

01173

3  
207

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
(DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO)

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TUBO ABSORBEDOR EVACUADO  
CON UNIONES VIDRIO METAL DESARMABLES

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICA

P R E S E N T A  
CARLOS RAUL SANDOVAL ALVARADO

MEXICO, D.F.

1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Profesor:  
DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO  
P r e s e n t e .

Comunico a usted que a propuesta del Jefe de la Sección de Ingeniería (MECANICA), ha sido designado director de tesis del alumno CARLOS RAUL SANDOVAL ALVARADO, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería (MECANICA).

Mucho me da agradecerle su comunicación por escrito a la aprobación a esta designación y el nombre de la tesis a desarrollar.

Atentamente,  
"POR MI RAZA HABLABA EL ESPIRITU"  
C.E. Universitaria. 23 de septiembre de 1991  
EL JEFE DE LA DIVISION

  
ING. JUAN DAMY RIOS

JDR:HCC:masa

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA

RECIBI NOTIFICACION PARA EL EXAMEN DEL ALUMNO CARLOS PAUL SANDOVAL  
VALDEARVARADO

Departamento DE INGENIERIA ELECTROMECANICA

Seccion MECANICA

JURADO	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE: M. EN I. MANUEL AGUIRRE GANDARA	<i>Manuel Aguirre</i>	Oct 3 '91
VOCAL: DR. CARLOS MAZARI PENZER	<i>Carlos Mazari</i>	17 Oct. 91
SECRETARIO: DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO	<i>Rafael Almanza</i>	oct 3, 91
SUPLENTE: DR. ANGEL ROJAS SALGADO	<i>Angel Rojas</i>	oct 10/91
SUPLENTE: DR. ARON JACILENTE DIARRA	<i>Aron Jacilente</i>	OCT /11/91

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## INDICE

	Pagina
- RESUMEN	I
- OBJETIVOS DE TRABAJO	III
- INTRODUCCION	1
- ANTECEDENTES	6
1. COLECTORES SOLARES CILINDRICO PARABOLICOS	10
1.1) FUNCIONAMIENTO	12
1.2) INSTALACION	12
2. ESFUERZOS ENTRE CUERPOS ELASTICOS	15
2.1) MATERIALES COHESIVOS	16
2.1.1) RESISTENCIA MECANICA	18
2.2) DEFORMACION PLASTICA	18
2.3) ESFUERZOS COMPRESIVOS Y ANCHO DEL AREA DE CONTACTO	19
2.4) FALLA EN MATERIALES SOLIDOS SOMETIDOS A COMPRESION	28
3. UNION VIDRIO METAL	31
3.1) SELLADO VIDRIO METAL	32
3.2) SELLOS METALICOS	38
3.3) CONTROL DE ESFUERZOS COMPRESIVOS	40
3.3.1) DISPOSITIVO DE RESORTES	42
3.3.2) CALIBRACION DE LOS RESORTES	42

	Pagina
4. SISTEMA DE ALTO VACIO	44
4.1) PERMEABILIDAD EN METALES	44
4.2) PRESION DE VAPOR Y DESGASIFICACION EN METALES	45
4.3) MATERIALES USADOS PARA CAMARAS DE VACIO	48
4.4) VELOCIDAD DE BOMBEO Y CONDUCTANCIA	50
4.5) DESCRIPCION DEL SISTEMA DE VACIO EMPLEADO	51
4.5.1) BOMBA MECANICA	52
4.5.2) BOMBA DE DIFUSION	54
4.5.3) MEDIDORES DE VACIO	57
4.5.3.1) MEDIDOR POR TERMOPAR	57
4.5.3.2) MEDIDOR POR IONIZACION	60
4.6) FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	63
4.7) PRUEBAS A TEMPERATURA VARIABLE	63
5. TUBO ABSORBEDOR EVACUADO	64
5.1) DEFINICION DE TUBO ABSORBEDOR	64
5.2) FUNCIONAMIENTO	65
5.3) DISEÑO DE LA CUBIERTA PROTECTORA DE VIDRIO	65
5.4) DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS DE LABORATORIO	66
5.4.1) TUBO ABSORBEDOR CON TUBO DE VIDRIO	
DE BOQUILLAS CUADRADAS	66
5.4.1.1) VENTAJAS DEL NUEVO DISEÑO	70
5.4.1.2) INCONVENIENTES EN LOS NUEVOS	
DISEÑOS	70

	Pagina
5.4.2) TUBO ABSORBEDOR CON TUBO DE VIDRIO DE BOQUILLAS CONICAS	71
5.4.2.1) VENTAJAS DEL NUEVO DISEÑO	71
5.4.2.2) LIMITACIONES DEL NUEVO DISEÑO	72
5.5) PROCESO DE CONSTRUCCION Y PUESTA EN MARCHA DE LOS PROTOTIPOS DE LABORATORIO	72
5.5.1) PROCESO DE FABRICACION	72
5.5.2) ARMADO DE LOS PROTOTIPOS	72
5.5.2.1) CON TUBO DE BOQUILLAS CUADRADAS	72
5.5.2.2) CON TUBO DE BOQUILLAS CONICAS	73
6. DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	74
6.1) PRIMERAS PRUEBAS DE VACIO CON BOMBEO MECANICO Y SELLOS DE VITON	74
6.2) PRUEBAS DE VACIO CON BOMBEO DE DIFUSION	80
6.3) VALVULA METALICA DE AGUJA	81
6.4) VALVULA DE ACERO CON SELLO DE COBRE	86
6.5) SELLOS METALICOS EN TODO EL SISTEMA, BRIDAS COMPRIMIDAS A FUERZA CONSTANTE	91
- CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	96
- APENDICE A TEORIA CINETICA DE LOS GASES	107
- APENDICE B CAMINO MEDIO LIBRE	111

-	APENDICE C	TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE TUBO ABSORBEDOR Y ENVOLVENTE	116
-	APENDICE E	CONCENTRACION DE ESFUERZOS EN METALES Y ALGUNAS PROPIEDADES MECANICAS DE METALES UTILIZADOS COMO SELLOS PARA VACIO	123
-	REFERENCIAS		
-	BIBLIOGRAFIA		



## RESUMEN

Partiendo del diseño de los concentradores solares cilíndrico parabólicos utilizados inicialmente en la planta solar experimental construida en terrenos del Jardín Botánico de la UNAM, por parte del Instituto de Ingeniería, se modifica el diseño de los tubos absorbedores usados en cada módulo con el propósito de mejorar su eficiencia y vida media al protegerlos contra cambios bruscos de temperatura.

El resultado obtenido al rediseñar estos colectores en un concentrador solar del tipo canal parabólico con tubo absorbedor evacuado y uniones vidrio metal realizadas con sellos metálicos es el permitir armar concentradores solares modulares contenidos en tubos absorbedores evacuados y uniones vidrio metal desarmables. Además, los diseños se han ideado para proteger a los tubos absorbedores evacuados contra oscilaciones térmicas diurnas.

El sellado para vacío en la unión vidrio metal se logra por medio de anillos metálicos unidos a fuelles metálicos que permiten compensar las diferencias de dilatación térmica entre el vidrio y el metal, evitando la fractura del vidrio y la pérdida de vacío.

Los sellos se comprimen entre el vidrio y el metal por medio de un arreglo de bridas y resortes, controlando los esfuerzos compresivos necesarios para plastificar el sello metálico y mantener una unión vidrio metal rígida.

Esta tecnología facilita la construcción de sistemas generadores de electricidad utilizando energía solar.

## OBJETIVOS DE TRABAJO

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de un tubo absorbedor evacuado para ser utilizado en un concentrador solar cilíndrico parabólico que funcione con las siguientes características :

- a) El vacío entre el tubo absorbedor y su cubierta protectora de vidrio debe mantenerse por períodos de tiempo prolongados (del orden de años), a presiones entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$  Torr sin bombeo continuo.
- b) El sellado vidrio metal no se destruya ante variaciones en la temperatura del sistema.
- c) El colector y su tubo absorbedor deben acoplarse fácilmente a otras unidades.

En lo que se refiere a pérdidas de calor en el tubo absorbedor, debidas a transferencia de calor por conducción, radiación y convección, se pretende minimizarlas o eliminarlas considerando lo siguiente:

- a) Dimensionando adecuadamente el tubo absorbedor y su cubierta protectora, de acuerdo a las condiciones ambientales y de trabajo.
- b) Utilizando superficies selectivas en el absorbedor metálico.
- c) Evacuando el espacio anular entre absorbedor y su envolvente con presiones de  $10^{-4}$  Torr o menores.

## - INTRODUCCION

Gran parte de la superficie de la República Mexicana se caracteriza por tener muchos días soleados al año, con una radiación solar incidente de importancia como se muestra en la figura A (ref. 1), con lo que se tiene una importante información para desear la utilización y aprovechamiento de concentradores solares con el objeto de captar la energía solar y obtener calor al calentar un fluido a temperaturas entre 300 °C y 400 °C, pudiéndose captar suficiente energía calorífica para ser utilizada en procesos termomecánicos para producir electricidad ó generar vapor.

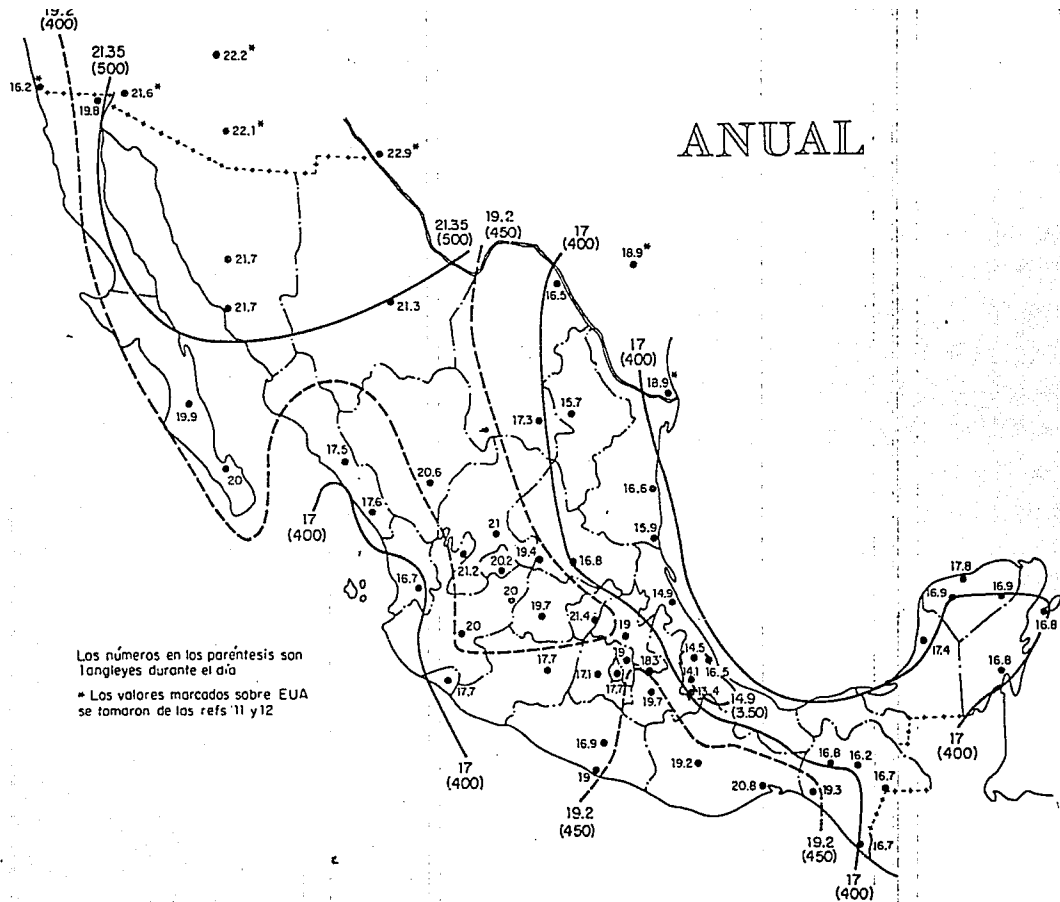


Fig A Promedio de irradiación global diaria, en MJ/m<sup>2</sup>

Entre los usos más comunes se tiene: cocinado de alimentos, calentadores de agua para baños públicos, secado de granos y plantas desaladoras de agua de mar.

Uno de los aspectos más importantes respecto a la utilización de la radiación solar es el costo de los dispositivos que transforman dicha energía en alguna de las formas convencionales, como son el calor o la electricidad.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se han realizado investigaciones sobre la conversión de energía solar en energía térmica, mecánica o eléctrica por medio de concentradores solares cilíndrico parabólicos, los cuales constan de espejos cóncavos en cuyas líneas focales se concentra la radiación solar directa sobre un tubo metálico (tubo absorbedor) colocado en esta línea (figura B) . En el tubo fluye aceite o agua, el cual se calienta al pasar por el tubo (ref. 2 ).

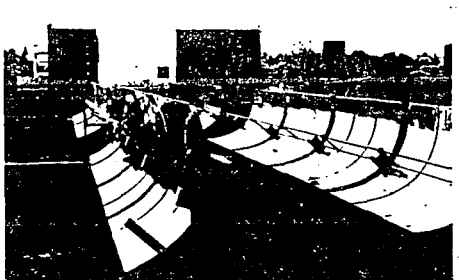


Fig. B Concentrador Solar Cilíndrico parabólico

La eficiencia de un concentrador como el descrito anteriormente depende de múltiples factores, como son: la reflejancia del material utilizado como espejo, la geometría del espejo (canal cilíndrico parabólica), absortancia y emitancia de la película selectiva depositada en el tubo absorbedor, tipo de fluido empleado y el tipo de unión vidrio metal que mantendrá un vacío entre el tubo absorbedor y su cubierta de vidrio (Pyrex) y condiciones ambientales entre otros.

Los colectores solares cilíndrico parabólicos funcionan más eficientemente al estar evacuado el espacio anular entre el tubo absorbedor y la cubierta protectora de vidrio Pyrex, pues disminuye la pérdida de calor en el tubo absorbedor debido a la transferencia de calor por la convección y conducción del aire en ese espacio anular (fig. C), disminuyendo notablemente estas pérdidas a presiones menores a  $10^{-4}$  Torr. Además, la vida media de la película selectiva se incrementa (ref. 3) al no tener aire con el cual interaccionar.

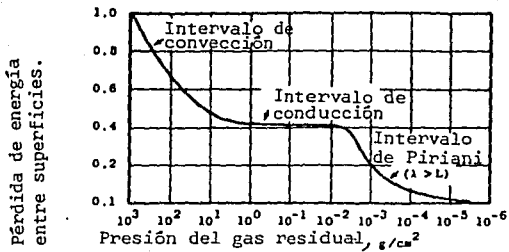


Fig. C Variación cualitativa de pérdida de energía entre superficies como una función de la reducción de presión. (  $1 \text{ gr/cm}^2 = .74 \text{ Torr}$  )  
(ref. 3)



- ANTECEDENTES

La demanda creciente de energía eléctrica por parte de la población, así como la necesidad de disminuir la contaminación ambiental, obliga a las autoridades encargadas del abastecimiento del fluido eléctrico a buscar fuentes alternas que suministren la energía que se logra producir principalmente con combustibles de origen fósil orgánico e hidroeléctricas, siendo la energía solar una fuente que aún no se ha aprovechado en alto porcentaje, pues la construcción de las instalaciones necesarias para su captación, transformación en energía eléctrica y distribución comercial todavía se encuentran a nivel de prototipos, y su precio se acerca a ser competitivo con otros procesos de conversión de energía.

Las plantas solares que utilizan a los captadores de enfoque, para poder captar la energía solar que llega al colector como radiación solar directa (no difusa), transforman la energía solar en energía térmica, la cual a su vez será utilizada en procesos de generación de electricidad o procesos de producción de trabajo mecánico.

El costo de construcción de un Sistema Generador de Energía Solar (planta SEGS) es alto, por ejemplo: Construir la red actual de plantas SEGS de la compañía "LUZ INTERNATIONAL", ubicada en el desierto de Mohave en E.E.U.U. (fig. D), costó a Luz y sus asociados mil millones de dolares (ref. 5); esta planta consta de nueve SEGS y se planea que produzca setecientos megawatts de electricidad en el año 1995, teniéndose actualmente 350 megawatts instalados con un área de colectores de 2,300,000 m<sup>2</sup> (ref. 6).

Cada planta SEGS requiere de un mantenimiento que cuesta cuatro y medio a cinco millones de dolares al año, siendo actualmente el mejor promedio de conversión logrado experimentalmente del orden del veinticinco por ciento.

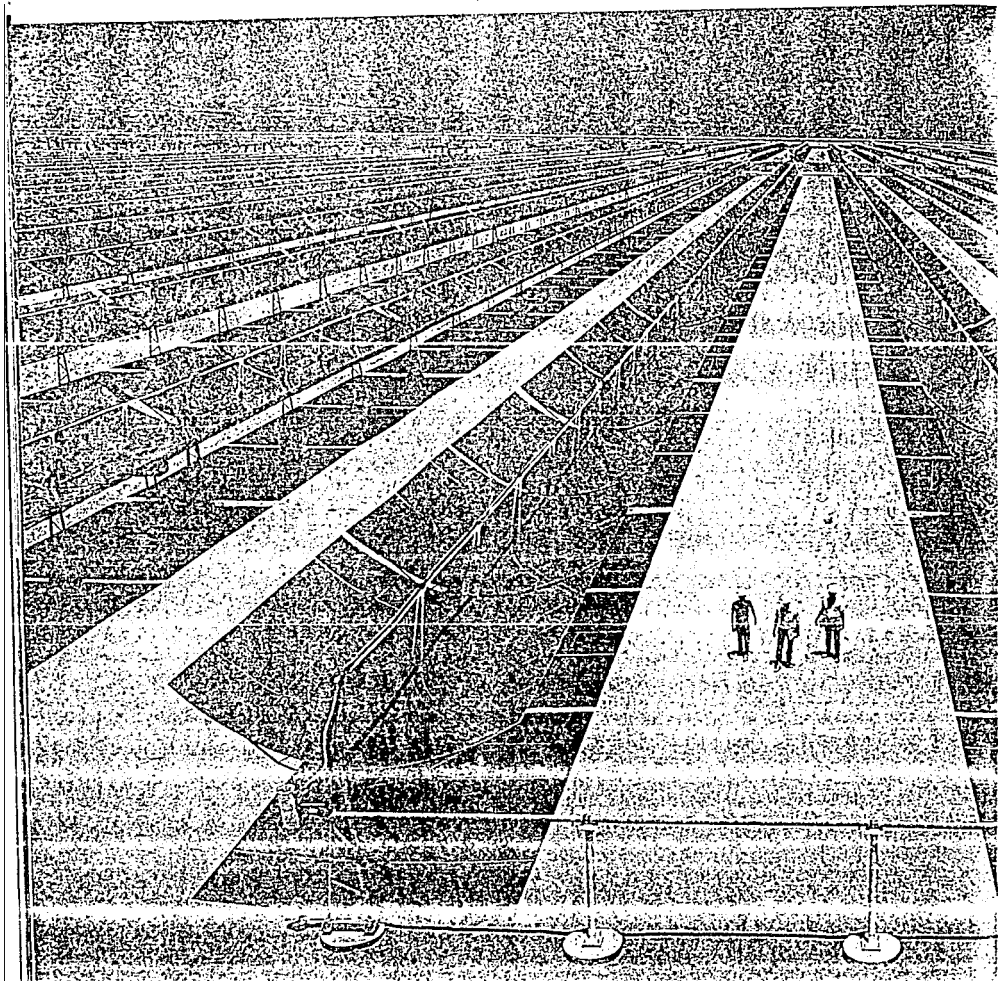
La electricidad generada en las SEGS cuesta al consumidor entre ocho y nueve centavos de dolar por Kilowatt-hora, pero el costo por unidad eléctrica es de cinco a siete centavos de dólar para la energía generada por las plantas que funcionan con carbón o con

Fig. D

# EL PODER DE LA

# LUZ

Texto: © Robert Lamb / Science Photo Library  
Fotos: Hank Morgan / Science Photo Library

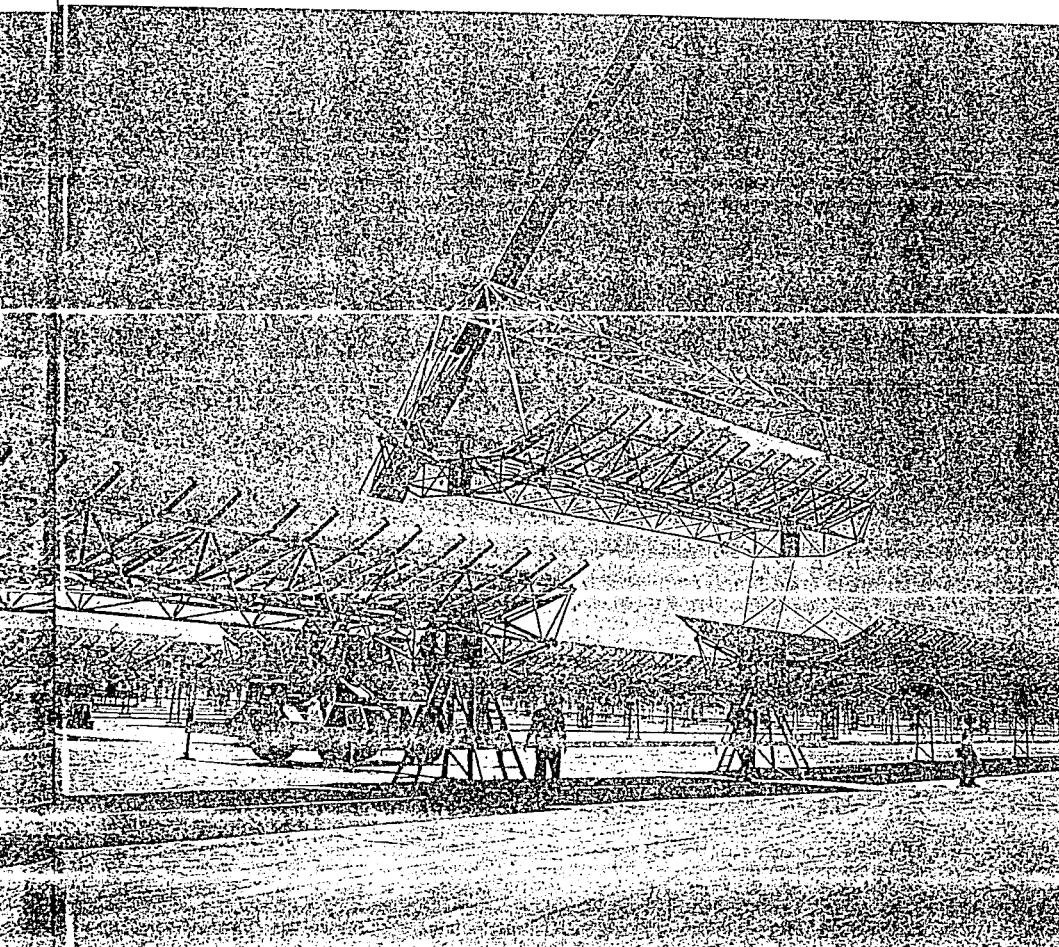
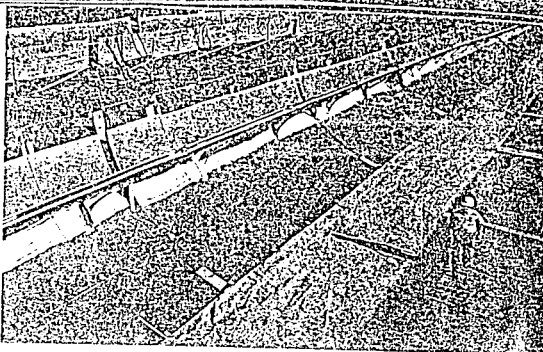


combustible extraído del petróleo, aunque ya se logró que la energía eléctrica producida en las SEGS sea más barata que la energía nuclear (el costo del Kw-h generado es de ocho centavos de dólar). Actualmente el costo del manejo de desperdicios radioactivos y la seguridad de estas plantas es alto, elevando los costos de producción. También en estudios recientes de externalidades se considera que para termoeléctricas con funcionamiento a base de petróleo o carbón, el costo del kilowatt hora generado está entre ocho y doce centavos de dólar (ref. 6).

## 1. COLECTORES SOLARES CILINDRICO PARABOLICOS

Un colector cilíndrico parabólico consta de una superficie reflectora de la radiación solar, o sea, espejos hechos con lámina de acrílico aluminizado ó plateado al alto vacío, colocados en conchas de fibra de vidrio en forma de canal parabólica. Cuenta en la línea focal con un tubo metálico (ver fig. 1.1), el cual tiene la función de absorber la radiación solar directa que es recibida por los espejos, y reflejada hacia este tubo, el cual está colocado en el interior de un tubo de vidrio para protegerlo de la intemperie, o sea: de agua, polvo, contaminación ambiental y viento entre otros factores.

Las plantas de energía solar se instalan en lugares de alto índice de insolación, como los desiertos, manipulándose los espejos con computadoras para que siempre apunten hacia el Sol y reciban su energía hasta el último momento del día.



## 1.1) FUNCIONAMIENTO

La radiación solar que es captada por los espejos es concentrada en el foco del canal parabólico, en el cual se encuentra colocado un tubo metálico (cobre o acero). Estos concentradores cuentan con un dispositivo mecánico que les permite seguir el movimiento aparente del sol durante todo el día, logrando con esto un enfoque continuo sobre el tubo absorbedor (ref. 7).

Dentro del tubo de metal (tubo absorbedor) fluye un líquido, el cual se calienta por la radiación solar que incide sobre él. El fluido caliente circula a través de un intercambiador de calor sumergido en agua, calentándola ó generando vapor.

Los colectores solares funcionan más eficientemente al ser evacuado el espacio anular entre el tubo metálico y el tubo de vidrio (ref. 8), pues disminuyen las pérdidas de calor por convección y conducción del aire en ese espacio, siendo casi cero las pérdidas de calor a presiones menores a  $10^{-4}$  Torr. (figura 1.2 y 1.3).

