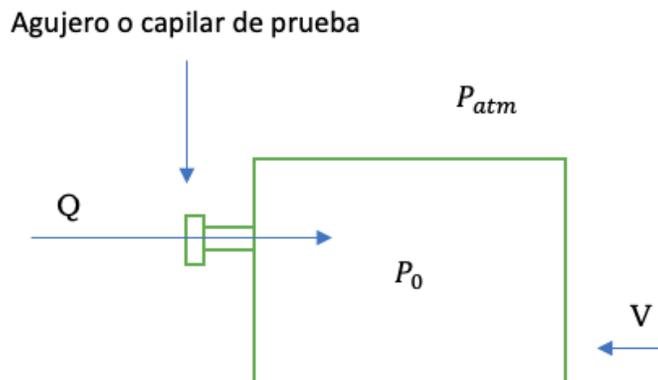


Figura 3.1 Esquema del arreglo experimental para la evaluación de tasa de fuga por el método por aumento de presión

Como vemos en la figura 3.1 y de acuerdo con lo explicado en 2.4.1, obtuvimos el aumento de presión en el tiempo antes mencionado.

El experimento consistió en hacerle vacío al sistema hasta alcanzar una presión de 5.8×10^{-3} Torr, al llegar a esa presión, se abre el agujero o capilar para dejar pasar masa a través de estos elementos en un intervalo de 27 minutos (1620 seg); con la ayuda de una cámara de video, se grabó la carátula del medidor de presión para registrar posteriormente el aumento de la presión cada 15 segundos.

El medidor de vacío es de tipo Piranni, con esta metodología obtuve el comportamiento de la presión con respecto al tiempo. A continuación, se muestra fotos del sistema, así como del montaje de agujeros y capilares.



Figura 3.2 Sistema de Vacío De 60 litros con Bomba mecánica y turbo molecular

Los 3 agujeros calibrados los cuales se adaptaron con un reductor NW25 a NW16 en una de las válvulas de la cámara como se muestra en las siguientes imágenes Figura 3.3 y Figura 3.4.



Figura 3.3 Agujeros de 120, 150 y 200 micras (izquierda a derecha) amplificados 500 veces

Los tubos capilares disponibles tienen un agujero de 550 micras y una longitud de 10.6 cm y de 50.9 cm, ambos se acoplaron a la cámara de vacío mediante una tapa ciega con brida NW25, como se muestra en la Figura 3.5 y Figura 3.6.



Figura 3.4 Arreglo Experimental, para conectar los tres agujeros a la cámara de vacío.

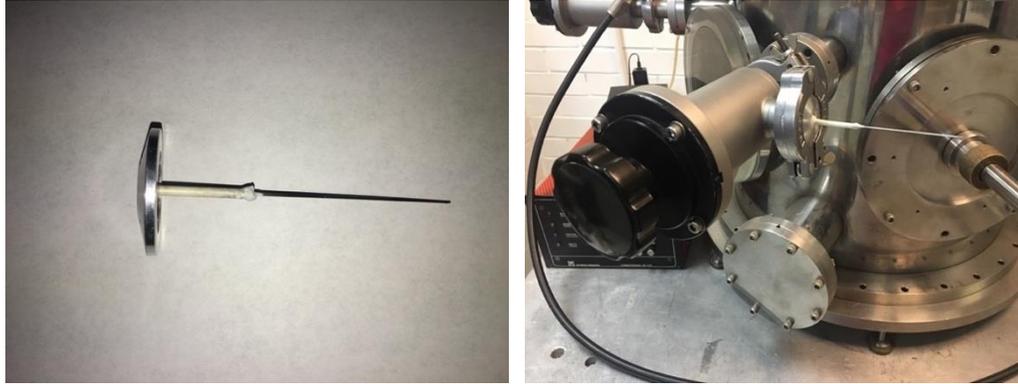


Figura 3.5 Capilar de 10.6 cm adaptado a la cámara de vacío

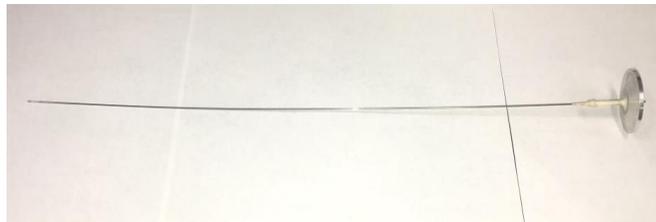


Figura 3.6 Capilar de 50.9 cm conectado a la cámara de vacío y amplificado 500 veces

3.3 Evaluación de una fuga con Detector de Helio

El segundo método consistió en evaluar la tasa de fuga de los mismos agujeros y del capilar de 10.6 cm con un detector de Helio Varian 979, el cual este compuesto por una bomba turbo molecular de velocidad de bombeo variable, apoyada por una bomba mecánica, un espectrómetro de masas, un bloque de válvulas, entre otras cosas asociadas a la electrónica del sistema, como se ve en la figura 3.7.

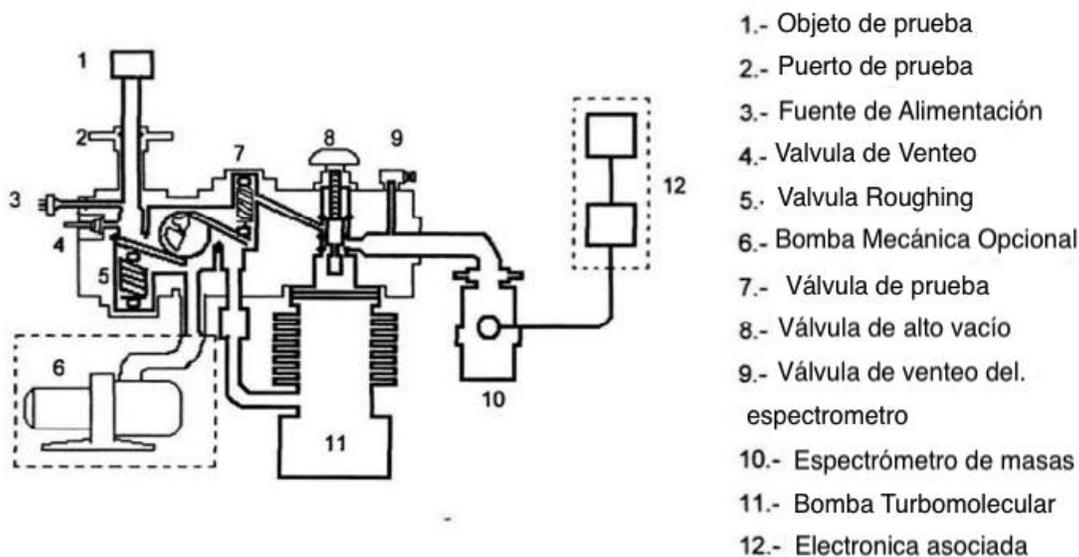


Figura 3.7 Diagrama Detector de Helio Varian 979

En la figura 3.8 se observa el arreglo experimental que he propuesto para calcular la tasa de fuga de los agujeros. El método propuesto para obtener la tasa de fuga consiste en lo siguiente:

