



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EVALUACION DE LA HERMETICIDAD DE CONTENEDORES  
AL VACIO Y A PRESION USANDO He COMO GAS  
TRAZADOR.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C A

P R E S E N T A :

**ANABEL CRUZ HERNANDEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

FIS. HECTOR DE JESUS CRUZ MANJARREZ FLORES-ALONSO



MEXICO, D. F.



2004

FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR



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.



ACADEMIA NACIONAL  
DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

**Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:**

"Evaluación de la hermeticidad de contenedores al vacío y a presión usando He como gas trazador"

realizado por Cruz Hernández Anabel

con número de cuenta 9114319-2 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

**Atentamente**

Director de Tesis

Propietario

Propietario

Propietario

Suplente

Suplente

Fís. Héctor de Jesús Cruz-Manjarrez Flores-Alonso

Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga

Dr. José Manuel Saniger Blesa

Dr. Juan Carlos Cheang Wong

Dra. Corina Solís Rosales

**Consejo Departamental de Física**

M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ  
Coordinadora de Licenciatura

## DEDICO ESTA TESIS

A mis padres  
Juan Gregorio Cruz Quiroz  
Agustina Hernández Sánchez  
Gracias por inculcarme el habito del estudio.

A mi esposo  
Rubén De Jesús Hernández  
Por ser una maravillosa persona y cumplir tus metas.

A mis Hermanos  
Humberto Cruz Hernández  
Por nunca dejarte vencer.

Ramón Cruz Hernández  
Por tener esa gran sencillez .

Ofelia Cruz Hernández  
Por que has luchado siempre.

Juan Miguel Cruz Hernández  
Por tener el coraje de hacer lo que te propones.

A mis sobrinos  
Teresa de Jesús Rubio Cruz.  
Guadalupe Esther Rubio Cruz.  
Luis ángel Estrada Cruz.  
Jazmín Florencio De Jesús.  
Eduardo Florencio De Jesús  
Por brindarme la alegría que sólo ustedes pueden dar.

A Esperanza Gutiérrez Pesina.  
Por haberme brindado su ayuda en los momentos más difíciles.

A Luis Estrada Vega.  
Por dar el ejemplo de que la lectura enriquece culturalmente.

A la Familia De Jesús Hernández.  
Por brindarme su apoyo incondicional.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme alcázar un título Profesional.

A Héctor de Jesús Cruz-Manjarrez Flores-Alonso, por su apoyo, paciencia, ayuda y amistad que me brindo incondicionalmente; asegurándole que siempre podrá contar con una amiga.

A Luis Flores por su apoyo y consejos en los momentos adecuados.

Al Taller de Vacío del Edificio Tlahuizcalpan por haberme dado la oportunidad de utilizar las instalaciones y equipos con los que cuenta.

A mis sinodales:

Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga.

Dr. José Manuel Saniger Blesa

Dr. Juan Carlos Cheang Wong

Dra. Corina Solís Rosales

Por brindarle tiempo y enriquecer este trabajo

A mis amigas, Ivonne, Esperanza, y Consuelo,

Por que siempre me andado un ejemplo para seguir adelante y superarme cada día.

A mi Esposo Rubén De Jesús Hernández por estar siempre en todo momento alentándome a seguir adelante, dejando aquí plasmado una de sus frases celebres “No te enseñan, tú aprendes”.

A mis padres por que las primeras enseñanza escolares las obtuve de ustedes y las enriquecieron con su apoyo y esto me permitió tener unas bases firmes para llegar al final.

# ÍNDICE

<b>Introducción</b>	III
<b>Capítulo 1: Los gases Ideales.</b>	1
1.1.- Variables macroscópicas.	2
1.2.- Las Leyes de los Gases Ideales.	4
1.3.- Modelo de Gas Ideal y Ecuación de Estado del Gas Ideal	5
1.3.1.- El camino libre medio	7
1.4.- Flujo de gases.	8
1.4.1.- Flujo en el régimen viscoso	10
1.4.2.- Flujo en el régimen molecular.	11
1.5.- Sistemas cerrados y la condición de hermeticidad.	12
1.5.1.- Al vacío.	13
1.5.2.- A presión	14
<b>Capítulo 2: Fugas, métodos de detección y evaluación.</b>	16
2.1.- Fugas reales y fugas virtuales.	16
2.2.- El flujo másico y la tasa de fuga.	19
2.3.- La tasa de fuga máxima permisible.	20
2.4.- La hermeticidad.	20
2.5.- Metodología de evaluación y detección de fugas reales.	22
2.6.- Detección y evaluación de fugas con gas trazador.	25
2.6.1.-Helio.	26
2.6.2.-Tasa de fuga de helio.	26
2.7.- El detector de helio.	27
2.8.- Evaluación y detección de fugas con detector de helio.	30
<b>Capítulo 3: Desarrollo experimental de un método de evaluación de hermeticidad de grandes volúmenes.</b>	38
3.1.- Consideraciones iniciales.	38
3.2.- Hipótesis.	39
3.3.- diseño y construcción de un volumen de prueba "estándar".	40
3.4.- Operación del detector de helio.	43
3.5.- Preparación de mezclas He-N <sub>2</sub> .	48
3.6.- Evaluación de fugas.	50
3.7.- Resultados relevantes.	56

<b>Capítulo 4: Método de acumulación usando sniffer y cámara de pruebas.</b>	<b>66</b>
Conclusiones.	74
Bibliografía.	78

## Introducción

Los avances tecnológicos conllevan en gran medida a la utilización de sistemas cerrados con amplia gama de aplicaciones tanto en la investigación como en la industria, estos sistemas requieren de una evaluación de hermeticidad que sea adecuada a su aplicación específica para evitar la contaminación o para mantenerlos en las condiciones iniciales de presión por largos periodos. Sin embargo, los métodos utilizados para la evaluación de estos en ocasiones no tiene la sensibilidad adecuada. En el presente trabajo, se busca establecer un método eficiente y de aplicación directa para la evaluación de la hermeticidad en base al uso de gas de helio, con la instrumentación adecuada, como los detectores de fugas de helio, los cuales cuentan con una sensibilidad que permite detectar y evaluar fugas hasta  $10^{-10}$  Sccs de helio, que es la evaluación de la tasa de fuga máxima permisible para sistemas en donde se involucran gases radioactivos o altamente corrosivos. Además de que el helio es un gas inerte y puede usarse en cualquier aplicación, lo que se busca es una propuesta no destructiva para el contenedor y no contaminante en su aplicación final.

El trabajo experimental y pruebas se realizaron con el detector de helio marca Varian Modelo 979 que se encuentra en el Taller de Vacío del Edificio de Ciencias Experimentales Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El objetivo de este trabajo es proponer un método, para la evaluación de la Hermeticidad en contenedores cuyo volumen es mayor a  $10 \text{ m}^3$ , sin excluir volúmenes menores.

En el primer Capitulo, se presentan los fundamentos físicos asociados al comportamiento de los gases en el estado estacionario y dinámico así como la definición de sistema hermético.

En el Capítulo 2, se han considerado los métodos de detección comunes poniendo énfasis en los procedimientos para helio, incluyendo los arreglos que se utilizan en conjunto con el detector de fugas.

En el Capítulo 3, se describe ampliamente el desarrollo experimental que permitió establecer la propuesta, los resultados significativos así como los problemas y las soluciones que se presentaron durante el desarrollo experimental.

En el Capítulo 4, se presenta la propuesta del método de evaluación y localización de fugas con helio a baja concentración, cabe destacar que la propuesta se fundamenta en las pruebas de Laboratorio y que su aplicación está sujeta a los ajustes necesarios para su aplicación eficiente en un sistema real.

La experiencia adquirida durante el desarrollo del presente trabajo me permitió tener una perspectiva diferente a la adquirida durante la carrera, lo cual resultó satisfactorio, ya que me percate que el campo de la física es muy amplio y sólo se requiere de un análisis del medio circundante, para aplicar los principios fundamentales.

# Capítulo 1

## Los Gases Ideales.

El comportamiento de los gases es de interés desde hace ya 400 años. El primer estudio serio lo realizó Robert Boyle en 1662, quien después de realizar experimentos con gran variedad de gases estableció empíricamente una relación entre las variables macroscópicas presión y volumen; esta relación se conoce actualmente como la Ley de Boyle y es fundamental para definir el modelo de gas ideal. Cien años después, Jacques Charles, aplicando un método semejante al que usó Boyle, encontrando otra relación entre las variables macroscópicas volumen y temperatura, la cual se conoce como la ley de Charles. Tiempo después en experimentos semejantes a los de Charles y Boyle, Gay-Lussac obtuvo dos observaciones importantes: la primera es la relación que existe entre la presión y la temperatura; la segunda, los cambios de volumen que se producen cuando dos o más gases reaccionan para formar productos gaseosos a temperatura y presión constante; estos resultados se publicaron en el año de 1808.

Otro de los grandes contribuyentes al Modelo de Gas Ideal actual es Amadeo Avogadro, quien presentó las bases para distinguir un átomo de una molécula y junto con la segunda observación de Gay-Lussac, obtuvo el conocido principio de Avogadro, que fue publicado en el año de 1811.

Estas leyes empíricas en conjunto con el principio de Avogadro, constituyen la base del Modelo de Gas Ideal, el cual se puede asociar a los gases a presión menor que la presión atmosférica lejos del punto crítico, que es la condición necesaria para llevar a cabo los procedimientos de detección y evaluación de fugas por medio de gases trazadores.

En las siguientes secciones se presentan los conceptos y leyes fundamentales de los gases a baja presión.

### 1.1.- Variables macroscópicas.

Todos los sistemas cerrados en donde se involucran gases o vapores se pueden caracterizar mediante tres variables macroscópicas:

Presión	$p$	( $\text{Nt/m}^2$ )
---------	-----	---------------------

Volumen	$V$	Volumen del contenedor ( $\text{m}^3$ )
---------	-----	---

Temperatura	$T$	Temperatura Absoluta ( Kelvin)
-------------	-----	--------------------------------

La presión se define como el cociente de la fuerza aplicada en un área unitaria, por lo que la presión que ejerce un gas es la fuerza con que chocan o golpean las partículas a las paredes del volumen que las contiene.

Para los sistemas comunes sobre la superficie terrestre, la presión es la atmosférica; a nivel del mar y a cero grados centígrados se define como Atmósfera Estándar:

$$1 \text{ Atmósfera Estándar} = 101325 \text{ Pascales ( Nt/m}^2\text{)}$$

Si la presión interna del sistema se encuentra por arriba de la unidad, se dice que está a presión alta, y si se mantiene por debajo de la unidad se mantiene al "vacío".

Otras unidades congruentes para la presión atmosférica son:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Atmósfera Estándar} &= 760 \text{ Torr (760 mm de Hg)} \\ &= 1013 \text{ mbar} \\ &= 14.7 \text{ libras/plg}^2 \text{ (PSI)} \end{aligned}$$

La temperatura que se usa en el modelo de Gas Ideal es la Absoluta, sin embargo, la escala Celsius es de uso general.

$$T(\text{Kelvin}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

El modelo anterior, es la base teórica para el cálculo de los flujos de fuga.

## 1.2.- Las Leyes de los Gases Ideales.

### Ley de Boyle

Establece que bajo la condición de temperatura constante

$$pV = \text{constante}$$

donde  $p$  es la presión del gas en Pascales y  $V$  el volumen que ocupa el gas a una temperatura determinada.

En los sistemas de vacío y en los sistemas a presión, el producto  $pV$  se conoce como la "carga inicial" de gas y  $V$  es el volumen del contenedor que permanece constante, aun cambiando las condiciones de presión y temperatura.

Desde el punto de vista de la energía, la Ley de Boyle es una relación de conservación.

$$p_0 V_0 = p_1 V_1 \quad \text{para una temperatura constante}$$

### Ley de Charles

Al igual que la Ley de Boyle, la relación de Charles es el resultado de estudios empíricos y relaciona las variables volumen y temperatura a presión constante.

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

donde  $V$  es el volumen que ocupa el gas y  $T$  la temperatura absoluta.

De las anteriores

$$p V / T = \text{constante} = R = \text{Constante Universal de los Gases}$$

$R$  tiene un valor de 8.31 Joules / Kelvin y corresponde a la energía de una mol de cualquier gas.

### **1.3.- Modelo de Gas Ideal y Ecuación de Estado del Gas Ideal.**

El modelo del Gas Ideal se fundamenta en las siguientes hipótesis (1)

1.- El gas está compuesto por un gran número de moléculas o partículas individuales idénticas.

2.- Las moléculas son esferas rígidas muy pequeñas con masa diferente de cero.

3.- Las moléculas del gas se mantienen en movimiento continuo y a velocidad constante; el movimiento es en trayectorias rectilíneas, por lo tanto no están sujetas a la acción de fuerzas externas.

4.- Los choques entre moléculas o de moléculas con las paredes del recipiente que las contienen son elásticos.

5.- La velocidad de las moléculas obedece a la distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann.

## Principio de Avogadro

Establece que bajo condiciones de temperatura y presión constante, existe una relación lineal entre el volumen y el número de partículas del gas (N) y que iguales volúmenes de diferente gas contiene el mismo número de moléculas.

$$V = \text{Cte.} \times N$$

El número de moléculas que contiene un volumen de gas, es el número de mol por el número de Avogadro ( $N_A = 6.023 \times 10^{23}$  partículas); una mol de cualquier gas en condiciones estándar (a nivel del mar y a  $0^\circ\text{C}$ ) equivale a un volumen de 22.4 litros. Así:

$$P_{\text{atm}} V_{\text{molar}} = K N_A T(273.15)$$

con K una constante de proporcionalidad (Constante de Boltzmann).

Generalizando a cualquier presión, volumen y temperatura

$$pV = N K T$$

donde **p** es la presión del gas

**V** es el volumen

**K** es una constante de Boltzmann

**N** es el número de moléculas

**T** la temperatura en Kelvin.

El valor de la constante de Boltzmann en distintas unidades

$$K = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{Joules}}{\text{Kelvin}} = 1.38 \times 10^{-16} \frac{\text{ergios}}{\text{Kelvin}} = 1.03 \times 10^{-22} \frac{\text{torr} \times \text{litro}}{\text{Kelvin}}$$

De la ecuación de estado  $p V = N K T$  se obtiene la densidad molecular ( $n$ )

$$p = n K T$$

donde  $n$  es el número de moléculas por unidad de volumen.

### 1.3.1.- El camino libre medio.

El camino libre medio ( $\lambda$ ), se define como la distancia que recorre una molécula entre dos choques sucesivos, ya sea entre moléculas o con las paredes del recipiente que las contiene.

El recorrido de una molécula a través del recipiente o contenedor es una sucesión de trayectorias rectilíneas libres de longitud  $\lambda$ . No todas las trayectorias son de la misma longitud, debido a que todas las moléculas están distribuidas en el volumen; el número de choques depende de la presión. Cuando la presión es baja, predominan los choques de las moléculas con las paredes del contenedor y dan origen al llamado régimen molecular; si los choques son entre moléculas, el régimen es viscoso.

Si  $\lambda$  es el camino libre medio

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2n\pi a^2}}$$

donde  $a$  es el diámetro de la molécula en metros y  $n$  es la densidad de moléculas; por convención, cuando el camino libre medio promedio ( $\lambda$ ) es  $< 1$  cm el régimen es viscoso y si  $\lambda > 1$  cm el régimen es molecular. (2)

Es claro que si las moléculas son pequeñas como el Hidrógeno y el Helio, el camino libre medio es grande a pesar de que la densidad molecular sea muy alta; la variable ( $\lambda$ ), considera partículas en movimiento, que de acuerdo a la definición se involucra directamente con un flujo de gas a través de un medio.