## 1.2) INSTALACION

Las plantas de energía solar se instalan en lugares de alto índice de insolación, como lo son los desiertos, manipulándose los espejos para que siempre apunten hacia el sol, y reciban energía del sol, lo más posible, en el transcurso del día. El mejor promedio de conversión, de energía solar a energía eléctrica, logrado experimentalmente es del orden del veinticinco por ciento, pues la eficiencia en los dispositivos convertidores de la energía solar en energía mecánica o eléctrica es baja, debido a la baja densidad de radiación solar recibida en la superficie de la tierra, lo cual obliga a emplear grandes áreas de captación (espejos), encareciendo los costos de las instalaciones.

Actualmente se tienen plantas solares comercialmente en uso como la planta SEGS VIII de la compañía "LUZ INTERNATIONAL", con una capacidad de producción de 80 MW de energía eléctrica a partir de la utilización de 1.2 Km<sup>2</sup> de tierras áridas e improductivas, en las cuales se ha colocado una gran cantidad de espejos ( cerca de 600,000 ), rotando juntos bajo un control computarizado, para seguir en su trayectoria al sol (ref. 5).



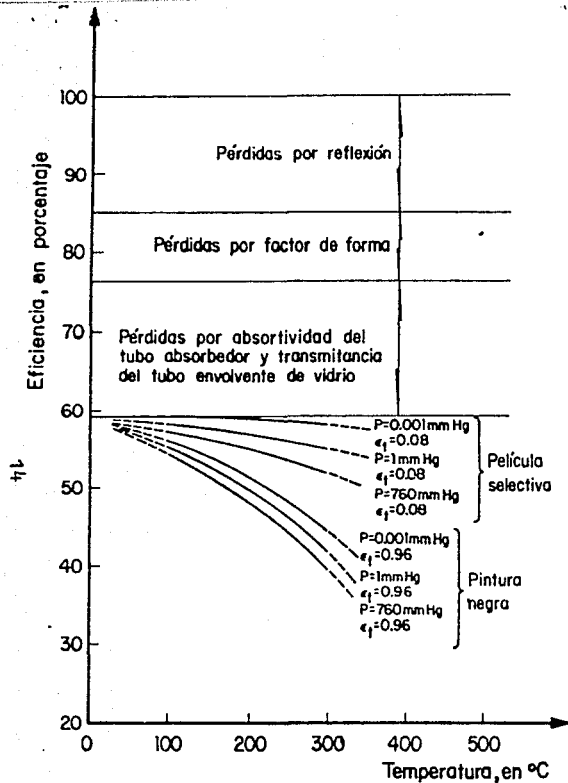
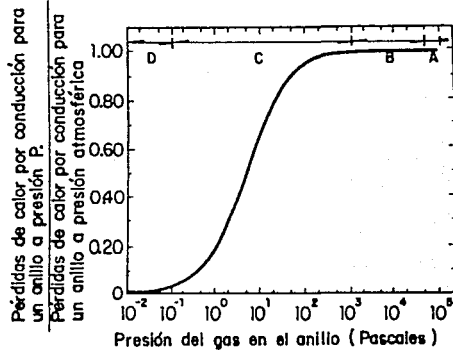


Fig 1.2 Eficiencia de un concentrador tipo canal parabólico



Temperatura del tubo absorbedor: 316 °C

Temperatura del vidrio envolvente: 93 °C

A: Posibles pérdidas de calor por convección y conducción

B: Pérdidas de calor constantes debidas a conducción

C: Reducción de pérdidas de conducción debido al aumento en el camino medio libre de las moléculas

D: Pérdidas de calor por conducción despreciables

Fig 1.3 Efecto de la reducción de presión en el anillo formado por el tubo absorbedor y la envolvente de vidrio

## 2. ESFUERZOS ENTRE CUERPOS ELASTICOS

Con el fin de entender el comportamiento de la unión vidrio metal, en los tubos absorbedores evacuados, es necesario realizar estudios del comportamiento elasto plástico de los materiales que intervienen en dicha unión. El estudio del comportamiento elasto plástico, a nivel macroscópico, de los sólidos sometidos a esfuerzos que le produzcan cambios permanentes en su forma, se efectua utilizando técnicas del medio continuo, entendiéndose por medio continuo el utilizar como modelo del sólido en estudio a un cuerpo que ocupa un lugar en el espacio sin huecos ni porosidades.

Esta definición de medio continuo no es válida si se trata de objetos cuyas dimensiones se aproximan a las dimensiones moleculares.

## 2.1) MATERIALES COHESIVOS

Los medios granulares pueden presentar características cohesivas, friccionantes ó una combinación de ambas (en suelos el agua juega un papel importante en su comportamiento cohesivo). En general, los metales presentan características cohesivas (resistencia al esfuerzo cortante) y pueden tratarse con técnicas del medio continuo (elasticidad y plasticidad). De donde, si el esfuerzo compresivo en el cuerpo es tal que la ley de Hooke deja de ser aplicable, entonces, el material presenta un cambio permanente en su forma conocido como deformación plástica (ref. 9).

Al comprimir un cilindro contra una placa (que puede ser de distintos materiales) se forma una superficie de contacto entre ambas, que depende de la presión con la que son puestas en contacto. El número de partículas que interactúan en la unión, las cuales pueden ser átomos ó moléculas, depende de los materiales empleados en la construcción de la placa y el cilindro.

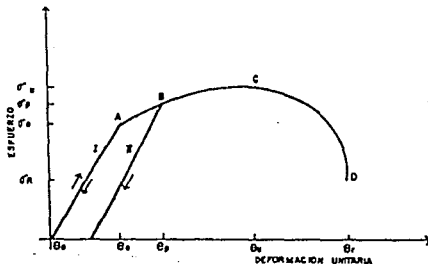
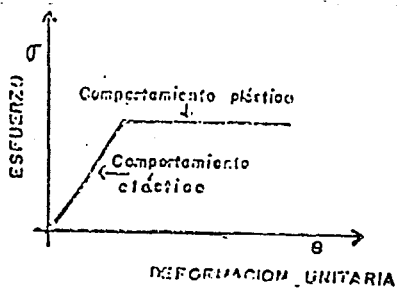


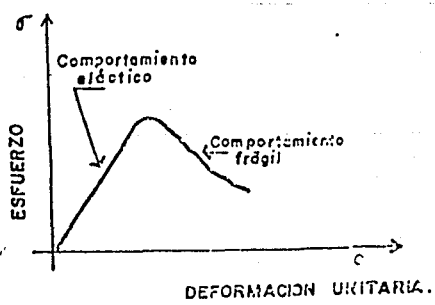
Fig. 2.1 Esfuerzo-Deformación en materiales dúctiles

En la curva I de la figura 2.1, se observa que al aplicar un esfuerzo  $\sigma$  a un sólido elástico (caso ideal) tal que no exceda el límite elástico  $\sigma_e$ , el material regresa prácticamente a su estado original (punto  $e_0$ ) al suprimir el esfuerzo  $\sigma$ . A partir del límite elástico (punto A), cualquier aumento en el esfuerzo  $\sigma$  (menor y próximo a  $\sigma_p$ ) producirá una deformación permanente; al disminuir éste esfuerzo, el material se recupera elásticamente, siguiendo la curva II. A partir del punto B, el material es capaz de seguir soportando nuevos incrementos en el esfuerzo, con deformaciones cada vez mayores. Se llega así al punto C, que tiene la máxima ordenada del diagrama y representa el máximo esfuerzo soportado, este esfuerzo es conocido como resistencia última  $\sigma_u$ . A partir del punto C, la deformación aumenta, aún con disminución en el esfuerzo, principiando la fractura y apareciendo finalmente la ruptura en el punto D.

En un medio elasto-plástico (caso ideal), se tiene el comportamiento mostrado en la figura 2.2; para materiales frágiles como el vidrio se tiene el comportamiento mostrado en la misma figura, (los cuales pueden ser distintos en función de grandes tiempos).



A) Medio elasto-plástico



B) Materiales frágiles

Fig. 2.2 Diagramas Esfuerzo-Deformación

(caso ideal)

El modelo continuo de un cuerpo elástico predice la existencia de tensiones muy altas en los vértices o aristas de los sólidos, por ésto es importante cuidar el no tener aristas con corte agudo en materiales frágiles como son el vidrio o las cerámicas, pues al someter estos materiales a esfuerzos de tensión, compresión, o de flexión, se puede producir una concentración de esfuerzos en las aristas no redondeadas, produciéndose el agrietamiento y posible fractura del material.

### 2.1.1) RESISTENCIA MECANICA

Conociendo el valor de las fuerzas de cohesión que ligan a los átomos entre sí, en un cuerpo cristalino se puede determinar la resistencia mecánica del material (resistencia mecánica teórica).

Se puede construir una muestra del material y determinar experimentalmente el valor de esta resistencia mecánica (resistencia mecánica técnica), siendo considerablemente inferior la magnitud de la resistencia mecánica técnica en comparación con la resistencia mecánica teórica. Esta diferencia puede explicarse si se consideran las mellas, raspaduras, rasguños, grietas y otras imperfecciones y defectos superficiales del material, siendo la perfección de la estructura interna (cristalina) la causa de que la resistencia mecánica técnica sea elevada y muy cercana al valor teórico. Por lo tanto, al eliminar las imperfecciones superficiales se eleva la resistencia mecánica técnica.

### 2.2) DEFORMACION PLASTICA

Al comprimir un material, en forma de cilindro, contra otro material en forma de placa, se deforman ambos materiales,

produciéndose una superficie de contacto entre ambos materiales. Si el esfuerzo compresivo es de tal magnitud que el comportamiento elástico deja de presentarse, se produce una deformación permanente conocida como deformación plástica, siendo el límite elástico el esfuerzo en el cual el material pierde su comportamiento elástico, y el esfuerzo último es el esfuerzo máximo que puede soportar un material antes de la ruptura (fig. 2.1 punto D).

### 2.3) ESFUERZOS DE COMPRESION Y AREAS DE CONTACTO

*Timoshenka* en el año 1934 obtuvo las ecuaciones para calcular los esfuerzos de compresión y el ancho del área de la superficie generada al poner en contacto un cilindro y un plano bajo esfuerzos compresivos a los dos materiales .

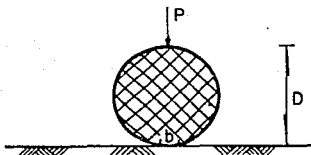


Fig. 2.3 Cilindro sobre plano semi-infinito

Para el caso de un cilindro de sección circular que es comprimido sobre un plano (fig. 2.3), las ecuaciones para obtener el máximo esfuerzo compresivo ( $\sigma_{\text{Max}}$ ), y el ancho del área de contacto ( $b$ ) son:

$$\text{Máx.Sc} = 0.056 \sqrt{\frac{P}{D \left\{ \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right\}}} \quad (1)$$

$$b = 4.06 \sqrt{PD \left\{ \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right\}} \quad (2)$$

donde

Máx.Sc es el máximo esfuerzo compresivo

b es el ancho de la superficie de contacto

E es el módulo de elasticidad

$\nu$  es el módulo d Poisson

D es el diámetro del cilindro

P es la carga por unidad de longitud

Para los materiales indicados en la tabla I, los valores del máximo esfuerzo compresivo y del ancho de la superficie de contacto en función del diámetro del cilindro a ser comprimido, y para valores de la carga por unidad de longitud del cilindro iguales a 1 Kg/cm, 10 Kg/cm y 100 Kg/cm , se obtuvieron las curvas mostradas en las gráficas de la figura 2.4 a la 2.9 .

Tabla I  
 MODULOS DE YOUNG "E" Y DE POISSON " $\nu$ " Y LA FORMA EN QUE  
 FUERON UTILIZADAS EN EL TUBO ABSORBEDOR

Material	E (Kg/cm)	$\nu$	Modo de empleo
Acero inoxidable	$2.00 \times 10^6$	.30	Placa
Vidrio	$6.30 \times 10^5$	.20	Placa
Cerámica	$2.46 \times 10^5$	.21	Placa
Cobre	$1.09 \times 10^6$	.30	Cilindro
Aluminio	$7.03 \times 10^5$	.30	Cilindro
Estaño Plomo 60-40	$3.06 \times 10^5$	.40	Cilindro
Oro	$8.23 \times 10^5$	.42	Cilindro



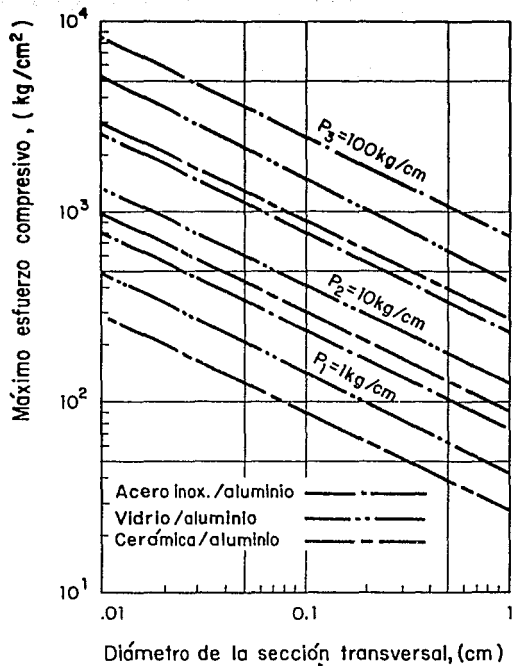


Fig. 2.4 Máximo Esfuerzo compresivo

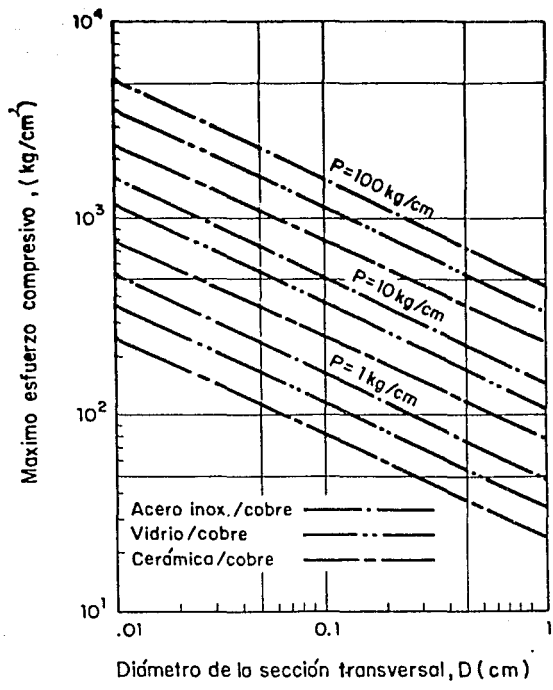


Fig. 2.5 Máximo Esfuerzo Compresivo

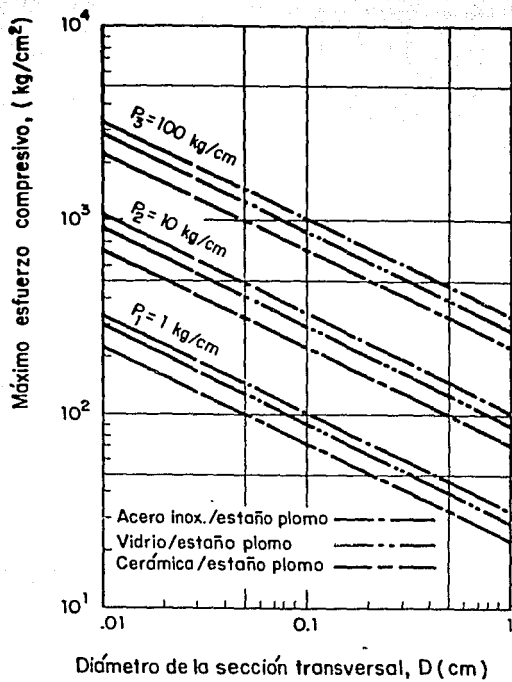


Fig. 2.6 Máximo Esfuerzo Compresivo

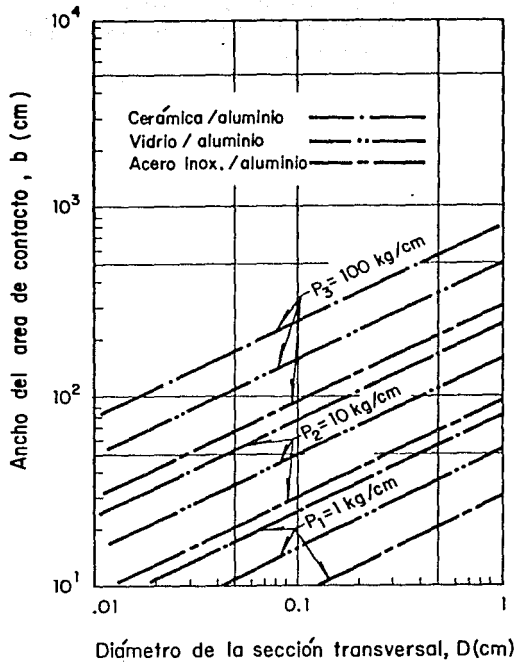


Fig. 2.7 Ancho del Área de Contacto

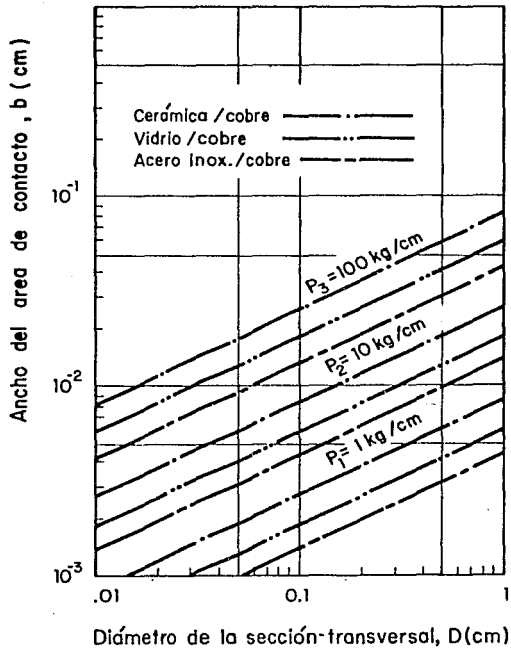


Fig. 2.8 Ancho del Área de Contacto

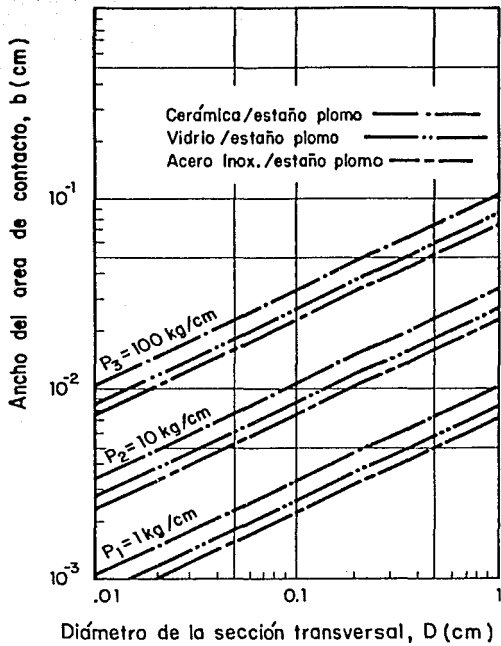


Fig. 2.9 Ancho del Area de Contacto

## 2.4) FALLA EN MATERIALES SOMETIDOS A COMPRESION

Considerando el caso de un cuerpo (medio semi-infinito) al cual se le aplica una carga  $q$ , la estructura interna de este cuerpo se va a deformar, conforme se aumenta esta carga, por la generación de esfuerzos internos, originando que el material deje de comportarse elásticamente para dar lugar a zonas de plastificación. El estado elástico límite obtenido por Nabor Carrillo (ref. 11) ocurrirá cuando  $q = \pi C$  ( $C$  es una constante conocida como cohesión del material); esta carga corresponde a pequeñas fallas localizadas en el interior del cuerpo, las cuales no llegan a producir una superficie de falla continua. Los estados de esfuerzo previos a la falla se distribuyen en el material como se muestra en la fig. 2.10 .

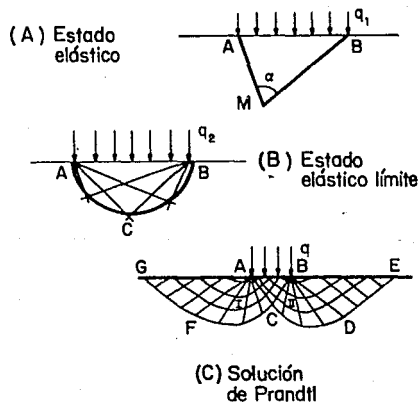


Fig. 2.10 Falla progresiva de un cuerpo en estado plástico

En todo punto M (fig. 2.10a), los esfuerzos<sup>1</sup> forman el ángulo  $\alpha$  entre MA y MB . Estos esfuerzos estan dados por las fórmulas siguientes (ref.11)

$$\sigma_1 = \frac{q_1}{\Pi} (\alpha + \text{sen } \alpha) \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{q_1}{\Pi} (\alpha - \text{sen } \alpha) \quad (4)$$

El máximo esfuerzo cortante está dado por (ref. 11):

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{q_1}{\Pi} \text{sen } \alpha \quad (5)$$

En materiales cohesivos, los máximos esfuerzos cortantes se encuentran en los puntos donde  $\alpha = 90^\circ$ ; esto es, en los puntos del semicírculo ACB (fig. 2.10b) donde:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{q_1}{\Pi} \quad (6)$$

Al seguir aumentando la carga, las zonas de plastificación tambien aumentan, presentándose zonas de falla, las cuales se han extendido desde el semicírculo ABC hasta las zonas I y II (fig. 2.10c).

---

1 En un cuerpo sometido a esfuerzos, existen planos en los cuales el esfuerzo normal es máximo ó mínimo y el esfuerzo cortante es nulo. Estos planos se llaman principales y los esfuerzos normales que en ellos actúan a  $90^\circ$  entre si se llaman esfuerzos principales (ref.13).



Para obtener la localización de las superficies de falla, *Taylor* (ref. 12) obtuvo la curva de deslizamiento, esto se conoce como capacidad límite de carga. La curva de deslizamiento se muestra en la figura 2.11 , observándose que esta superficie circular coincide, con muy buena aproximación, con la superficie de falla obtenida por *Prandtl*, en la que  $q = (\Pi+2)C$  .

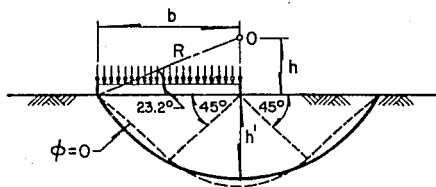


Fig. 2.11 Capacidad límite de carga, usando la suposición de superficies circulares de falla (ref. 12).

### 3. UNION VIDRIO METAL

Dos bridas con un buen acabado superficial pueden mantenerse en contacto haciendo una buena unión mecánica, pero siempre van a existir irregularidades en la unión, originando la formación de pequeños canales entre las dos superficies; aún si estos canales son del orden de micras, ellos constituyen una considerable fuente de filtración, la cual no puede ser permitida en sistemas de alto vacío. Para cerrar estos canales por simple presión de dos bridas, se requieren muy altos esfuerzos de compresión, dado que estas superficies son muy duras. Para remediar esta situación, la acción de sellado es efectuada por la interposición entre las dos bridas

de un tercer material, el cual llena las pequeñas irregularidades de las superficies, requiriéndose fuerzas de compresión sobre las bridas que son razonablemente menores a las requeridas en la unión sin junta (ver figura 3.1) (ref 14).

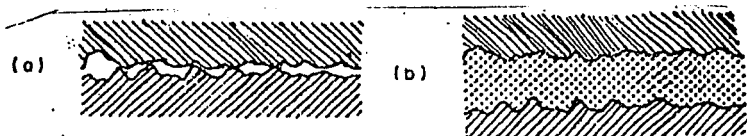


fig. 3.1 UNION DE BRIDAS (ref. 14)

### 3.1) SELLADO VIDRIO METAL

La unión vidrio metal por encasquillamiento (fig. 3.2) consiste en encajar los bordes de los extremos de un tubo de Kobar en los bordes del tubo de vidrio, se obtiene un sellado permanente, pero tiene como desventaja el adelgazamiento de las paredes del tubo de vidrio, ocurriendo que la probabilidad de ruptura del tubo de vidrio sea alta al ser sometido a esfuerzos en la unión.

Se debe tener cuidado con la distribución no uniforme de los esfuerzos tangenciales y radiales en la unión, pues la ligazón entre el vidrio y el metal queda determinada por el tipo de óxido formado en el sello metálico, originando que la proporción entre el volumen de la capa de óxido formada y el volumen del metal no sea uniforme a lo largo de todo el sello.

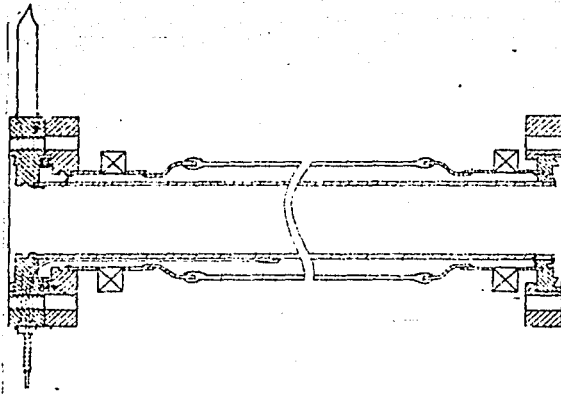


Fig. 3.2 Unión vidrio-metal en los concentradores solares evacuados actualmente en uso

Por esto, la deformación mecánica no es la misma en todo el sello, resultando muy porosos los sellos que tienen un alto contenido de oxígeno. Por ejemplo: cuando una pieza de cobre es colocada en lugares a cielo abierto, y si la atmósfera contiene al menos el uno por ciento de dióxido de azufre, entonces, la velocidad de oxidación se incrementa en un factor de veinte.

La forma del sello depende del dispositivo a ser sellado, y de la factibilidad de construcción, siendo las diferencias en los valores de los coeficientes de dilatación térmica, del metal y el vidrio, uno de los grandes problemas a resolver en las uniones vidrio metal, pues se generan esfuerzos en los bordes no redondeados de los materiales entre los cuales se coloca el sello, siendo los esfuerzos de compresión, para el vidrio, diez veces mayores a los esfuerzos de tensión.