Para calcular la tasa de fuga de los tres agujeros y el capilar fue necesario diseñar y construir un sistema de pruebas, que consiste en una platina de aluminio con una brida estándar ISO NW25 que se conecta directamente al puerto de pruebas del detector, un tubo de acrílico que constituye el cuerpo de la cámara que tiene un volumen de 2207 cm³ y una tapa superior con un diseño específico para adaptar los tres soportes de latón con el agujero calibrado y el capilar. A la tapa se le añade una mini cámara de admisión de gas con un volumen de 25.3 cm³.

Esta mini cámara fue necesaria ya que en las primeras pruebas, me pude dar cuenta que el tamaño de la fuga era demasiado grande para la velocidad

de bombeo de la bomba mecánica del detector y no permitía que la presión de la cámara de prueba bajara a la presión de trabajo.

Así que diseñé esta mini cámara de admisión de gas, para aislar el agujero de prueba de la presión atmosférica y a su vez tener control de la presión del gas trazador Helio.

Para saber que presión de gas había en la mini cámara se le conecto un medidor de presión y una válvula conectada a un tanque de Helio para regular la entrada de gas al sistema de prueba. La figura 3.9 y 3.10 ilustra el arreglo con el detector

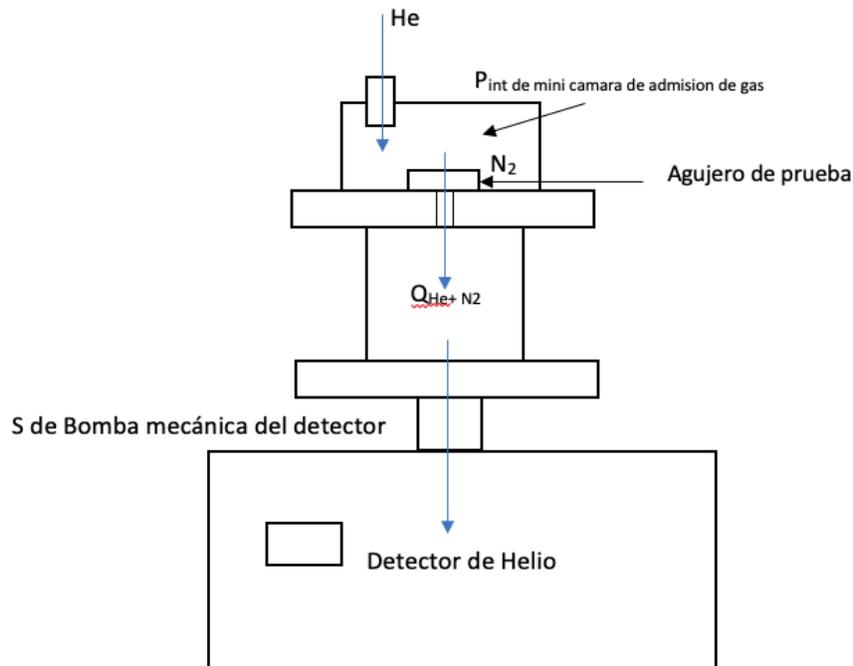
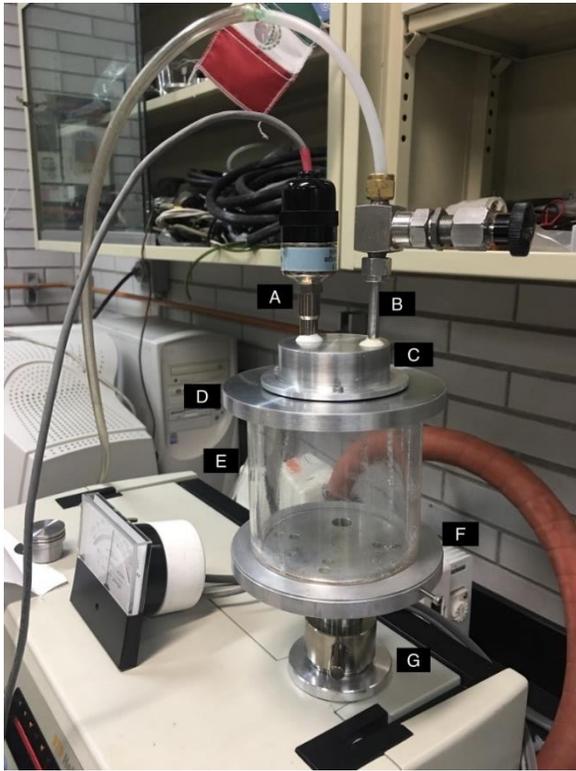


Figura 3.8 Esquema del arreglo experimental para evaluación de fugas con el detector de Helio

Con el arreglo experimental como se muestra en la figura 3.8, se hizo el siguiente procedimiento experimental:

Se colocan los agujeros y el capilar como se muestra en la figura 3.11, se le conecta la mini cámara de gas para comenzar las mediciones. Para empezar a medir la tasa de fuga se necesita que, la cámara de prueba tenga una presión de 1×10^{-3} Torr, y la mini cámara tenga una presión de 200 millitorr. Al tener dicha presión en la mini cámara de gas se abre la válvula de admisión para dejar pasar una cantidad de Helio tal que, hasta ajustar la presión a 2 torr.