#### **1.4.- Flujo de gases.**

Cuando un sistema cerrado se encuentra a una presión diferente de la presión atmosférica y considerando que no existen los sistemas herméticos perfectos, la diferencia de presión entre el interior y el exterior de un sistema provoca un flujo de gas. Si la presión interna es menor que la atmosférica, el flujo es hacia el interior y si es mayor la presión en el interior, el flujo de gas es hacia el exterior. (3)

Debido a que no existe un sistema que se mantenga en idénticas condiciones por un tiempo indefinido, es necesario conocer la evolución de las variables macroscópicas en el tiempo:

$$\frac{d}{dt} (pV) = \frac{d}{dt} (N K T)$$

$$\frac{dp}{dt} V + p \frac{dV}{dt} = K T \frac{dN}{dt}$$

El término  $\frac{dp}{dt}$  es el cambio de la presión en el volumen V -debido a que mediante un sistema externo o bomba se modifica la cantidad de materia contenida en volumen- ; la  $\frac{dV}{dt}$  se define como la velocidad de bombeo (S) del sistema externo.

Por último, la expresión  $\frac{dN}{dt}$  es el número de partículas que entra o sale del sistema debido a la diferencia de presión y se define como gasto (Q):

$$Q = K T \frac{dN}{dt}$$

En el estado estacionario,  $\frac{dp}{dt}$  es cero por lo que

$$pS = Q$$

Cuyo significado físico es la cantidad de gas Q que entra a un sistema cuando tiene instalado un medio externo para evacuarlo con velocidad de bombeo S.

Cuando se desinstala el medio externo  $S = 0$ , por lo que el contenedor es autónomo:

$$V dp = Q dt$$

$$\frac{V(p_1 - p_2)}{(t_1 - t_2)} = Q$$

La expresión anterior se interpreta como la cantidad de materia que entra o sale de un sistema de volumen  $V$  que experimenta un cambio de presión diferente de cero en un tiempo determinado.

Las unidades del flujo másico son  $\frac{\text{presión} \times \text{volumen}}{\text{tiempo}}$ . Una  $Q$  estándar está definida como

$$Q = 1 \text{ Scgs} = 1 \text{ atmósfera estándar por centímetro cúbico por segundo.}$$

#### 1.4.1.- Flujo en el régimen viscoso.

Cuando los extremos de un tubo se encuentran a distinta presión existe un movimiento de gas. Si el camino libre medio es corto comparado con el diámetro del tubo y existe movimiento de gas hacia la zona de menor presión, entonces las moléculas se encuentran muy próximas unas de otras, por lo que los choques que existen son únicamente entre moléculas; esta condición se considera como flujo continuo. Además, si las líneas de corriente son casi paralelas, el flujo es viscoso laminar. Cuando este flujo viaja a velocidades y presiones altas se convierte en flujo turbulento, este hecho se muestra en el diagrama de la Figura 1.1

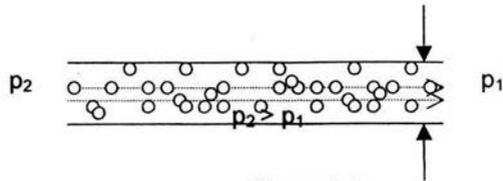


Figura 1.1  
Flujo viscoso molecular.

Si el número de partículas disminuye, el camino libre aumenta, es decir, cuando el número de partículas disponibles para moverse a través del tubo se reduce considerablemente, el régimen cambia de viscoso a molecular.

#### 1.4.2.- Flujo en el régimen molecular.

Considerando que en el régimen molecular la cantidad de moléculas es menor que en el flujo viscoso y que las colisiones son únicamente con las paredes del tubo, entonces el flujo molecular ya no depende de la diferencia de presión, sino de la forma en que se realicen las colisiones con la pared. A esta escala, la reflexión es difusa y el factor más importante es la sección transversal del tubo.

En la Figura 1.2 se muestra un diagrama de flujo molecular en donde la probabilidad de una partícula para moverse de izquierda a derecha es la misma que en sentido contrario. (4)

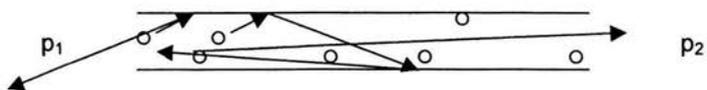


Figura 1.2  
Flujo molecular.

En los sistemas reales, el aumento o pérdida de presión son indeseables, lo cual se refleja en el cambio de la cantidad de masa inicial, por lo que es necesario establecer la magnitud aceptable de  $Q$ , este hecho permite establecer la condición de sistema cerrado o hermético, ya sea en sistemas al vacío o a presión alta.

### **1.5.- Sistemas cerrados y la condición de hermeticidad.**

La condición de Hermeticidad se establece según la aplicación del sistema o contenedor. Cuando un contenedor no es de una sola pieza, es decir, consta de ensambles -que en ocasiones no son sellados adecuadamente-, la estructura de los componentes tiene defectos microscópicos como poros o microgrietas. Considerando que no todos son de la misma dimensión, se debe desarrollar un método para evaluarlos y determinar cómo afectan a la pérdida o ganancia de gas en el sistema. Por lo que un sistema es hermético cuando la tasa de fuga del sistema real es menor que una tasa de fuga calculada teóricamente para la aplicación específica.

Es necesario especificar la aplicación del sistema a evaluar, es decir, si es un sistema a presión o al vacío, ya que el tratamiento es distinto; el primero se encuentra en el régimen viscoso y el segundo en régimen viscoso y molecular.

Un cambio de presión no modifica la temperatura del sistema. A continuación se describen los procesos de cambio de presión.

### 1.5.1.- Al vacío.

Cuando un sistema o contenedor se cierra, la presión inicial es la presión atmosférica. Para extraer el aire que quedó atrapado se conecta un sistema externo (bomba de vacío). Si  $S$  es la velocidad de bombeo, es decir, el volumen de gas evacuado por segundo a la presión existente en el sistema, se obtiene que la presión disminuye. Después de alcanzar el vacío deseado, se aísla del sistema externo de bombeo y el sistema queda al "vacío". (presión menor que 1 atmósfera)

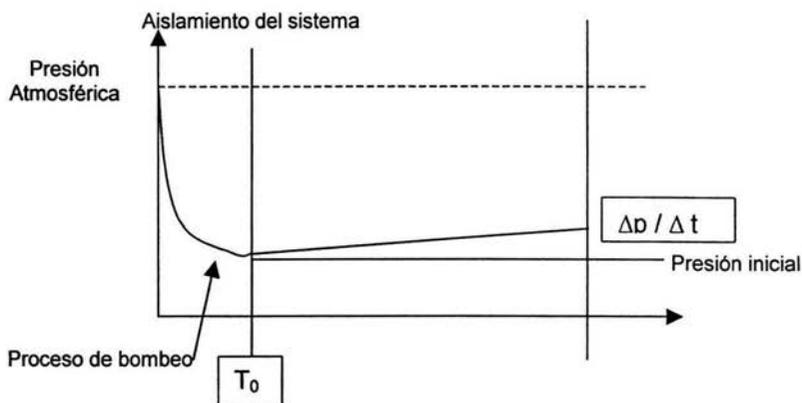


Figura 1.3  
Proceso de bombeo de un sistema cerrado al vacío

Teniendo el sistema al vacío, como se muestra en la Figura 1.3, la presión interna aumenta en el tiempo. El intervalo debe definirse para cada aplicación, así como el máximo cambio de presión en el intervalo.

Los cambios de presión son aceptables y debe definirse el máximo cambio antes de iniciar el proceso de bombeo; es claro que el cambio siempre está presente, lo que implica que no existe un sistema perfecto.

### 1.5.2.- A presión.

Un contenedor a presión es aquel en donde la presión interna del sistema es mayor que la presión atmosférica. Un diagrama de presión similar al de la Figura 1.3 es útil para explicar el cambio de presión en el tiempo.

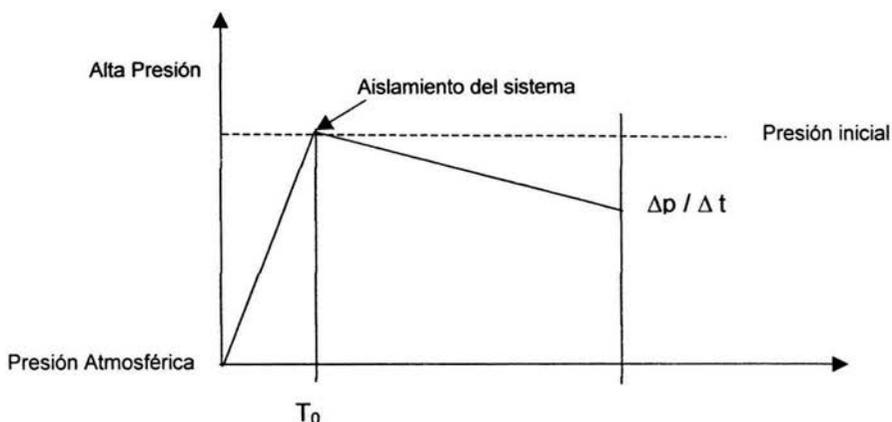


Figura 1.4  
Diagrama de un sistema a presión.

Cuando se aísla el sistema ( $T_0$ ), la presión interna disminuye, esta presión no debe sobre pasar la presión mínima que esta vinculada con la aplicación.

La pérdida o ganancia de materia en los sistemas aislados esté relacionada con la pendiente de la recta en las gráficas anteriores, por lo que la pendiente es representativa de la tasa de fuga.

Los conceptos y definiciones de este Capítulo, permiten planear el trabajo experimental para cumplir con el objetivo del presente trabajo. En el siguiente

Capítulo presento los intervalos y métodos más comunes para la detección de fugas, poniendo especial énfasis en la detección con Helio como gas trazador.

## Capítulo 2

### Fugas, métodos de detección y evaluación.

En todos los campos, una fuga es un escape indeseable de "algo". Este hecho se puede asociar a fluidos, gases o incluso materia sólida, sin embargo, en la mayoría de los casos las pérdidas pueden controlarse y reducirse al mínimo. Tal es el caso de las fugas de agua, de combustibles o vapores, para los que cada caso existe una metodología que permite localizar aquellos factores que producen la pérdida. El tema que ocupa el presente Capítulo se discuten los métodos de detección de fugas y los procedimientos para la evaluación de sistemas al vacío y de sistemas cuya presión interna es mayor a la presión atmosférica.

#### 2.1.- Fugas reales y fugas virtuales.

Las definiciones de fuga real y fuga virtual reconocidas por la comunidad internacional son: fuga real, son defectos en el contenedor que permiten la entrada o salida de aire atmosférico; las fugas virtuales son fuentes internas de gas. (5)

En los sistemas al vacío y a presión la presencia de las fugas es distinta. En los primeros se manifiesta desde el proceso de bombeo, ya que el contenedor no alcanza la presión base (el mejor "vacío") de la bomba con la que se lleva a cabo la evacuación, lo que significa que mientras la bomba evacua los gases del volumen por una línea, existen defectos en el contenedor que permiten que el aire

atmosférico y otros vapores entren y mantengan la presión interna por encima de la presión base.

Para los contenedores a presión mayor que la atmosférica, la manifestación de un defecto es la pérdida de la carga inicial de gas en el contenedor, es decir, en el tiempo la materia en el volumen sale y se difunde en los alrededores con la consecuente disminución de la presión, la pérdida de materia cesa cuando la presión iguala a la presión atmosférica.

Las fugas virtuales sólo se presentan en sistemas de vacío y son fuente de gas internas. Ejemplos de ellos son los gases absorbidos o pequeños volúmenes de gas atrapados en poros o grietas, o bien en cuerdas de tornillo de partes internas del sistema.

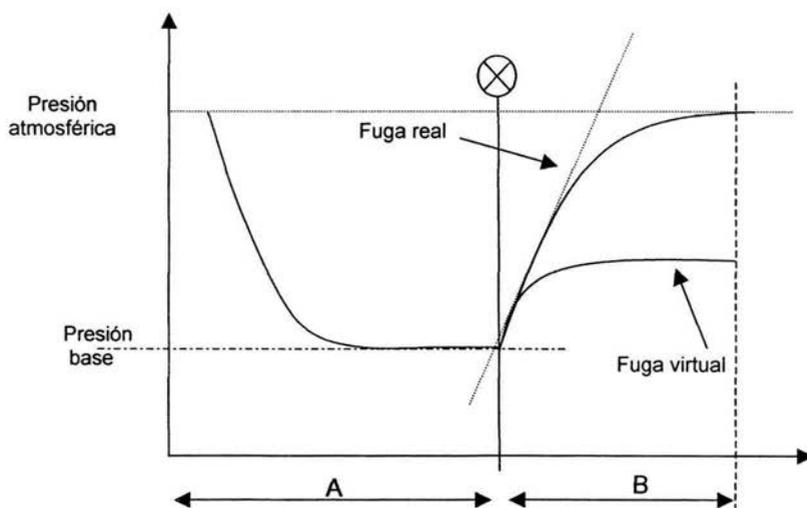


Figura 2.1  
Fuga real y virtual en un sistema al Vacío.

En la Figura 2.1 el intervalo A es la curva de bombeo y representa el proceso de evacuación del sistema hasta alcanzar el estado estacionario (sección horizontal de la curva) que coincide con la presión base; se cierra la válvula y el sistema queda aislado sin un dispositivo externo de bombeo. En el intervalo B se muestran dos curvas que representan el aumento en la presión por causa de una fuga real por donde entra aire. En la grafica se observa una recta cuya pendiente es mayor a 45° el aumento de la presión interna cesa cuando se alcanza la presión atmosférica. El aumento de la presión por causas de una fuga virtual se representa en la curva inferior del intervalo B; Se observa que el aumento de presión interna no alcanza la presión atmosférica. Este hecho se debe a que los gases liberados por efecto del vacío no son suficientes para que todo el volumen alcance la presión atmosférica.

En los sistemas a presión no son relevantes las fugas virtuales, ya que no producen cambios significativos en el sistema. En la Figura siguiente se muestra un curva cualitativa del proceso.

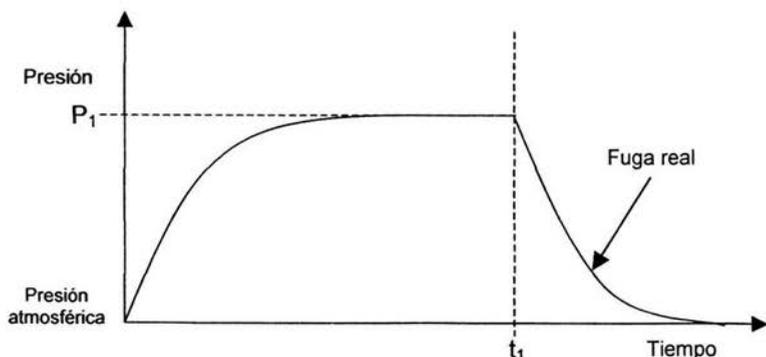


Figura 2.2  
Fuga real en un sistema a presión.

En la Figura 2.2 un sistema de volumen V se presuriza con un sistema externo hasta  $P_1$ . Una vez que se alcanza la presión de operación se desconecta y se aísla; este punto representa el tiempo  $t_1$ . La presión interna disminuye por la presencia de fugas reales en el sistema, la presión final es la presión atmosférica.

Como los sistemas que se encuentran a presión distinta a la atmosférica sufren cambios de presión interna, es necesario cuantificar la cantidad de materia que entra o sale de ellos, lo cual provoca los cambios.