Los pasos que se recomienda seguir en la elaboración de un sellado vidrio metal son:

- a) Las partes metálicas deben tener todos los bordes redondeados, libres de polvo, y sin raspaduras ni rayones en su superficie.
- b) Las partes de vidrio deben estar bien limpias, pulidas y con bordes redondeados.
- c) Los sellos metálicos deben plastificarse con esfuerzos inferiores a los necesarios para romper el tubo de vidrio, y no deformen significativamente a la brida metálica que será adherida a la pieza de vidrio.

Por todo lo anterior, es necesario pensar en utilizar un tipo de sellado que se pueda desmontar, para que sea fácilmente desarmable, esta dificultad se resuelve con los sellos de junta<sup>2</sup>, pudiendo de este modo hacer posible el reemplazar las partes dañadas o desgastadas dentro del tubo absorbedor, logrando la reutilización al permitirse la reparación.

La presión necesaria sobre la junta para asegurar un buen sellado depende de:

- El material de la junta.
- El acabado superficial de las bridas.
- La deformación existente entre la junta y las bridas.

Para que exista un buen sellado, es necesario que los sellos se comporten de la siguiente forma:

- Al inicio, la deformación del sello es elástica, y al ir incrementando la fuerza de compresión sobre el sello, se inicia la plastificación.
- La plastificación comienza en las aristas del sello que están en contacto con las bridas, extendiéndose esta plastificación hacia el interior del material sellador conforme aumenta el esfuerzo compresivo.

---

2 Los sellos de junta se definen por la *Sociedad Americana de Vacío* como sellos efectuados por compresión de una junta entre las partes a ser selladas.

- Cuando el límite elástico del material sellador es alcanzado, ocurre un endurecimiento del mismo por el aumento de dislocaciones en la estructura interna del material; debido a esto, es necesario minimizar el área de contacto sello brida con la finalidad de reducir el esfuerzo compresivo aplicado al sello para mantener la plastificación sin llegar al agrietamiento y posible ruptura del vidrio.
- Debido a que en la plastificación el material sellador es deformado mas allá del límite elástico, se puede generar una reducción de la presión en la unión sello brida debido a la contracción por disminución de temperatura. La dilatación del material por aumento de temperatura, da origen a un aumento en la superficie de contacto sello brida, por lo tanto, debe existir un mecanismo que mantenga la plastificación sin llegar al agrietamiento y posible ruptura.
- Una vez montados los sellos, y sometidos a compresión, se deforman permanentemente, por tal motivo no pueden ser utilizados nuevamente.

Los sellos de goma natural son materiales limpios, pero tienen alta permeabilidad, bajo intervalo de temperaturas de operación y son inestables químicamente (especialmente al ser expuestos al calor). Los elaborados con neopreno son menos permeables, pero su intervalo de operación de temperatura y su grado de evolución a los gases no les permite funcionar a más de 149°C y menos de -54°C. Los fabricados a base de silicón tienen un mayor intervalo de temperatura de operación (entre -62°C y 232°C) pero su permeabilidad es alta.

Todos estos materiales no son recomendables para ser utilizados a presiones menores que  $10^{-4}$  Torr por su alta presión de vapor a temperatura ambiente y en sistemas de sellado permanente (aún con bombeo continuo). El vitón es un hule especial que trabaja a presiones del orden de  $10^{-6}$  Torr, sin embargo se recomienda no utilizarlos cuando las temperaturas son mayores de  $204^{\circ}\text{C}$ . Estos inconvenientes no se presentan en sellos metálicos (ref. 15).

Un sellador ideal sería un material hecho de un núcleo de alta resistencia mecánica cubierto de capas de materiales de alta ductilidad y baja dureza, pues el núcleo duro le da rigidez al sello y el blando se deforma para producir el sellado como se muestra en la figura 3.3.

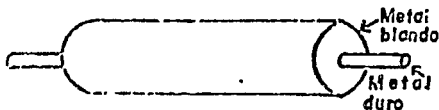


Fig. 3.3 SELLADOR IDEAL

Para obtener una unión vidrio metal que efectúe un sellado para alto vacío, al estar presentes cambios bruscos de temperatura, se requiere que cumpla con los siguientes requisitos:



- 1) Debe existir una buena cohesión entre la superficie metálica y la superficie del vidrio.
- 2) El sellado para vacío entre las superficies metálica y de vidrio debe mantenerse considerando que los coeficientes de expansión térmica lineal del metal y del vidrio son diferentes.
- 3) La plasticidad del metal debe ser tal que no se produzca la ruptura del vidrio al estar presentes esfuerzos de tensión entre las superficies en contacto.

### 3.2) SELLOS METALICOS

Con respecto al comportamiento de los metales al ser utilizados para construir cámaras de vacío, experimentalmente se ha obtenido lo siguiente:

- Los gases raros no se difunden en ningún metal a ninguna temperatura.
- El hidrógeno no forma soluciones con aluminio, cromo, cobalto, cobre, fierro, molibdeno, níquel, plata, platino y tungsteno.
- El nitrógeno es soluble en aluminio, fierro, molibdeno y tungsteno.
- El oxígeno es soluble en cobalto, cobre, y especialmente en plata.

Los metales utilizados como material para la construcción de sellos para vacío, se pueden clasificar en duros y blandos. Entendiendo por metales blandos a aquellos que tienen un límite

plástico inferior al que tienen los materiales con el que fueron construidas las bridas que comprimen al sello, metales como el indio, estaño plomo, aluminio, plata, oro y cobre son ejemplos de metales blandos.

El cobre es un metal blando, económico y de fácil adquisición en forma de alambre, sin embargo, presenta algunos inconvenientes al ser utilizado como sello para vacío en sistemas cuya operación no protege al cobre del ataque químico debido a condiciones ambientales como son los óxidos de azufre, que al combinarse con agua forman diluciones ácidas. Además, el cobre se oxida rápidamente, por todo esto, no es recomendable utilizarlos como sello en aparatos en los cuales se desea conservar el vacío, sin bombeo continuo, por períodos prolongados de tiempo (del orden de años).

Las impurezas a base de oxígeno y azufre forman con el cobre combinaciones químicas quebradizas ( $\text{Cu}_2\text{O}$  y  $\text{Cu}_2\text{S}$ ) que se distribuyen por los límites intergranulares. El oxígeno al contacto con el cobre forma protóxido cuproso, el cual provoca la enfermedad del hidrógeno, pues al calentarse el cobre, estando en contacto con la atmósfera, se difunde el hidrógeno hacia el interior del cobre. Al estar presentes en su interior el  $\text{Cu}_2\text{O}$ , estas moléculas reaccionan con el hidrógeno, formando vapores de agua por la reacción  $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$ , que transcurre con un aumento de volumen. Esto crea en el metal una gran presión, produciéndose la formación de microgrietas que pueden conducir a la destrucción del sellado. El esfuerzo límite que produce la ruptura es de 2000 a 2500  $\text{Kg/cm}^2$  (ref.16).

El aluminio puro es un metal ligero, blando, posee alta resistencia a la corrosión, y se funde a los 658 °C . Las aleaciones de aluminio del tipo AMTs que contienen 1.0 a 1.6 % de manganeso, las aleaciones del tipo AMg (2.0 a 2.8 % de Mg y 0.15 a 0.4 % de Mn), y las aleaciones AMg 5 (4.0 a 5.5 % de Mg y 0.3 a 0.6 % de Mn) son aleaciones de alta plasticidad , no se endurecen por tratamiento térmico, y son resistentes a la corrosión. El límite a la ruptura es de 1300 a 3000 Kg/cm<sup>2</sup> , conservando su alta plasticidad (ref. 16).

El oro es un metal que tiene un punto de fusión de 1063 °C , es blando, tiene una alta resistencia a la corrosión y a la oxidación aún a elevadas temperaturas, y posee alta plasticidad. La alta resistencia a la corrosión se hace patente al no sufrir alteraciones cuando está en contacto con ácido nítrico, sulfúrico ó clorhídrico, pero es atacado rápidamente si se expone a una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico (agua regia). La gran maleabilidad y ductibilidad permite estirar una barra hasta formar un alambre que es más delgado que un cabello humano, tiene un límite de cedencia de 30,000 psi (2110.34 Kg /cm<sup>2</sup>) (ref. 17).

### 3.3) CONTROL DE ESFUERZOS COMPRESIVOS

Para evitar la ruptura del tubo de vidrio que recubre y protege al tubo absorbedor, y al mismo tiempo conservar el sellado para vacío, se utiliza el arreglo mostrado en la figura 3.4, en la cual se muestra el posicionamiento de sellos metálicos en las zonas donde existe contacto entre el tubo de vidrio y alguna pieza metálica. Este tipo de unión vidrio metal permite limitar los esfuerzos generados por momentos flexionantes sobre las boquillas del tubo de vidrio, minimizando los efectos sobre el vidrio por concentración excesiva de esfuerzos, evitándose la ruptura de éste ó un posible agrietamiento del mismo.

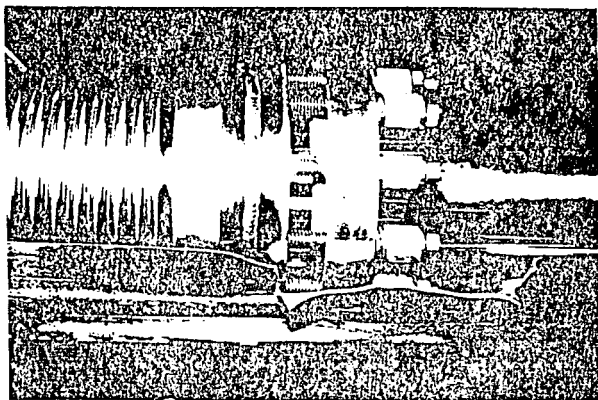
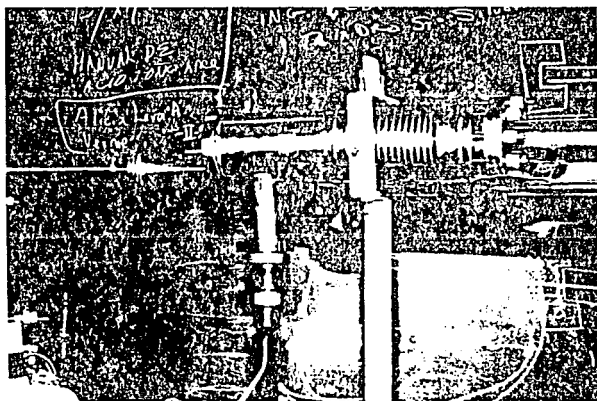


FIG. 3.5 Dispositivo de Resortes

FIG. 3.4 Sello Metálico en Unión Vidrio-Metal



### 3.3.1) DISPOSITIVO DE RESORTES

En la figura 3.5 se observa un dispositivo de resortes en los tornillos de las bridas que comprimen a los sellos metálicos; estos resortes tienen como función principal el evitar la pérdida del sellado, pues al calentar y enfriar un sello metálico se producen en él dilataciones y contracciones que deforman al metal, ocasionando un sellado defectuoso, el cual impide que se conserve el vacío. Esta pérdida de vacío se evita por medio de un sistema de resortes que compensan las variaciones en los esfuerzos de compresión sobre las bridas y sobre el sello, provocando que el sello se mantenga amoldado a las bridas. Además, los resortes permiten conservar el nivel de esfuerzos aplicados sobre el tubo de vidrio, con lo cual se minimiza el riesgo de una posible fractura.

### 3.3.2) CALIBRACION DE LOS RESORTES

Los resortes a ser utilizados en el sistema de compresión de los sellos metálicos, descritos anteriormente, deben funcionar en forma conjunta para producir una compresión uniforme sobre el sello, aún con cambios bruscos de temperatura. Dado que los resortes obtenidos no siempre tienen las mismas características de funcionamiento al ser sometidos a compresión, se requiere conocer las características reales de operación de cada resorte para elegir los que tienen un comportamiento lo más similar posible. Para lograr esto, cada resorte se sometió a pruebas de compresión y se obtuvo su deformación conforme se le aumentaba la carga, produciéndose la gráfica que se muestra en la figura 3.6, en la cual se tiene el promedio de las deformaciones de los resortes en función de la carga aplicada, mostrándose un comportamiento lineal.

CALIBRACION DE RESORTES

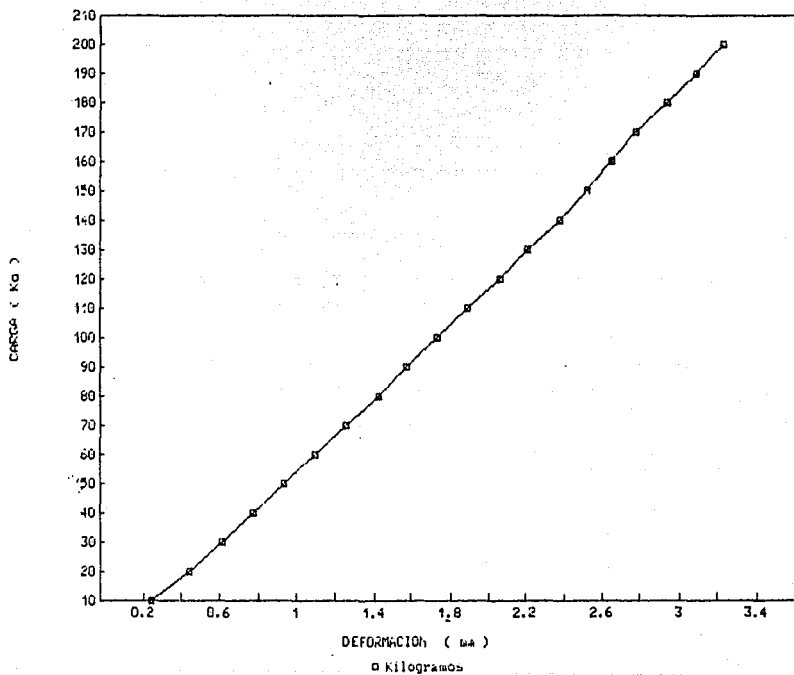


Fig. 3 C Calibración de Resortes

#### **4. SISTEMA DE ALTO VACIO.**

##### **4.1) PERMEABILIDAD EN METALES.**

Los materiales menos densos son capaces de contener cantidades más grandes de sustancias ajenas (impurezas) sin sufrir tensiones en su estructura interna; mientras que, en los materiales de mayor densidad sucede lo contrario. Por ésta razón, se tienen más impurezas en plásticos y elastómeros que en metales, vidrios y cerámicas supercompactas.

El proceso de permeabilidad es aquel en el cual los gases pasan continuamente a través de las paredes de los materiales; este proceso involucra primero la absorción del gas en la superficie donde la presión es mayor; después que ha sido absorbido, el gas penetra en el material debido a la diferencia de presiones, difundiéndose hacia la superficie de menor presión.

#### 4.2) PRESION DE VAPOR Y DESGASIFICACION EN METALES.

Al elevar la temperatura de un metal (sólido ó líquido), mayor es la probabilidad de que átomos ó moléculas superficiales se liberen de éste; a tal fenómeno se le da el nombre de vaporización, y a la proporción en la que un material se vaporiza se le conoce comunmente como presión de vapor (ver figuras 4.1 y 4.2).

Los materiales con bajo punto de ebullición, tales como agua, algunas grasas, y aceites tienden a originar problemas en sistemas de alto vacío por su alto grado de vaporización; materiales como madera, lana, algodón, papel, cuero, asbesto y la mayoría de plásticos y hules vaporizan a temperatura ambiente cuando se someten a alto vacío, dando por resultado una pérdida de vacío en el sistema. Por lo tanto, para la elección de materiales para la construcción de sistemas para alto vacío se deben usar materiales con poca vaporización, como metales, vidrio Pyrex y cerámicas supercompactas.

Dado que los metales tienden a volatilizarse aún a temperaturas por debajo del punto de fusión, es necesario elegir



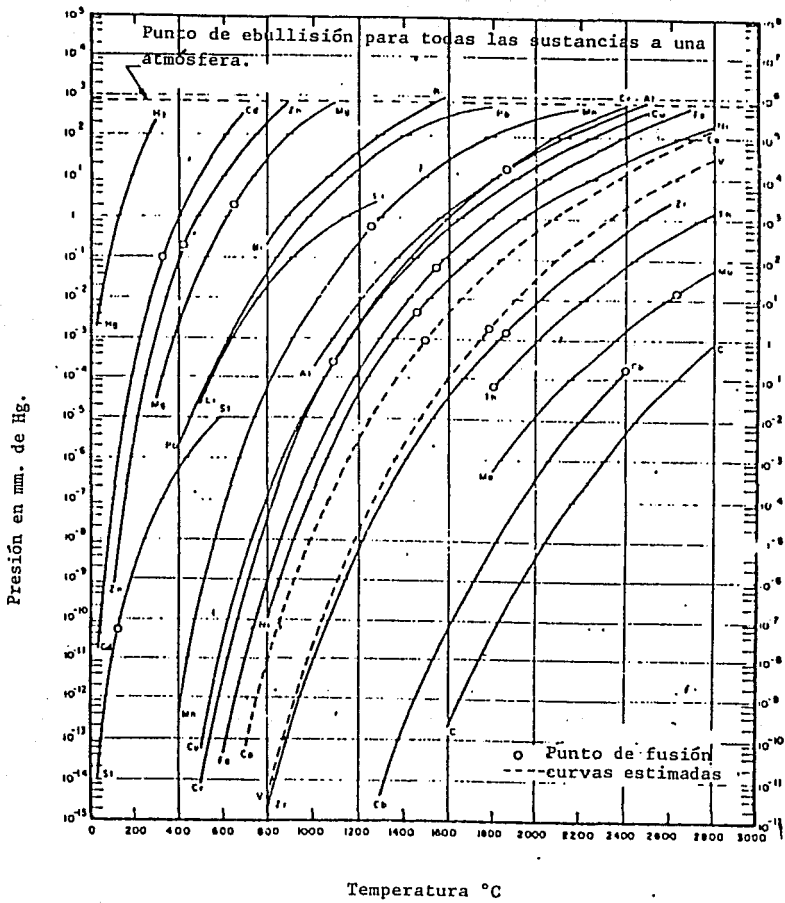


Fig. 4.1 Presión de vapor en función de la temperatura

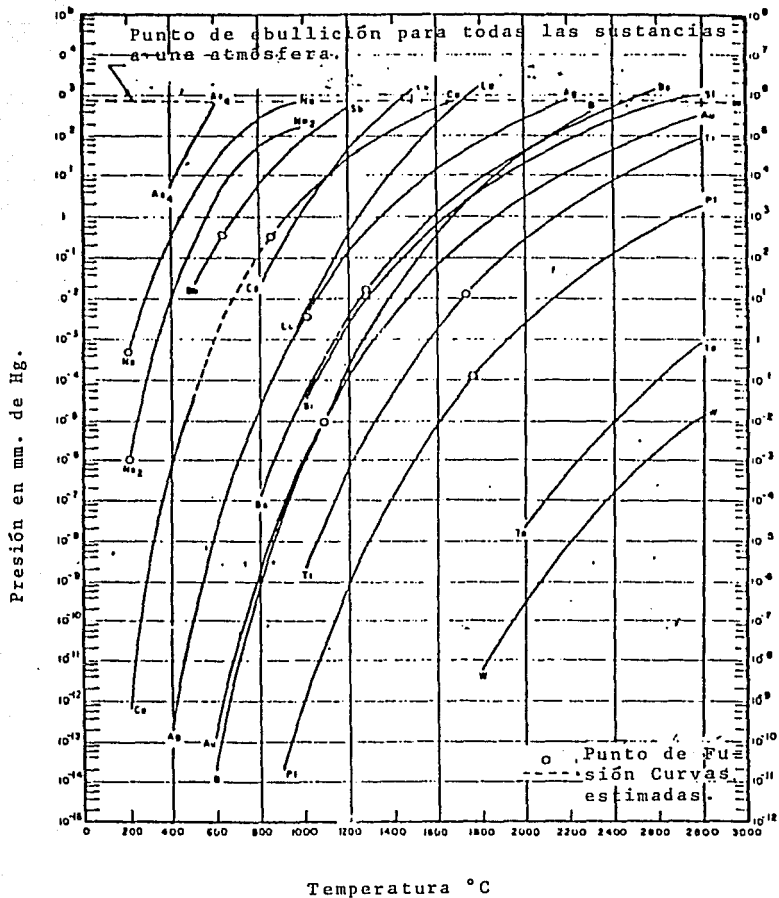


Fig. 4.2 Presión de vapor en función de la temperatura (Ref. 8).

aquellos que su presión de vapor sea la más baja para el intervalo de temperaturas de operación del sistema de vacío. Para temperaturas entre 200 y 600 grados centígrados, los metales con menor presión de vapor son: cobre, cromo, fierro, plomo, magnesio, litio, oro, plata, boro, cobalto y aluminio.

Otro aspecto importante a considerar en todos los materiales sólidos es la presencia de imperfecciones en su estructura interna, dando origen a la presencia de espacios que son ocupados por gases difundidos en él; de esta manera se presentan en el material zonas que funcionan como fuentes liberadoras de gases en cámaras de alto vacío, dando la impresión de la existencia de fugas a causa de grietas o mala instalación de los empaques que sellan las uniones entre las partes que forman la cámara de vacío (fugas virtuales).

Al proceso de evacuación de las porosidades del material se le conoce como desgasificación; para que la desgasificación sea mínima es necesario el empleo de materiales poco porosos como son: los metales, el vidrio y cerámicas supercompactas. Influye también en un buen proceso de desgasificación el grado de limpieza de las superficies internas en la cámara de vacío.

#### 4.3) MATERIALES USADOS PARA CAMARAS DE VACIO.

El paso de los gases que atraviesan el material depende de su estructura interna, de la temperatura y del tipo de gas involucrado, ver tabla II .

TABLA II

Intervalos de utilidad de algunos materiales empleados en cámaras de vacío (unidades en Torr)  
(Ref. 14)

Material	$760 > 1$	$1 > 10^{-3}$	$10^{-3} > 10^{-5}$	$10^{-5} > 10^{-7}$	$10^{-7} > 10^{-10}$
Hierro y Aceros	bueno	bueno	bueno	previa desgasificación	solo acero inoxidable
Hierro, Cobre y Aluminio puro	bueno	bueno	mal	mal	mal
Aleaciones de Cobre	bueno	bueno	bueno	previa desgasificación	solo cobre OFHC
Aleaciones de Níquel	bueno	bueno	bueno	bueno	bueno
Aluminio	bueno	bueno	previa desgasificación	previa desgasificación	no es recomendable
Cuarzo y vidrio	bueno	bueno	bueno	bueno	Solo paredes gruesas
Cerámicas	bueno	bueno	solo con revestimiento de vidrio	solo con revestimiento de vidrio	solo tipos especiales
Hica	bueno	bueno	fuerte desgasificación	fuerte desgasificación	no es recomendable
Hules	bueno	bueno	solo desgasificados	mal	mal
Plásticos	bueno	tipos especiales	solo tipos especiales	solo teflón araldite	no es recomendable
Oro	bueno	bueno	bueno	bueno	bueno

#### 4.4) VELOCIDAD DE BOMBEO Y CONDUCTANCIA.

Partiendo de la ecuación general de los gases ideales, se define el gasto como la cantidad de gas que pasa a través de una abertura por unidad de tiempo a temperatura constante.

La velocidad de bombeo de un sistema para vacío se define como la razón del gasto entre la presión.

$$S = Q/P \quad (4.1)$$

donde S es la velocidad de bombeo; Q es el gasto y P la presión.

Dado que el gasto tiene unidades de presión por volumen entre unidad de tiempo, la velocidad de bombeo tiene unidades de volumen entre unidad de tiempo.

Es posible comparar un sistema de vacío con un circuito eléctrico si se supone que la cantidad de gas que entra a una tubería es el mismo que sale de ella. Esta analogía nos conduce a la siguiente relación:

$$\Delta P = QW \quad (4.2)$$

donde  $\Delta P$  es la diferencia de presión en los extremos de un tubo; Q la cantidad de gas que fluye y W es la resistencia al flujo.

La resistencia al flujo W se obtiene de la siguiente relación:

$$U = 1/W = 6.5 D^3/L \quad (4.3)$$

siendo U la conductancia del tubo ( $\text{cm}^2$  Torr lt/Kg seg); D el diámetro interior en  $\text{cm}^3$  y L su longitud en cm .

Debido a la naturaleza de los materiales y al diseño del sistema de vacío, el sistema de bombeo extraerá gases y/o vapores solo hasta una presión límite. La presión en una cámara después de un tiempo dado es :

$$P_f = P_{i,m} + (P_i - P_{i,m}) e^{-(\bar{s}/V)t} \quad (4.4)$$

donde  $P_f$  es la presión final;  $P_{i,m}$  es la presión mínima obtenible por el sistema de vacío;  $P_i$  es la presión inicial;  $\bar{s}$  es la velocidad de bombeo promedio; V es el volumen a ser evacuado y t es el tiempo de evacuación (esta relación no considera el gas ocluido en las paredes del recipiente).

El tiempo de bombeo se obtiene de la relación:

$$t = [V/\bar{s}] \text{Ln} [P_f/P_i] \quad (4.5)$$

donde V es el volumen;  $\bar{s}$  la velocidad de bombeo promedio;  $P_f$  y  $P_i$  son las presiones final e inicial, respectivamente.

#### 4.5) DESCRIPCION DEL SISTEMA DE VACIO EMPLEADO.

Un sistema de vacío es aquel en el cual la presión es mantenida a un valor inferior a la presión atmosférica.

El sistema de vacío utilizado consta de :

- Un sistema de vacío burdo (bomba mecánica), el cual reducirá la presión dentro del tubo absorbedor, desde la presión atmosférica hasta un nivel donde un sistema de bombeo fino (bomba de difusión u Otras) puede ser usado.
- Medidores para vacío que indiquen la presión en el tubo absorbedor.