- A.- Medidor de presión
- B.- Válvula de admisión de gas
- C.- Mini cámara de gas trazador
- D.- Tapa superior con agujero o capilar adaptado
- E.- Cilindro de acrílico
- F.- Tapa superior conectada al detector

Figura 3.9 Esquema de la cámara de prueba conectada al detector de Helio



Figura 3.10 Vista general del arreglo experimental

La figura 3.11 muestra como se adaptaron los soportes de los agujeros y el capilar a la tapa superior.



Figura 3.11 Agujero y capilar adaptados a la tapa superior

Paralelamente a estas dos pruebas, se hicieron cálculos teóricos, para tener así tres medidas de tasa de fuga para cada agujero y para cada capilar. El evaluar la tasa de fuga por tres métodos diferentes ayuda a tener una mejor evaluación de cada agujero y cada capilar. En el siguiente capítulo se explicarán cada uno de los resultados obtenidos por estos métodos para saber si se encontró una relación entre tamaño de agujero físico y la tasa de fuga.

Capítulo 4

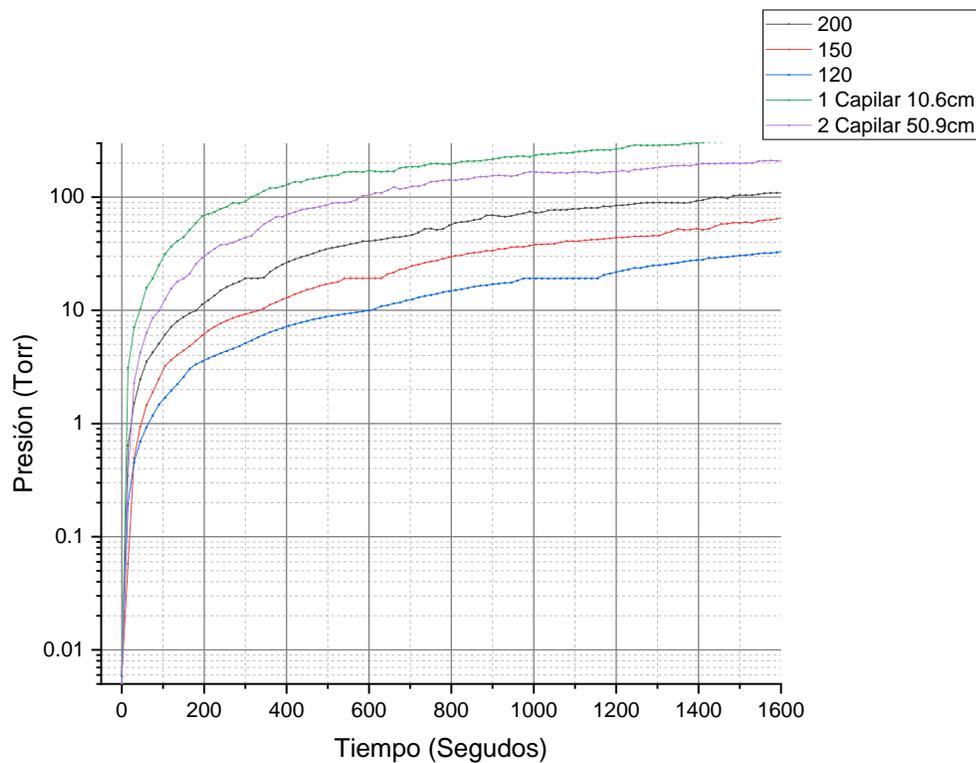
Resultados y Conclusiones

4.1 Resultados

4.1.1 Aumento de Presión

Bajo el procedimiento experimental que se explicó en el capítulo anterior se muestran los resultados para los distintos agujeros y capilares con el método de aumento de presión

Al graficar la presión exponencialmente contra el tiempo lineal con los valores de la tabla 1 Anexo A, obtuve las siguientes gráficas para cada capilar y para cada agujero.



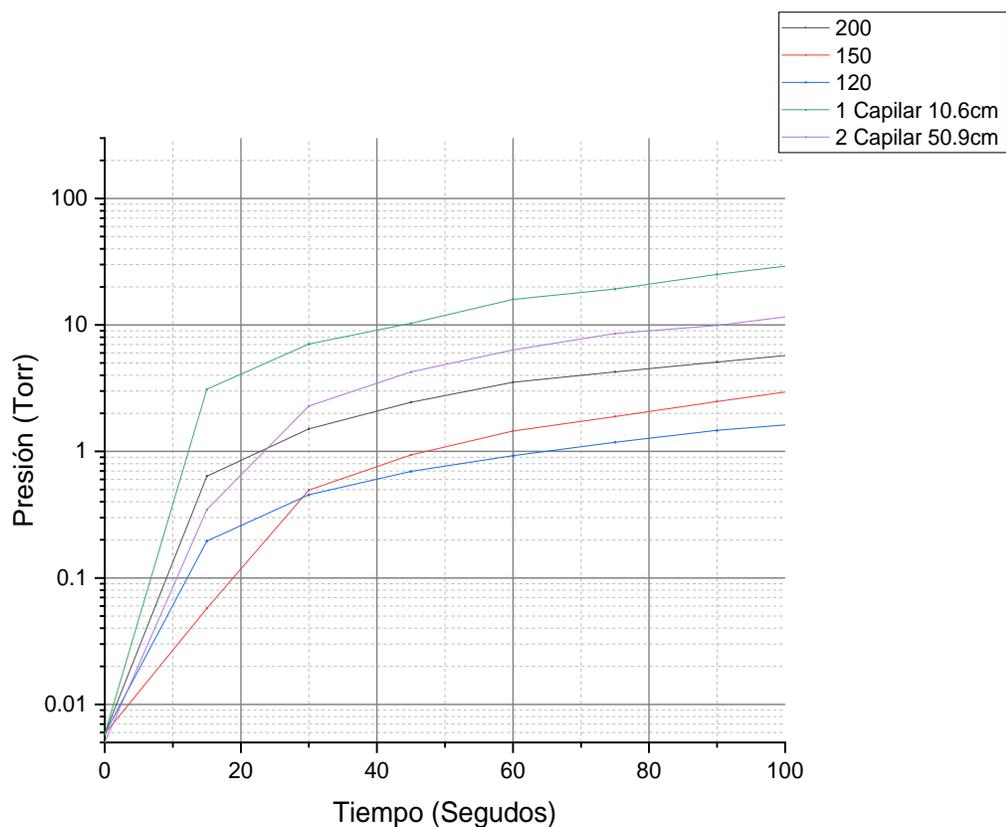
Grafica 1 Presión vs Tiempo de micro agujeros y capilares

De la ecuación 1.3 se obtiene:

$$\left(Q * V = \frac{\Delta p}{\Delta t} \right)$$

Lo que nos dice que la tasa de fuga para el volumen de la cámara (60 lt) es el cociente que hay entre la diferencia de presión (Δp) y el tiempo (Δt).