## **2.2.- El flujo másico y la tasa de fuga.**

El flujo másico es la cantidad de materia que se mueve hacia adentro o hacia afuera del sistema a través de orificios, grietas, fisuras y ensamblajes entre otros, que se encuentran expuestos a una diferencia de presión en sus extremos. (4)

La tasa de fuga (Q), es la cantidad de masa que atraviesa un conducto o canal en la unidad de tiempo y tiene unidades de presión por volumen entre tiempo. Las normas internacionales la establecen en función de presión atmosférica estándar, por lo que Q unitaria es:

$$Q = 1 \text{ Scgs} = 1.29 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

(cantidad de material contenida en un centímetro cúbico a presión atmosférica estándar que fluye en la unidad de tiempo –1 segundo-).

En unidades fundamentales la tasa de fuga

$Q = \left[ \frac{\text{joules}}{\text{segundos}} \right]$ , que se interpreta como la energía que pierde o gana el sistema

por unidad de tiempo. En base a la hipótesis de que

**no existe sistema perfecto**

pero es necesario que el sistema cumpla con los requerimientos de la aplicación, se tiene que establecer la cantidad de materia que puede ganar o perder en un tiempo finito para poder establecer su funcionamiento adecuado del sistema

**2.3.- La tasa de fuga máxima permisible.**

Cuando un sistema cerrado tiene pérdida o ganancia de materia se debe a la presencia de una o varias fugas. La suma de los defectos es la fuga total del sistema ( $Q_T$ ),

$$Q_T = \sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

la cual no debe exceder al valor establecido de acuerdo con la aplicación del contenedor, Si se establece la tasa de fuga máxima permisible para el contenedor y su aplicación, se tendrá el cambio máximo de presión en el sistema, por lo que se tiene el valor de comparación para asignar la condición de hermeticidad.

**2.4.- La hermeticidad.**

Si el sistema tiene pérdida o ganancia de materia, es necesario saber la aplicación específica y la tasa de fuga máxima permisible  $Q_{MP}$  para poder llevar a cabo una



menor al valor máximo permisible. Este hecho implica que el contenedor en estas condiciones es hermético. Por el contrario, las rectas 2 y 3 sobrepasan el valor de la recta  $P_f$  al término del mismo intervalo; en ambos casos se consideran sistemas no herméticos.

Dado que el tiempo es un factor importante en la hermeticidad de los sistemas, y se establece de acuerdo al método que se usa y a la aplicación específica, a continuación se presentan los diferentes métodos de detección y evaluación de fugas que se utilizan actualmente, así como los principios físicos y sensibilidades.

#### **2.5.- Metodología de evaluación y detección de fugas reales.**

Cuando aparece el término “detección de fugas” debe entenderse como la existencia de métodos por los cuales se pueden localizar y en algunos casos medir la tasa de fuga. Para la selección del método se debe tener en cuenta que no se pueden tratar a los sistemas por igual, depende del tamaño, material, componentes, tipos de sellos en los ensambles y el rango de presión a la cual deben de trabajar.

Los diferentes métodos de detección de fugas son:

a) Inmersión (prueba hidrostática).

Consiste en aumentar la presión interna del volumen de prueba y sumergirlo en agua.

Si la tasa de fuga es de 1 ScCs y las burbujas son esféricas de radio 2 mm tienen un volumen promedio de  $0.034 \text{ cm}^3$ , entonces aparecerán 29 burbujas por segundo.

Para

1 ScCs	29 Burbujas / s	0.034 s
0.1 ScCs	2.9 Burbujas / s	0.34 s
0.01 ScCs	0.29 Burbujas / s	3.4 s
0.001 ScCs	0.029 Burbujas / s	34 s
0.0001 ScCs	0.0029 Burbujas / s	340 s

Como se puede observar, la sensibilidad de la prueba se debe considerar entre 0.1 y 0.01 ScCs donde el tiempo de aparición es medible. (8)

#### b) Método de tinta especial.

El uso de esta tinta es aplicable donde se sospecha exista una fuga. Sin embargo, la evidencia de fuga puede tardar una hora o más en presentarse; la sensibilidad recomendada es hasta de  $10^{-4}$  ScCs. Algunos inconvenientes del método son: puede contaminar el producto si se trata de contenedores de alimentos, dañar circuitos electrónicos si se trata de componentes eléctricos y electrónicos entre otros. (6)

#### c) Ultrasonido.

Se utiliza el sonido que produce el gas al escapar de un contenedor cuando el volumen se encuentra a presión alta; el método es bueno para fugas del orden de  $10^{-3}$  ScCs y no se puede utilizar en sistemas al vacío. (6)

d) Halógenos

Se usa especialmente en aplicaciones donde están presentes gases refrigerantes; la metodología consiste en llenar el sistema con refrigerante, localizar la fuga con el detector y evaluarla; la sensibilidad del método es  $10^{-5}$  Sccs. (6)

e) Pérdida de presión o vacío

Se hace vacío o se aumenta la presión dependiendo del tipo de sistema, se mide la presión inicial y final interna del sistema en el tiempo establecido; la tasa de fuga se determina a partir de la relación

$$Q = (\Delta p / \Delta t) V$$

En este método son importantes los cambios de presión y el volumen. Se usa comúnmente para establecer los períodos de garantía en productos perecederos y la industria electrónica. La sensibilidad máxima es del orden de  $10^{-4}$  Sccs. (6)

f) Uso de solventes.

Es uno de los métodos más comunes cuando se trata de sistemas de bajo vacío y consiste en aplicar solventes suaves de alta presión de vapor en las zonas externas donde se sospecha que se pierda o gana gas. La presencia del solvente en el interior se hace evidente por cambios bruscos en la medida del vacío, sobre todo cuando se usan sensores de conductividad térmica. La sensibilidad del método es del orden de  $10^{-2}$  Sccs. (6)

#### g) Trazador de helio

Este método tiene sensibilidad hasta  $10^{-11}$  Sccs en sistemas al vacío y a presión; el método consiste en registrar el gas trazador que entra a un sistema o sale de él a través de la fuga mediante un elemento sensible, en este caso es un espectrómetro de masas preparado para detectar helio. Este método ofrece la ventaja única de evaluación de la tasa de fuga y en algunos casos la localización del defecto.

Los métodos mencionados se utilizan generalmente en la industria para determinar el tiempo de vida de los productos en el mercado, pero el método del Helio nos permite establecer de una forma precisa la garantía del producto sin contaminarlo, dañarlo, reducir tiempos de evaluación, costos y se puede utilizar para sistemas que tengan o no un sistema de vacío integrado.

#### **2.6.- Detección y evaluación de fugas con gas trazador.**

En este método se utiliza un Espectrómetro de Masa Detector de Helio con el cual se puede evaluar la cantidad de helio que entra o sale por los defectos que existen en el sistema, ya que el helio por sus propiedades, tiende a salir o entrar en sistemas que se encuentran a presión distinta de la atmosférica.

### **2.6.1 Helio.**

El helio es un excelente gas trazador por que:

- Es un gas noble
- Se encuentra a nivel de traza en la atmósfera (5 ppm)
- Es inflamable
- Su velocidad térmica promedio de  $1300 \text{ m / s}^2$
- No es tóxico
- Su diámetro es muy pequeño
- No permea los metales
- Es químicamente inerte

Debido a esto penetra por fugas muy pequeñas, por lo que la cantidad de helio que atraviesa el defecto, puede ser detectada; aunque exista en baja concentración en el medio ambiente se registra siempre un cambio en la tasa de fuga en el detector de helio.

### **2.6.2 Tasa de fuga de helio.**

El valor de la tasa de fuga está dado en las mismas unidades de Q unitaria, es decir, en atmósferas estándar por centímetro cúbico por segundo. Como la atmósfera la conforman gases en diferentes porcentajes; y el método que se propone en el presente trabajo hace referencia a las fugas con gas de helio es necesario realizar correcciones para tener congruencia con las normas internacionales.

El valor unitario para la tasa de fuga es de:

1 Scgs a 0° C y una atmósfera a nivel del mar

Si se transforma a la masa correspondiente,

1 Scgs = 1.29 mgr / s

1 Scgs de helio = 0.17 mgr de helio / s

1 Scgs de argón = 0.806 mgr de argón / s

Por lo que el factor de conversión es de 7.588 para el helio y 1.60 para el argón.

## **2.7.- El detector de helio.**

El detector de helio es un espectrómetro de masa cuyo elemento separador es un sector magnético de 90° con intensidad de campo fijo. El espectrómetro está seleccionado para separar y dirigir la masa del helio hacia el detector de corriente iónica, fuera del sector. La corriente producida se compara con la señal de helio proveniente de una fuga calibrada y por medio de un circuito electrónico se cuantifica la señal en unidades de fuga Scgs de helio.

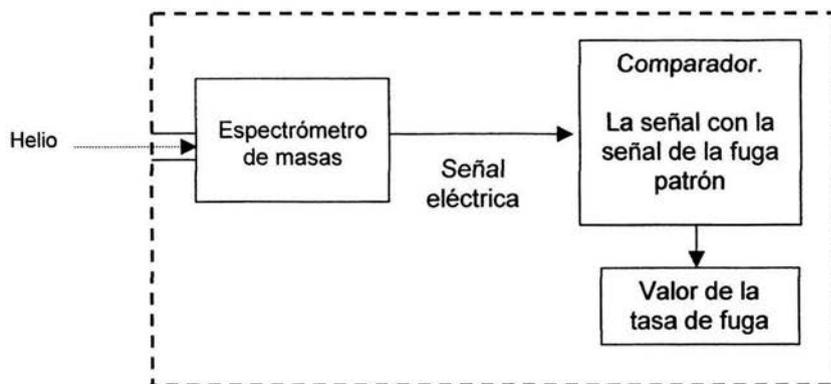


Figura 2.4  
Diagrama de bloques de un detector de helio.

La Figura 2.4, es un diagrama de bloques de la operación de un detector de helio.

Los procesos de evaluación se dividen en dos grupos o modalidades, de acuerdo a las condiciones internas del contenedor:

- Vacío
- Sniffer o sonda de pruebas

En el modo de vacío, el volumen a prueba que inicialmente se encuentra a presión atmosférica, se acopla de forma directa al detector de helio, para bajarle la presión interna. Con la diferencia de presión que existe entre el exterior y el interior del volumen de prueba, el helio junto con otros gases atmosféricos circundante en el ambiente tienden a entrar por los defectos. Sin embargo, cuando se aumenta la densidad de helio en una zona cercana a la fuga, por medio de una fuente externa

de gas, el trazador entra al sistema conformado por el objeto y el detector, de acuerdo a la siguiente Figura:

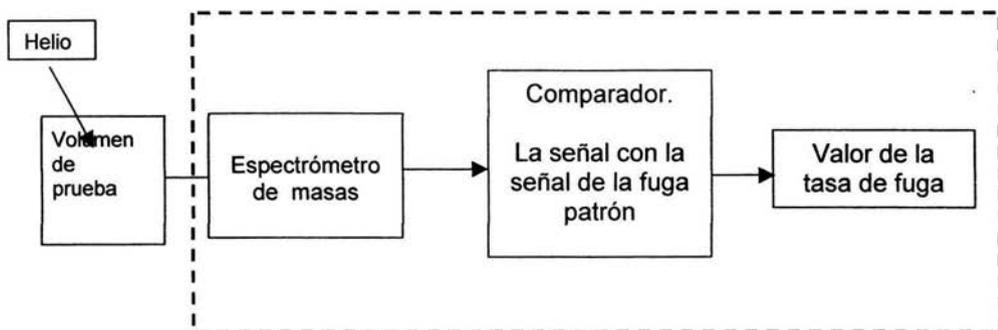


Figura 2.5  
Diagrama del proceso de evaluación de fugas por el método de vacío.

En la Figura 2.5, se muestra el diagrama de bloques del proceso; cabe destacar que la presión en el objeto debe mantenerse en el intervalo de  $10^{-3}$  Torr para asegurar que la señal generada por el Helio atmosférico es despreciable.

En el modo de Sniffer, se conecta una sonda en el puerto destinado para esta función. El objeto a prueba, se presuriza con Helio, el cual sale por los defectos; la sonda de prueba tiene contacto directo con el medio ambiente y con el espectrómetro del detector, por lo que siempre está presente una señal de Helio que corresponde a la concentración del trazador en el medio, así cuando la sonda se acerca a una fuga, se registra inmediatamente un aumento en la señal, que es mayor a la del medio circundante a presión atmosférica.

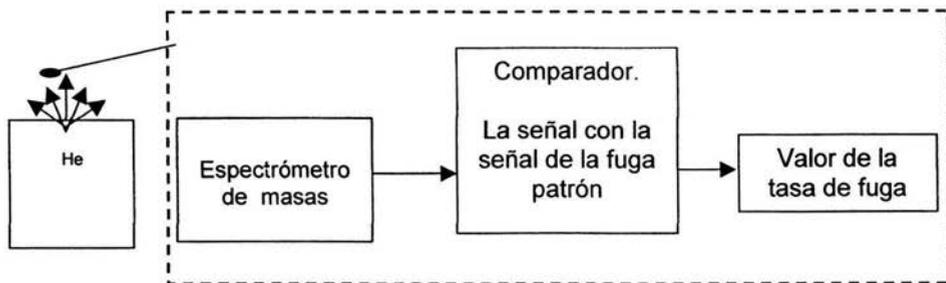


Figura 2.6  
Diagrama del método de detección de fugas con sniffer.

Cabe destacar que el método de sniffer es menos preciso que el de vacío, ya que sólo una fracción del trazador entra por el capilar de la sonda de prueba, esto implica que el método es útil para la localización de las fugas con poca exactitud.

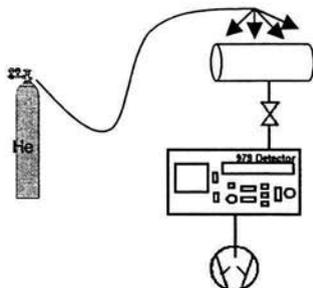
Los modos de vacío y sniffer, se utilizan con diferentes arreglos, dependiendo del tamaño del objeto a evaluar o bien para aumentar o disminuir la precisión de la medida de la tasa de fuga.

## 2.8.-Evaluación y detección de fugas con detector de Helio

Para la evaluación de la Hermeticidad en sistemas de volumen pequeño, se aplica el modo al vacío, en el cual la bomba de vacío integrada al detector de Helio es suficiente para bajarle la presión interna a  $1 \times 10^{-3}$  Torr, que es el intervalo de trabajo del equipo. Sin embargo, cuando el volumen de prueba es muy grande, se usa una bomba auxiliar, conectada en paralelo con el puerto de pruebas del detector de fugas, para poderle bajar la presión.

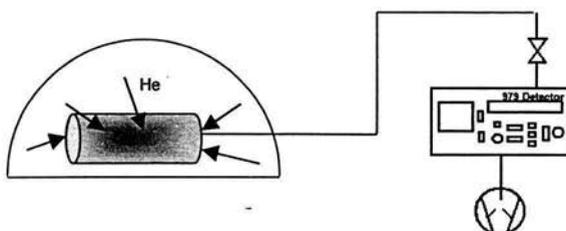
Para el modo de vacío se usan los siguientes arreglos:

**A) Para volumen pequeño y conexión directa.**



El contenedor que inicialmente tiene presión atmosférica, se le hace vacío hasta llegar al intervalo de trabajo del detector, después se rocía exteriormente helio a todo el contenedor, de este modo se evalúan y localizan las fugas parciales, ya que en caso de que exista un defecto, el detector registra el helio que entra, dando un valor de la tasa de fuga de dicho punto. (8)

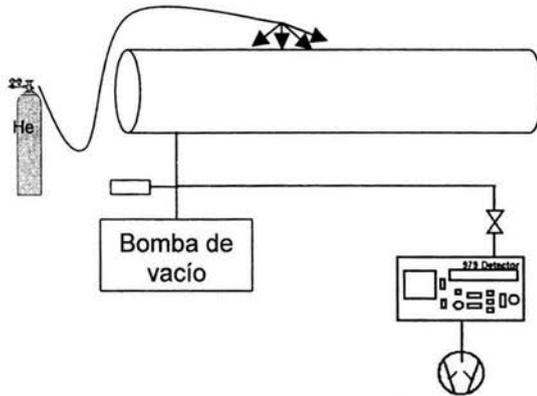
**B) Volumen pequeño con arreglo para la evaluación de la fuga total.**



Este arreglo se conoce como externo-interno, al igual que el caso anterior, se baja la presión del volumen de prueba, colocándole una envolvente, se rocía helio. Debido a la diferencia de presión, el helio tiende a entrar por los defectos y solamente se puede evaluar la tasa de fuga total del sistema en estudio. (8)

Los siguientes arreglos son aplicables a volúmenes grandes en la prueba de hermeticidad en el modo de vacío.