#### 4.5.1) BOMBA MECANICA.

En esta bomba, la porción del volumen de aire extraído del sistema en evacuación pasa a través de un tubo de entrada, el cual conduce al interior de una camisa cilíndrica. Aquí se encuentra girando un rotor excéntrico de tal modo que siempre se ajusta en forma compacta en la parte superior del interior de la camisa, ver figura 4.3 . Sobre el rotor están colocadas dos paletas planas separadas por un muelle que las comprime contra la superficie de la camisa, estas paletas atrapan las moléculas de aire, y mediante el movimiento sucesivo del rotor, son comprimidas y expulsadas al exterior a través de la válvula de descarga en el tubo de salida (ref. 18).

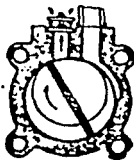


Fig. 4.3a Esquema de funcionamiento.

Se utilizó una bomba mecánica marca Sargent-Welch (ref.19) modelo 1397 con las siguientes características de operación:

- Velocidad de bombeo a una atmósfera 500 litros/min
- Presión mínima obtenible  $1 \times 10^{-3}$  Torr
- Potencia del motor 1 HP
- Rapidez del motor 1725 rpm
- Rapidez de giro de bombeo 400 rpm
- Tipo de aceite Duo Seal Welch
- Capacidad de aceite 1.18 litros

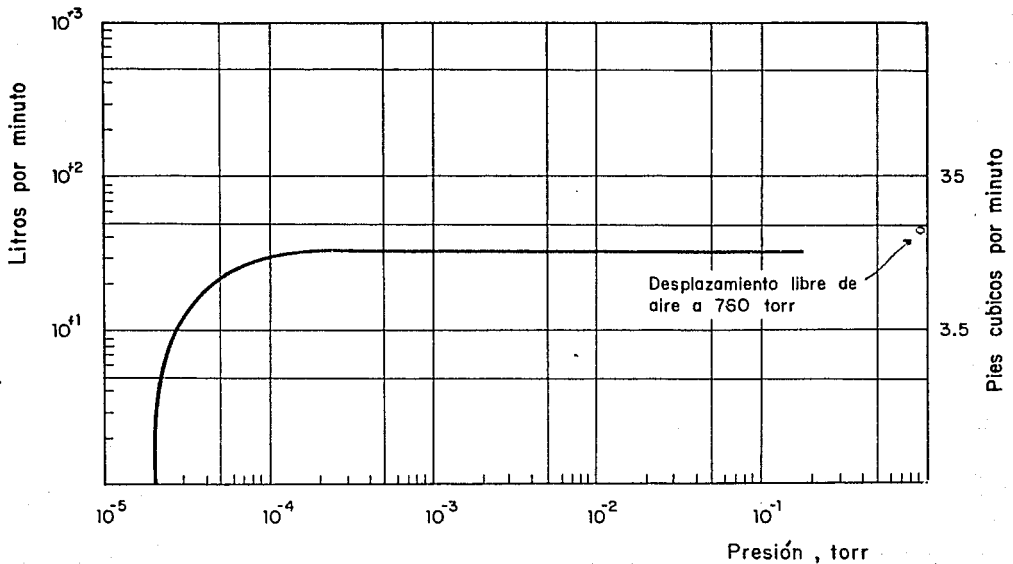


Fig. 4.3b Velocidad de bombeo de una Bomba mecánica Sargent-Welch modelo 1397 500 lt/min



#### 4.5.2) BOMBA DE DIFUSION.

Su funcionamiento (ver figura 4.4) se basa en que las moléculas del gas que se evacúan son arrastradas por un chorro de vapor de aceite.

Después de que la bomba mecánica ha creado el prevacío necesario en la bomba difusora y en el volumen en evacuación, se conecta la resistencia que calienta el aceite hasta su punto de operación. Los vapores del aceite fluyen por el conducto central, expulsándose a gran velocidad por las toberas hacia la pared refrigerada por un serpentín que conduce agua. Al condensarse estos vapores, escurren hacia el fondo de la vasija, arrastrando las moléculas del gas que se está evacuando (la función principal del chorro de vapor se reduce a entregar parte de su impulso a las moléculas del gas que se evacúa, para dirigir las hacia el tubo de escape). El calentador y el refrigerador de la bomba, están dispuestos de tal forma que aseguran la circulación continua de vapor (ref. 11).

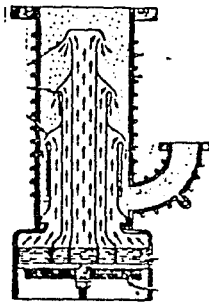


Fig. 4.4 Esquema de funcionamiento de una bomba de difusión

Las características de la bomba de difusión marca Varian modelo VHS-6 9 (ver figuras 4.5 y 4.6) son las siguientes:

- Velocidad de bombeo	2400 litros/seg
- Presión mínima obtenible	$1 \times 10^{-7}$ Torr
- Presión máxima de salida (para inicio de operación)	$1 \times 10^{-3}$ Torr
- Tiempo de calentamiento del aceite	10 min
- Tiempo de enfriamiento del aceite	60 min
- Flujo de agua (para enfriamiento)	1 lt/min
- Volumen de la bomba	500 cc

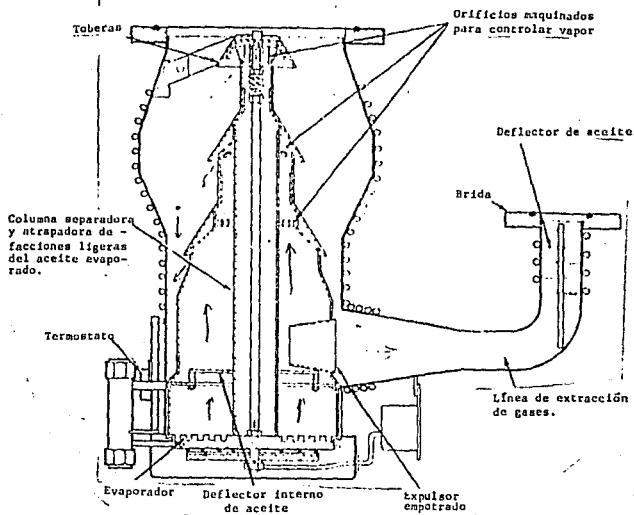


Fig. 4.5 Bomba de difusión marca Varian VHS-6

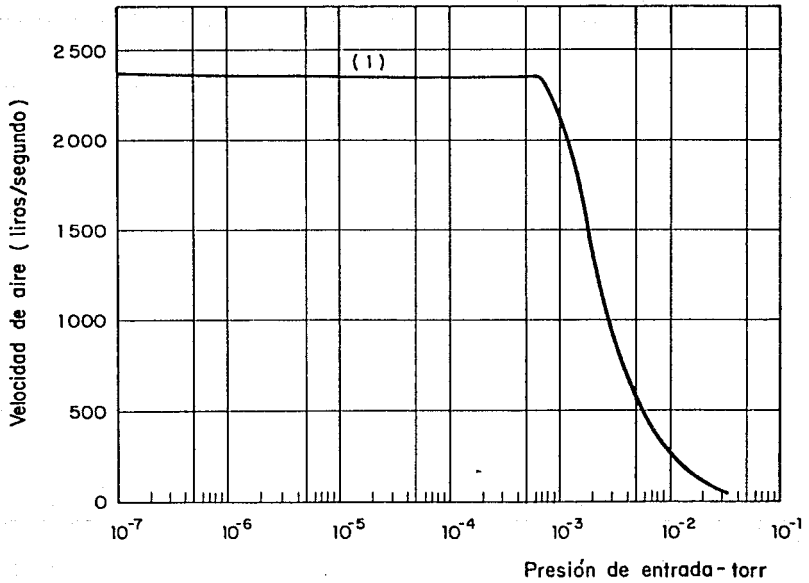


Fig. 4.6 Bomba de difusión Varian modelo VHS-6 2400 lt/seg  
(velocidad de bombeo)

#### 4.5.3) MEDIDORES DE VACIO.

Un elemento importante en todo sistema de vacío, es el empleo de medidores que indiquen la presión existente en el interior de la cámara.

Dado que el intervalo de vacío que se desea medir es de  $760$  a  $1 \times 10^{-6}$  Torr , se utilizan los siguientes medidores:

##### 4.5.3.1) MEDIDOR DE TERMOPAR.

Los medidores de termopar miden la presión en términos de la cantidad de calor que el gas conducirá desde un filamento caliente (ver figura 4.7). Con una potencia de calentamiento fija, la temperatura de la unión del termopar, la cual depende de la conductividad del gas, está indicada por su voltaje de salida. Cuando la presión disminuye, el termopar se calienta, aumentando su voltaje de salida; este voltaje se registra en un milivoltímetro calibrado en unidades de presión (ref. 20).

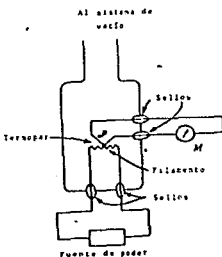
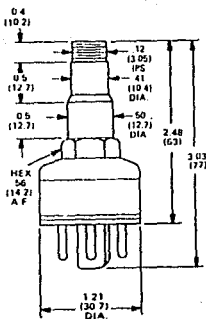


Figura 4.7 Funcionamiento del medidor de termopar.

Para vacíos desde 760 a  $1 \times 10^{-3}$  Torr se utilizó un medidor de termopar marca Pennwalt modelo MB 3M y un registrador Pennwalt (figura 4.8).



531/536 Gauge Tube

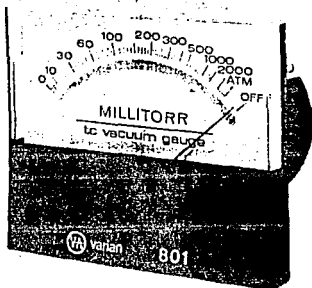
Acot. inch (mm)

Fig. 4.8 Medidor de termopar (ref. 20).

## 801 & 802-A GAUGE CONTROLLERS

These controllers have recorder output and easy-to-read motor scales. The 801 controller is compact and lightweight, with three mounting studs to facilitate panel mounting in a minimum of space. The 802-A is the same controller housed in a cabinet for table-top use.

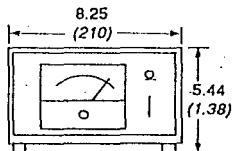
outline drawing inches(mm)



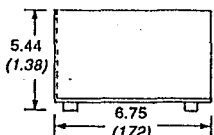
### specifications

Power: 120 VAC, 60 Hz,  
240 VAC, 50 Hz, 10W  
Range:  $10^{-3}$  Torr to 2 Torr  
Recorder Output: 0-11 mV  
Temperature Range:  $10^{\circ}$  C- $40^{\circ}$  C

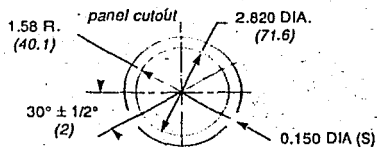
front panel view



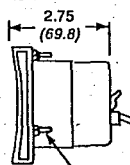
side view



802-A

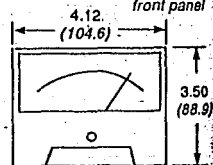


side view



No. 6-32 studs (3)

front panel



801

Fig. 4.8 Registrador para un medidor de vacio de termopar

#### 4.5.3.2) MEDIDOR POR IONIZACION.

Su principio de operación se basa en la ionización de los átomos o moléculas del gas, que se encuentran entre el filamento y el colector del medidor (ver figura 4.9).

En este medidor aparecen tres electrodos (filamento, rejilla y colector) colocados en un tubo que se conecta al sistema de vacío.

El filamento emite electrones al ser calentado por medio de una corriente eléctrica; como la rejilla está a potencial positivo con respecto al filamento, atraerá a los electrones.

Cuando los electrones se aceleran adquieren suficiente energía para ionizar las moléculas del gas en el tubo, produciéndose una corriente de iones que es proporcional a la densidad del gas cuando la corriente de electrones es constante, por lo tanto, esta corriente de iones es proporcional a la presión a temperatura constante.

Los iones formados son atrapados por el elemento colector, registrándose la corriente en un electrómetro (ref. 21).

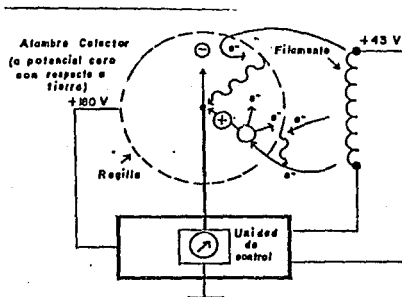
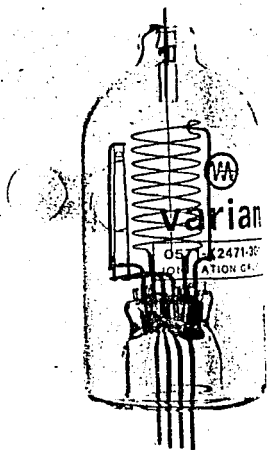


Fig. 4.9 Esquema de funcionamiento de un Ion-Gauge

Para vacíos comprendidos entre  $1 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-7}$  Torr se utilizó un medidor por ionización y un controlador marca Granville-Phillips (figura 4.10).



### specifications

Sensitivity:  $10 \text{ (Torr)}^{-1}$   
 Operating Ratings: 0 VDC (collector); + 150 VDC to ground (grid); + 30 VDC to ground, 5 VAC nominal (filament)  
 X-Ray Limit:  $2 \times 10^{-10}$  Torr, approx  
 Recommended Controllers: 842 and 843 ratio-matic ionization gauge controllers; 844/845, 880 RS, and MGA Gauge digital ionization gauge controllers.

### outline drawing inches(mm)

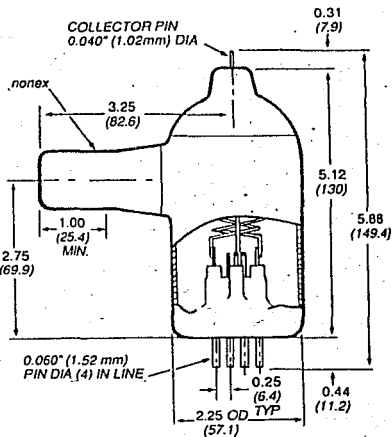
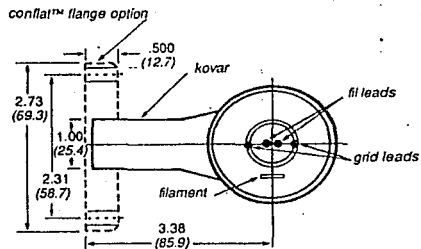


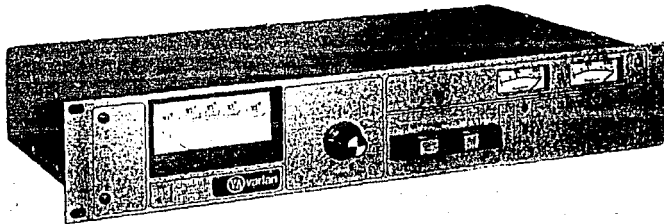
Fig. 4.10a Medidor por ionización (ref. 21)



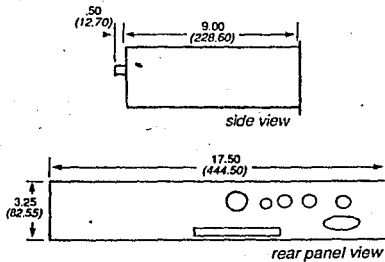
## HOT FILAMENT GAUGE CONTROLLERS

### 843 RATIONOMATIC™ IONIZATION GAUGE CONTROLLER

The 843 Rationomatic controller eliminates emission, zero, and other adjustments. It measures pressure from  $10^8$  Torr to 2 Torr. The 843 is both an ion and thermocouple gauge controller and can be supplied with three optional process control set points - two ion gauge and one thermocouple. An automatic filament turn-on option is also available.



#### outline drawing inches(mm)



#### specifications

Power Required:	100W, 115/230V, 50/60 Hz
Range:	$10^8$ to $1.0 \times 10^{-3}$ Torr (ion gauge); $1.0 \times 10^{-2}$ to 2 Torr (TC gauge)
Degas:	50W resistance w/standard cable
Recorder Output:	0 to 5V, 1V/decade, $10^8$ to $10^{-3}$ Torr
Process Control Contact Rating:	5A @ 115 VAC/24 VDC
Overpressure Point:	$2 \times 10^{-3}$ Torr
Recommended Gauge Tubes:	563, 571, and 572 Bayard-Alpert-type ion gauge tubes; 531 thermocouple gauge tube.

Fig.4.10b Controlador de un Ion-Gauge (ref. 21)

#### 4.6 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Se procedió a efectuar un prevacío, por bombeo mecánico, en el espacio anular dentro del tubo absorbedor (metálico) y el tubo de vidrio. Esto con el fin de permitir que ese espacio se limpiara al desgasificarse las paredes internas de dicho espacio anular formado entre los dos tubos. Además, se efectuó la prueba con bombeo mecánico con el fin de revisar si las soldaduras de las piezas fue realizado correctamente, descartándose con esto la posibilidad de pérdidas de vacío por fallas en las soldaduras

#### 4.7 PRUEBAS A TEMPERATURA VARIABLE

Simulando el calentamiento del tubo absorbedor por medio de una resistencia eléctrica localizada en el interior del tubo absorbedor. Se midieron las temperaturas de funcionamiento para temperaturas de la resistencia entre los 50 y los 200 °C.

## 5. TUBO ABSORBEDOR EVACUADO.

### 5.1) DEFINICION DE TUBO ABSORBEDOR

El tubo absorbedor, en los captadores de enfoque del tipo cilíndrico parabólico, consiste en un tubo metálico, generalmente de cobre o de acero, de sección circular, el cual está colocado en la línea focal de un espejo cilíndrico parabólico y se encuentra en el interior de un tubo de vidrio que le sirve de cubierta protectora.

## 5.2) FUNCIONAMIENTO

Al calentarse el tubo absorbedor, una porción del flujo de calor de éste hacia el ambiente se efectúa a través del aire contenido en la región anular entre el absorbedor y su cubierta de vidrio; por lo tanto, es deseable que la transferencia de calor, por convección, del aire contenido en esta región sea minimizada hasta lograr que las pérdidas de calor por este medio sean un porcentaje muy pequeño de la cantidad de radiación solar incidente. Para lograr esto, se extrae el aire contenido en esta región, hasta alcanzar presiones del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  Torr .

## 5.3) DISEÑO DE LA CUBIERTA PROTECTORA DE VIDRIO.

El uso de un tubo de vidrio para la protección del tubo absorbedor es necesario, pues al estar en contacto con el aire se degradaría rápidamente la película selectiva que cubre al tubo absorbedor. Además, se permite el paso de la radiación solar al tubo absorbedor y al mismo tiempo se impide la pérdida de calor por convección del aire que circunda el espacio anular existente entre los dos tubos. Sin embargo, esto presenta algunos inconvenientes, como son:

- Es difícil la obtención y conservación del vacío generado en el espacio anular entre el tubo absorbedor y su cubierta de vidrio.
- Se presentan complicaciones en la obtención del sellado rígido y permanente en las uniones vidrio metal.
- El sellado permanente en uniones vidrio metal impide la reutilización ó reparación del dispositivo.

#### 5.4) DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS DE LABORATORIO.

En esta sección se presenta el diseño de los prototipos de laboratorio de dos tubos absorbedores evacuados que se desea puedan ser utilizados en concentradores solares del tipo canal parabólica con uniones vidrio metal acopladas de tal manera que las diferencias en sus coeficientes de dilatación térmica lineal no produzcan la ruptura o agrietamiento de la cubierta de vidrio, y con ello, la pérdida de la eficiencia del concentrador debido a la pérdida de calor por convección.

##### 5.4.1) TUBO ABSORBEDOR CON TUBO DE VIDRIO DE BOQUILLAS CUADRADAS.

Para poder utilizar, y en caso necesario reparar, los tubos absorbedores, en los concentradores solares del tipo canal parabólico, se empleó para pruebas preliminares un tubo de vidrio con boquillas cuadradas como se muestra en la figura 5.1 ; con el fin de efectuar pruebas de funcionamiento con un tubo absorbedor como el mostrado en la figura 5.2 .

En las figuras 5.3 se observa el prototipo de laboratorio de un tubo absorbedor evacuado con boquillas cónicas.

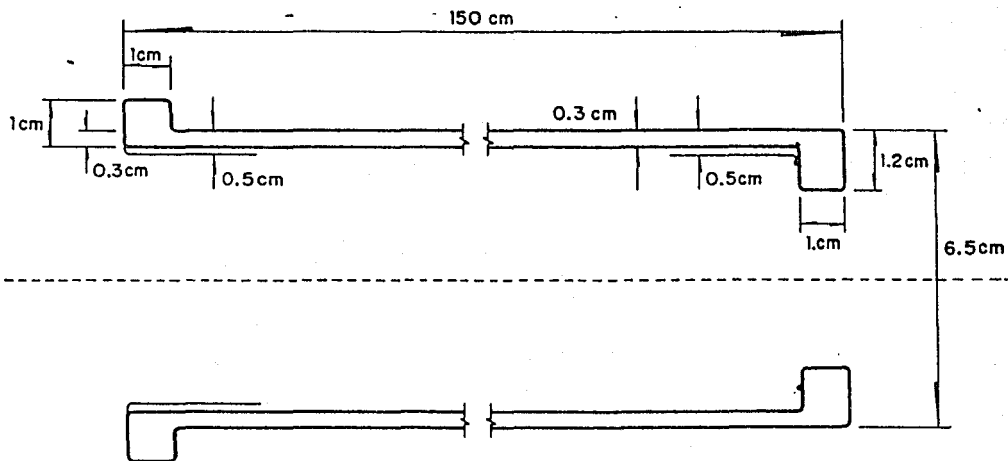


FIG.5.1 Tubo de vidrio a ser utilizado en el concentrador solar propuesto

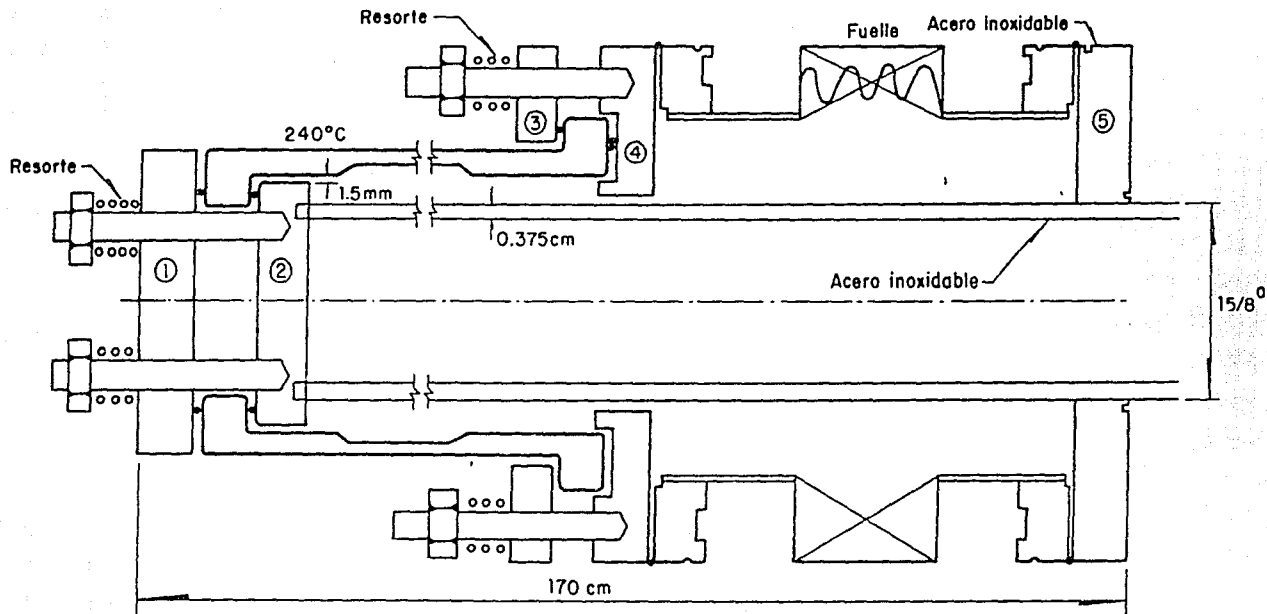


Fig.5.2 Concentrador solar evacuado con sello metálico en la unión vidrio-metal

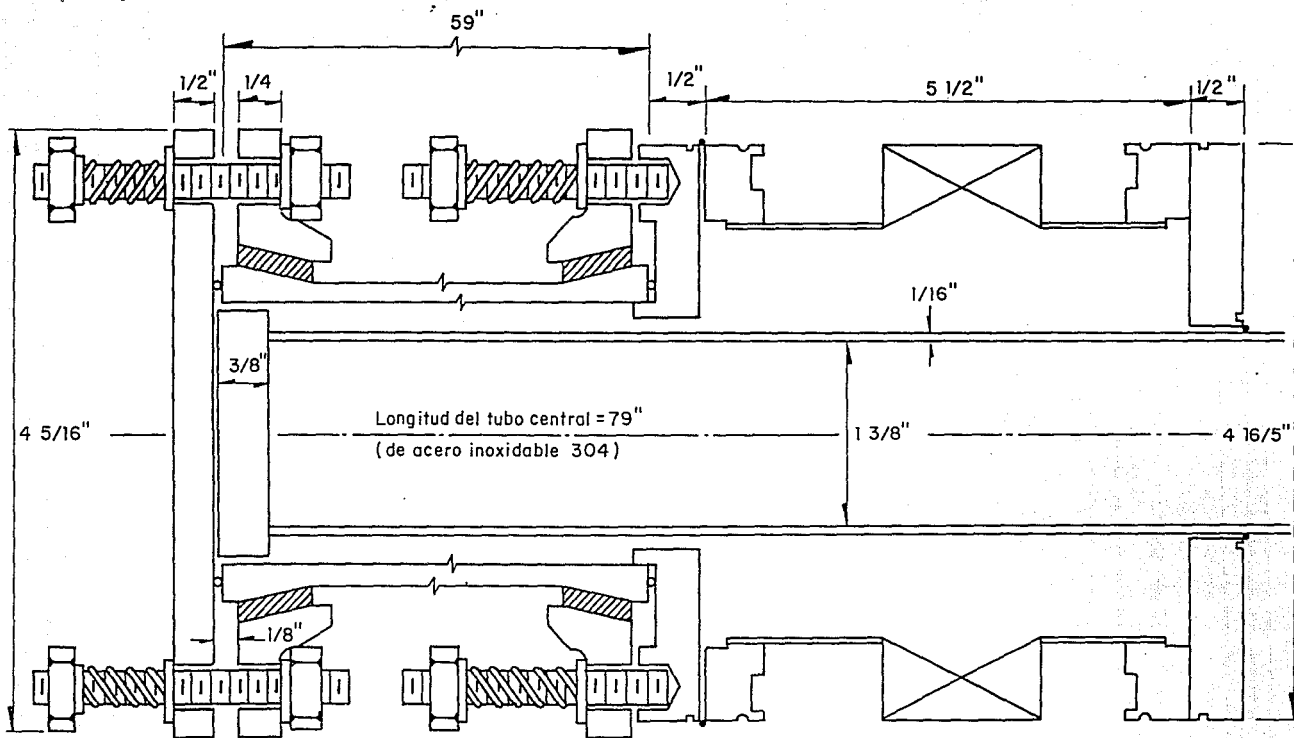


Fig 5.3 Diseño de un tubo absorbedor evacuado con cubierta protectora. Tubo de vidrio de boquillas cónicas



#### 5.4.1.1) VENTAJAS DEL NUEVO DISEÑO.

-- El tubo absorbedor obtenido permite elaborar un concentrador solar cilíndrico parabólico evacuado con un tubo absorbedor cuyas uniones vidrio metal son desarmables.