Para poder observar el cambio de tasa de fuga para cada agujero y capilar, en cuanto empieza a pasar materia por ellos se muestra la siguiente grafica.



Grafica 2 Aumento de presión en los primeros

La presión la represente en forma exponencial ya que el comportamiento del gas que fluye hacia la cámara se ajusta a los modelos teóricos de un gas en movimiento, ya que como vemos en la grafica 1, la cantidad de materia que entra al principio, aunque sea muy poca, la presión aumenta muy rápido, esto se debe a que la cantidad de materia comparada con la que hay dentro de la cámara de vacío es significativamente mayor. Después de un tiempo la cantidad de gas que entra va siendo menor, ya que la diferencia de presión va disminuyendo, y así se acerca asintóticamente a la presión atmosférica.

En este caso solo se midieron 27 minutos para cada agujero y para cada capilar, ya que ese tiempo fue representativo para lo buscado en el experimento que era encontrar que a mayor tamaño de fuga, mayor es la tasa de fuga y viceversa, a menor tamaño de fuga menor es la tasa de fuga, así como a mayor longitud de un capilar, la tasa de fuga es menor.

4.1.2 Detector de Helio (Varian 979)

Con una presión en la cámara de prueba de 1×10^{-3} Torr y una presión de 2 torr en la cámara de admisión ($\Delta P = 1.99$ Torr) se obtuvieron los siguientes resultados.

Agujeros de Prueba (Micras)	Tasa de fuga (sccs)
120	1.1×10^{-4}
150	2.7×10^{-4}
200	5.7×10^{-4}
550 (10.6 cm)	9.9×10^{-3}

Tabla 2 Resultados Detector de Helio 2

Teniendo estos resultados experimentales, se compararon con cálculos teóricos para así comparar los modelos que se tienen para medir una tasa de fuga.

4.1.3 Resultados Teóricos

Los siguientes resultados son totalmente teóricos, lo que quiere decir que siguen los modelos descritos en los primeros dos capítulos.

Para los siguientes resultados usé las ecuaciones 1.3 en un intervalo de 27 min con un volumen de 60 lt (volumen de la cámara), y los siguientes intervalos de presiones.

Agujeros de Prueba (Micras)	Presión inicial (Torr)	Presión final (Torr) (En 27 minutos)
120	5.87×10^{-3}	33.5
150	5.87×10^{-3}	68.6
200	5.87×10^{-3}	113
550 (10.6 cm)	5.87×10^{-3}	367
550 (50.9 cm)	5.87×10^{-3}	231

Tabla 3 Intervalos de presiones

Con esto se obtuvieron los siguientes resultados:

Agujeros de Prueba (Micras)	Tasa de fuga (sccs)
120	1.63
150	3.45
200	5.50
550 (10.6 cm)	17,88
550 (50.9 cm)	11.25

Tabla 4 Resultados en intervalo de 27 minutos

También calcule la tasa de fuga en intervalos de tiempo mas cortos para así poder ver la diferencia de la tasa de fuga en el tiempo.

Con: $\Delta P = 18$ Torr y 60 lt y los siguientes tiempos.

Agujeros de Prueba (Micras)	Tiempos (segundos)
120	900
150	500
200	200
550 (10.6 cm)	100
550 (50.9 cm)	150

Tabla 5 Intervalos de tiempo menos prolongados

Con estas consideraciones se obtuvieron los siguientes resultados

Agujeros de Prueba (Micras)	Tasa de fuga (sccs)
120	1.57
150	2.8
200	7.10
550 (10.6 cm)	10.8
550 (50.9 cm)	9.4

Tabla 6 Resultado en aumento de la presión en intervalos pequeños de tiempo

Ahora se tomaron medidas de las siguientes áreas transversales de los agujeros y el diámetro interior del capilar

Agujeros de Prueba (Micras)	Área (cm ²)
120	1.13×10^{-4}
150	1.76×10^{-4}
200	3.14×10^{-4}

Capilares de prueba (cm)	Diámetro (cm ²)
10.6	550
50.9	550

Tabla 7 Áreas y diámetros de los agujeros y capilares respectivamente.

Se calculó la conductancia con la ecuación 1.6 y 1.11 para los agujeros y capilares respectivamente y con una $p_{atmCDMX} = 586 \text{ Torr}$. Con esto se calculó el flujo másico con la ecuación 2.1

Agujeros de Prueba (Micras)	Conductancia (Lt/ Seg)	Tasa de Fuga (sccs)
120	2.26×10^{-3}	1.7
150	3.52×10^{-3}	2.7
200	6.28×10^{-3}	4.9
550 (10.6 cm)	3.10×10^{-2}	25.1
550 (50.9 cm)	6.60×10^{-3}	5.2

Tabla 8 Resultados Tomando en cuenta la conductancia

También se hicieron resultados teóricos para compararlos con los resultados obtenidos con el detector. Para esto se tomó en cuenta la conductancia en régimen molecular y a una $\Delta P = 1.99$ Torr con la ecuación 1.5 se obtuvieron los siguientes resultados:

Agujeros de Prueba (Micras)	Conductancia (Lt/ Seg)	Tasa de Fuga (sccs)
120	2.26×10^{-3}	3.40×10^{-3}
150	3.52×10^{-3}	5.36×10^{-3}
200	6.28×10^{-3}	9.60×10^{-3}
550 (10.6 cm)	3.10×10^{-2}	1.00×10^{-3}

Tabla 9 Resultados Teóricos para el detector de Helio

4.2 Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos por los dos métodos experimentales y por los cálculos teóricos, podemos notar que encontrar una relación entre la tasa de fuga y el tamaño de fuga, es algo muy complicado, ya que para los mismos agujeros y capilares, obtuvimos diferentes resultados, Esto se debe a que es importante tomar en cuenta que los modelos teóricos de varios autores no se ajustan ya que hay muchos factores externos como: la temperatura, la humedad atmosférica, la viscosidad del gas, ΔP entre la presión atmosférica, la presión del sistema y de su volumen.