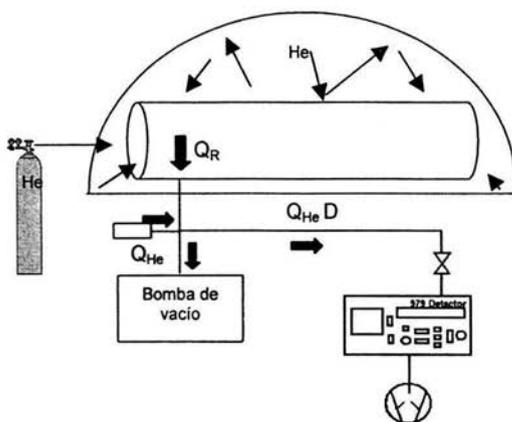
**C) Evaluación y localización de fugas parciales de volúmenes grandes.**



Se conecta la bomba auxiliar y el detector en paralelo, se baja la presión interna al sistema a prueba, se rocía helio por la parte externa o en los lugares donde se presume exista algún defecto o fuga, el aumento de la densidad de helio en la vecindad de la fuga hace que entre al volumen y es alcanzado por el sistema del detector, entonces se tiene el valor de la tasa de fuga parcial y la localización.

La fuga patrón de helio instalada en la línea de vacío, permite conocer el factor de ajuste en el detector de helio, ya que, como se observa en el diagrama, la cantidad total de helio que entra por una fuga, se divide en dos partes, la primera sale del sistema a través de la bomba auxiliar y sólo una fracción alcanza al detector y es evaluada. (8)

#### D) Volumen grande en el modo Externo-Interno

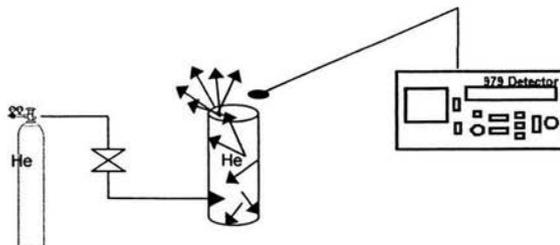


Al igual que en el caso anterior, la bomba auxiliar y el detector se conectan en paralelo al sistema, se baja la presión interna, el sistema se cubre totalmente y se introduce helio, de tal forma que esté en contacto con la parte exterior del sistema a prueba, entonces el trazador entra al interior por medio de los defectos y se evalúa la tasa de fuga total. (8)

Arreglos para el método sniffer o sonda de pruebas.

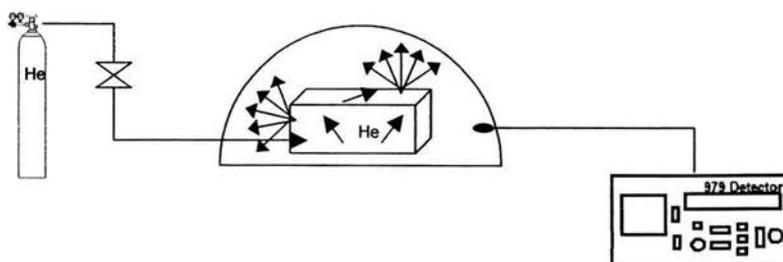
En esta modalidad, se presuriza el volumen con helio o una mezcla del trazador con otro gas a partes específicas, la presión del sistema tiene que ser mayor que la presión atmosférica para que se genere una tasa de fuga considerable, ya que de acuerdo a la operación del método, es menos sensible que la prueba de vacío.

### E) Localización de fuga parcial en volúmenes pequeños y grandes.



El sistema se presuriza con Helio, este tiende a salir por los defectos, por medio de la sonda se explora el contenedor externamente, al pasar el sniffer en la vecindad de una fuga se registra un aumento en la señal del detector, lo que indica que la densidad de Helio en esa zona aumenta, este hecho implica la cercanía de una fuente del gas trazador, es decir, al ir aumentando la señal se está más cerca de la localización de dicha fuga.

### F) Evaluación de fuga total para volúmenes pequeños.

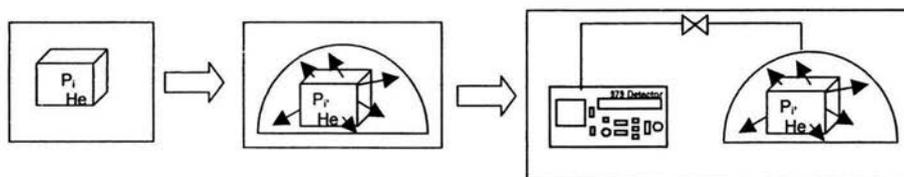


El contenedor a evaluar se presuriza con Helio y se le coloca una envolvente, el trazador sale por los defectos y se acumula en la cubierta, es decir, aumenta la

concentración en el volumen; posteriormente se introduce la sonda y el resultado es el aumento en la lectura que despliega el detector. Es conveniente señalar que la envoltente evita que el Helio se difunda, por lo que en este arreglo el valor de la tasa de fuga total es de mayor confiabilidad.

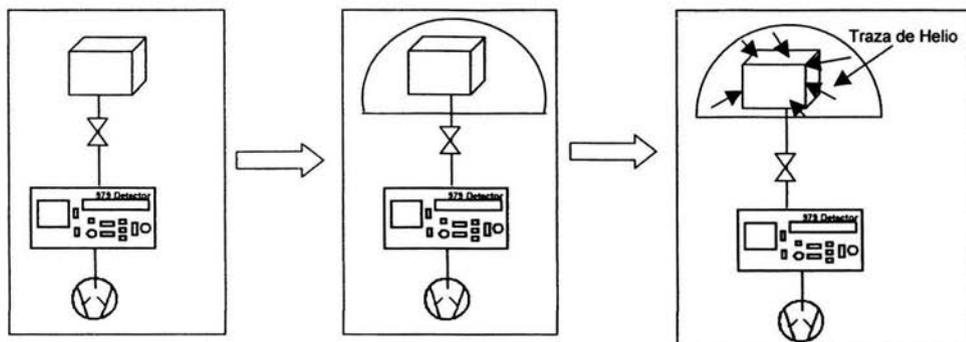
Los arreglos que se han presentado, implican alto costo en virtud de que se usa Helio en una concentración alta o al 100% para las pruebas dado que se trata de volúmenes pequeños, sin embargo, cuando los volúmenes de prueba son grandes pueden aplicarse métodos combinados que además se realicen con mezclas de Helio a baja concentración, pero con la reserva de que solo se pueden utilizar para la evaluación de la fuga total.

#### H) Evaluación de fuga total por acumulación por el método Interno-Externo.



Al objeto en estudio, se le introduce una traza de Helio y se le coloca en una envoltente, el trazador tiende a salir por los defectos y se acumula en la cubierta en un tiempo determinado. El detector de Helio se pone en contacto con la sonda de prueba que se introduce a la envoltente y el resultado es el despliegue del valor de la tasa de fuga total.

### I) Evaluación de fuga total por medio de acumulación por el método de vacío



El método es una combinación del Externo-Interno con una traza de Helio; se conecta el objeto por medio de una línea de vacío que cuenta con una válvula que aísla al detector -es importante señalar que el volumen es de dimensiones pequeñas, ya que como se señaló anteriormente, la bomba instalada en el detector es la que se encarga de bajar la presión interna- se abre la válvula y baja la presión interna, se coloca una cubierta y en estas condiciones, se inyecta una traza Helio en la envoltura y se mantiene durante un intervalo de tiempo establecido, permitiendo que el Helio penetre hacia el contenedor por medio de los defectos; al finalizar el tiempo, se abre la válvula y en el detector se registra el valor de la tasa de fuga total.

Los métodos y arreglos descritos en este Capítulo son utilizados actualmente en la industria y a nivel investigación, pero no existe algún método que evalúe y localice fugas en sistemas de gran capacidad, en los cuales existe la necesidad de

evaluarlos, por lo que es necesario ubicar los puntos de fuga y evaluar la magnitud de la tasa de fuga, para repararla de ser posible.

En el siguiente Capítulo se presenta el trabajo experimental, que soporta la propuesta de un método de evaluación de Hermeticidad de sistemas de gran capacidad, a partir de la combinación de los métodos al vacío y de acumulación aquí presentados.

## Capítulo 3

### Desarrollo experimental de un método de evaluación de hermeticidad de grandes volúmenes.

Como se mencionó en el Capítulo 2, los métodos de detección y evaluación de fugas con gas trazador (helio) cubren una variedad de configuraciones de manera eficiente, por lo que se considera un método universal. Sin embargo, en la descripción anterior no se consideran volúmenes grande de prueba o de configuraciones difíciles de manipularse o incluso transportarse. En este Capítulo se presentan las pruebas de laboratorio y la metodología que se desarrollaron para presentar una propuesta para cuantificar la tasa de fuga parcial de contenedores de gran magnitud, en los que la posibilidad de evaluar por el método de vacío es prácticamente nula.

#### **3.1 Consideraciones iniciales.**

De acuerdo a los métodos convencionales de detección y evaluación de fugas con gas trazador, el único arreglo que permite evaluar directamente la fuga total, o en su caso cada fuga parcial, es el de "vacío", en donde el volumen se mantiene a baja presión por medio de la bomba de vacío del propio detector de helio. Sin embargo. el tiempo de bombeo hasta la presión de prueba debe ser corto, en el orden de segundos y en general los equipos no tienen bombas de vacío con la capacidad requerida para realizar esta función, por lo que antes de presentar la

metodología será necesario presentar los volúmenes de referencia:

Volumen pequeño, cuando sea de  $1 \text{ cm}^3 - 5 \times 10^4 \text{ cm}^3$  ( 50 litros), en este intervalo la bomba de vacío de cualquier detector de helio puede alcanzar la presión de prueba requerida en un tiempo corto ( $< 5 \text{ min}$ ).

Volumen intermedio de  $5 \times 10^4 \text{ cm}^3 - 10 \text{ m}^3$ , en este intervalo, el sistema por evaluar requiere de una bomba auxiliar instalada en paralelo con el detector de helio; esta bomba es la responsable de mantener la presión (en el intervalo de 100 a 1 mili Torr) requerida para el funcionamiento óptimo del detector.

Volumen de prueba grande se consideran aquellos cuyo volumen es mayor que  $1 \times 10^7 \text{ cm}^3$ , este tipo de sistema requiere para su evaluación presurizarlo con gas trazador de helio o una mezcla de gases, ya que resulta complejo y costoso hacer vacío al sistema.

### **3.2 Hipótesis.**

El sistema hermético es aquel en el que la tasa de fuga total evaluada es menor a la calculada teóricamente para la aplicación específica. La propuesta para la evaluación de la hermeticidad en volúmenes grandes, es presurizar el sistema con una traza de helio o una mezcla de nitrógeno-helio. El gas tiende a salir por las fugas o defectos sin obstruirlos o contaminarlos, entonces acondicionando en la punta del sniffer un volumen constante con una concentración inicial conocida del

trazador, se aplica el método de acumulación interno-externo, para aumentar la concentración en el volumen de prueba, la concentración final del gas trazador después de un tiempo específico será proporcional a la fuga real.

Con objeto de comprobar la hipótesis que permita proponer un método se llevaron a cabo pruebas de laboratorio y se construyeron dispositivos auxiliares.

### **3.3 Diseño y construcción de un volumen de prueba “estándar.”**

El volumen de prueba se fabricó con un tubo de plexiglass de 6.6 cm. de diámetro interno y 12cm de altura, dos tapas de aluminio con diámetro externo de 8cm y un sello de vacío; la tapa inferior tiene un tubo de 0.6 cm (¼”) y que forma parte de la línea de vacío con una válvula abrir-cerrar ( $V_1$ ) que la conecta a un acoplador para el puerto de prueba del detector de helio Varian modelo 979 disponible en el Taller de Vacío del Edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias. La tapa superior tiene una línea de introducción con dos válvulas en serie; la primera válvula es del tipo abierto o cerrado ( $V_2$ ), en el extremo final de la línea esta instalada una válvula de aguja de flujo controlado ( $V_3$ ), la línea de vacío es de tubo de acero inoxidable de 0.6 cm de diámetro externo.

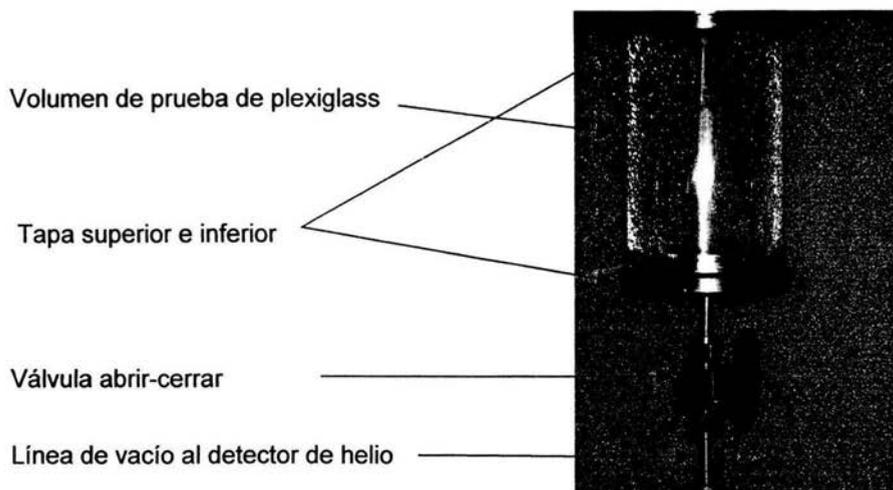


Figura 3.1  
Fotografía del volumen de prueba

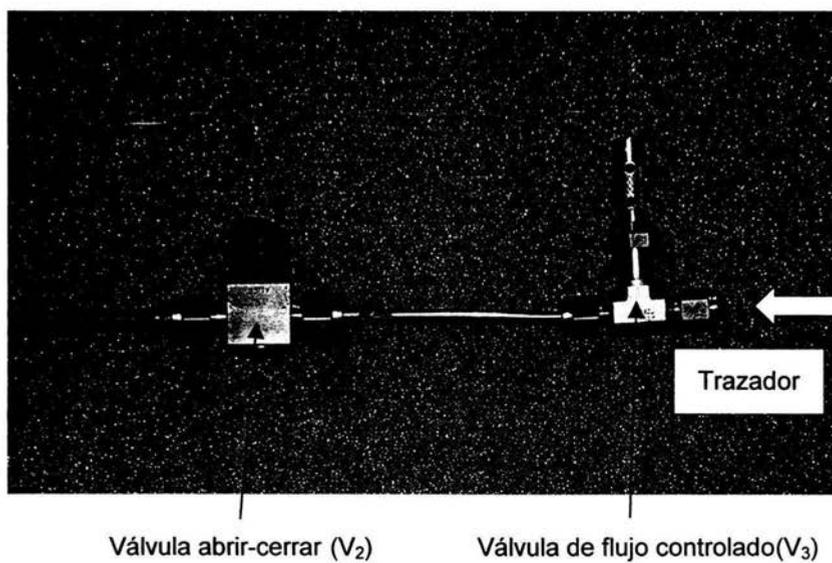


Figura 3.2  
Fotografía de la línea de entrada al volumen de prueba

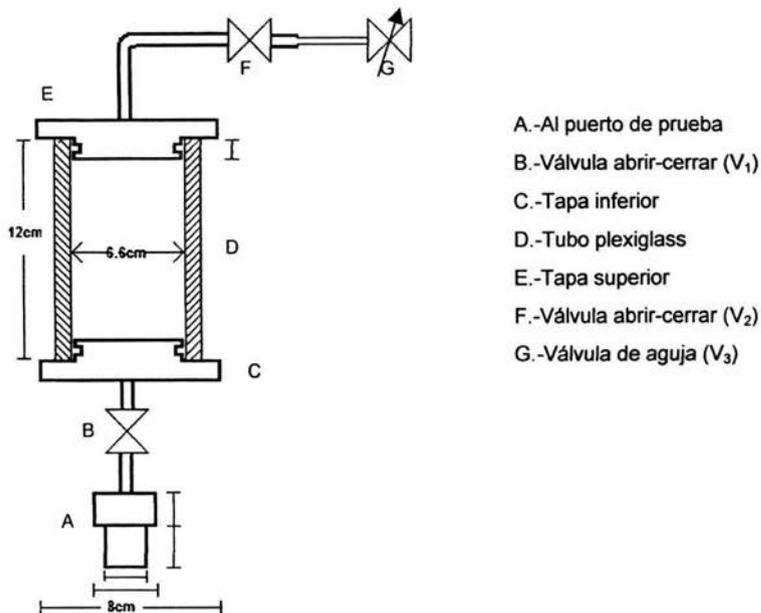


Figura 3.3  
 Diagrama del dispositivo de pruebas.