-- El tener uniones vidrio metal desarmables permite la construcción, reparación y acoplamiento de otras unidades, logrando con esto concentradores solares modulares que pueden acoplarse entre sí.

-- El sellado vidrio metal se obtiene por medio de anillos metálicos y resortes que permiten absorber las diferencias de dilatación térmica entre el vidrio y el metal, evitando la fractura del vidrio si el estado de esfuerzos de compresión se mantiene prácticamente constante e independiente de la temperatura.

#### 5.4.1.2) INCONVENIENTES EN LOS NUEVOS DISEÑOS.

-- El plastificar los anillos metálicos que son utilizados como sellos para vacío, requiere del control de las fuerzas a ser empleadas para comprimir los sellos, pues de lo contrario, se corre el riesgo de fracturar el tubo de vidrio por la aplicación excesiva de esfuerzos en sus boquillas.

-- Debe mantenerse uniforme la aplicación de los esfuerzos que comprimen al sello para que no se presenten deformaciones que produzcan separaciones entre las bridas metálicas, los sellos metálicos y las boquillas de vidrio, perdiéndose por esta causa el vacío obtenido.

-- Es necesaria la utilización de una válvula de vacío con sello metálico para poder separar totalmente al sistema de vacío del espacio anular entre el tubo absorbedor y el tubo de vidrio, esto con el fin de obtener tubos absorbedores evacuados que conserven el vacío obtenido durante períodos prolongados de tiempo sin necesidad de bombeo continuo, y funcionen a temperaturas de 300 °C o mayores, pues los arosellos de vitón desgasifican en vacíos de  $10^{-4}$  Torr o menores y, además, se descomponen químicamente a esas temperaturas.

#### 5.4.2) TUBO ABSORBEDOR CON TUBO DE VIDRIO DE BOQUILLAS CONICAS.

##### 5.4.2.1) VENTAJAS DEL NUEVO DISEÑO

-- Es de fácil obtención el tubo de vidrio con boquillas cónicas, pues se vende comercialmente a bajo costo en comparación con el tubo de boquillas cuadradas, el cual se fabrica sobre pedido.

-- La boquilla cónica presenta una mayor área de contacto con los asientos de las bridas que sirven para comprimir los sellos metálicos, permitiendo no se presenten con facilidad concentraciones de esfuerzos en los bordes de la boquilla, pues sus bordes están redondeados.

#### 5.4.2.2) LIMITACIONES DEL NUEVO DISEÑO.

-- Prácticamente no presenta desventaja en comparación con el tubo de boquillas cuadradas.

#### 5.5) PROCESO DE CONSTRUCCION Y PUESTA EN MARCHA DE LOS PROTOTIPOS DE LABORATORIO.

##### 5.5.1) PROCESO DE FABRICACION

Partiendo de los diseños propuestos en la sección anterior, se elaboraron los diseños de las piezas que los constituyen.

Para construir estas piezas, fue necesario cortar unas rodajas de una placa de acero inoxidable 304, por medio de una cortadora de plasma, utilizando las guías mostradas al final de este capítulo.

Una vez cortadas las rodajas, se procedió a elaborar las piezas en un torno, de acuerdo a las medidas especificadas en las figuras que muestran los diseños de estas piezas.

Una vez torneadas las piezas, se les dió un acabado a espejo (pulido a espejo) para poder utilizarlas como superficies de contacto para comprimir los sellos de vacío a ser probados.

## 5.5.2) ARMADO DE LOS PROTOTIPOS.

### 5.5.2.1) CON TUBO DE BOQUILLAS CUADRADAS

Una vez armado el tubo absorbedor con el tubo de vidrio de boquillas cuadradas, se procedió a montarlo en un soporte. A continuación se efectuaron las conexiones de éste con el sistema de bombeo, para posteriormente conectar los medidores de vacío y de temperatura, teniendo cuidado de comprimir los sellos de aluminio coontra las bridas de acero y contra el vidrio, de tal modo que el esfuerzo compresivo se distribuya lo más uniformemente posible para evitar concentración excesivas de esfuerzos sobre el vidrio. para lograr esto, se le pidió a la persona que construyó el tubo de vidrio que las caras de las boquillas quedaran lo más perpendiculares posible al eje longitudinal del tubo. Además, la superficie de las boquillas debe ser pulida.

Para revisar si las boquillas fueron bien construidas, primero se armó el prototipo del tubo absorbedor utilizando sellos de vitón en ambos extremos del tubo de vidrio para poder efectuar pruebas preliminares de funcionamiento a vacío burdo o mecánico del orden de 10 micrones.

### 5.5.2.2) CON TUBO DE BOQUILLAS CONICAS

El armado del tubo absorbedor con cubierta protectora de vidrio de boquillas cónicas requirió de menos cuidado que en el armado del prototipo con cubierta de boquillas cuadradas, pues en las boquillas cónicas el comprimirlas contra los sellos de aluminio no produce momentos flectores de magnitud lo suficientemente considerable como los que se pueden presentar en el tubo de vidrio de boquillas cuadradas, debiéndose tener cuidado de comprimir el sello metálico contra el tubo de vidrio de tal modo que la distribución de esfuerzos compresivos sea uniforme.

## 6. DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO

### 6.1 PRIMERAS PRUEBAS DE VACIO MECANICO USANDO SELLOS DE VITON

Se efectuaron varias pruebas de obtención de vacío (mecánico y de difusión) en el prototipo de laboratorio del tubo absorbedor evacuado con cubierta protectora con boquillas cuadradas; para poder conocer el funcionamiento de las uniones vidrio metal. Se utilizaron primeramente sellos de vitón a temperatura ambiente, para posteriormente efectuar las mismas pruebas con sellos metálicos a temperatura ambiente y con variación de la temperatura en el tubo absorbedor evacuado con cubierta de vidrio de boquillas cónicas.

Para poder efectuar un vacío del orden de  $10^{-5}$  Torr en el tubo absorbedor con cubierta de vidrio terminado en boquillas cuadradas, se efectuó primero una serie de pruebas de

funcionamiento del equipo de vacío para tener caracterizado al sistema de bombeo con el fin de saber cuales son los máximos vacíos que se pueden obtener en el sistema, y el tiempo necesario para lograrlos.

Para obtener la caracterización del sistema de vacío, se colocó una brida ciega en el extremo del tubo que conecta al sistema de bombeo con el tubo absorbedor y se efectua el proceso de evacuación, con bombeo mecánico, de la bomba de difusión y los tubos de conexión de esta bomba al tubo absorbedor, obteniendo como función del tiempo la curva de vacío logrado dentro de esta porción del sistema de bombeo.

En las primeras pruebas se observó que a bombeo continuo no se obtenían vacíos inferiores a  $10^{-3}$  Torr, indicando con esto que la bomba mecánica se encontró en buenas condiciones de funcionamiento, estable por períodos prolongados de tiempo, es decir: se obtiene una curva de vacío similar cada vez que se pone en funcionamiento. La gráfica de la figura 6.1 muestra que efectivamente la bomba mecánica utilizada estaba en buenas condiciones de funcionamiento.

Se procedió a cerrar la válvula que conecta a la bomba difusora con la bomba mecánica para comprobar si el vacío obtenido en el interior de la bomba difusora no se perdía rápidamente, indicando con esto la no conservación del vacío dependiente del correcto sellado en uniones de piezas, efectuadas con sellos de vitón tales como: unión de la entrada de la bomba difusora a la trampa de frío, conexión de la trampa de frío a la válvula de apertura de entrada de la bomba de difusión, conexión de la bomba mecánica a la bomba de difusión, conexión de la bomba difusora al sistema de medidores (Ion gauge y termopar), entre otras; ó a la presencia de grietas en las uniones efectuadas por medio de sol-

NO EXISTE

PAGINA

dadura como pueden ser: uniones de los tubos que conectan a la entrada de la bomba de difusión con el espacio anular del tubo absorbedor o de otro tipo.

Se encontró que una vez obtenido un vacío cercano a  $10^{-3}$  Torr, al aplicar acetona a las zonas de sellado efectuadas con arosellos de vitón, se encontró que no había variaciones en la lectura del vacío obtenido, indicando el buen funcionamiento de estos sellos en este intervalo de vacío.

Pero, al aplicar acetona a las uniones realizadas por soldadura, se encontró que variaba la lectura de vacío, indicando con esto la presencia de porosidades o grietas en la soldadura, por lo que, no se podía proceder a efectuar pruebas de vacío del orden de  $10^{-4}$  Torr o menores.

Para corregir este defecto, fue necesario sellarlas con glyptal, la cual es una sustancia que se aplica como pintura líquida sobre la superficie donde se encuentran las porosidades, para que al endurecerse el barniz tape el poro al introducirse la sustancia en las porosidades y endurecerse en su interior.

Selladas las fugas encontradas en todas las secciones del sistema de bombeo para vacío del orden de  $10^{-3}$  Torr, se procedió a realizar pruebas de funcionamiento, con bombeo mecánico, de todo el sistema de vacío mostrado en la figura 6.2 . Para ello se colocó una brida ciega en el extremo del tubo que conecta al tubo absorbedor con el sistema de bombeo, se efectuó vacío con la bomba mecánica y se midieron nuevamente los vacíos logrados por unidad de tiempo, pudiéndose determinar la pérdida de vacío por desgasificación de los sellos de vitón presentes en el sistema, obteniéndose la curva de la figura 6.3 .



De la prueba descrita anteriormente, resulta que el vacío cambia de 10 a 15 micrones en un periodo de tiempo de dos días, resultado que permitió el decidir revizar el funcionamiento de la bomba de difusión para altos vacíos (entre  $10^{-4}$  y  $10^{-6}$  Torr) con su entrada tapada con una brida ciega.

## 6.2 PRUEBAS CON BOMBEO DE DIFUSION

Una vez logrado el máximo vacío obtenible con la bomba mecánica (  $10^{-3}$  Torr ), se conectó el calefactor de la bomba difusora durante 30 minutos para alcanzarr la temperatura adecuada de calentamiento del aceite de la difusora, cuidando de tener siempre el sistema de enfriamiento por agua en funcionamiento continuo durante todo el tiempo de operación de la difusora y tambien durante el tiempo de enfriamiento de la misma después de desconectar el calefactor. Tambien se debe cuidar que la trampa de frio tenga el suficiente aire o nitrógeno líquido para impedir que moléculas de aceite penetren al sistema en evacuación, contaminándolo.

En las primeras pruebas de vacío se encontró que las conexiones de los medidores de vacío (Ion gauge y termopar) hechas con latón son conecciones con multitud de porosidades que originan vias de acceso de aire al interior del sistema de vacío para vacíos de  $10^{-5}$  Torr o menores, por esto, se cambiaron estas conecciones de latón por unas similares hechas de acero inoxidable.

Se repitieron las pruebas de vacío, resultando que se tubieron buenos resultados en el funcionamiento del sistema de vacío,

Una vez caracterizado todo el sistema de bombeo, se procedió a conectar el sistema de bombeo a la válvula de aguja (ver figura 6.4), que conecta al espacio anular entre el tubo absorbedor y su cubierta de vidrio para conocer su comportamiento como dispositivo de cierre con sello metálico, para que una vez obtenido el vacío deseado en el tubo absorbedor ( entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$  Torr ) se cierre esta válvula para dejar aislado al sistema de bombeo del espacio anular en el tubo absorbedor y conservar ese vacío por períodos de tiempo prolongados sin necesidad de bombeo continuo.

### 6.3 VALVULA METALICA DE AGUJA

El diseño de la válvula de aguja se efectuó considerando que la zona en donde se ponen en contacto el cuerpo de la válvula con la aguja debe soportar esfuerzos de compresión lo suficientemente intensos como para que la aguja se deforme en el límite elasto-plástico al material del cuerpo de la válvula, produciéndose el efecto de sellado deseado.

El diámetro del orificio por el cual se efectúa la conducción en la válvula de aguja es de 0.6 mm, permitiendo la fuerza necesaria para producir el sellado. Esta fuerza se encuentra distribuida en la pequeña área de contacto entre el cuerpo de la válvula y la superficie de la aguja produciendo con estos esfuerzos de compresión (lo convenientemente altos) la plastificación del material del cuerpo de la válvula en el área de contacto.

Al efectuar las pruebas de funcionamiento de esta válvula se obtuvo que el tiempo requerido para efectuar el proceso de evacuación es muy largo para el tipo de vacío que se desea exista en el espacio anular. Al ser muy pequeño el orificio de la válvula

No Existe

PAGINA

se tiene que la conductancia es muy baja cuando el flujo de aire a través de este orificio pasa de ser flujo viscoso a flujo molecular; siendo que en el flujo viscoso una gran cantidad de los átomos y moléculas del aire en el espacio en evacuación chocan con el orificio, y conforme baja el número de átomos y moléculas en ese espacio, disminuye la probabilidad de que estas partículas choquen con el orificio, teniéndose que conforme aumenta el camino libre medio de cada partícula de aire en se espacio en evacuación, el movimiento azaroso de cada partícula origina que el paso a través del orificio sea cada vez menos frecuente.

El vacío obtenido tanto antes como después de la válvula de aguja no es el mismo (ver figuras 6.5a y 6.5b), pues el diámetro del orificio de la válvula no permite se evacúe rápidamente el espacio anular del tubo absorbedor, haciendo que la velocidad de bombeo sea pequeña, y por lo tanto, el tiempo de bombeo se incrementa, teniendo por ejemplo que en las primeras pruebas efectuadas se logró un vacío de  $1.4 \times 10^{-5}$  Torr en el sistema de bombeo, mientras que en el mismo tiempo en el tubo absorbedor se conseguía un vacío de 20 micrones, mostrando que el vacío diferencial entre la entrada y la salida de la válvula de aguja fuera de un valor muy alto.

Para saber si funcionan adecuadamente los sellos metálicos de Estaño Plomo colocados en las uniones vidrio metal del tubo absorbedor se conectó directamente el espacio anular entre el tubo absorbedor y su cubierta de vidrio, teniendo que sin la válvula de aguja se mejora notablemente el tiempo de evacuación. Por tal motivo, se desistió utilizar una válvula con sello metálico con una apertura de entrada con alta conductancia en comparación con la manifestada en la válvula de aguja antes mencionada, corrigiéndose el problema presentado en los ensayos hechos con la válvula de aguja.

#### 6.4 VALVULA DE ACERO CON SELLO DE COBRE

La nueva válvula utilizada en lugar de la válvula de aguja es una válvula con cuerpo de acero inoxidable (fig. 6.6a y 6.6b); el sellado se efectúa con cobre y tiene un diámetro de la sección de paso de 15.875 mm, la cual en comparación con la sección de 0.6 mm de la válvula de aguja se tiene una mejora considerable en la conductancia, como se muestra en la tabla siguiente:

TABLA III

VALVULA	APERTURA (en mm)	CONDUCTANCIA (en lt/seg)
de aguja	0.6	3.28
de sello metálico	15.87	22.96

Una vez armado el tubo absorbedor con la cubierta de vidrio de boquillas cónicas, se conectó la nueva válvula de sello metálico al tubo absorbedor, y se efectuaron las pruebas de vacío a bombeo continuo y a temperatura ambiente, colocando sellos de vitón en las uniones vidrio metal con el fin de evitar al máximo el romper el tubo de vidrio en estas pruebas preliminares.

Los resultados de estas pruebas preliminares se muestran en la figura 6.7, en la cual se observa cómo el vacío en el tubo absorbedor se mantiene constante en un valor de  $6 \times 10^{-3}$  Torr con bombeo continuo. Al cerrarse la válvula se perdió el vacío obtenido por difusión, siguiendo la curva de desgasificación de los arosellos de vitón (fig. 6.8).

PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE VACIO (BOMBEO MECANICO)

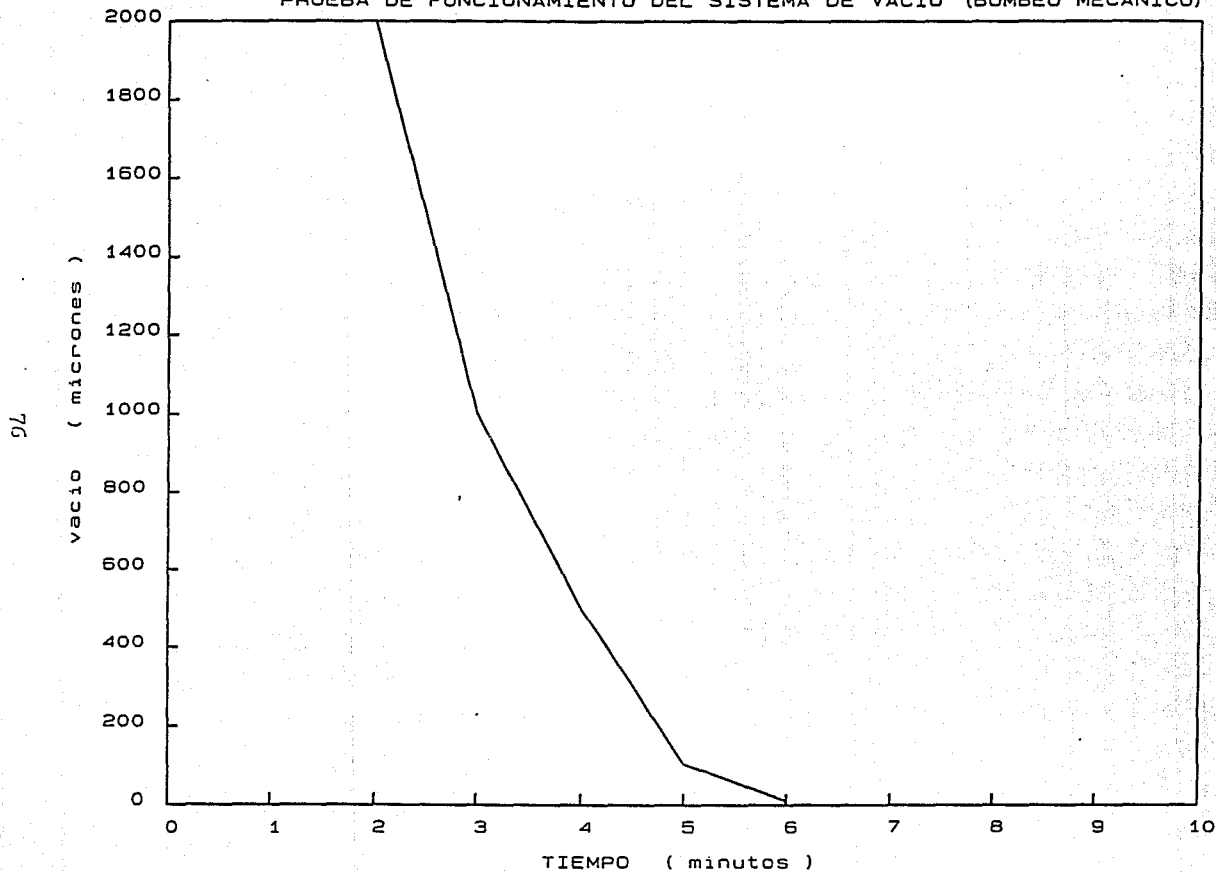


Fig 6.1 Bombeo mecánico en el sistema de vacío

SE REPITE  
DE LA PAG. 76

Mac. Coloca-  
das.

PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE VACIO (BOMBEO MECANICO)

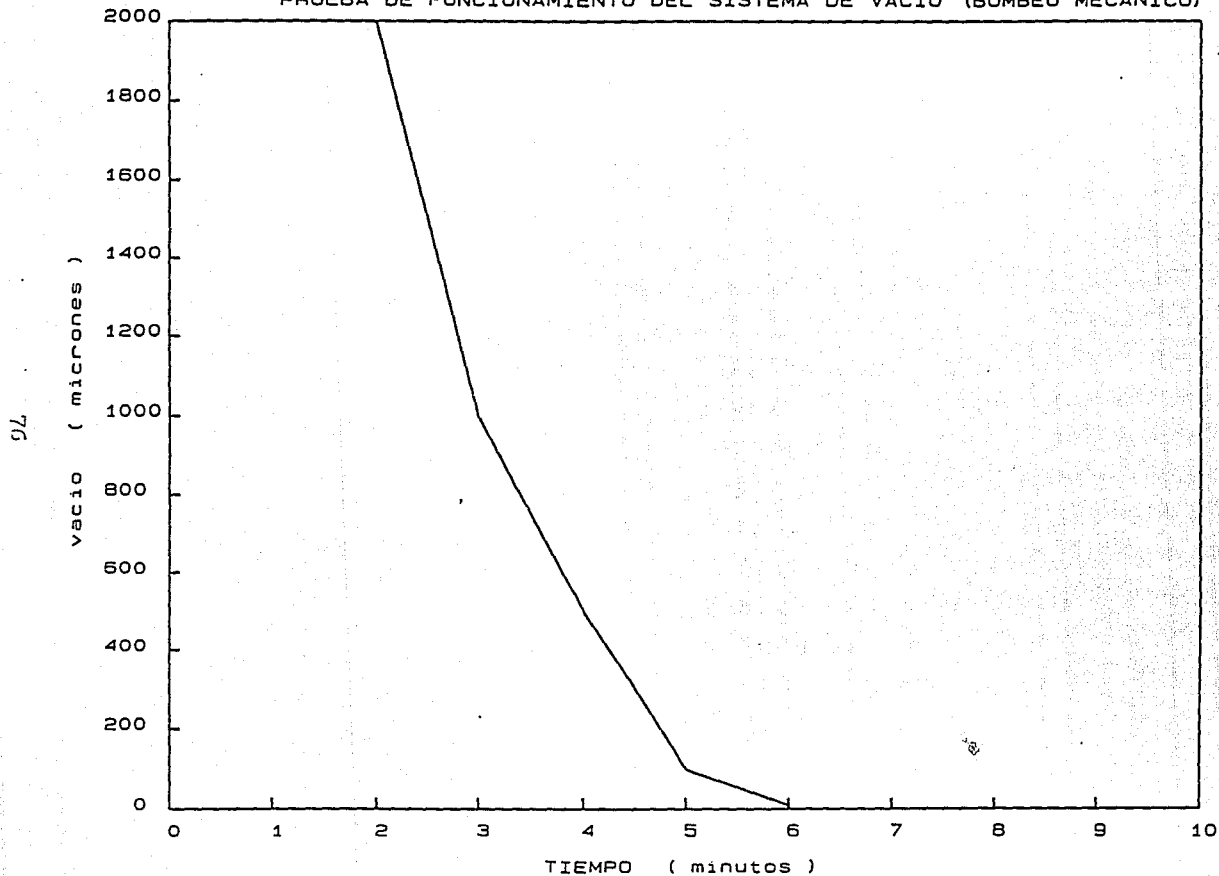


Fig 6.1 Bombeo mecánico en el sistema de vacío



dadura como pueden ser: uniones de los tubos que conectan a la entrada de la bomba de difusión con el espacio anular del tubo absorbedor o de otro tipo.

Se encontró que una vez obtenido un vacío cercano a  $10^{-3}$  Torr, al aplicar acetona a las zonas de sellado efectuadas con arosellos de vitón, se encontró que no había variaciones en la lectura del vacío obtenido, indicando el buen funcionamiento de estos sellos en este intervalo de vacío.

Pero, al aplicar acetona a las uniones realizadas por soldadura, se encontró que variaba la lectura de vacío, indicando con esto la presencia de porosidades o grietas en la soldadura, por lo que, no se podía proceder a efectuar pruebas de vacío del orden de  $10^{-4}$  Torr o menores.

Para corregir este defecto, fue necesario sellarlas con glyptal, la cual es una sustancia que se aplica como pintura líquida sobre la superficie donde se encuentran las porosidades, para que al endurecerse el barniz tape el poro al introducirse la sustancia en las porosidades y endurecerse en su interior.

Selladas las fugas encontradas en todas las secciones del sistema de bombeo para vacío del orden de  $10^{-3}$  Torr, se procedió a realizar pruebas de funcionamiento, con bombeo mecánico, de todo el sistema de vacío mostrado en la figura 6.2 . Para ello se colocó una brida ciega en el extremo del tubo que conecta al tubo absorbedor con el sistema de bombeo, se efectuó vacío con la bomba mecánica y se midieron nuevamente los vacíos logrados por unidad de tiempo, pudiéndose determinar la pérdida de vacío por desgasificación de los sellos de vitón presentes en el sistema, obteniéndose la curva de la figura 6.3 .