Y como en el experimento de aumento de presión el gas que entraba a la cámara de vacío por medio del micro agujero era aire atmosférico, el cual tenía diferentes variables, como humedad temperatura y viscosidad diferente al helio que se uso para medir la tasa de fuga con el detector y también el volumen de las cámaras de prueba eran diferente, lo cual afecta las evaluaciones.

4.3 Conclusiones

- La hermeticidad es indispensable para muchos productos en la industria.

La hermeticidad es una condición indispensable para sistemas cerrados y productos terminados en donde se requiere que la presión interna se mantenga sin cambios; algunos ejemplos son:

Extinguieres, sistemas de refrigeración, productos perecederos, para la industria refresquera y cervecera, para los instrumentos electrónicos, en la industria automotriz, entre mucho otros.

- La diferencia entre los métodos de evaluación y detección de fugas

Para determinar si un sistema es hermético para una aplicación determinada, es muy importante seleccionar el método de evaluación de las fugas. Ya que del tamaño de la fuga determina si ese sistema en particular es hermético o no.

- Factores externos que afectan una evaluación

Para determinar la fuga, es necesario considerar factores externos, como: la temperatura, la humedad, la viscosidad del gas, ΔP entre la presión atmosférica, la presión del sistema y de su volumen.

- Modelos teóricos que describen la evaluación

En la literatura disponible varios autores han desarrollado modelos teóricos, los cuales no necesariamente, se ajustan a las pruebas experimentales, por lo tanto, debe tenerse las precauciones pertinentes, cuando se diseñan los procedimientos experimentales para evaluar la fuga de un sistema.

- El detector de helio es el mejor método para detección de fugas

El detector de helio es una herramienta muy preciosa para determinar la tasa de fuga, además de que en el método al vacío permite localizar de manera eficiente los puntos de fuga.

Actualmente, algunas pruebas de hermeticidad como la hidrostática, que consiste en sumergir el elemento de prueba a una alta presión en agua y observar las burbujas en los puntos de fuga, se ha convertido en una prueba obsoleta a nivel industrial y se a sustituido a nivel mundial por la detección con trazas de helio. Incluso en la refrigeración sean desechado las pruebas de hermeticidad usando el freón R22

Bibliografía

Leybold. (2007). Fundamentals of Vacuum Technology. Cologne.

Authors, T. o. (2013). Leak Detection Compendium. Germany: Pfeiffer Vacuum.

Gerhard, L. (1972). Fundamentos De La Ciencia Y Tecnica Del Vacio . Princeton: Aguilar .

Halliday, D., Resnick, R., & Jearl., W. (2017). Fundamentos de Física vol 1. México: Grupo Editorial Patria.

Model 979 Series Helium Mass Spectrometer Leak Detector. (2005). 699909979, 1.1 - 2.28.

Varian Associates, I. (1980). Introduction To Helium Mass Meter Leak Detection. Palo Alto, California: Varian Associates, Inc.

Varian Associates, I. (1992). Basic Vacuum Practice. Lexintong: Varian associates, Inc.