En la Figuras 3.1 se muestran el volumen que sirve de referencia para la concentración inicial y en la Figura 3.2 se muestra la línea de entrada del gas trazador al volumen y por ultimo en Figura 3.3 se muestra el arreglo general con las dimensiones más representativas.

El objetivo de la construcción del dispositivo es tener un volumen fijo durante la realización de las pruebas, el cual almacena el gas trazador, las válvulas abrir-cerrar son para aislar el sistema, la válvula ( $V_3$ ) es para simular una fuga que además puede ser variable.

Para verificar el funcionamiento del sistema de prueba es necesario montarlo al detector de helio y operarlo.

### 3.4 Operación del detector de helio

El detector de Helio es un instrumento que consta de un espectrómetro de masa de sector magnético fijo preparado especialmente para helio ( $m = 4$  uma) con su bomba de alto vacío turbomolecular de velocidad de bombeo variable de acuerdo a la sensibilidad solicitada por el usuario, una bomba de paletas para apoyo de la bomba turbomolecular y bombeo primario del puerto de pruebas, electrónica asociada además de los componentes secundarios como válvulas de venteo, puerto de pruebas entre otros.

En la siguiente Figura 3.4, se muestra un diagrama del Detector de Helio. (9)

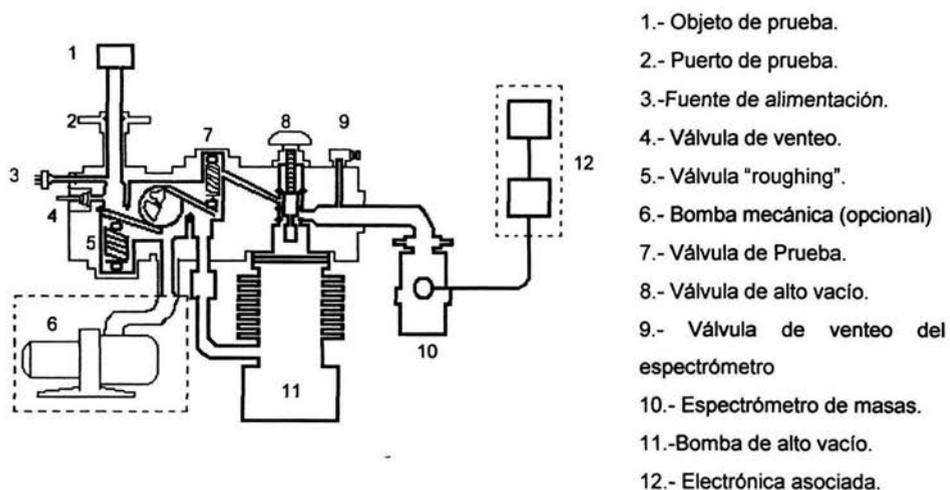
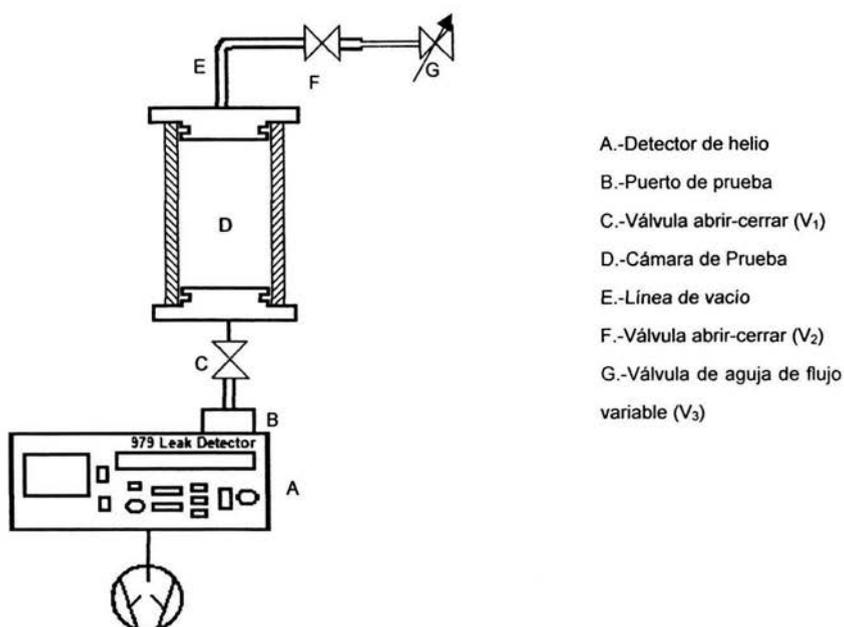


Figura 3.4  
Diagrama del espectrómetro de masas y del sistema del Detector de Helio.

La bomba mecánica auxiliar permite evacuar el sistema, de presión atmosférica hasta  $1 \times 10^{-3}$  Torr, en el puerto de Venteo, en el cual se acopla el objeto a prueba; la válvula de Venteo permite tener contacto al sistema con la atmósfera. La válvula Roughing aísla el sistema interno del detector para no perder el vacío secundario (la bomba auxiliar). La válvula de prueba pone en contacto al puerto de prueba con el espectrómetro de masas. La válvula de alto vacío mantiene al tubo del espectrómetro a  $1 \times 10^{-6}$  Torr se alcanza con la bomba de alto vacío. El espectrómetro de masa produce iones por medio de unos filamentos calientes, estos iones son atraídos por potencial negativo y dirigidos hacia el sector magnético de  $90^\circ$ , el cual únicamente orienta a los iones de helio al detector de corriente que emite la señal por medio de la electrónica asociada al detector. (10)

La cámara de prueba se acopla al detector de helio para verificar su hermeticidad, esta condición se alcanza cuando se iguala la presión base de la bomba instalada en el equipo de detección, que corresponde a  $1 \times 10^{-3}$  Torr; esta prueba se realizó manteniendo la Válvula 1, 2, 3 cerrada del diagrama de la Figura 3.1. Una vez comprobada la hermeticidad dinámica –con la bomba de vacío en operación–, se aísla el sistema cerrando las válvulas 1 y 2, esta acción permite mantener al “vacío” el volumen de prueba.



- A.-Detector de helio
- B.-Puerto de prueba
- C.-Válvula abrir-cerrar ( $V_1$ )
- D.-Cámara de Prueba
- E.-Línea de vacío
- F.-Válvula abrir-cerrar ( $V_2$ )
- G.-Válvula de aguja de flujo variable ( $V_3$ )

Fig. 3.5  
Dispositivo de prueba acoplado al detector de Helio

Para poder establecer una fuga en el sistema, se abre la válvula de flujo controlado ( $V_3$ ), cabe destacar que se trata de una válvula de aguja, por lo que la conductancia es muy pobre aún abierta totalmente – Válvula Swagelok Mod SS-SS2 con un flujo máximo para aire de 1.1 Std L/ min-; la apertura se mantiene fija en todas las pruebas.

### Primera prueba

Al abrir la válvula de aguja ( $V_3$ ) y manteniendo la válvula ( $V_2$ ) cerrada, se presenta una fuga, cuya función es aumentar la presión en la sección de la línea entre las válvulas; es claro que al aumentar la presión con aire atmosférico, aumenta la concentración de helio en la sección, hecho que es evidente en el detector cuando

se abre la válvula  $V_2$  mostrando que el helio se encuentra presente en el aire atmosférico.

Nuevamente se cierra la Válvula 2, de este modo se alcanza otra vez el estado estacionario ( $1 \times 10^{-3}$  Torr en la cámara), con lo que se tiene las condiciones óptimas para llevar a cabo las siguientes pruebas.

Para aire atmosférico a  $20^\circ\text{C}$ , el promedio del trazador es de 5 ppm (0.000005%), con esta concentración, se obtuvo una fuga promedio de

$$Q_{\text{aire}} = 3.1 \times 10^{-7} \text{ Sccs de helio}$$

( $2.36 \times 10^{-7}$  Torr\* $\text{Lt/s}$ ) a una temperatura del Laboratorio de  $20^\circ\text{C}$

Este valor será considerado como la referencia de la fuga a presión atmosférica; el valor que se encontró depende de factores que no son controlables, como los cambios de temperatura repentinos, las corrientes de aire dentro del laboratorio entre otros.

Dado que la concentración del trazador en la atmósfera es pobre, se buscó una nueva referencia usando el trazador al 100%.

### **Segunda prueba con helio al cien por ciento.**

Con el sistema en condiciones semejantes a la primera prueba, se colocó una fuente de helio en la vecindad de la fuga; al abrir la válvula ( $V_2$ ) se observó un incremento en la presión de la cámara de pruebas y desde luego en la lectura de la tasa de fuga en el detector. Al cambiar la concentración de helio al 100% se obtuvo una tasa de:

$$Q_{\text{Helio}} = 6.0 \times 10^{-3} \text{ Scgs de helio}$$

( $5.02 \times 10^{-3}$  Torr Lt/s de helio) a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$

De los valores anteriores, se deduce que el procedimiento tiene dos valores extremos, si con la concentración del 0.000005 % de helio y con 100% se tienen valores de la tasa de fuga que difieren en cuatro órdenes de magnitud para el mismo defecto, Entonces se define el intervalo de trabajo aplicable al volumen de prueba.

Para hacer eficiente la prueba en volúmenes grandes por el método de sniffer, se optó por una solución intermedia, que consistió en variar la concentración de helio en una atmósfera de  $\text{N}_2$ , lo que provoca que las pruebas sean más precisas que usando el helio de la atmósfera y menos costosas que presurizando los volúmenes grandes con el 100% de helio.

### 3.5 Preparación de mezclas He-N<sub>2</sub>

Para la elaboración de las mezclas se utilizaron recipientes graduados con llaves de paso (embudo de separación y bureta), contenedores, gas de helio y nitrógeno con 99% de pureza.

-El embudo de separación con graduación, se sujeto al soporte universal y se sumergió en el contenedor con agua hasta una marca fija, el resto del volumen quedo fuera de la superficie con la válvula hacia arriba. El embudo se lleno de agua al borde previamente.

-La manguera conectada al tanque de helio se introdujo en el contenedor con agua, en donde se encontraba el embudo de separación previamente preparado; se abrió la llave del tanque para que saliera el aire atmosférico que se encontraba en la manguera y así tener la seguridad de la pureza de gas trazador. Esta acción produjo burbujas dentro del agua; El tiempo de evacuación del aire fue de 1 minuto en todos los casos.

-Las burbujas formadas por el gas de helio se dirigieron hacia la boca inmersa del recipiente graduado, esto provoco que el nivel del agua dentro del embudo se desplazara y actúa como guía para medir el volumen de gas atrapado.

-Teniendo el volumen de helio como referencia para el porcentaje de la mezcla, el volumen se complementa con N<sub>2</sub> proveniente de otro tanque; usando el mismo procedimiento que se uso en el helio.

-Con la mezcla He-N<sub>2</sub> preparada, se colocó un volumen variable "sin aire" en el extremo superior del embudo; se abrió la válvula al mismo tiempo que se

sumergía el embudo en el contenedor. Esta acción permitió que la mezcla de gas se transfiera al volumen externo.

La etapa final del proceso de preparación, consistió en cerrar la válvula y desprender el volumen externo que contenía la mezcla a una presión cercana a la presión atmosférica.

Las mezclas que se prepararon fueron de 300 cm<sup>3</sup> de He con 300 cm<sup>3</sup> de N<sub>2</sub>; 200 cm<sup>3</sup> de He con 400 cm<sup>3</sup> de N<sub>2</sub> y 100 cm<sup>3</sup> de He con 500 cm<sup>3</sup> de N<sub>2</sub>.

Las mezclas se utilizaron para realizar pruebas por el método de vacío para volumen pequeño y conexión directa (Capítulo 2 sección 2.8 inciso A). Sin embargo, los valores resultantes de la tasa de fuga comparada con la preestablecida (el valor del 100% He) indicaron que aun la concentración del trazador es alta, en virtud de que la tasa de fuga es sólo un factor 10 menor a la tasa real, por lo que se optó por preparar otras mezclas de menor concentración, y aumentar el tiempo de exposición del gas trazador en la fuga. Esta decisión se fundamentó en el hecho de que un volumen de prueba de cientos de metros cúbicos requiere de un volumen de gas de He muy grande, aún cuando la concentración sea del 50%.

Las mezclas de menor concentración, se presentan a continuación.

15ml He — 1485ml N <sub>2</sub>	1%
75ml He — 1425ml N <sub>2</sub>	5%

150ml He — 1350ml N <sub>2</sub>	10%
225ml He — 1275ml N <sub>2</sub>	15%
375ml He — 1125ml N <sub>2</sub>	25%
750ml He — 750ml N <sub>2</sub>	50%

Estas mezclas fueron preparadas con el mismo procedimiento que las de alta concentración.

### 3.6 Evaluación de fugas.

#### Método de vacío.

Se prepara el dispositivo para realizar las pruebas, teniendo la válvula 2 cerrada, se alcanza la presión de  $1 \times 10^{-3}$  Torr en el volumen de prueba, se cierra la válvula 1, se coloca la mezcla de helio al 50% en el entorno de la fuga (válvula de aguja V3) y se abre la válvula V<sub>2</sub>, el resultado es una respuesta inmediata en el detector. Las pruebas siguientes se realizaron de forma semejante con la utilización del 100% de helio (encontrando una tasa de fuga de  $6.0 \times 10^{-3}$  Sccs de helio), pero sustituyendo las mezcla con el 33% y 16%, obteniendo valores de la tasa de fugas en los distintos casos.