# PRUEBA CON BOMBEO MECANICO BFIDA CIEGA (ENTRADA DE DIFUSORA)

78

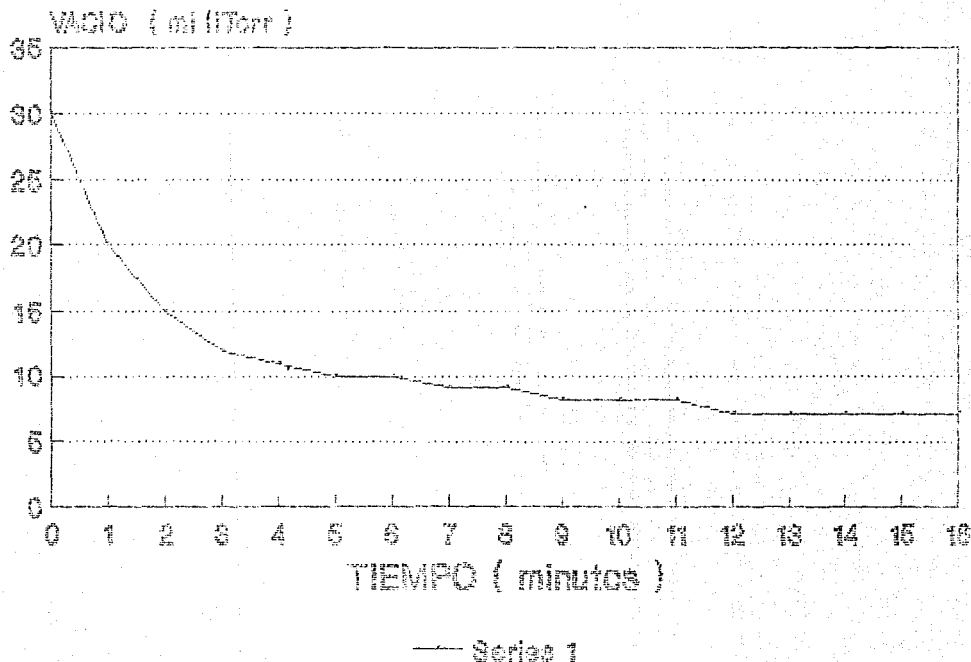


Fig 6.2 Bombeo mecánico en la bomba de difusión

## DESGASIFICACION DEL TUBO AB.

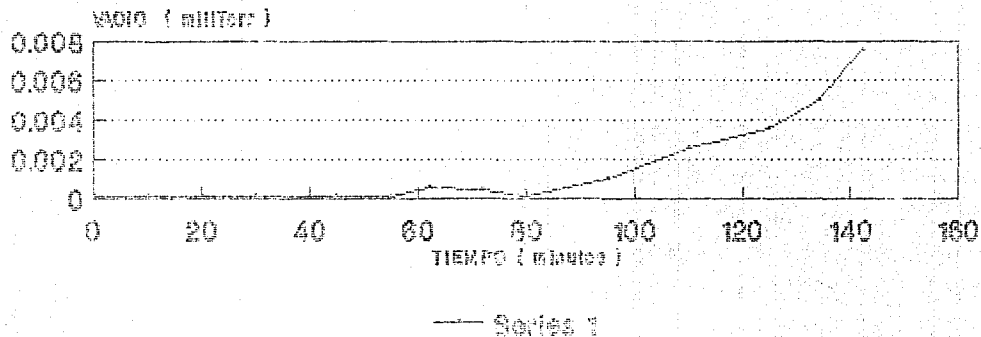


Fig 3.6 Desgasificación del tubo absorbedor

De la prueba descrita anteriormente, resulta que el vacío cambia de 10 a 15 micrones en un período de tiempo de dos días, resultado que permitió el decidir revizar el funcionamiento de la bomba de difusión para altos vacíos (entre  $10^{-4}$  y  $10^{-6}$  Torr) con su entrada tapada con una brida ciega.

## 6.2 PRUEBAS CON BOMBEO DE DIFUSION

Una vez logrado el máximo vacío obtenible con la bomba mecánica (  $10^{-3}$  Torr ), se conectó el calefactor de la bomba difusora durante 30 minutos para alcanzarr la temperatura adecuada de calentamiento del aceite de la difusora, cuidando de tener siempre el sistema de enfriamiento por agua en funcionamiento continuo durante todo el tiempo de operación de la difusora y tambien durante el tiempo de enfriamiento de la misma después de desconectar el calefactor. Tambien se debe cuidar que la trampa de frío tenga el suficiente aire o nitrógeno líquido para impedir que moléculas de aceite penetren al sistema en evacuación, contaminándolo.

En las primeras pruebas de vacío se encontró que las conexiones de los medidores de vacío (Ion gauge y termopar) hechas con latón son conecciones con multitud de porosidades que originan vias de acceso de aire al interior del sistema de vacío para vacíos de  $10^{-5}$  Torr o menores, por esto, se cambiaron estas conecciones de latón por unas similares hechas de acero inoxidable.

Se repitieron las pruebas de vacío, resultando que se tubieron buenos resultados en el funcionamiento del sistema de vacío,

Una vez caracterizado todo el sistema de bombeo, se procedió a conectar el sistema de bombeo a la válvula de aguja (ver figura 6.4), que conecta al espacio anular entre el tubo absorbedor y su cubierta de vidrio para conocer su comportamiento como dispositivo de cierre con sello metálico, para que una vez obtenido el vacío deseado en el tubo absorbedor ( entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$  Torr ) se cierre esta válvula para dejar aislado al sistema de bombeo del espacio anular en el tubo absorbedor y conservar ese vacío por períodos de tiempo prolongados sin necesidad de bombeo continuo.

### 6.3 VALVULA METALICA DE AGUJA

El diseño de la válvula de aguja se efectuó considerando que la zona en donde se ponen en contacto el cuerpo de la válvula con la aguja debe soportar esfuerzos de compresión lo suficientemente intensos como para que la aguja se deforme en el límite elasto-plástico al material del cuerpo de la válvula, produciéndose el efecto de sellado deseado.

El diámetro del orificio por el cual se efectúa la conducción en la válvula de aguja es de 0.6 mm, permitiendo la fuerza necesaria para producir el sellado. Esta fuerza se encuentra distribuida en la pequeña área de contacto entre el cuerpo de la válvula y la superficie de la aguja produciendo con estos esfuerzos de compresión (lo convenientemente altos) la plastificación del material del cuerpo de la válvula en el área de contacto.

Al efectuar las pruebas de funcionamiento de esta válvula se obtuvo que el tiempo requerido para efectuar el proceso de evacuación es muy largo para el tipo de vacío que se desea exista en el espacio anular. Al ser muy pequeño el orificio de la válvula

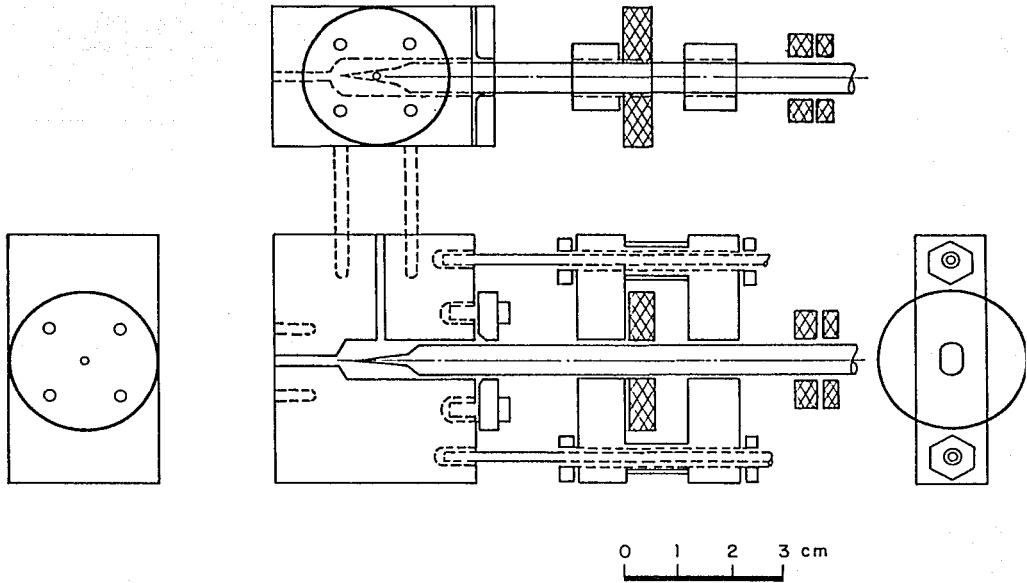


Fig 6.4 Válvula de aguja-para altos vacíos

se tiene que la conductancia es muy baja cuando el flujo de aire a través de este orificio pasa de ser flujo viscoso a flujo molecular; siendo que en el flujo viscoso una gran cantidad de los átomos y moléculas del aire en el espacio en evacuación chocan con el orificio, y conforme baja el número de átomos y moléculas en ese espacio, disminuye la probabilidad de que estas partículas choquen con el orificio, teniéndose que conforme aumenta el camino libre medio de cada partícula de aire en ese espacio en evacuación, el movimiento azaroso de cada partícula origina que el paso a través del orificio sea cada vez menos frecuente.

El vacío obtenido tanto antes como después de la válvula de aguja no es el mismo (ver figuras 6.5a y 6.5b), pues el diámetro del orificio de la válvula no permite se evacúe rápidamente el espacio anular del tubo absorbedor, haciendo que la velocidad de bombeo sea pequeña, y por lo tanto, el tiempo de bombeo se incrementa, teniendo por ejemplo que en las primeras pruebas efectuadas se logró un vacío de  $1.4 \times 10^{-5}$  Torr en el sistema de bombeo, mientras que en el mismo tiempo en el tubo absorbedor se conseguía un vacío de 20 micrones, mostrando que el vacío diferencial entre la entrada y la salida de la válvula de aguja fuera de un valor muy alto.

Para saber si funcionan adecuadamente los sellos metálicos de Estaño Plomo colocados en las uniones vidrio metal del tubo absorbedor se conectó directamente el espacio anular entre el tubo absorbedor y su cubierta de vidrio, teniendo que sin la válvula de aguja se mejora notablemente el tiempo de evacuación. Por tal motivo, se decidió utilizar una válvula con sello metálico con una apertura de entrada con alta conductancia en comparación con la manifestada en la válvula de aguja antes mencionada, corrigiéndose el problema presentado en los ensayos hechos con la válvula de aguja.

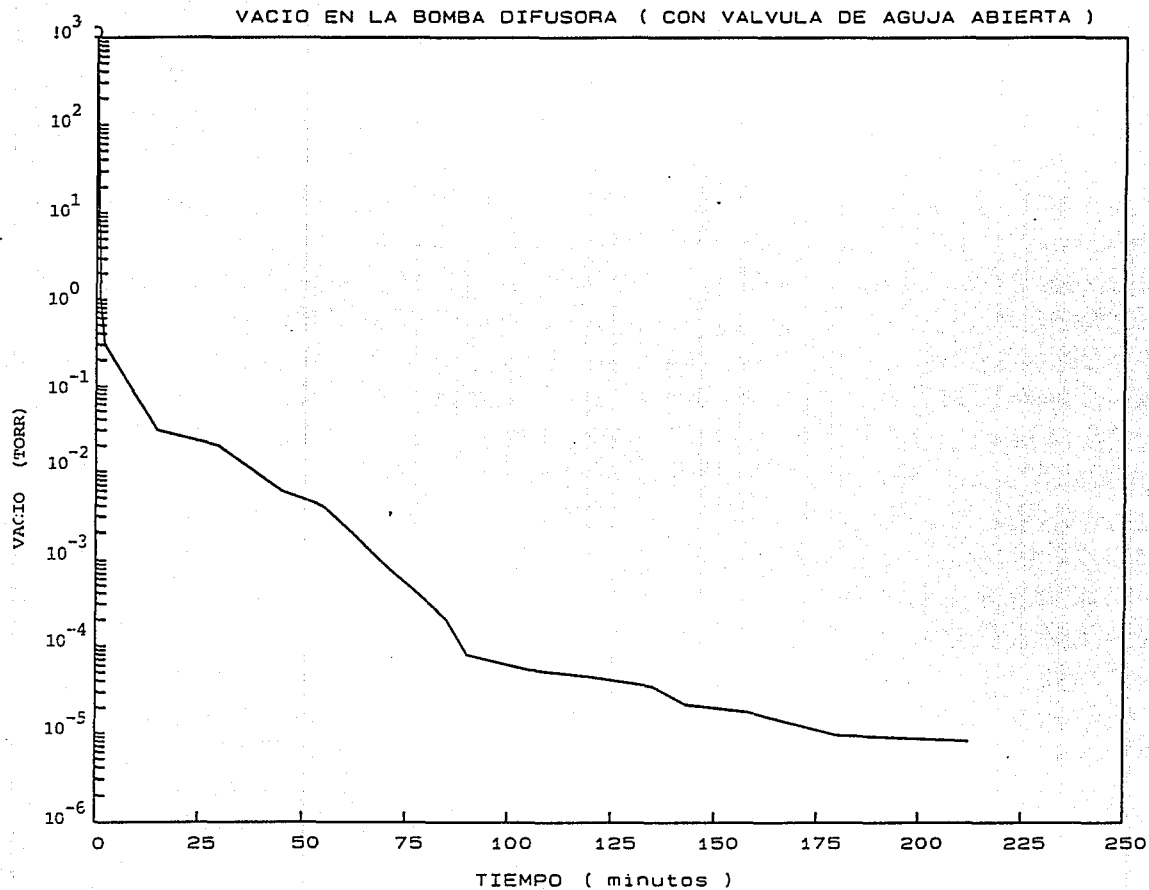


Fig 6.5a) Vacío en bomba difusora (valvula aguja abierta)



PERDIDA DE VACIO POR DESGASIFICACION DE O-RINGS DE VITON

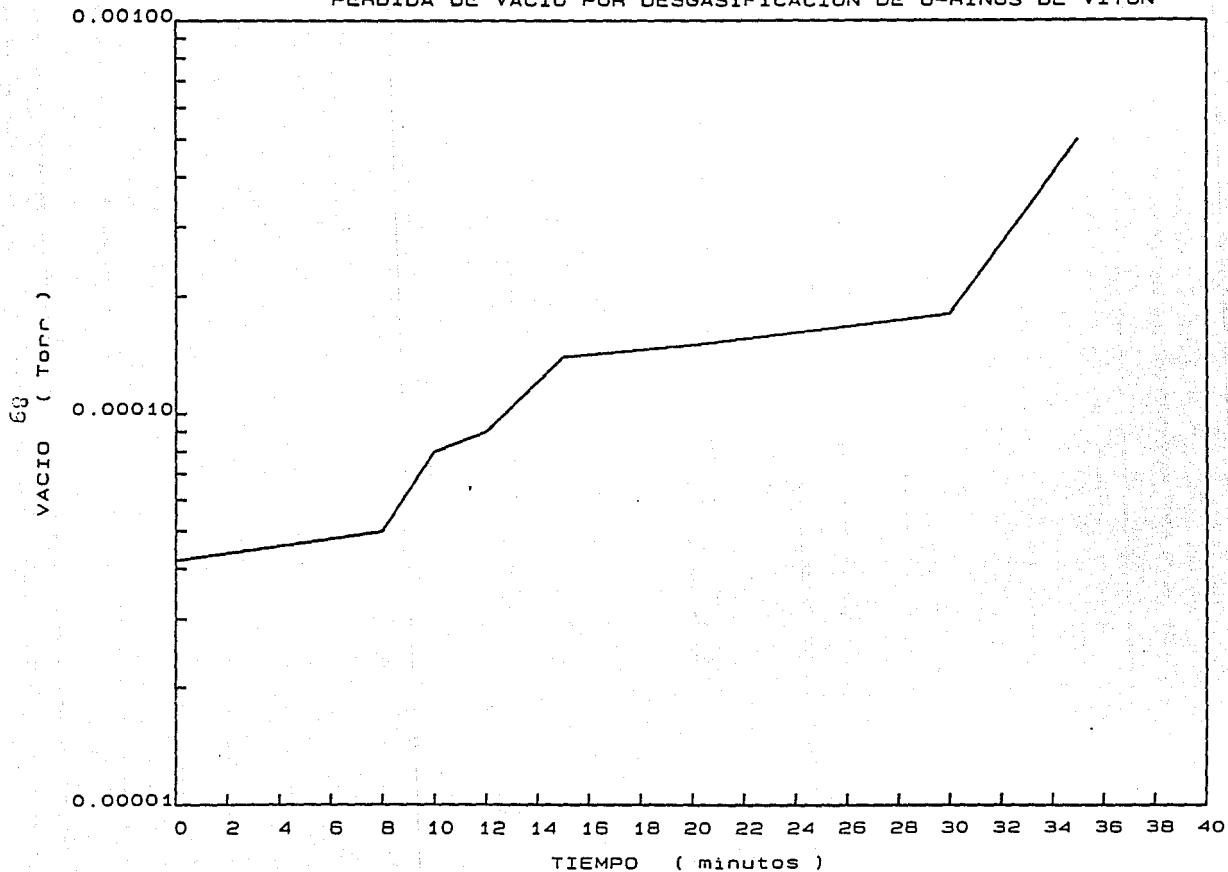


Fig 6.8 Desgasificación de O-rings de viton

50

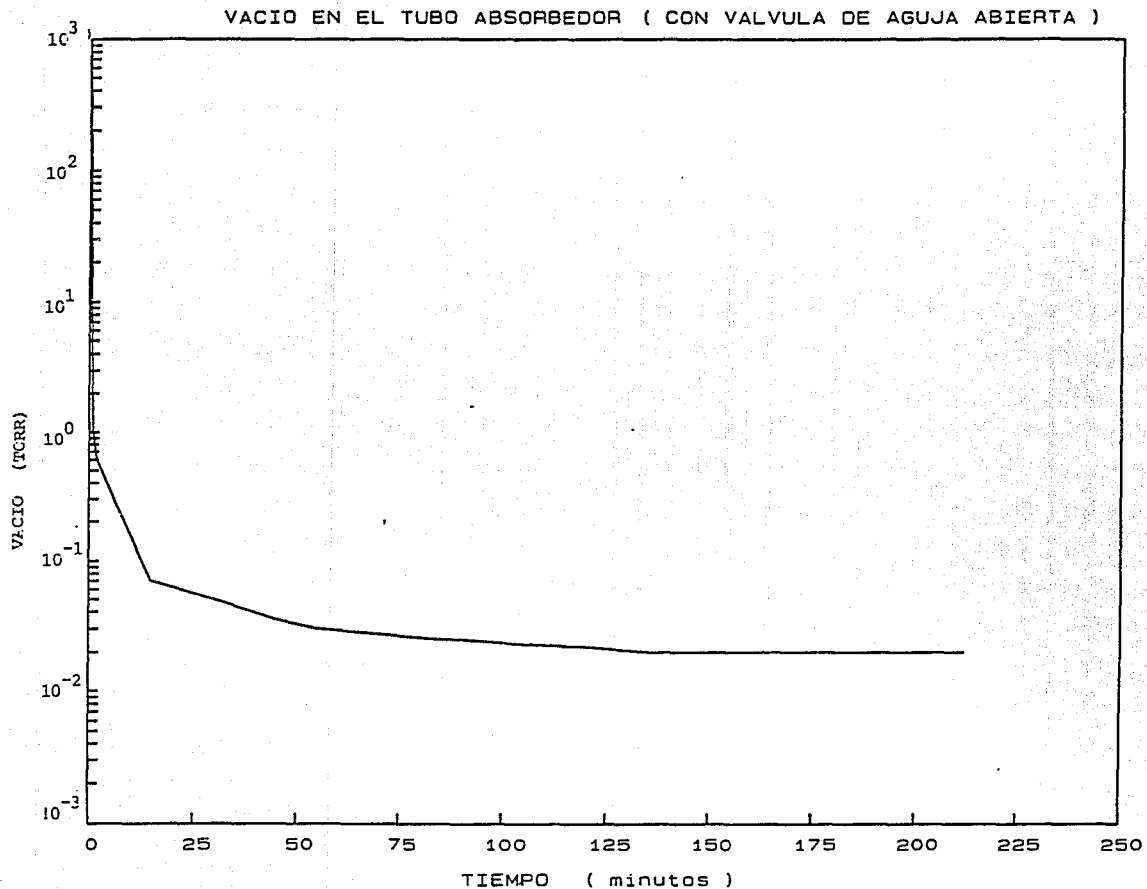


Fig 6.5b) Vacío en tubo absorbedor (valvula,aguja abierta)

#### 6.4 VALVULA DE ACERO CON SELLO DE COBRE

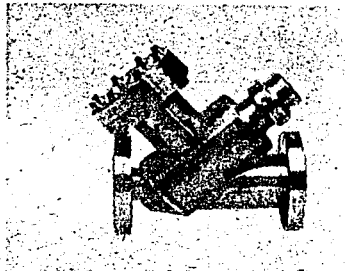
La nueva válvula utilizada en lugar de la válvula de aguja es una válvula con cuerpo de acero inoxidable (fig. 6.6a y 6.6b); el sellado se efectua con cobre y tiene un diámetro de la sección de paso de 15.875 mm, la cual en comparación con la sección de 0.6 mm de la válvula de aguja se tiene una mejora considerable en la conductancia, como se muestra en la tabla siguiente:

TABLA III

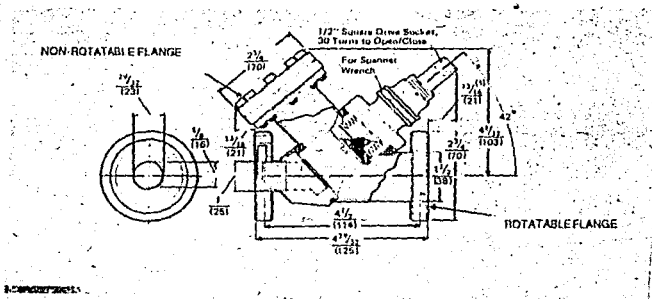
VALVULA	APERTURA (en mm)	CONDUCTANCIA (en lt/seg)
de aguja	0.6	3.28
de sello metálico	15.87	22.96

Una vez armado el tubo absorbedor con la cubierta de vidrio de boquillas cónicas, se conectó la nueva válvula de sello metálico al tubo absorbedor, y se efectuaron las pruebas de vacío a bombeo continuo y a temperatura ambiente, colocando sellos de vitón en las uniones vidrio metal con el fin de evitar al máximo el romper el tubo de vidrio en estas pruebas preliminares.

Los resultados de estas pruebas preliminares se muestran en la figura 6.7 , en la cual se observa cómo el vacío en el tubo absorbedor se mantiene constante en un valor de  $6 \times 10^{-3}$  Torr con bombeo continuo. Al cerrarse la válvula se perdió el vacío obtenido por difusión, siguiendo la curva de desgasificación de los arosellos de vitón (fig. 6.8).



a) Cuerpo de Acero Inoxidable

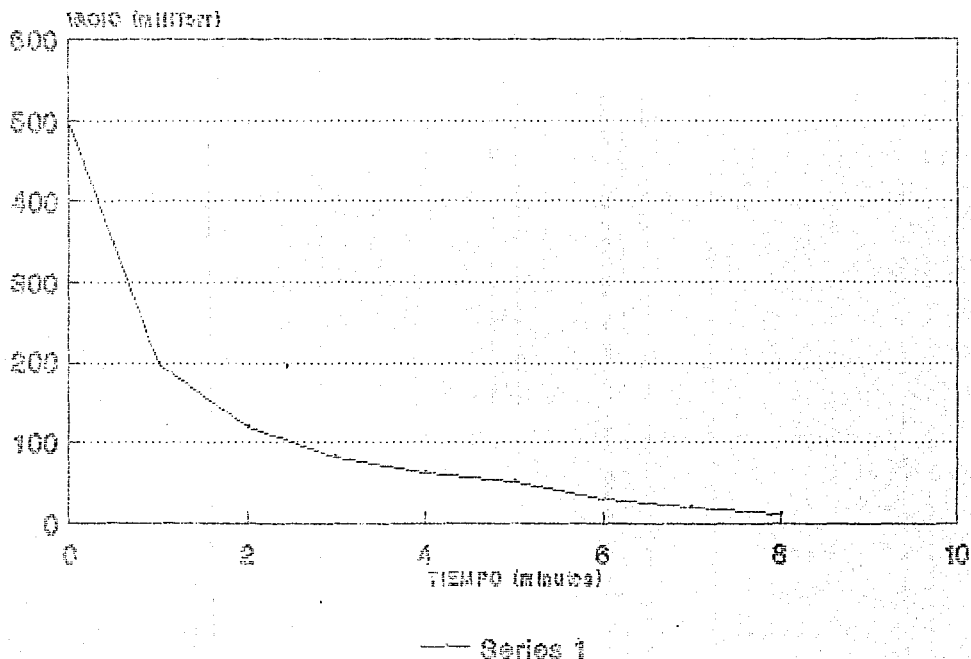


b) Sellaño cobre con acero

Fig. 6.6 Válvula de acero con sello de cobre

# VACIO DEL TUBO ABSORBEDOR BOMBA MECANICA CONECTADA DIRECTAMENTE

68



AL TUBO ABSORBEDOR

Fig 6.7 Vacío mecánico del tubo absorbedor

PRUEBA EN TUBO ABSORBEDOR CON SELLOS DE ALUMINIO (A TEMP. AMB.)