Anexo A: Tabla de resultados

Aumento de Presión					
Tiempo (s)	120 Micras Presión (Torr)	150 Micras Presión (Torr)	200 Micras Presión (Torr)	550 Micras 10.6 cm Presión (Torr)	550 Micras 50.9 cm Presión (Torr)
0	5.870E-03	5.87E-03	5.87E-03	5.87E-03	5.87E-03
15	1.960E-01	5.75E-02	6.38E-01	3.10E+00	3.47E-01
30	4.550E-01	4.95E-01	1.51E+00	7.07E+00	2.29E+00
45	6.960E-01	9.37E-01	2.45E+00	1.03E+01	4.25E+00
60	9.270E-01	1.45E+00	3.52E+00	1.59E+01	6.34E+00
75	1.180E+00	1.89E+00	4.25E+00	1.92E+01	8.57E+00
90	1.470E+00	2.48E+00	5.08E+00	2.51E+01	9.90E+00
105	1.700E+00	3.22E+00	6.08E+00	3.14E+01	1.25E+00
120	1.960E+00	3.64E+00	7.13E+00	3.67E+01	1.56E+01
135	2.230E+00	4.03E+00	8.01E+00	4.10E+01	1.80E+01
150	2.590E+00	4.41E+00	8.75E+00	4.46E+01	1.91E+01
165	3.040E+00	4.82E+00	9.43E+00	5.13E+01	2.11E+01
180	3.340E+00	5.39E+00	9.95E+00	5.93E+01	2.58E+01
195	3.540E+00	5.99E+00	1.13E+01	6.82E+01	2.92E+01
210	3.760E+00	6.62E+00	1.23E+01	7.08E+01	3.21E+01
225	3.970E+00	7.13E+00	1.35E+01	7.40E+01	3.51E+01
240	4.190E+00	7.67E+00	1.50E+01	7.90E+01	3.79E+01
255	4.390E+00	8.11E+00	1.61E+01	8.26E+01	3.84E+01
270	4.600E+00	8.58E+00	1.71E+01	8.94E+01	3.99E+01
285	4.820E+00	8.91E+00	1.79E+01	8.84E+01	4.19E+01
300	5.140E+00	9.27E+00	1.92E+01	9.16E+01	4.39E+01
315	5.430E+00	9.57E+00	1.92E+01	1.01E+02	4.56E+01
330	5.780E+00	9.90E+00	1.92E+01	1.06E+02	5.17E+01
345	6.090E+00	1.04E+01	1.95E+01	1.14E+02	5.78E+01
360	6.410E+00	1.12E+01	2.18E+01	1.20E+02	6.18E+01
375	6.700E+00	1.18E+01	2.37E+01	1.21E+02	6.72E+01
390	7.010E+00	1.25E+01	2.54E+01	1.25E+02	6.72E+01
405	7.310E+00	1.31E+01	2.69E+01	1.31E+02	7.11E+01
420	7.580E+00	1.39E+01	2.83E+01	1.37E+02	7.40E+01
435	7.820E+00	1.45E+01	2.95E+01	1.36E+02	7.72E+01
450	8.060E+00	1.52E+01	3.06E+01	1.43E+02	7.94E+01
465	8.310E+00	1.57E+01	3.19E+01	1.46E+02	8.05E+01
480	8.530E+00	1.64E+01	3.34E+01	1.49E+02	8.26E+01
495	8.770E+00	1.70E+01	3.46E+01	1.53E+02	8.48E+01
510	8.940E+00	1.74E+01	3.56E+01	1.55E+02	8.84E+01
525	9.140E+00	1.78E+01	3.65E+01	1.57E+02	8.94E+01
540	9.310E+00	1.91E+01	3.74E+01	1.67E+02	8.94E+01
555	9.480E+00	1.92E+01	3.85E+01	1.68E+02	9.09E+01
570	9.630E+00	1.92E+01	3.93E+01	1.68E+02	9.52E+01
585	9.830E+00	1.92E+01	4.08E+01	1.67E+02	1.03E+02
600	9.970E+00	1.92E+01	4.08E+01	1.72E+02	1.04E+02
615	1.030E+01	1.92E+01	4.16E+01	1.69E+02	1.09E+02
630	1.090E+01	1.92E+01	4.22E+01	1.68E+02	1.09E+02
645	1.110E+01	2.09E+01	4.33E+01	1.69E+02	1.15E+02
660	1.150E+01	2.16E+01	4.42E+01	1.69E+02	1.23E+02
675	1.170E+01	2.30E+01	4.44E+01	1.81E+02	1.18E+02
690	1.220E+01	2.35E+01	4.53E+01	1.84E+02	1.21E+02
705	1.250E+01	2.48E+01	4.63E+01	1.86E+02	1.25E+02
720	1.300E+01	2.54E+01	4.88E+01	1.86E+02	1.25E+02
735	1.340E+01	2.63E+01	5.24E+01	1.91E+02	1.29E+02
750	1.370E+01	2.70E+01	5.28E+01	1.98E+02	1.37E+02
765	1.400E+01	2.75E+01	5.13E+01	1.98E+02	1.38E+02
780	1.450E+01	2.87E+01	5.24E+01	1.96E+02	1.41E+02
795	1.480E+01	2.95E+01	5.64E+01	1.96E+02	1.42E+02
810	1.510E+01	3.03E+01	5.93E+01	2.00E+02	1.41E+02
825	1.540E+01	3.06E+01	6.03E+01	2.06E+02	1.44E+02
840	1.580E+01	3.18E+01	6.10E+01	2.08E+02	1.44E+02
855	1.620E+01	3.23E+01	6.28E+01	2.08E+02	1.49E+02
870	1.650E+01	3.26E+01	6.39E+01	2.10E+02	1.52E+02
885	1.670E+01	3.37E+01	6.90E+01	2.14E+02	1.52E+02
900	1.710E+01	3.36E+01	6.93E+01	2.16E+02	1.55E+02

Aumento de Presión					
	120 Micras	150 Micras	200 Micras	550 Micras 10.6 cm	550 Micras 50.9 cm
Tiempo (s)	Presión (Torr)	Presión (Torr)	Presión (Torr)	Presión (Torr)	Presión (Torr)
915	1.720E+01	3.49E+01	6.82E+01	2.21E+02	1.56E+02
930	1.750E+01	3.50E+01	6.72E+01	2.27E+02	1.55E+02
945	1.760E+01	3.61E+01	6.82E+01	2.27E+02	1.53E+02
960	1.830E+01	3.64E+01	7.04E+01	2.30E+02	1.56E+02
975	1.920E+01	3.64E+01	7.18E+01	2.31E+02	1.66E+02
990	1.920E+01	3.73E+01	7.47E+01	2.28E+02	1.68E+02
1005	1.920E+01	3.82E+01	7.25E+01	2.36E+02	1.67E+02
1020	1.920E+01	3.84E+01	7.36E+01	2.40E+02	1.65E+02
1035	1.910E+01	3.85E+01	7.65E+01	2.39E+02	1.66E+02
1050	1.910E+01	3.88E+01	7.72E+01	2.43E+02	1.63E+02
1065	1.920E+01	3.99E+01	7.69E+01	2.47E+02	1.65E+02
1080	1.920E+01	4.09E+01	7.76E+01	2.45E+02	1.63E+02
1095	1.920E+01	4.09E+01	7.87E+01	2.48E+02	1.66E+02
1110	1.920E+01	4.08E+01	7.87E+01	2.53E+02	1.67E+02
1125	1.920E+01	4.16E+01	8.05E+01	2.55E+02	1.68E+02
1140	1.920E+01	4.21E+01	8.05E+01	2.59E+02	1.65E+02
1155	1.920E+01	4.22E+01	8.05E+01	2.62E+02	1.63E+02
1170	2.060E+01	4.28E+01	8.30E+01	2.62E+02	1.66E+02
1185	2.110E+01	4.32E+01	8.26E+01	2.62E+02	1.68E+02
1200	2.180E+01	4.40E+01	8.44E+01	2.66E+02	1.68E+02
1215	2.240E+01	4.39E+01	8.48E+01	2.72E+02	1.72E+02
1230	2.300E+01	4.44E+01	8.58E+01	2.82E+02	1.68E+02
1245	2.370E+01	4.51E+01	8.73E+01	2.89E+02	1.76E+02
1260	2.370E+01	4.51E+01	8.87E+01	2.87E+02	1.76E+02
1275	2.450E+01	4.52E+01	8.94E+01	2.87E+02	1.79E+02
1290	2.490E+01	4.57E+01	8.94E+01	2.87E+02	1.81E+02
1305	2.510E+01	4.57E+01	8.98E+01	2.87E+02	1.84E+02
1320	2.550E+01	4.81E+01	8.94E+01	2.89E+02	1.86E+02
1335	2.600E+01	4.99E+01	8.94E+01	2.90E+02	1.90E+02
1350	2.630E+01	5.24E+01	8.94E+01	2.89E+02	1.90E+02
1365	2.700E+01	5.13E+01	8.89E+01	2.97E+02	1.91E+02
1380	2.750E+01	5.17E+01	8.98E+01	2.98E+02	1.90E+02
1395	2.780E+01	5.28E+01	9.30E+01	3.02E+02	1.95E+02
1410	2.800E+01	5.13E+01	9.41E+01	3.05E+02	1.98E+02
1425	2.900E+01	5.24E+01	9.73E+01	3.09E+02	1.98E+02
1440	2.900E+01	5.53E+01	9.95E+01	3.09E+02	1.98E+02
1455	2.950E+01	5.78E+01	9.95E+01	3.10E+02	1.99E+02
1470	2.960E+01	5.82E+01	9.73E+01	3.16E+02	1.99E+02
1485	3.010E+01	5.96E+01	1.03E+02	3.18E+02	2.00E+02
1500	3.050E+01	5.93E+01	1.04E+02	3.23E+02	1.99E+02
1515	3.070E+01	6.03E+01	1.04E+02	3.24E+02	2.00E+02
1530	3.120E+01	5.93E+01	1.04E+02	3.24E+02	2.00E+02
1545	3.170E+01	6.14E+01	1.06E+02	3.24E+02	2.08E+02
1560	3.210E+01	6.25E+01	1.08E+02	3.28E+02	2.10E+02
1575	3.210E+01	6.32E+01	1.09E+02	3.33E+02	2.11E+02
1590	3.260E+01	6.46E+01	1.09E+02	3.34E+02	2.09E+02
1605	3.330E+01	6.61E+01	1.09E+02	3.36E+02	2.09E+02
1620	3.340E+01	6.82E+01	1.09E+02	3.42E+02	2.06E+02
1635	3.350E+01	6.75E+01	1.09E+02	3.46E+02	2.10E+02
1650	3.370E+01	6.82E+01	1.14E+02	3.45E+02	2.06E+02
1665	3.370E+01	6.82E+01	1.14E+02	3.50E+02	2.06E+02
1680	3.400E+01	6.86E+01	1.14E+02	3.58E+02	2.06E+02
1695	3.470E+01	6.86E+01	1.14E+02	3.60E+02	2.18E+02
1710	3.530E+01	7.04E+01	1.17E+02	3.60E+02	2.21E+02
1725	3.600E+01	7.18E+01	1.21E+02	3.63E+02	2.21E+02
1740	3.640E+01	7.33E+01	1.23E+02	3.64E+02	2.23E+02
1755	3.725E+01	7.33E+01	1.23E+02	3.65E+02	2.23E+02
1770	3.856E+01	7.33E+01	1.23E+02	3.65E+02	2.30E+02
1785	4.120E+01	7.33E+01	1.23E+02	3.65E+02	2.30E+02
1800	4.100E+01	7.33E+01	1.23E+02	3.67E+02	2.30E+02
1815	4.140E+01	7.43E+01	1.23E+02	3.67E+02	2.31E+02