	% He	Q Sccs de He
Mezcla 1	50	$2.7 \times 10^{-4}$
Mezcla 2	33	$4.6 \times 10^{-5}$
Mezcla 3	16	$2.4 \times 10^{-5}$

Estos datos obtenidos muestran la cercanía al límite superior del intervalo de “trabajo”, lo cual es un indicativo de que se pueden utilizar mezclas de menor concentración de helio y la aplicación de un método alternativo que en lo sucesivo se denominará método de acumulación.

### **Método de acumulación.**

De manera general, en el Capítulo anterior se presentó el método de acumulación; Sin embargo la justificación del método que se propone en este trabajo requiere de un análisis más preciso del comportamiento de las variables involucradas. El volumen, la presión y el tiempo están relacionadas entre sí, en una relación resultante de la ecuación de estado de gas ideal y que se presentó en detalle en el primer Capítulo.

$$p V / t = Q$$

Si el sistema tiene una presión inicial  $p_i$  menor a la presión atmosférica, existe un flujo de gas hacia el interior del volumen a través de la fuga, en un tiempo fijo, el número de partículas que atraviesan la sección transversal es la misma; Este flujo da como resultado un aumento en presión del sistema ( $p_f$ )

$$Q = (p_f - p_i) V / \Delta t$$

Se tiene que la presión final es

$$p_f = Q \Delta t / V + p_i \quad \text{el tiempo es fijo}$$

Es decir, la presión final del sistema es mayor que la inicial debido a la cantidad de partículas que entran en el intervalo establecido; si el flujo de partículas hacia el interior es el gas trazador, el detector reconoce el aumento de la presión parcial de helio en el interior y lo cuantifica para así desplegar el valor correspondiente.

Cuando se aumenta la concentración de helio, aumenta la presión parcial del mismo. Este hecho se puede representar gráficamente como se muestra en la siguiente figura.

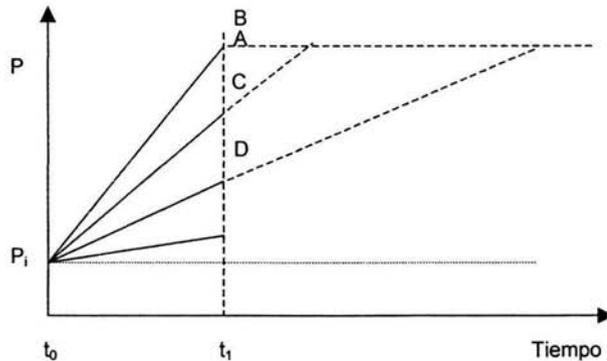


Fig.3.6  
Curvas de aumento de concentración

De manera cualitativa, en la Figura 3.6 se identifican las rectas A, B, C y D que representan el cambio en la presión parcial del gas trazador en el volumen; el caso A, la respuesta es rápida por que se trata de una concentración alta de helio, en los siguientes casos, en el tiempo fijo, no se alcanza el valor de presión real (A)

que es desde luego la fuga real del sistema. Un caso importante es la recta C, que corresponde a la mitad de la presión de la recta A, este hecho implica que la concentración es del 50% del trazador.

Para la primera prueba con el método de acumulación, se usó el helio del aire atmosférico; la primera etapa del procedimiento consistió en preparar el dispositivo (las válvulas V<sub>1</sub> abierta y V<sub>2</sub> cerrada) hasta que se alcance la presión base en el intervalo de  $10^{-3}$  Torr, (Figura 3.3).

Para la segunda etapa, se cierra V<sub>1</sub> y se abre la válvula V<sub>2</sub> durante un intervalo de 5 segundos y se cierra al termino de este; inmediatamente después se abre la válvula V<sub>1</sub>, el resultado es un aumento en la señal y se deriva la lectura de la tasa de fuga, la bomba de vacío del detector baja nuevamente la presión en el volumen de acuerdo a la ley exponencial, hasta que se alcanza la presión base.

El procedimiento anterior se repite, pero con la válvula V<sub>2</sub> se mantiene abierta durante 10 segundos. Se cierra V<sub>2</sub> y se abre V<sub>1</sub> para obtener la segunda lectura, para las subsecuentes, se realiza el mismo procedimiento aumentando el tiempo en 5 segundos hasta llegar a 180 segundos y el último en 240 segundos. Con objeto de visualizar el procedimiento, se muestra el siguiente diagrama en la Figura 3.7.

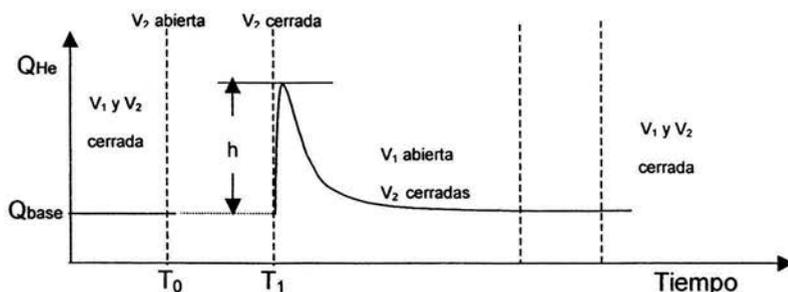


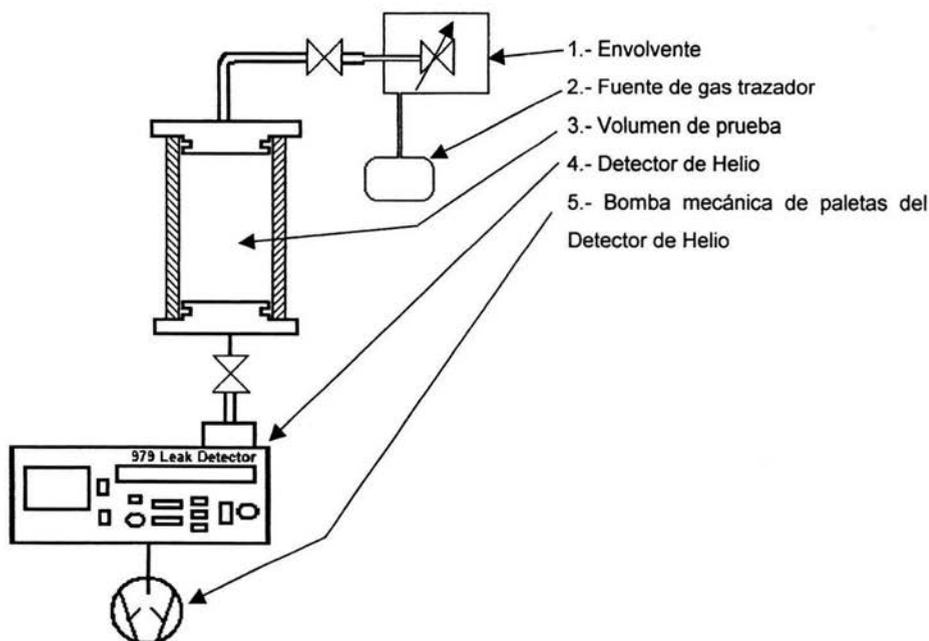
Fig.3.7

Diagrama del proceso de prueba por el método de acumulación

Durante el proceso de prueba, el sistema alcanza la presión base, la cual mantiene a la tasa de fuga constante ( $Q_{base}$ ) en el detector. Al permitir que entre gas trazador al sistema (abriendo Válvula 2) aumenta la presión interna y la concentración del trazador durante el intervalo de tiempo establecido (tiempo de acumulación), lo cual se ve reflejado en el aumento de la tasa de fuga ( $h$ ) en el diagrama, ya que, existe una interconexión directa entre el volumen y el puerto de pruebas del detector, la señal disminuye a medida que la presión en el puerto alcanza nuevamente la presión base; la caída exponencial corresponde al modelo del gas ideal que se presentó en el Capítulo 1.

En el diagrama anterior, el intervalo de acumulación al que se hace referencia en el procedimiento corresponde al intervalo  $T_1 - T_0$  y  $h$  es el cambio en la lectura de la tasa de fuga debido al helio o una mezcla del trazador que entró a la cámara de prueba en el intervalo de tiempo y que se denomina tiempo de acumulación.

En las siguientes pruebas, se aplicó el mismo procedimiento, pero se modificó el dispositivo para la inyección del gas trazador, además, se colocó una capucha de manera que cubriera la fuga como se muestra en la Fig.3.8. Se introduce primero la mezcla de 1%, al término de la prueba se desmonta la capucha para no dejar residuos de la mezcla, se colocó nuevamente y se le anexa la siguiente mezcla y así sucesivamente con las concentraciones del 5, 10, 15, 25 y 50 por ciento de helio.



- Figura 3.8

Dispositivo de prueba para el método de acumulación con modificación

La envoltorio se colocó alrededor de la válvula de flujo variable con objeto de mantener el gas trazador en una zona cercana a la fuga, La fuente de gas se conectó por medio de un tubo capilar de acero inoxidable de 0.007" de diámetro

interno, directamente a la envolvente, de esta manera tratando de inyectar continuamente la mezcla, para evitar el cambio abrupto en la concentración del trazador durante el tiempo de prueba.

En la siguiente sección se muestran los datos de las pruebas y los resultados que se derivan de ellos.

### 3.7 Resultados relevantes

Como se había anteriormente los valores de la tasa de fuga de las pruebas con el método de vacío son:

Mezcla de helio en %	Valor de la tasa de fuga en Scgs de helio
50	$2.7 \times 10^{-4}$
33.	$4.6 \times 10^{-5}$
16.	$2.4 \times 10^{-5}$

Tabla1

Valores de tasa de fuga por el método de vacío con distinta concentraciones.

para evaluar el método, las pruebas se realizaron con concentraciones altas de helio, los resultados de la tasa de fuga de la tabla 1 difieren hasta un factor de 100 con respecto a la tasa de fuga real ( $6.0 \times 10^{-3}$  Scgs de helio), \$Esto se debe a que al colocar el gas trazador en la vecindad de la fuga, el helio se difunde con rapidez debido a su masa reducida ( 4 gr/mol) y a su velocidad térmica promedio (1300 m/s), por lo que la mezcla no se mantiene constante al ser colocada; los resultados permiten deducir que este método, se puede usar de manera eficiente

para la rápida localización de fugas, sin embargo, la evaluación de la tasa de fuga es poco precisa.

Dentro de los objetivos de este trabajo, se busca optimizar pruebas de localización y evaluación de fugas con baja concentración de helio, para lo cual se mantiene constante la concentración de la mezcla durante las pruebas. Para alcanzar el objetivo, se colocó en contacto directo, una envolvente y la fuente de gas trazador, en la válvula de flujo variable(fuga fabricada), esto crea una atmósfera de concentración de helio específica en la vecindad de la fuga, con lo cual se asegura que la mezcla no aumenta la concentración debido al helio del aire atmosférico circundante y que no existan cambios bruscos en la concentración.

#### **Datos por el método de acumulación**

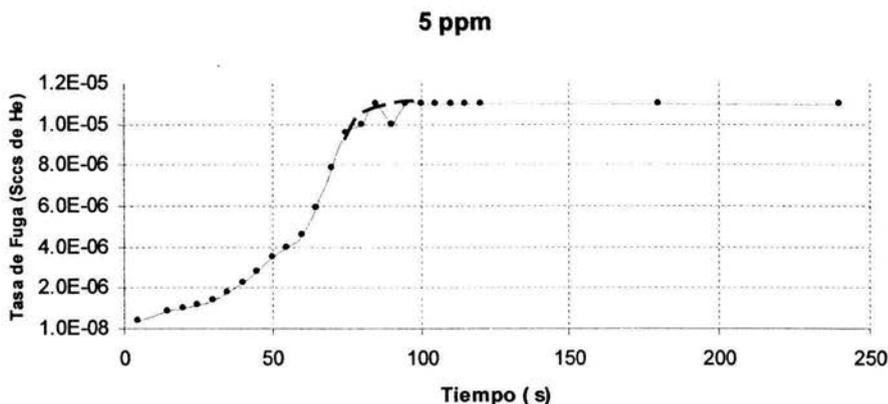
El procedimiento para las pruebas por acumulación se expuso en la sección 3.4, continuación se presentan los resultados:

TIEMPO(s)	Q <sub>5ppm(He)ScCs</sub>	Q <sub>1%(He)ScCs</sub>	Q <sub>5%(He)ScCs</sub>	Q <sub>10%(He)ScCs</sub>	Q <sub>15%(He)ScCs</sub>
5	4.00E-07	2.50E-04	2.70E-05	5.30E-03	5.90E-03
15	8.30E-07	4.30E-04	3.00E-03	5.40E-03	6.00E-03
20	1.00E-06	6.70E-04	4.90E-03	5.30E-03	6.00E-03
25	1.20E-06	7.10E-04	3.70E-03	5.60E-03	6.00E-03
30	1.40E-06	1.00E-03	5.40E-03	5.90E-03	6.00E-03
35	1.80E-06	2.10E-03	5.10E-03	5.90E-03	6.00E-03
40	2.30E-06	2.30E-03	5.40E-03	5.90E-03	6.00E-03
45	2.80E-06	2.30E-03	5.30E-03	5.90E-03	6.00E-03
50	3.50E-06	2.60E-03	5.30E-03	5.90E-03	6.00E-03
55	4.00E-06	3.30E-03	5.30E-03	5.90E-03	6.00E-03
60	4.60E-06	2.00E-03	5.40E-03	5.90E-03	6.00E-03
65	5.90E-06	2.30E-03	5.40E-03	5.90E-03	6.00E-03
70	7.90E-06	3.10E-03	5.40E-03	5.90E-03	6.00E-03
75	9.60E-06	3.70E-03	5.40E-03	5.90E-03	6.00E-03
80	1.00E-05	3.70E-03	5.40E-03	5.90E-03	6.00E-03
85	1.10E-05	4.50E-03	5.40E-03	5.90E-03	6.00E-03
90	1.00E-05	4.50E-03	6.00E-03	6.00E-03	6.00E-03
95	1.10E-05	3.70E-03	6.00E-03	6.00E-03	6.00E-03
100	1.10E-05	5.20E-03	6.00E-03	6.00E-03	6.00E-03
105	1.10E-05	5.20E-03	6.00E-03	6.00E-03	6.00E-03
110	1.10E-05	5.20E-03	6.00E-03	6.00E-03	6.00E-03
115	1.10E-05	5.20E-03	5.80E-03	6.00E-03	6.00E-03
120	1.10E-05	5.20E-03	6.00E-03	6.00E-03	6.00E-03
180	1.10E-05	5.20E-03	5.80E-03	6.00E-03	6.00E-03
240	1.10E-05	5.20E-03	6.00E-03	6.00E-03	6.00E-03

Tabla 2  
Valores por el método de acumulación.

Los valores con las concentraciones de helio de 5 ppm (Aire Atmosférico), 1%, 5%, 10% y 15% se muestran en la Tabla 2; por otra parte, las mezclas con el 25% y 50% de Helio proporcionaron el valor de la tasa de fuga real en el intervalo de acumulación de 5 segundos, por lo que no fue necesario realizar más pruebas, incluso el valor real de la tasa de fuga se obtiene con las concentraciones de 5%, 10% y 15% en distintos intervalos de acumulación.

Al graficar el tiempo de acumulación contra la tasa de fuga en las distintas concentraciones de la tabla 2 se tiene.



Gráfica 3.9.1  
Curva de acumulación con aire atmosférico.

En la Gráfica 3.9.1, se usaron los valores para el helio de la atmósfera (5 ppm) de la Tabla 2, no se usó envoltorio ya que suponemos que la concentración del trazador en el ámbito del Laboratorio es uniforme y constante; la temperatura fue de 15°C.