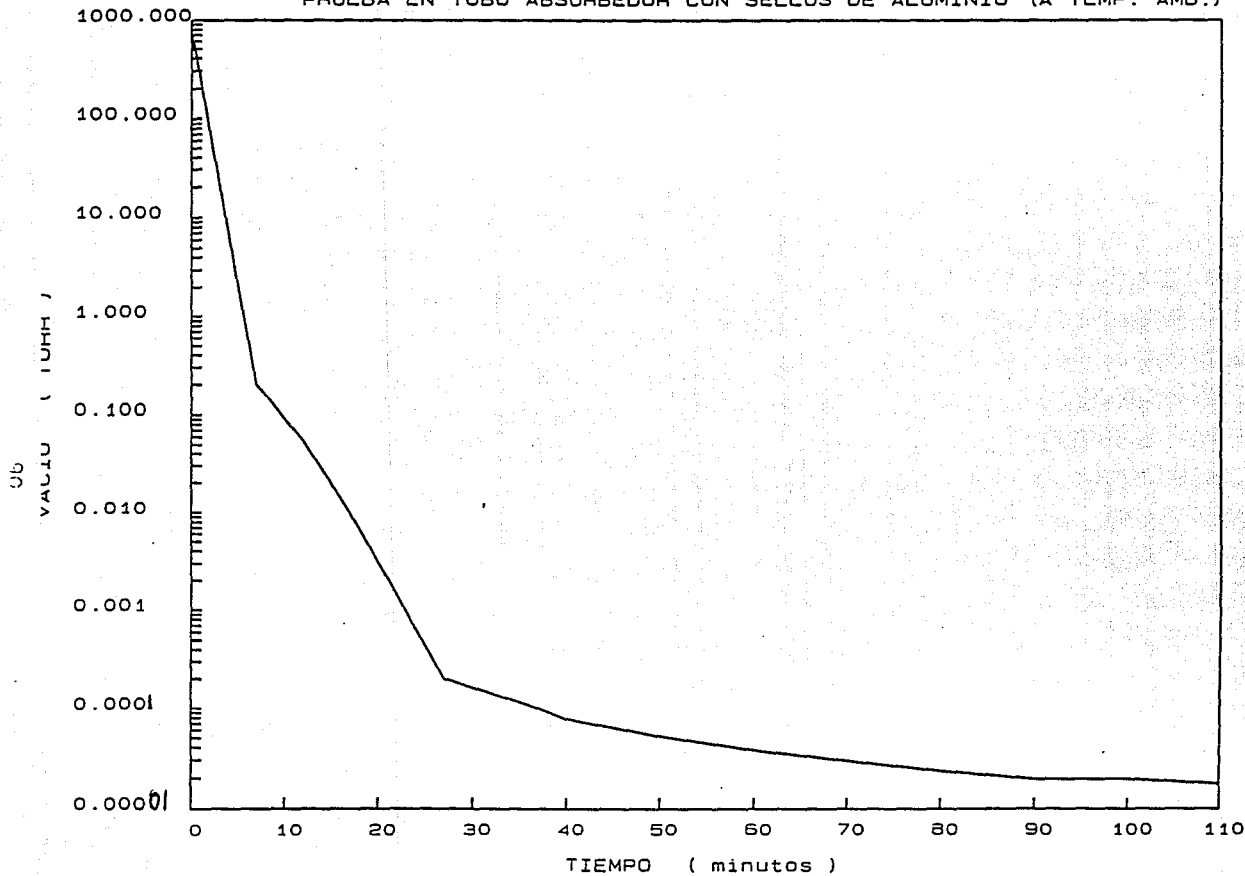


Fig-6.9 Prueba de vacío con sellos de aluminio (temperatura ambiente)

## 6.5 SELLOS METALICOS EN TODO EL SISTEMA, BRIDAS COMPROMIDAS A FUERZA CONSTANTE

A continuación se procedió a colocar sellos metálicos de aluminio en las uniones vidrio metal, las cuales son sometidas a esfuerzos de compresión por medio de un sistema de resortes, proporcionando los esfuerzos compresivos necesarios para que el material del sello pueda pasar del estado elástico al estado elastoplástico.

Se comprimió al sello metálico entre una brida metálica y la boquilla del tubo de vidrio, por medio de un sistema de resortes, para los cuales se obtuvo la curva de deformación (longitud del resorte) con respecto a la carga aplicada mostrada en la figura 3.6. Esta gráfica describe el comportamiento de los resortes cuando son sometidos a fuerzas de compresión, de tal modo que la fuerza total necesaria para aplicar los esfuerzos de compresión sobre los sellos sea aplicado lo más uniformemente posible para que el metal del sello pase del estado elástico al estado elastoplástico sin fracturar el tubo de vidrio.

Para efectuar esta prueba, se procedió a comprimir el sello metálico con un esfuerzo compresivo predeterminado por el comportamiento a la ruptura del vidrio (sin sobrepasar este límite). Estas pruebas fueron satisfactorias, logrando buenos resultados en su funcionamiento.

La obtención del vacío con respecto al tiempo, en el espacio anular, es mostrado en la figura 6.9 , habiéndose efectuado todas estas pruebas a temperatura ambiente. En esta gráfica se presenta la conservación de vacío (  $4 \times 10^{-5}$  a  $8.2 \times 10^{-5}$  ) por un espacio de tiempo de casi dos horas, comtinuándose la prueba por todo un fin

PRUEBA DE VACIO CON SELLOS METALICOS (EN FUNCION DE LA TEMPERATURA)

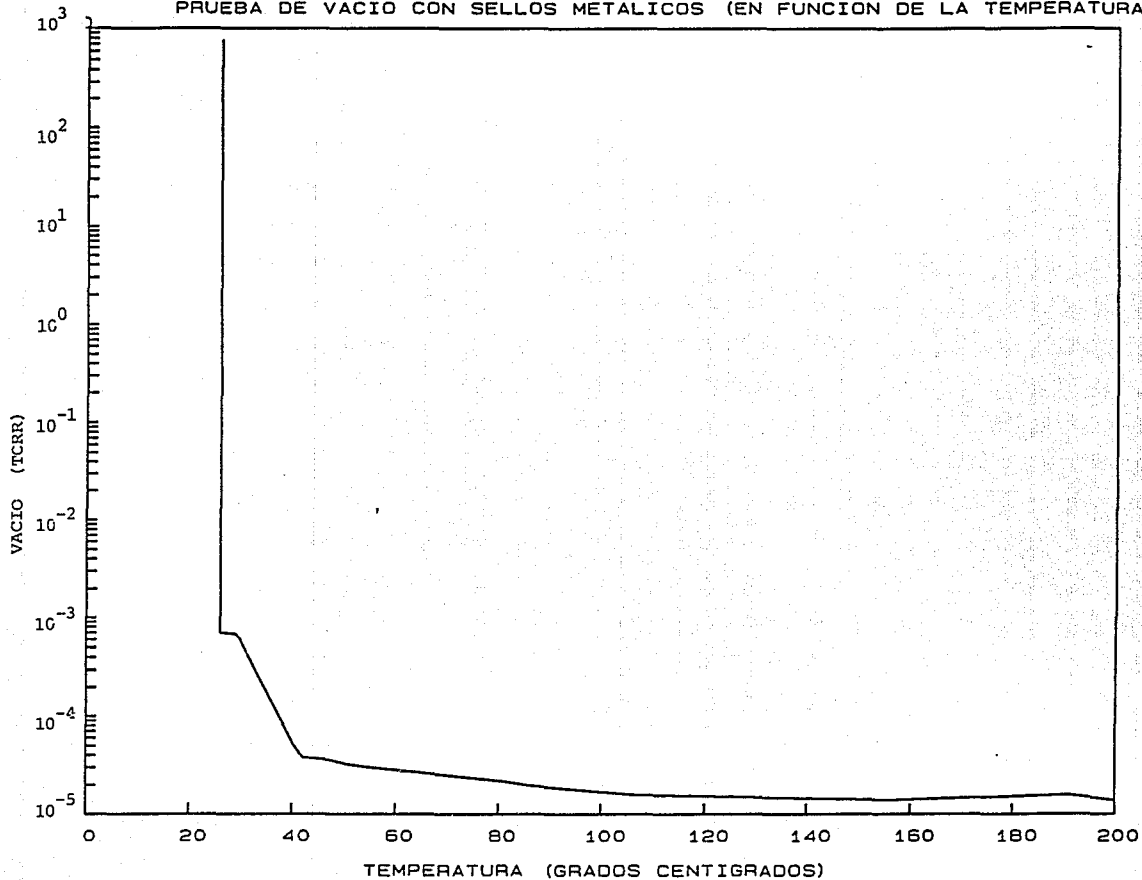


Fig 6.10 Prueba de vacío en función de la temperatura



de semana, resultando que no se tubieron pérdidas significativas de vacío en un período de tiempo de casi dos días, situación que da la pauta para poder iniciar pruebas de conservación de vacío bajo cambios de temperatura en el tubo absorbedor.

El calentamiento del tubo absorbedor se efectuó por medio de una resistencia eléctrica de 4000 Watts en forma de U, la cual se conectó a una línea de alimentación de corriente alterna de 127 volts; ésta se introdujo en el tubo metálico del tubo absorbedor para simular su calentamiento por la radiación solar, proporcionando de esta manera el calor necesario para elevar la temperatura del tubo absorbedor desde la ambiente hasta una temperatura máxima de 270°C .

La gráfica de la figura 6.10 muestra los resultados obtenidos en las pruebas de comportamiento del tubo absorbedor evacuado cuando se somete a un aumento en la temperatura; teniéndose que en el tubo de vidrio la temperatura no fuera mayor a los 93°C.

Se observó el vacío tanto durante el proceso de calentamiento, como el de enfriamiento, mostrándose en la gráfica 6.11 los resultados de la prueba de conservación de vacío cuando la temperatura se varió en función del tiempo, conservándose el vacío entre 0.028 y 0.032 micrones. -

TEMPERATURA EN FUNCION DEL TIEMPO  
PRUEBA CON CONSERVACION DE VACIO  
(entre 0.028 y 0.032 micrones)

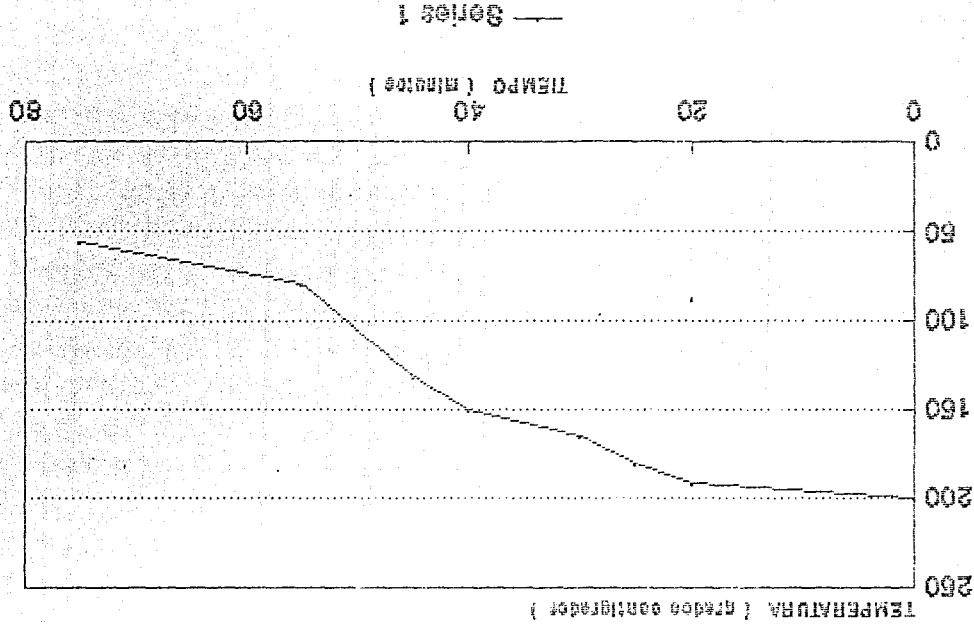


Fig 6.11 Pruebas de temperatura en función del tiempo

NO EXISTE

PAGINA

## **CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.**

Los resultados obtenidos hasta ahora permiten afirmar que la técnica desarrollada para el sellado para vacío en la unión vidrio metal por medio de sellos metálicos y un sistema de resortes es viable.

Esta técnica puede ser empleada en la unión vidrio metal de los tubos absorbedores evacuados y sus cubiertas de vidrio, pues los resultados obtenidos en el laboratorio son satisfactorios (ver gráficas del capítulo 6).

Las pruebas realizadas en el prototipo con boquillas cuadradas, y a temperatura ambiente, dan buenos resultados de funcionamiento de los sellos metálicos, pues se cumple como objetivo principal el no fracturar ni agrietar el tubo de vidrio, <sup>no</sup> originando pérdidas en el vacío. 97

Las pruebas realizadas en el prototipo con boquillas cónicas dan una orientación del orden de magnitud de la temperatura a la que puede funcionar un concentrador solar evacuado que utilice un tubo absorbedor como el propuesto.

La técnica desarrollada no solo muestra ser útil para la conservación de altos vacíos, sino también para ser empleada en las uniones de los tubos absorbedores que conducen el fluido caliente, permitiéndolo la conexión, en serie, de dos o más colectores solares (arreglo modular).

Como paso a seguir, se eliminará la utilización de los resortes, que amortiguan las dilataciones térmicas, por el uso de un solo resorte cuyo funcionamiento es similar al de la prensa de un embrague de automóvil; ó por rondanas de presión, ya que en las pruebas de campo es necesario utilizar un dispositivo sencillo (maneral de torque) que permita aplicar la fuerza necesaria para comprimir adecuadamente los sellos metálicos para deformarlos plásticamente y producir el sellado de vacío.

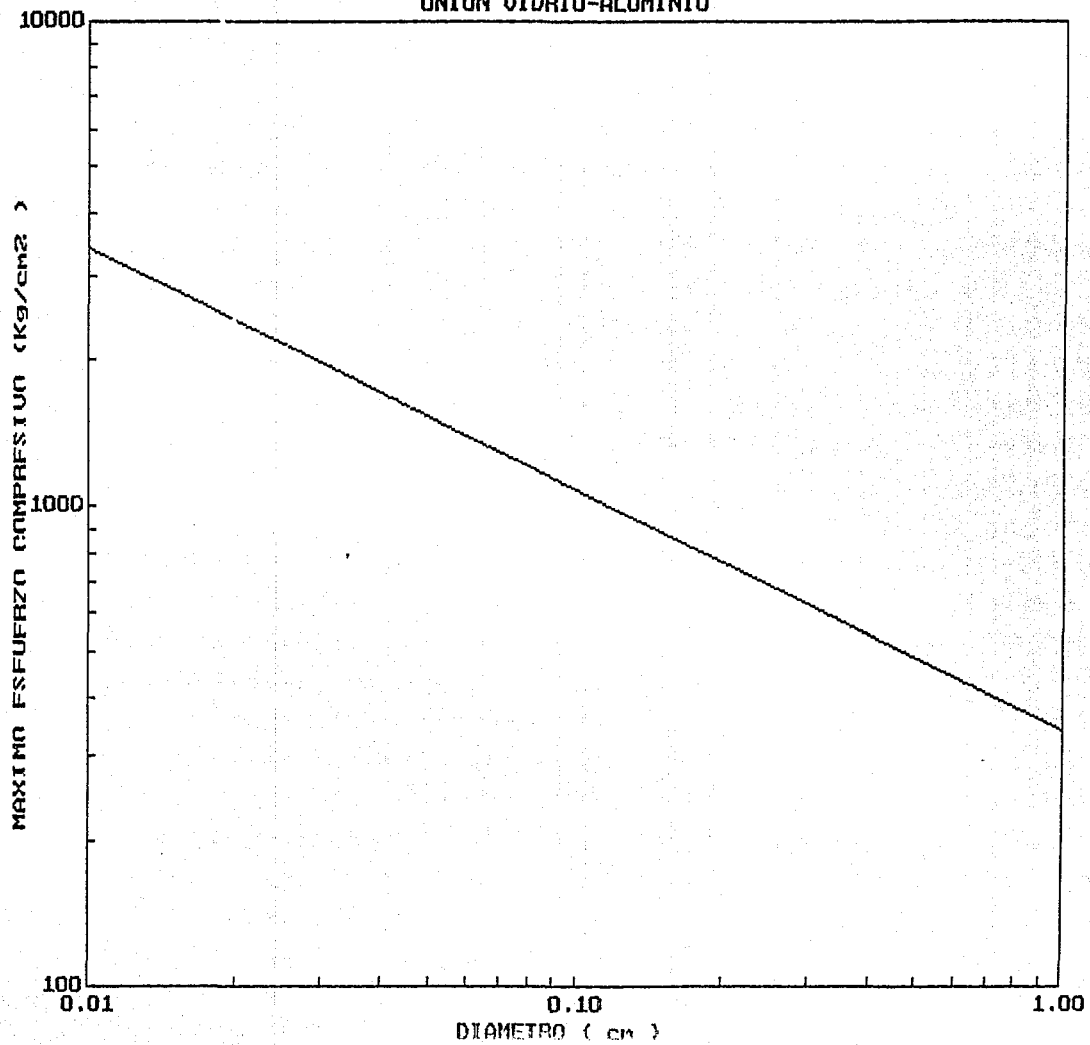
En la etapa siguiente de este proyecto se diseñará y construirá, en base a los conocimientos y experiencias adquiridas a lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis, un tubo absorbedor al vacío que funcione en el campo bajo condiciones reales de operación.

Se recomienda usar un adsorbedor (GETTER) pegado al tubo de vidrio, de manera que algunos gases introducidos en el espacio anular entre el tubo adsorbedor y el tubo de vidrio, ó desprendidos de las paredes internas de este espacio anular, sean adsorbidos por los GETTERS.

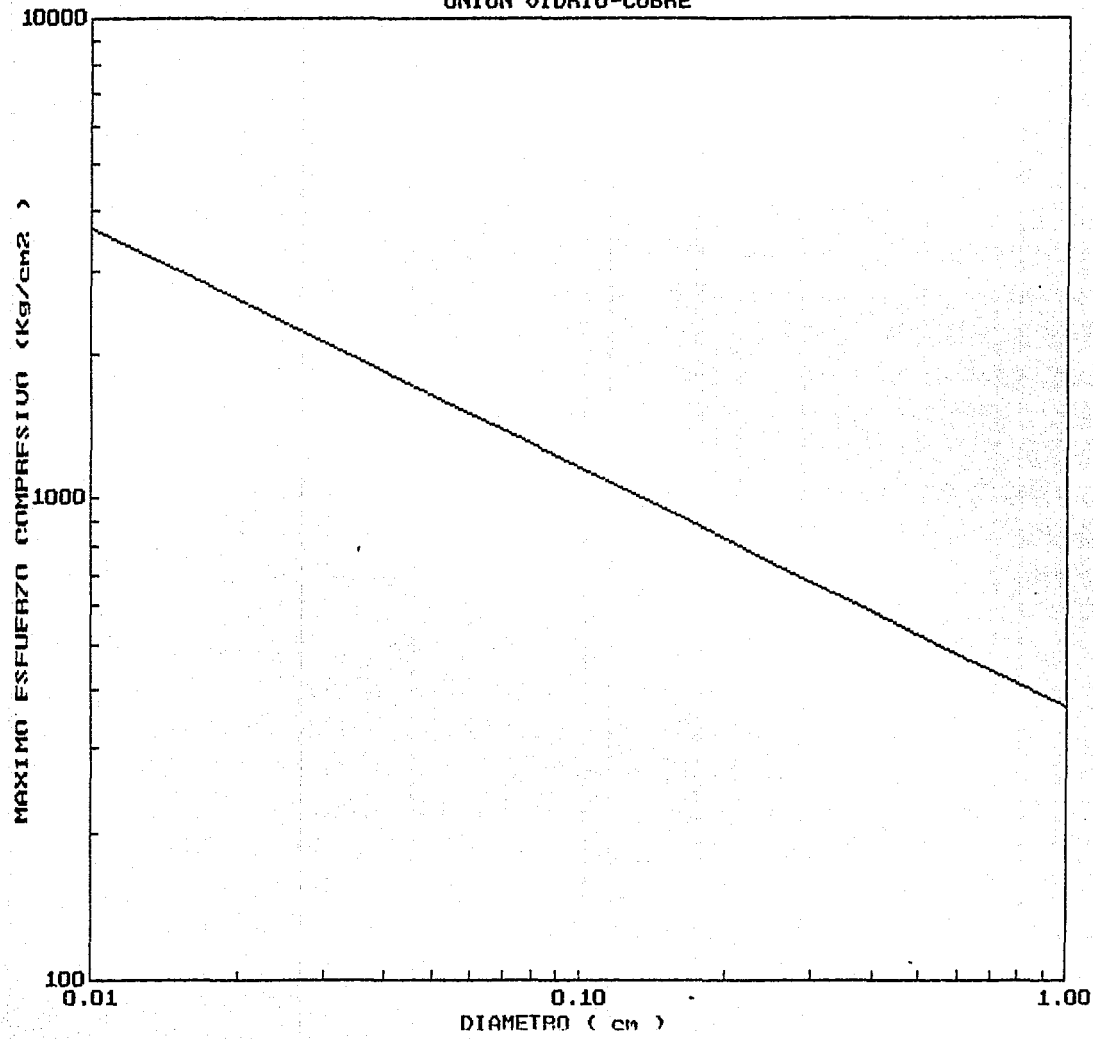
Con esta etapa experimental se puede afirmar que los logros obtenidos se podrán usar para mejorar la eficiencia de los concentradores solares evacuados, además de eliminar o disminuir la degradación de la película selectiva adherida al tubo metálico, ya que no se podrán producir interacciones químicas entre ésta y el aire.

Para el trabajo posterior en pruebas de campo, se agregan al final de esta sección de conclusiones y sugerencias, las gráficas de esfuerzos compresivos en función del diámetro de sección de un cilindro comprimido sobre un plano semiinfinito para los casos descritos en las mismas (ref. 10).