Tabla 1 Anexo A Valores de presión en 27 minutos

Anexo B: Planos

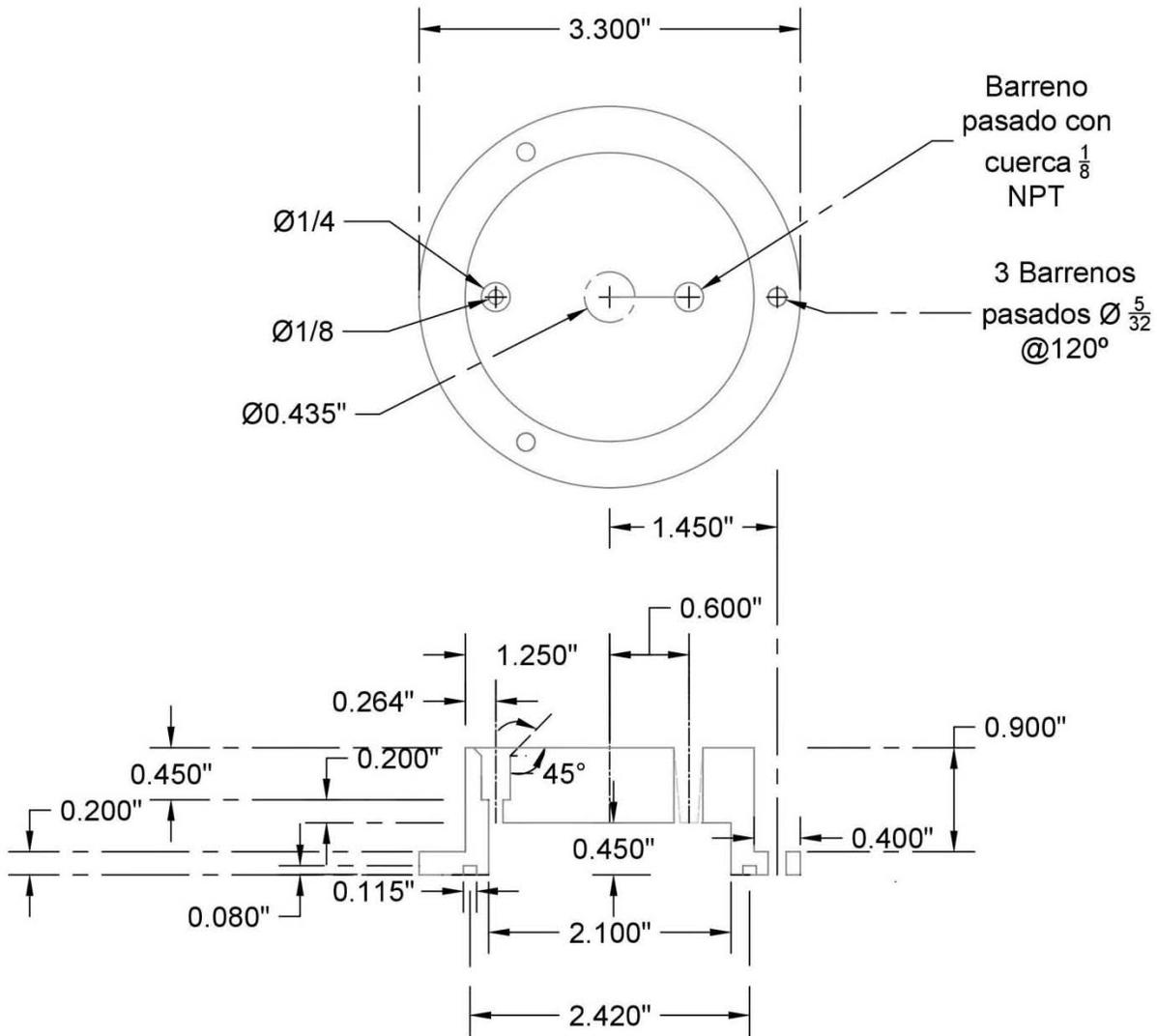


Figura Anexo B.1 Diagramas mini cámara de admisión de gas

Ø6 Barrenos con
cuerda para allen de $\frac{1}{8}$
@ 120 con
profundidad de .250"
a una distancia del
centro de: 0.750" y
1.450"