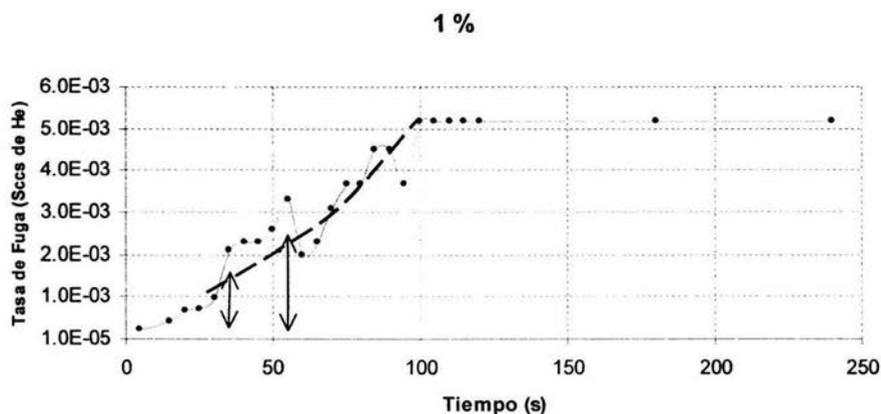
Como se observa en la figura, la curva está dividida en dos partes: la primera representa el aumento en la concentración de forma exponencial, lo cual implica que la suposición de una concentración uniforme del trazador en laboratorio es verdadera; la segunda, es la curva que tiende al valor final de la tasa de fuga que se registra en el detector de helio con una concentración final.

En la gráfica, la tasa de fuga con la concentración del trazador en el aire llega a una constante y corresponde a  $1 \times 10^{-5}$  Sccs de He, sin embargo, al comparar esta

lectura con el valor de tasa de la fuga real (100% helio) tiene un factor de 600 menor; Por lo cual no es una concentración viable para la evaluación de fugas.

$$Q_{\text{real}} = 600 Q_{5\text{ppm}}$$

El tiempo necesario para alcanzar el valor constante es de 90 segundos, es decir que si se requiere el uso del trazador de aire, se tendría que esperar 2.5 Hrs. para evaluar la tasa de fuga real de  $6 \times 10^{-3}$  ScCs de He con estas condiciones.



Gráfica 3.9.2  
Curva de acumulación con el 1%

Al tomar los valores de la Tabla 2 para la concentración de helio al 1%, resulta la curva de la Grafica 3.9.2, en la que se observa un comportamiento similar a la curva anterior, a pesar de que presentan saltos o aumentos en la tasa de fuga, lo que no resulta problemático ya que se entiende que si las pruebas de tiempo de acumulación son consecutivas, en ciertos intervalos, el helio trazador se mantiene en la envolvente y la siguiente prueba se verá afectada por el helio que se inyecta

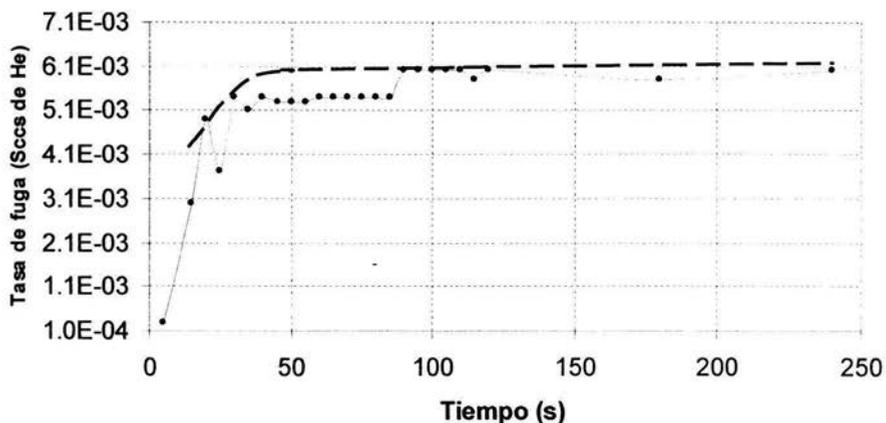
más el helio en la envolvente. Sin embargo, se puede ajustar la curva (negra punteada) de acuerdo al modelo de la curva con aire y se confirma el hecho de la acumulación en la envolvente. Cuando se alcanza el valor constante, es decir, el máximo, la fuga tiene un comportamiento similar al del aire, por tanto

$$Q_{\text{real}} = 1.15 Q_{\text{Helio}}$$

Por lo que el tiempo de acumulación del helio es más rápido que el del aire atmosférico, sin embargo el valor final de la fuga no es el que se busca, debido a que el factor de conversión es de 1.15.

Con la finalidad de obtener, el valor de la tasa de fuga real se realiza la siguiente prueba con una concentración de helio más alta en la mezcla.

**5 %**

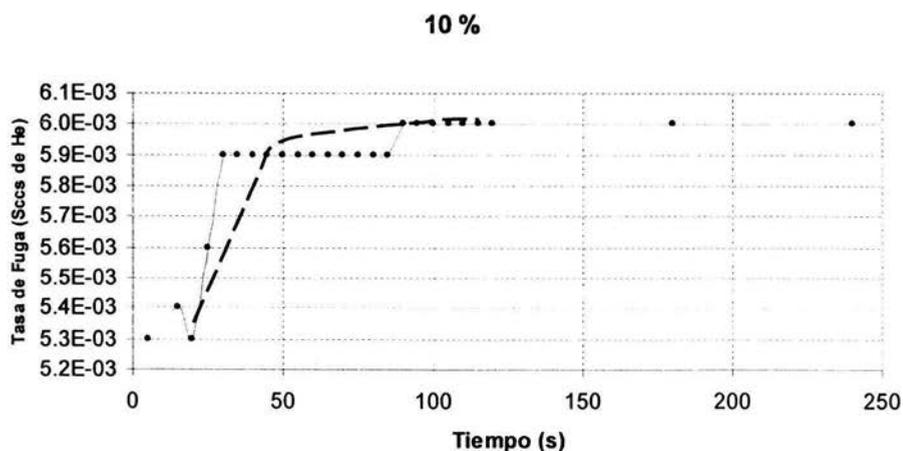


Gráfica 3.9.3  
Curva de acumulación col el 5%

En la gráfica 3.9.3 se muestra la curva del 5% de helio, tal como las anteriores la tendencia es similar, primero de tipo exponencial, terminando en una constante; el aumento o disminución de la tasa de fuga en la gráfica, no afecta al ajuste de la curva (línea punteada), ya que considerando la sensibilidad del detector y el aumento de partículas de helio en la mezcla, cualquier lectura es afectada por la prueba anterior.

**Con la concentración del 5% se llegó al valor de la tasa de fuga real.**

El tiempo de acumulación para alcanzar el valor de la tasa de fuga real es aproximadamente de 90 segundos, y con el objeto de reducir el tiempo de acumulación, se enriquece el trazador en la mezcla He -N<sub>2</sub>.

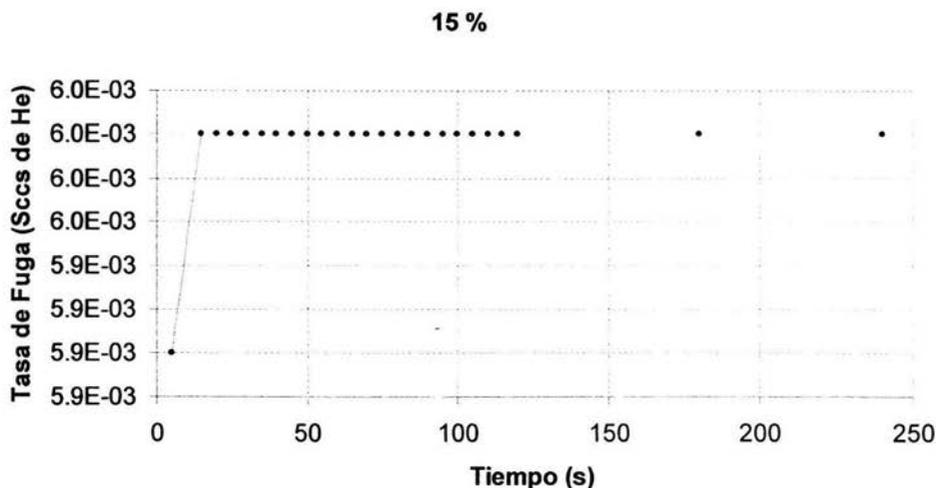


Gráfica 3.9.4  
Curva de acumulación con 10%

La Gráfica 3.9.4 representa la curva para los valores de la tasa de fuga de la

mezcla He-N<sub>2</sub> al 10%, el comportamiento que presenta es de modo semejante a las curvas anteriores, empieza exponencialmente, finalizando en una línea constante; la curva punteada muestra el ajuste a los valores donde existe saltos "bruscos", ya que, al aumentar la cantidad de helio en la mezcla, esta influye en la sensibilidad del detector. Este hecho se observa en la curva, donde el valor mínimo de la tasa de fuga es de  $5.3 \times 10^{-3}$  y la diferencia entre valores consecutivos es de máximo tres millonésimas de tasa de fuga; El valor de la tasa de fuga se alcanzó en un tiempo de acumulación de aproximadamente 90 segundos, en el caso anterior, el tiempo fue el mismo, pero el aumento en la tasa de fuga cambio de forma más rápida con esta concentración (10%) de Helio.

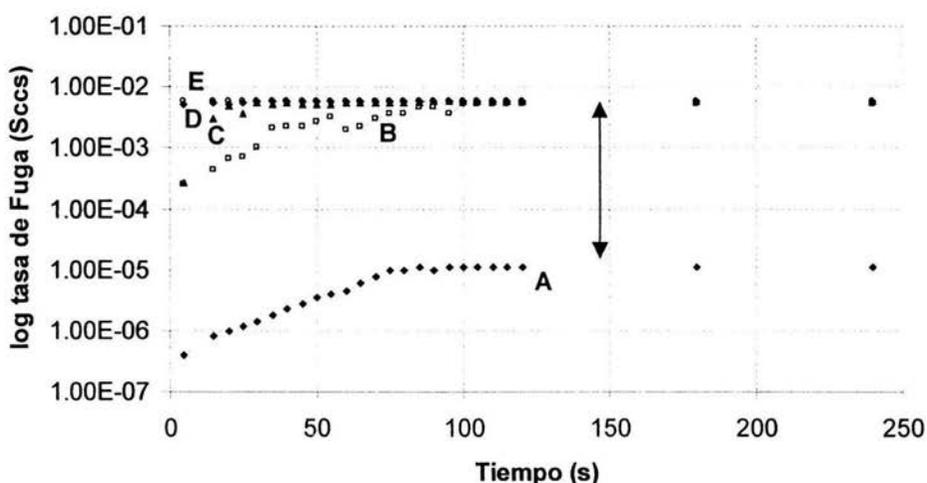
Dado que las mezclas del 5 y 10 por ciento de concentración de Helio, se llego al valor de la tasa de fuga real, se deduce que, con una concentración mayor, disminuye el tiempo de prueba.



Gráfica 3.9.5  
Curva de acumulación con el 15%

En la grafica 3.9.5 se muestra la curva con los valores de la Tabla 2 para la concentración del 15%, se observa que el valor de la tasa de fuga real se alcanza en un tiempo de acumulación de 10 segundos, por lo que se considera la concentración óptima para evaluar la tasa de fuga real que se "fabrico" en el sistema, invirtiendo poco tiempo y poco helio en comparación con el 100%.

### Método de Acumulación



Grafica 3.9.6  
Curvas por el método de acumulación

En la Gráfica 3.9.6, se muestran las curvas de las pruebas realizadas por el método de acumulación con las distintas concentraciones; la curva A es del aire atmosférico, la curva B del 1%, la curva C del 5%, la curva D del 10% y la curva E del 15% de helio. En esta grafica se muestra de manera global las curvas de la Tabla 2 y como se expuso anteriormente, el aire atmosférico (A), como gas trazador tiene una concentración pobre en helio, lo cual se aprecia en la distancia

que existe con la curva E. La curva B tiene un comportamiento similar a la curva A con un factor de 100, no obstante, la concentración del 1% no es suficiente para llegar al valor de la tasa de fuga real; en la curva C, la concentración es suficiente para alcanza el valor de la tasa de fuga real; la curva D desde el inicio se tiene valores cercanos a la tasa de fuga real, lo cual representa una opción para la evaluación del sistema, con un intervalo de tiempo de acumulación corto y baja concentración de helio (10%). Sin embargo, con la mezcla del 15% (curva E) se tiene de manera eficiente la tasa de fuga real, de ahí que las pruebas con la mezcla del 25 y 50 por ciento en el intervalo de acumulación de 5 segundo se registro el valor de la tasa de fuga real.

En base a estos resultados, se propone la metodología de evaluación de fugas en sistemas de gran capacidad por el método de sniffer, usando mezclas volumétricas a baja concentración de helio.

## Capítulo 4

### Método de acumulación usando sniffer y cámara de pruebas.

Como se mencionó en el Capítulo 3, el uso de helio como gas trazador en concentraciones altas o incluso del 100% da como resultado una respuesta rápida en el detector de fugas cuando se localiza un defecto. Sin embargo, el costo de la prueba es alto, tomando en cuenta que en la mayoría de las aplicaciones el trazador debe enviarse a la atmósfera; con objeto de reducir el costo y sacrificando el tiempo de prueba, se propone el método que a continuación se detalla para volúmenes muy grandes.

#### **Método propuesto.**

Los resultados de las pruebas por el método de acumulación que se desarrollaron en el laboratorio muestran que el helio que sale por una fuga se puede almacenar momentáneamente para retardar la difusión. Este hecho permite medir la cantidad de masa del trazador recuperada, además, si se involucra el tiempo, se puede cuantificar la rapidez con la que el trazador aumenta su concentración en el volumen de captura.

Cuando se trata de mezclas, el aumento de la concentración de helio en el volumen de captura es lento. Sin embargo, la cuantificación del gas trazador

después de un tiempo resulta ser una fracción de la concentración al 100% de helio, es decir, se puede encontrar un factor de multiplicación para tener el valor de la tasa de fuga real teniendo el tiempo de acumulación y la fracción de helio involucrado en la mezcla.

**El método propuesto para la evaluación se divide en dos etapas:**

La primera es localizar las fugas del volumen y la segunda etapa evaluar las fugas localizadas.

**Primera etapa: Localización de las fugas.**

La localización se realiza con el método de sniffer de acuerdo a los siguientes:

-El detector de helio se posiciona en el modo de sniffer y se coloca la sonda, la cual debe consta de una línea de vacío flexible con una longitud variable de acuerdo a la posición del detector de helio con respecto al volumen de prueba. En el extremo abierto de la sonda se instala una punta de prueba que consiste en un tubo capilar y una válvula de flujo variable; la función de la válvula de flujo es ajustar la conductancia, para que la diferencia de presión entre la atmósfera y el puerto de pruebas del detector sea muy grande, es decir, que sólo admita una cantidad de gas al interior del detector, para que este pueda mantener a su sistema interno a la menor presión posible – en el Intervalo de  $10^{-3}$  Torr -.

-Se estima el volumen del contenedor y se inyecta helio, que por sus características no es reactivo con otros gases o vapor. Es importante conocerse la masa inyectada con objeto de preparar al sistema para la segunda etapa (evaluación).

-Se enciende el detector y se ajusta la válvula de flujo variable de la sonda; la apertura de la válvula dependerá de la concentración del trazador inyectado al volumen y de la magnitud de la tasa de fuga requerido por la aplicación.

-Una vez fijos los parámetros, se llevará a cabo la exploración al sistema, poniendo especial atención en uniones fijas, como son soldaduras, uniones roscadas y desmontables.

-En el momento de registrar algún aumento en la lectura de la tasa de fuga en el detector, se marca la zona, para posteriormente realizar la evaluación.

En caso de que la hermeticidad del sistema esa crítica y en el primer recorrido no se encontraron evidencias de fuga, se puede tomar una de las siguientes medidas:

A) Aumentar la concentración del trazador ( inyección adicional de helio)

O bien

B) Aumentar el flujo del gas hacia el detector, es decir, aumentar la conductancia de la válvula de flujo variable instalada en la nariz.

Y nuevamente se llevará a cabo una segunda exploración aplicando las mismas recomendaciones de la prueba preliminar.

Si se aplicaron los dos casos anteriores y no se registró una fuga en el contenedor, entonces debe considerarse hermético.

El caso extremo es aquel en donde es necesario aumentar la concentración del trazador al 100%, es claro que esta prueba es costosa; sin embargo, es aplicable para cualquier requerimiento.

A continuación se muestra el arreglo sugerido para la localización de fugas.

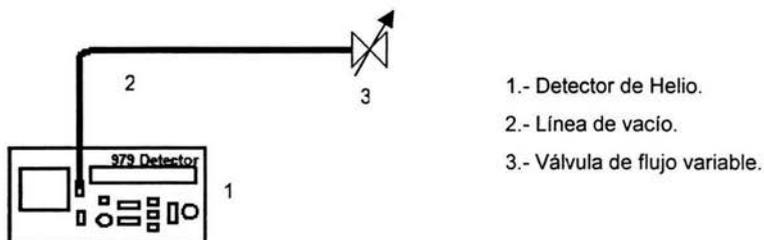


Fig. 4.1  
Dispositivo para Localización de fugas

En el arreglo de la Fig. 4.1, el detector se encuentra en el modo sniffer para realizar la exploración del contenedor con la sonda flexible; La válvula en el extremo se ajusta según los requerimientos del sistema.

Cabe destacar que por la naturaleza del trazador, su difusión en el medio ambiente es muy alta y en dirección ascendente, por lo que, la exploración de juntas se deba realizar con el sniffer en posición vertical haciendo el recorrido hacia delante y hacia atrás del punto máximo de señal registrada en el detector, como se muestra en el diagrama (b) de la Fig.4.2

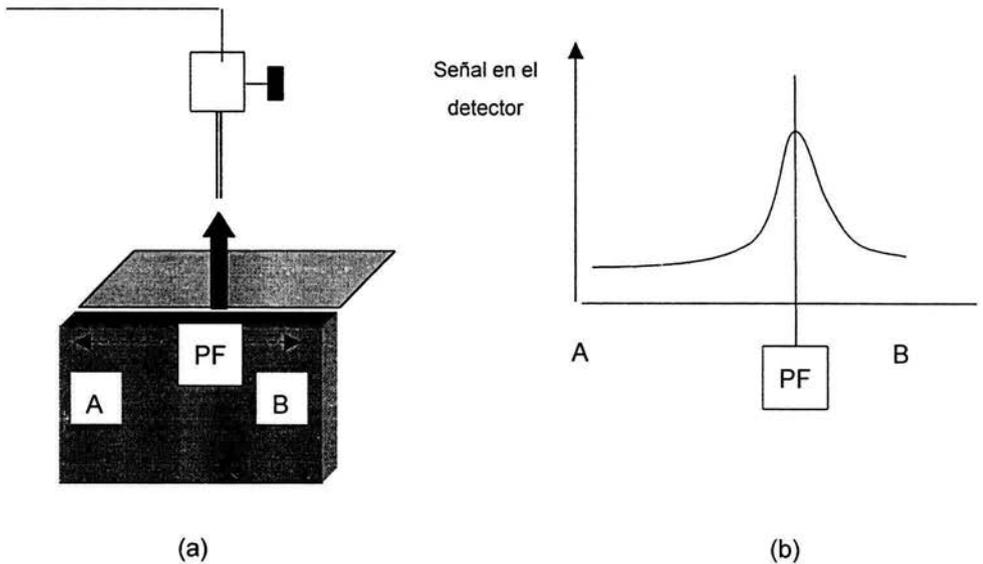


Figura 4.2  
Posición correcta del sniffer.

Una vez localizadas las fugas parciales del sistema se procede a la evaluación de cada una de ellas.

## Segunda etapa: Evaluación de las fugas localizadas.

Para la evaluación de las fugas parciales, se propone un arreglo como se muestra en la Fig. 4.3; el detector se conecta con una sonda flexible de longitud variable (dependiendo de la ubicación del sistema a evaluar). La sonda cuenta con una cámara de volumen fijo, dos válvulas abrir-cerrar y un cachador en su extremo final.

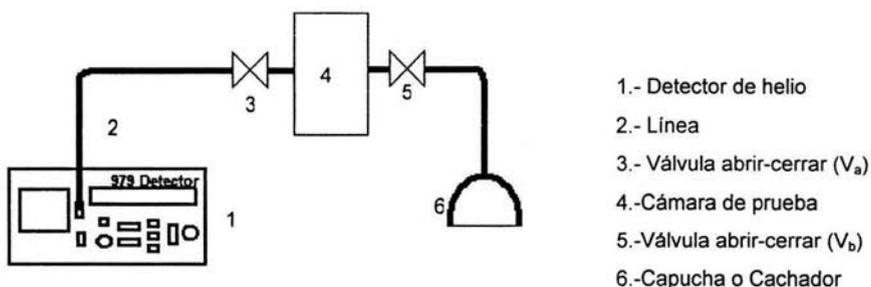


Fig. 4.3

Dispositivo para la evaluación de fugas con baja concentración de helio

Para iniciar la evaluación

-El detector se posiciona en modo sniffer y se conecta la sonda propuesta para la evaluación.

-Se enciende el detector, manteniendo la válvula  $V_a$  abierta y la válvula  $V_b$  cerrada, esta acción es para bajar la presión en la línea de vacío y en la cámara de prueba.

-Cuando se alcancé el rango de presión de trabajo del detector  $—1 \times 10^{-3}$  torr— el cachador se posiciona en el lugar de la fuga, para que retarde a difusión del helio en el medio ambiente. El cachador puede tener la forma de un

paraboloide o una media esfera, de tal forma que cubra en medida de lo posible el punto de fuga, como se muestra en la figura 4.4.

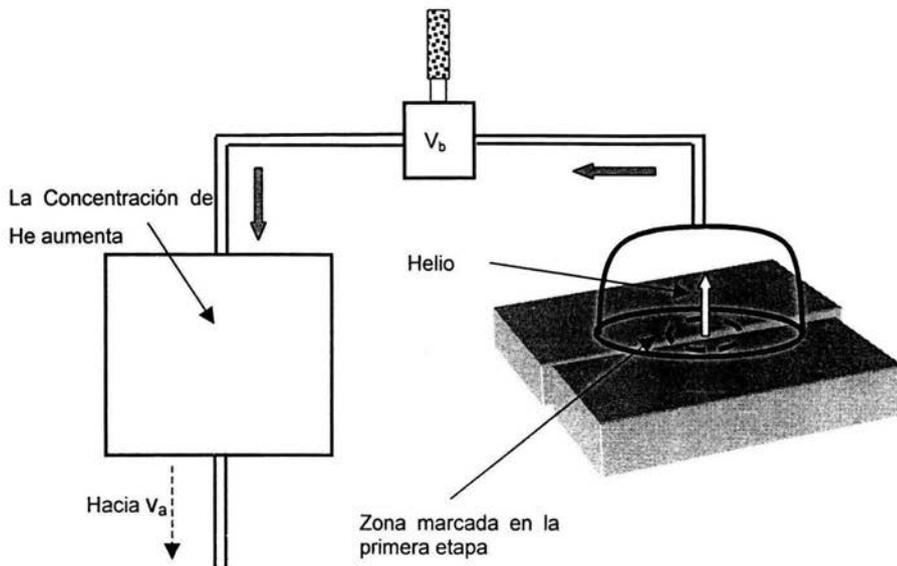


Fig. 4.4  
Posición y forma del cachador para la evaluación de fugas

-Se abre la válvula  $V_b$ , para que el gas fluya hacia la cámara de prueba y al término del intervalo de tiempo establecido para la evaluación, se cierra la válvula.

-La válvula  $V_a$  se abre, para dar paso al gas hacia el detector de helio; La lectura de la tasa de fuga se registra.

-Nuevamente se baja la presión de la cámara de prueba, y se coloca el cachador en otra fuga en caso de existir y se repite el procedimiento anterior.

Se suman todas las lecturas registradas para poder obtener la fuga total del sistema.

Por ultimo la fuga total del sistema es comparada con una curva patrón que sirve como base para determinar si el sistema cumple con la condición de hermeticidad requerida.

La curva patrón se puede obtener por medio del arreglo de la Figura 4.5

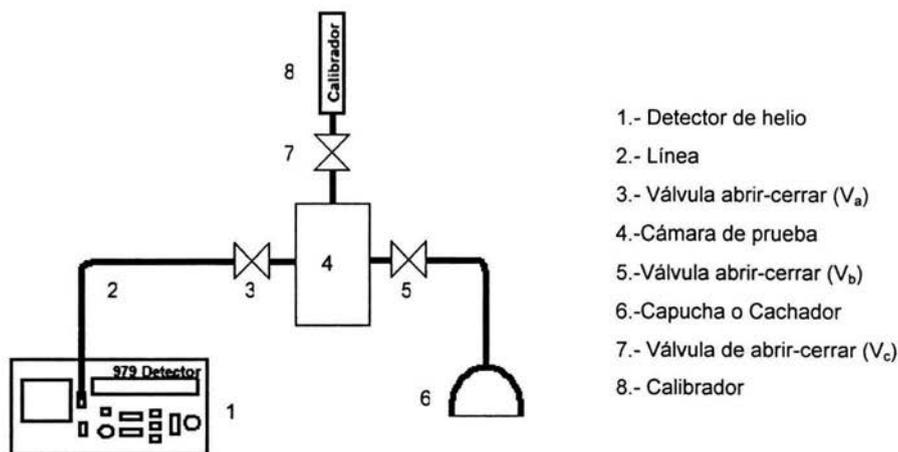


Figura. 4.5  
Dispositivo para referencia

El arreglo de la Figura 4.5, muestra al detector de Helio con una sonda flexible que tiene una cámara de prueba en medio de dos válvulas abrir-cerrar y un cachador, la cámara de prueba esta en contacto con un calibrador de helio por medio de otra válvula abrir-cerrar.

El arreglo de la Figura 4.5 es el semejante al utilizado en las pruebas de evaluación, pero la modificación de anexar el calibrador de helio, permitirá tener una referencia. Está se obtiene haciendo uso del método descrito en el Capítulo 3 y con la concentración de helio que proporciona el calibrador.

## CONCLUSIONES

Antes de la realización del presente trabajo, mis conocimientos relacionados con la hermeticidad eran casi nulos y mucho menos conocía la importancia que tiene en la tecnología actual, a nivel investigación y en la industria. Para iniciar el trabajo sobre el tema de evaluación de la hermeticidad, se presentó la oportunidad de conocer a un fabricante de válvulas para gas, utilizadas en escuelas y de un investigador del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, que necesitaban saber si sus sistemas cumplían con la condición de hermeticidad requerida para el funcionamiento óptimo de estos. Lo que me permitió tener un panorama sobre la importancia de la hermeticidad de sistemas, en los cuales es necesario que cumplan con esta condición, y conocer los problemas que tiene los métodos de evaluación tradicionales, ya que no ofrecen una evaluación adecuada.

Es importante destacar, que los fundamentos físicos útiles para el diseño y la fabricación de los dispositivos utilizados en las pruebas realizadas, se diseñaron primero teóricamente aplicando los conocimientos adquiridos durante la carrera de Física, la cual al llevarla a la práctica, difiere con el trabajo en el laboratorio, los cuales sólo se perciben durante su elaboración.

En el manejo del detector de Helio fue necesario comprender el principio físico de operación, ya que la condición de alto vacío en el sistema es indispensable y si existe una mala sincronización de las válvulas o una operación deficiente por parte del usuario, podría sufrir daños irreparables, por lo que fue necesario conocer y

"sentir" el comportamiento de los gases en sus diferentes regímenes, tal como sucede con la presión como variable macroscópica asociada a un volumen que los obliga a tener comportamientos diferente, ya que en presiones cercanas a la atmosférica, debe tratarse como volumen, no así cuando la presión es menor, en donde se trata como partícula libre.

También al buscar la información presentada en diversas fuentes, se afirma que la técnica más sensible y confiable para toda aplicación es la de uso de trazador de helio, por lo que considero que el Taller de Vacío del Edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias donde se realizó el presente trabajo esta capacitado para realizar cualquier de prueba de hermeticidad, ya que cuenta con un Detector de Helio marca Varian modelo 979 operando en condiciones óptimas, esto asegura que los resultados que se presentaron en el Capítulo correspondiente, son confiables y el método sugerido es aplicable.

Por otra parte la metodología propuesta, permite la evaluación de la hermeticidad de sistemas que no cuenten con un sistema de vacío propio, permitiendo medir tasas de fuga desde  $1 \times 10^{-3}$  hasta  $1 \times 10^{-10}$  ScCs de helio, ya que con la modificación de la sonda de prueba, se pueden obtener evaluaciones de fugas totales y de fugas parciales; además, al tener una válvula de flujo variable, se puede considerar otra variable controlada, es decir, se puede modificar el intervalo de trabajo cambiando la conductancia de la válvula y el tiempo de acumulación, ya que lo importante es hacer que la presión parcial de helio que existe en la mezcla

y está en contacto directo con la nariz de la sonda llegue a la cámara de prueba y así evaluar de manera confiable la fuga.

Con la elaboración de las mezclas obtuve:

Primero: pude obtener el valor de la tasa de fuga real con helio a baja concentración, lo que reduce el costo de la prueba.

Segundo: al aumentar el tiempo de acumulación, pude obtener el valor de la tasa de fuga real, con excepción de concentraciones muy pobres de helio en la mezcla.

Tercero: al ser muestras volumétricas, pude tener control de la concentraciones de helio involucradas en los experimentos y así mismo se pobra tenerlo en sistemas de volúmenes de gran capacidad.

### **Aplicaciones**

La metodología propuesta se pueden utilizar en la aplicación de:

- Tuberías, cilindros, llaves, tanque y transportes de gas
- Condensadores o torres de enfriamiento
- Sistemas de refrigeración de gran volumen
- Sistemas criogénicos
- Líneas de transporte y contenedores de gases y líquidos

Como el método de evaluación de la hermeticidad descrito es una propuesta, la cual al llevarla hacia la implementación real, probablemente requerirá modificaciones y ajustes; se plantea una continuación del presente trabajo, que consiste en la evaluación de la hermeticidad de un sistema de gran volumen.

## Bibliografía

1. Robert M. Eisberg & Lawrence S. Lerner, FÍSICA Fundamentos y Aplicaciones, editorial McGraw- Hill, 1990.
2. Samuel Glasstone, Termodinámica para químicos, editorial Aguilar, Madrid 1960.
3. José Segura Clavel, Termodinámica técnica, editorial A.C. libros científicos y técnicos, Madrid 1976.
4. Lewin Gerhard, Fundamentos de la ciencia y técnica del vacío, editorial Aguilar, 1972.
5. Wilson N.G. and Bebáis L.C., Handbook of vacuum leak detection, American Vacuum Society, 1976.
6. Leak detection application & techniques courses, Varian Vacuum Training.
7. Introduction to He mass spectrometer leak detection, Library of congress catalog card number 80-54419, September 1995.
8. Héctor de Jesús Cruz-Manjarrez Flores-Alonso, Comunicación Verbal.
9. Manual de operación del Leak detector model 979, Varian.
10. Manual operación del 930-40 Porta-Test Leak Detector, Varian