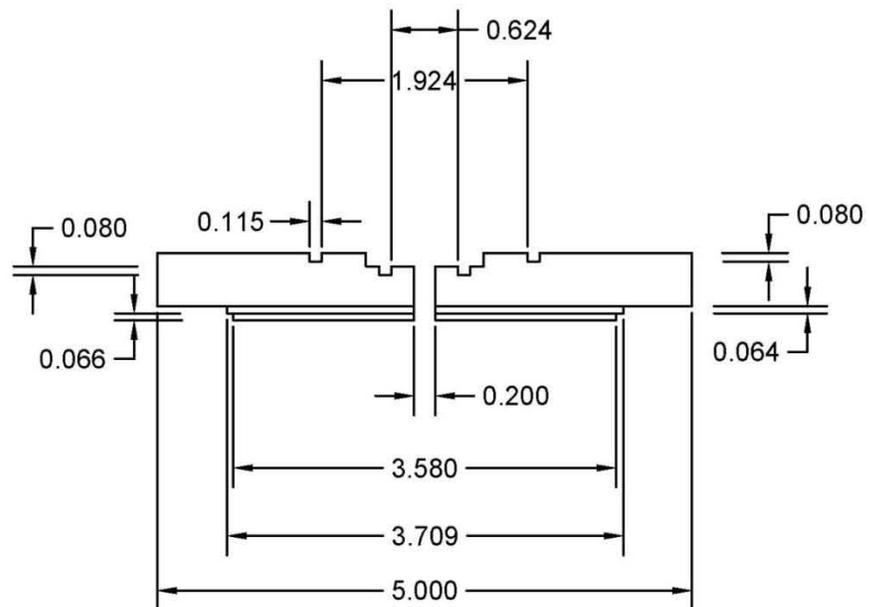
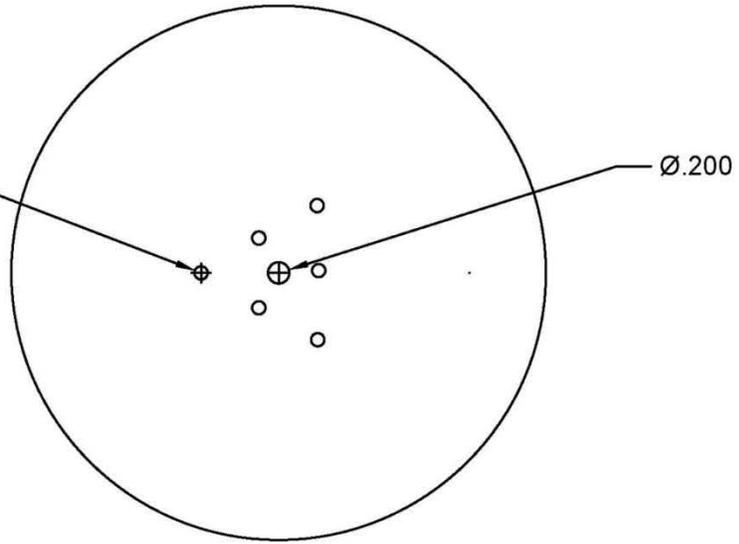


Figura Anexo B.2 Tapa superior con adaptador para capilar y pieza de latón con Micro agujero

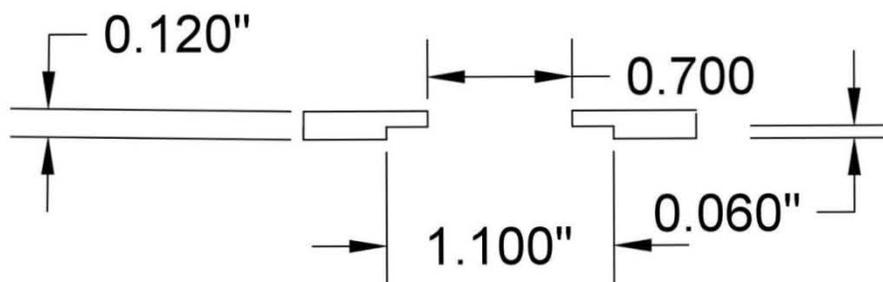
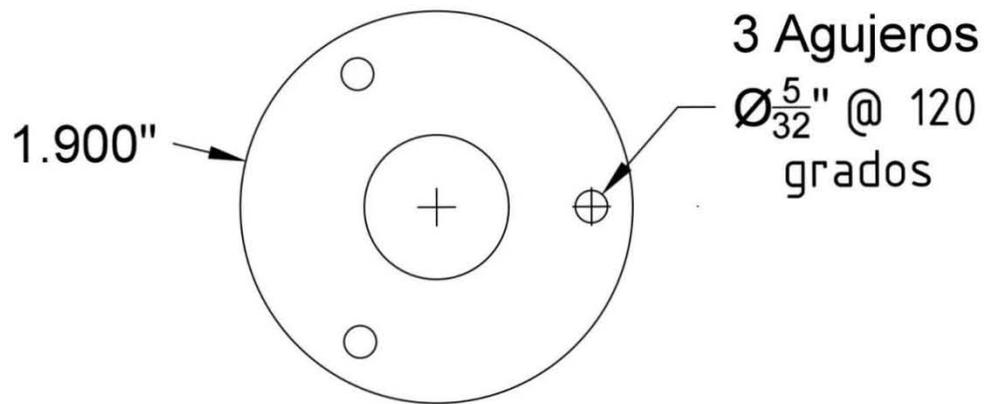


Figura Anexo B.3 Retenedor para pieza de latón con micro agujero