UNION VIDRIO-ALUMINIO



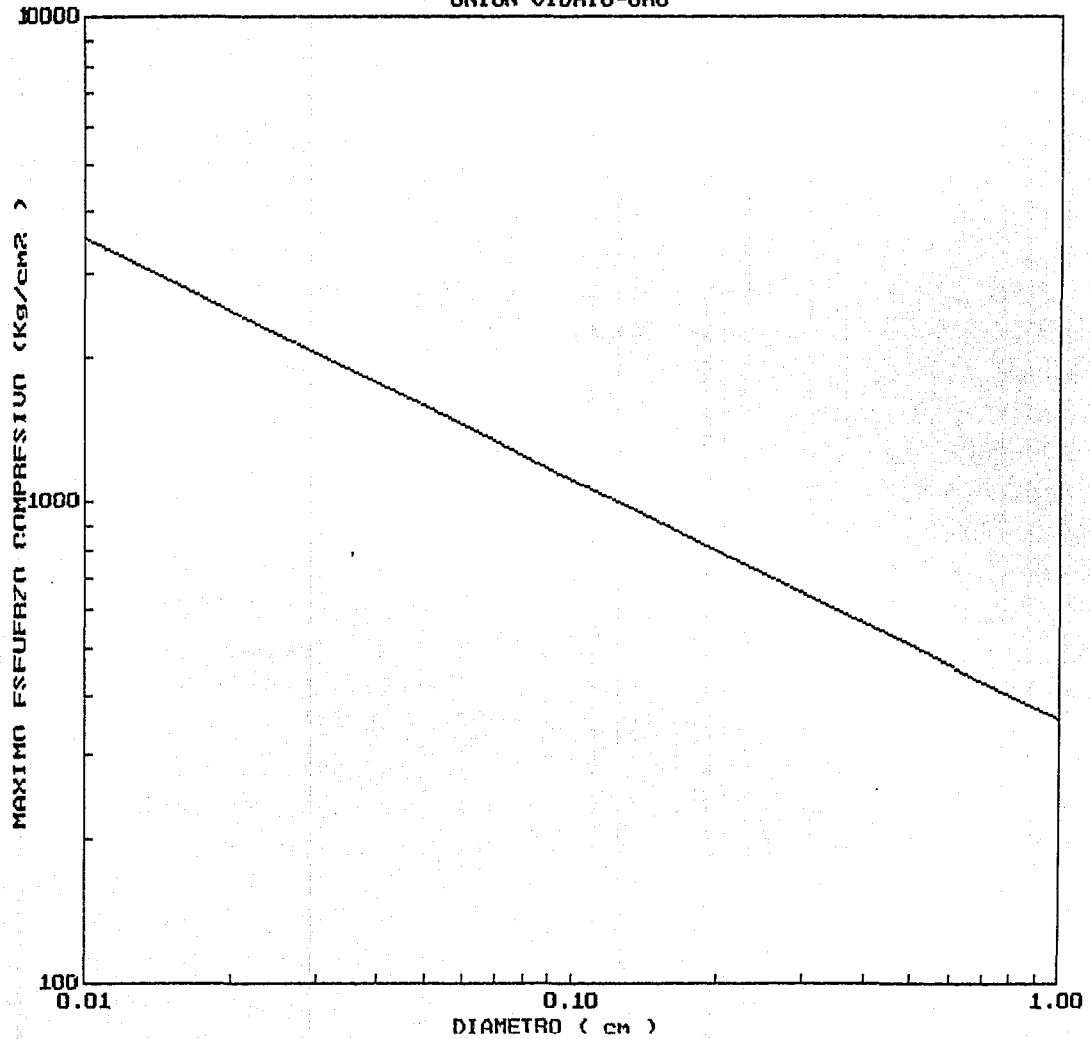
UNION VIDRIO-COBRE

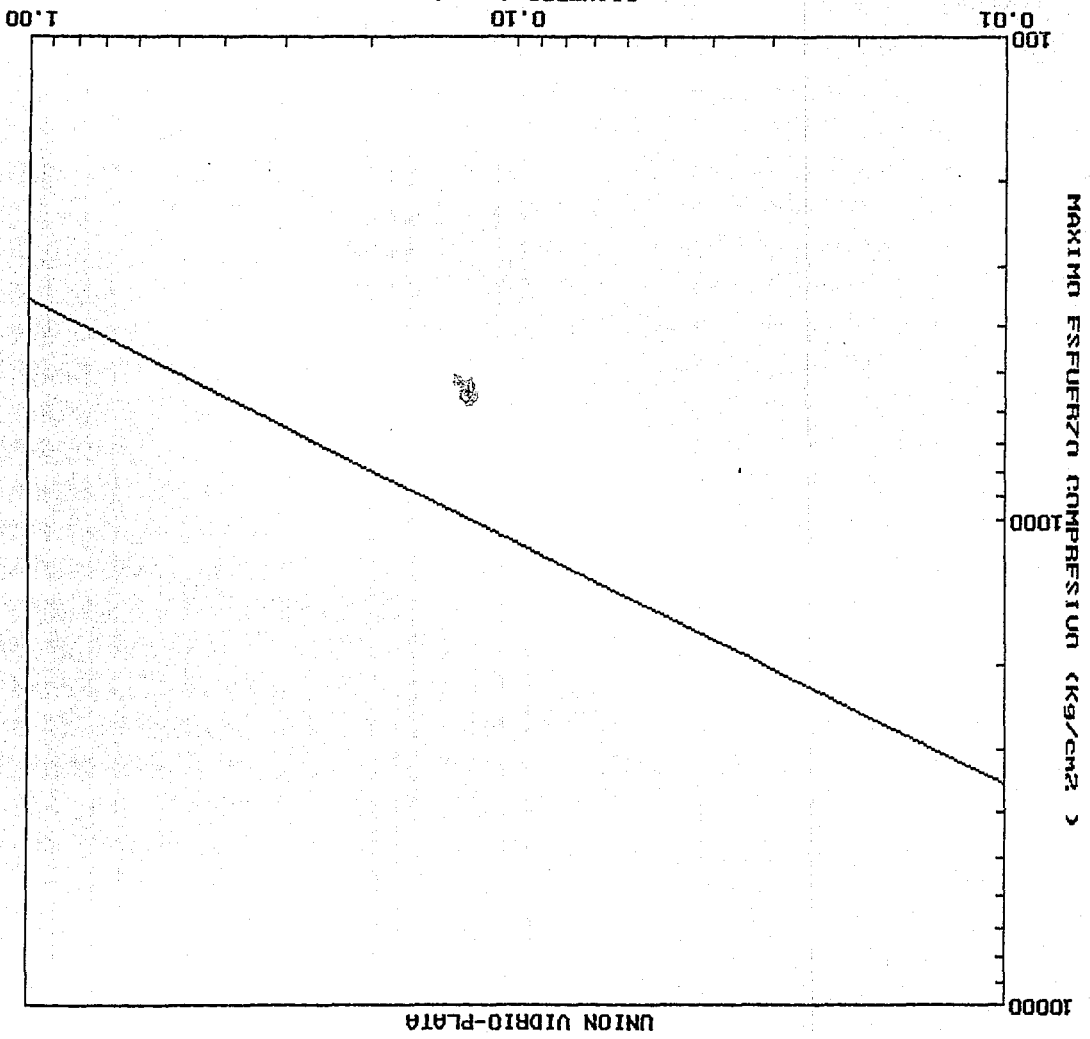




UNION VIDRIO-ORO

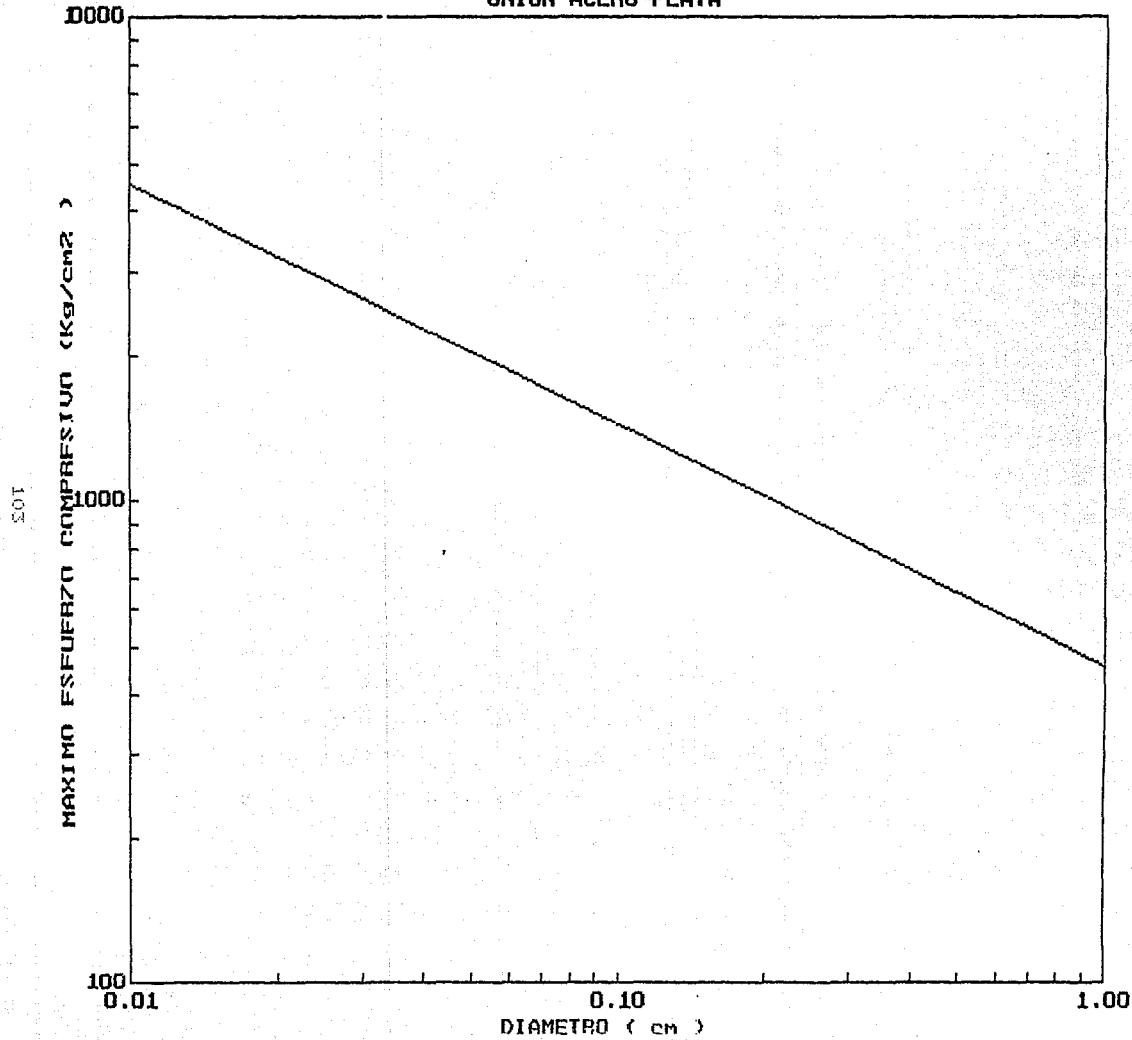
101

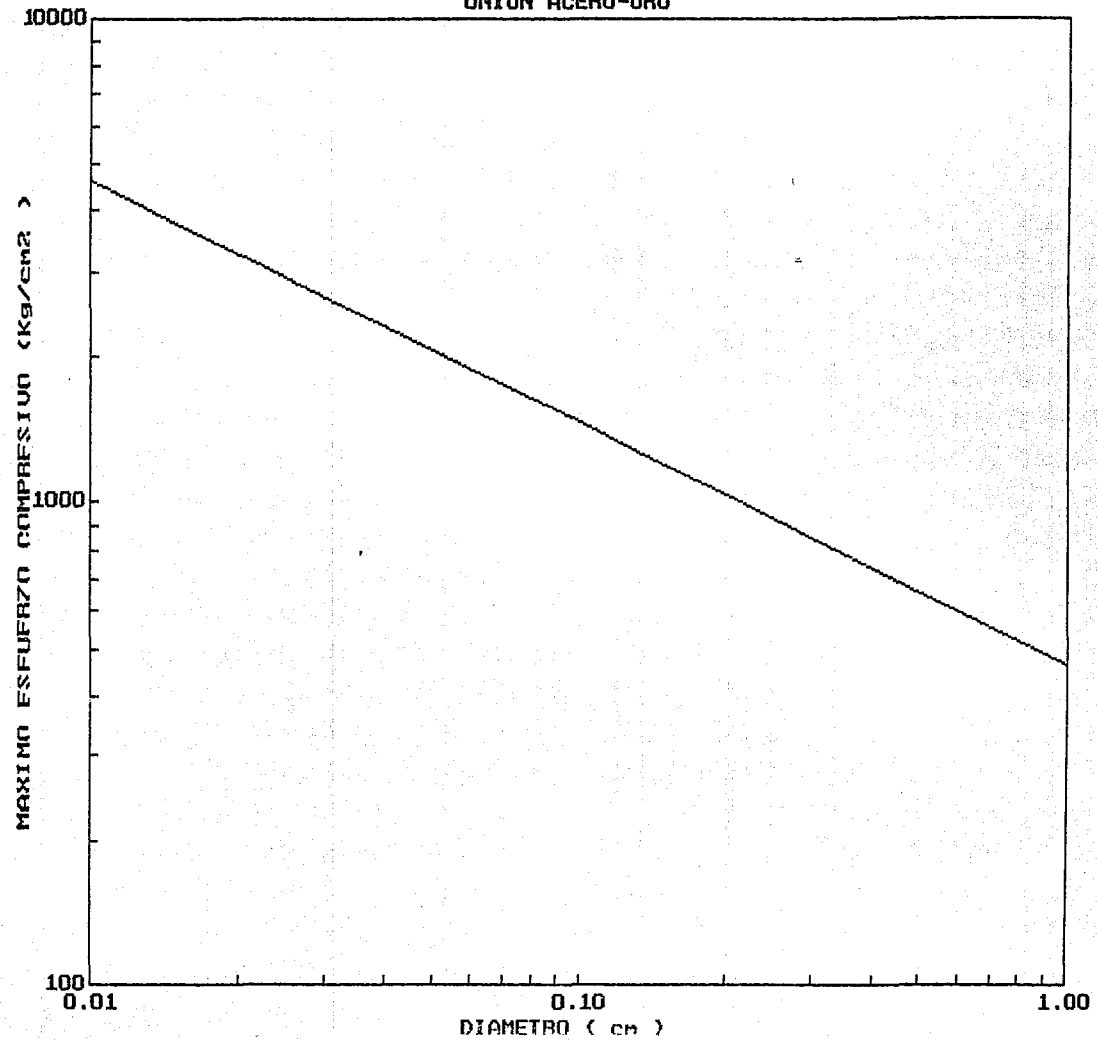




UNION VIDRIO-PLATA

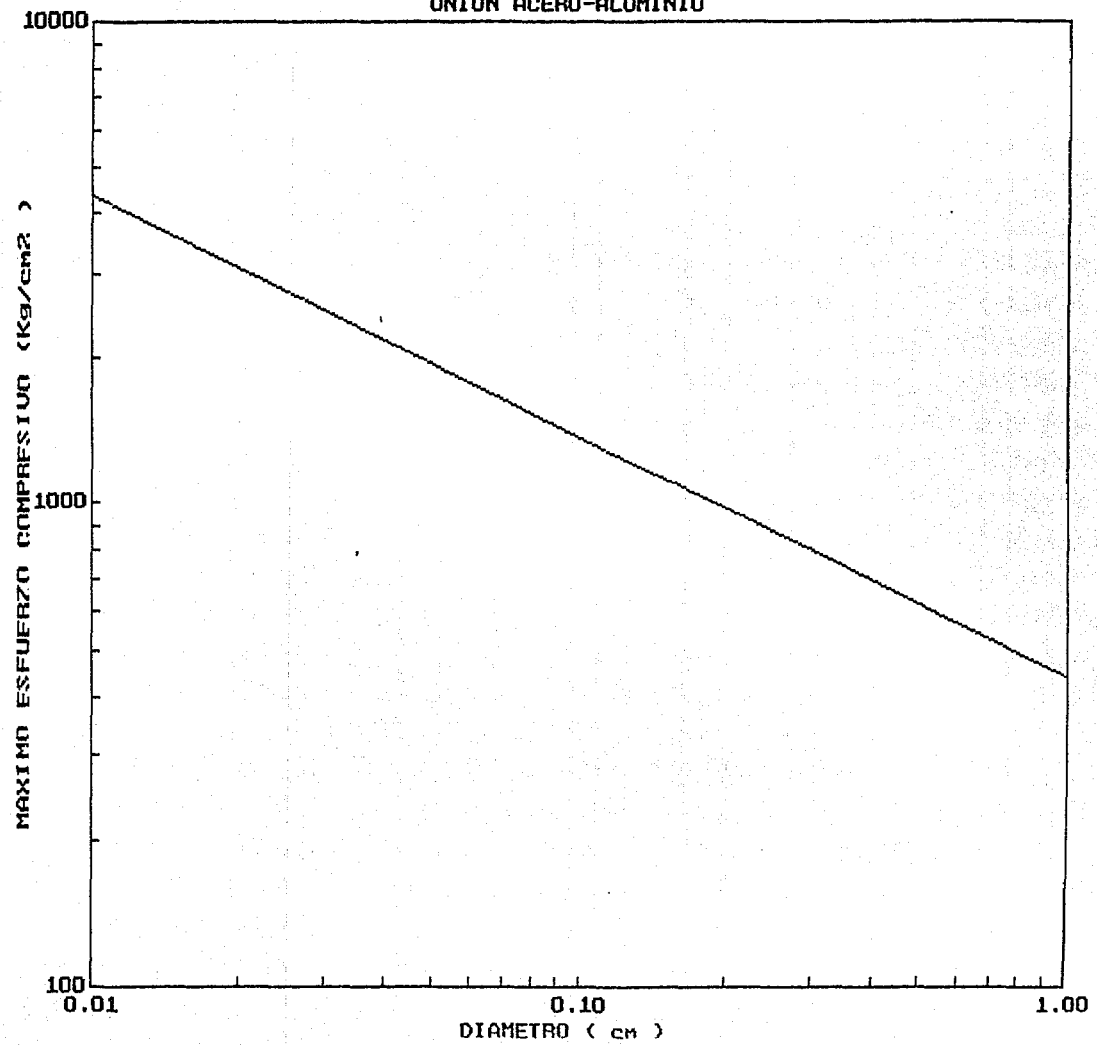
UNION ACERO-PLATA





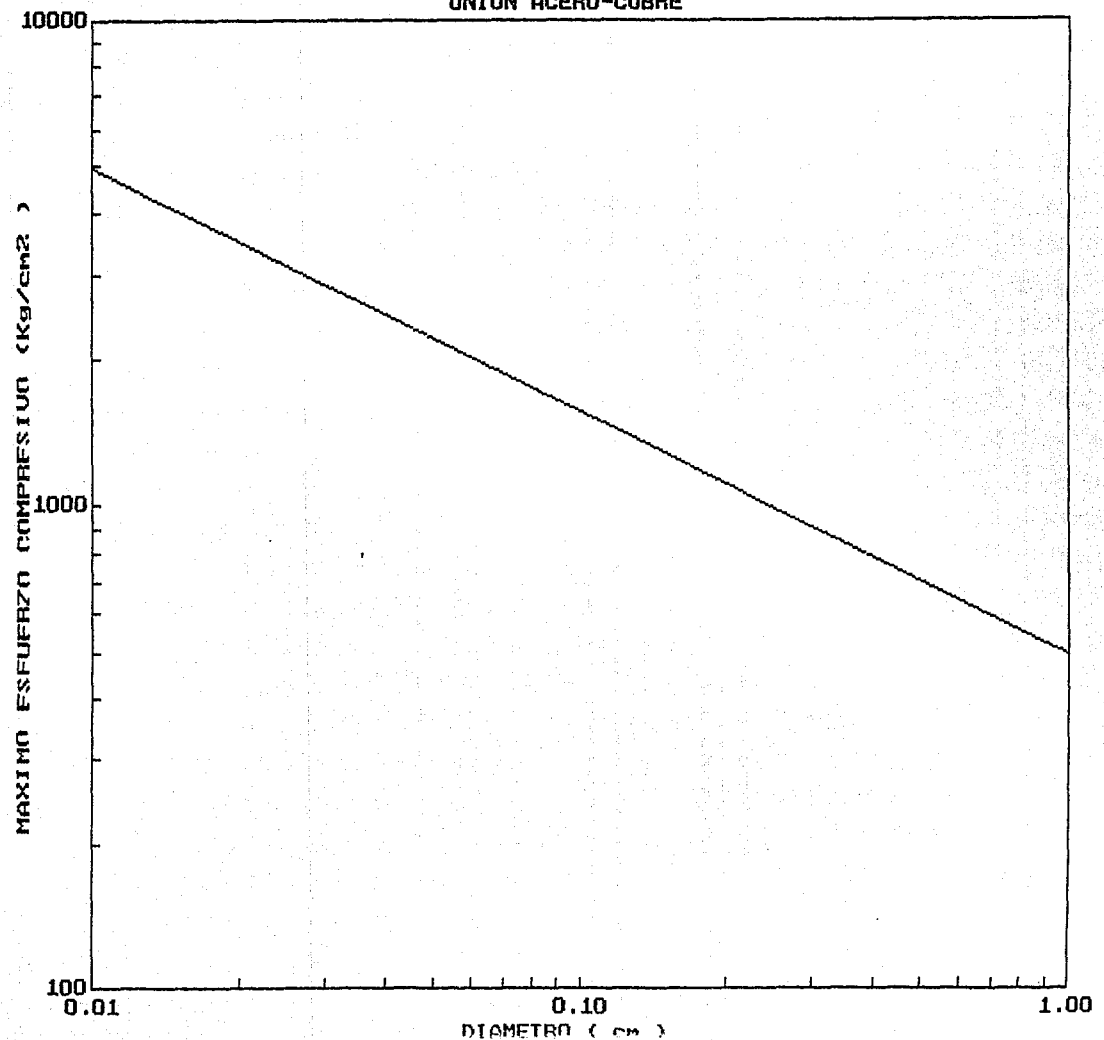
UNION ACERO-ALUMINIO

501



UNION ACERO-COBRE

501



## APENDICE A

### TEORIA CINETICA DE LOS GASES

La finalidad principal de la teoría cinética de los gases es aplicar las leyes de la mecánica de Newton al movimiento de las moléculas de un gas, considerando éstas individualmente en interacción con las moléculas vecinas y con las paredes del recipiente que las contiene, para poder predecir propiedades macroscópicas de dicho gas tales como la presión y la temperatura por medio de un tratamiento estadístico

A continuación se establecen las hipótesis en las que se basa el modelo microscópico que se utiliza para predecir el comportamiento macroscópico de un gas

1. El gas está formado por un gran número de moléculas, las cuales pueden ser consideradas como partículas idénticas.
2. El volumen propio de las moléculas es muy pequeño y despreciable en comparación con el volumen total ocupado por el gas.
3. Las moléculas se encuentran constantemente en movimiento, chocando entre sí y con las paredes del recipiente que las contiene, teniendo como consecuencia que su densidad media es la misma en todos los puntos del volumen ocupado por el gas.
4. Todas las direcciones en las que se puede mover una molécula son igualmente probables.
5. Los choques que sufren las moléculas entre sí y con las paredes del recipiente son perfectamente elásticos.

6. En el movimiento de la partícula, que tiene lugar entre choques no actúa sobre ellas alguna fuerza apreciable.

Estas hipótesis constituyen el modelo cinético molecular más sencillo posible del comportamiento de un gas.

Para calcular la presión que ejerce el gas sobre las paredes del recipiente que lo contiene, consideremos la fuerza media resultante de un gran número de choques. De manera análoga, podemos calcular el calor específico de un gas considerando la variación que experimenta la energía mecánica de las moléculas con la temperatura.

La energía cinética media de translación de una molécula está dada por

$$E_c = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann, y  $T$  es la temperatura absoluta del gas ideal.

De la anterior ecuación, se tiene que la velocidad cuadrática media de las moléculas de un gas es

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

La energía cinética de translación por unidad de masa es en consecuencia

$$E_c = \frac{3RT}{2M}$$

donde  $R$  es la constante universal de los gases, y  $M$  es la masa molecular.



"El cálculo de la presión y el calor específico de un gas ideal depende de los valores medios de las propiedades del gas"

La presión total ejercida por las moléculas sobre las paredes que contienen al gas es

$$P = \frac{1}{3} \frac{Nm\langle v^2 \rangle}{V}$$

siendo N el número de moléculas, m la masa de cada una de ellas,  $\langle v^2 \rangle$  el valor cuadrático medio de sus velocidades, V el volumen total del gas.

La presión absoluta es

$$P = \frac{1}{3} nm\langle v^2 \rangle$$

donde n es la densidad del gas  
(número de partículas por unidad de volumen)  
m es la masa de la molécula

se tiene

$$P = nkT$$

siendo esta ecuación la ecuación de estado del gas ideal

Si se desea aumentar la temperatura de la unidad de masa de un gas en la cantidad  $\Delta T$ , tenemos que incrementar su energía en la cantidad

$$\Delta E_c = \frac{3}{2} \left( \frac{R}{M} \right) \Delta T$$

de donde, el calor específico es

$$C_v = \frac{3}{2} \frac{R}{M}$$

y el calor específico molar

$$c_v = \frac{3}{2} R$$

Este resultado nos dice que el valor del calor específico molar de todos los gases debería ser el mismo; pero en realidad sucede que al aumentar la complejidad de las moléculas de los gases, los calores específicos adquieren valores más elevados.

El hecho de que algunos calores específicos molares tengan valores superiores a los que se espera, solamente puede significar que existe en el sistema alguna otra forma de energía.

"Una posibilidad es que las moléculas estén animadas de un movimiento de rotación simultaneo con el de traslación"

Consideremos una molécula diatómica como un pequeño dipolo formado por dos masas distantes entre sí una cantidad fija. Este dipolo puede girar alrededor de dos ejes perpendiculares entre sí, los cuales pasan por su centro de gravedad y son perpendiculares a su propio eje. Como la velocidad de la molécula tiene tres componentes, cada una de estas componentes tiene asociada una energía igual a  $(1/2)kT$  por término medio.

La idea de que cada grado de libertad deba tener asociada por término medio una energía cinética de valor  $(1/2)kT$  por molécula, es un principio muy importante de la teoría cinética de los gases, conocido como principio de la equipartición de la energía.

"Se puede perfeccionar todavía más el cálculo del calor específico molar considerando que las moléculas pueden tener un movimiento vibratorio interno".

## APENDICE B

### RECORRIDO MEDIO LIBRE

Considerando brevemente algunos fenómenos en los cuales juegan un papel importante los detalles de los choques moleculares. Estos procesos se conocen en su conjunto como fenómenos de transporte.

En cualquier fenómeno que dependa del transporte de las moléculas, la distancia media recorrida por una molécula entre dos choques sucesivos juegan un papel importante y se denomina recorrido libre medio.

Un metro cúbico de un gas a presión de  $10^5$  Pa y a una temperatura de  $22^\circ\text{C}$ , contiene  $2.5 \times 10^{25}$  moléculas, mientras que a una presión de  $10^{-7}$  Pa se tiene solamente  $2.5 \times 10^{13}$  moléculas.

Esto nos indica que cualquier volumen a presiones del orden antes descrito contendrán una gran cantidad de moléculas, las cuales se encuentran en continuo movimiento en todo tiempo; bajo estas condiciones, las moléculas están separadas unas de otras por distancias que son grandes en comparación con sus diámetros.

Si pudiéramos parar por un instante todas las moléculas y colocarlas en un sistema coordenado, la separación promedio entre moléculas sería aproximadamente de  $3.4 \times 10^{-9}$  metros a una presión atmosférica de  $10^5$  Pa .

El diámetro de la mayoría de las moléculas de un gas es del orden de  $2 \times 10^{-10}$  a  $6 \times 10^{-10}$  metros, siendo su separación 6 o 15 veces su diámetro a presión atmosférica.

Para bajas presiones (del orden de  $10^{-7}$  Pa) la distancia de separación entre moléculas es de  $3 \times 10^5$  metros.

Boltzmann y Maxwell calcularon la velocidad promedio de las partículas, siendo

$$v = \left( \frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2}$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann

$T$  es la temperatura absoluta en  $^{\circ}\text{K}$

$m$  es la masa de la molécula

Considerando que cada molécula se mueve en línea recta entre cada colisión sucesiva, se tiene que el recorrido libre medio ( $\lambda$ ) está dado por la relación siguiente

$$\lambda = \frac{1}{2^{1/2} \pi r^2 n}$$

donde  $r$  es el diámetro molecular

$n$  es la densidad del gas

(número de partículas por unidad de volumen)

El flujo de partículas que cruzan una superficie plana de área unitaria es

$$\Gamma = \frac{1}{4} n v$$

de donde

$$\Gamma = n \left( \frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2}$$

Un valor que guarda una estrecha relación con el recorrido libre medio y con la velocidad molecular media es el número de choques por unidad de tiempo. Este valor es útil conocerlo, pues

para efectuar altos y muy altos vacíos se tiene que el flujo del gas a través del conducto por el cual se está efectuando la evacuación no es de tipo viscoso, pues es de tipo molecular, siendo esto algo importante a ser considerado para la elección del tipo de válvula de paso a emplearse en la conexión del sistema de vacío al sistema a ser evacuado para poder controlar la velocidad de evacuación.

Basándose en un modelo sencillo se puede calcular el número medio de choques que experimenta una molécula por unidad de tiempo.

Supongamos que las moléculas pueden representarse con esferas rígidas idénticas de radio  $r$  que chocan entre sí elásticamente (el cálculo se simplifica suponiendo que solamente una molécula se encuentra en movimiento). Cuando dos moléculas chocan, la distancia que separa sus centros es  $2r$ . Si imaginamos un cilindro de radio  $2r$  cuyo eje coincida con la dirección de la velocidad de la molécula que se mueve, cualquier otra molécula cuyo centro se encuentre en el interior de este cilindro, choca con la molécula en movimiento.

El volumen del cilindro es

$$V_{cyl.} = 4\pi r^2 \langle v^2 \rangle \Delta t$$

y el número medio de choques por unidad de tiempo es

$$4\pi r^2 v N / V$$

El tiempo medio transcurrido entre dos choques sucesivos, denominado tiempo libre medio, representado por  $\tau$ , es el valor recíproco de la expresión anterior, o sea :

$$\tau = (4\pi r^2 v N / V)^{-1}$$

El recorrido libre medio es

$$\lambda = v\tau = \frac{V}{4\pi r^2 N}$$

Este resultado puede expresarse en función de las propiedades macroscópicas del gas, obteniéndose

$$\lambda = \frac{k}{4\pi r^2} \frac{T}{P}$$

A continuación se enumeran varios fenómenos físicos que dependen directamente del transporte de las moléculas gaseosas:

### 1. DIFUSION.

Si en un recipiente que contiene gas introducimos cierta cantidad de otro gas distinto, el tiempo que transcurre hasta que la concentración del nuevo gas alcanza un valor determinado que depende de las distancias medias que recorren las moléculas entre choques sucesivos.

### 2. CONDUCTIVIDAD TERMICA.

Cuando el calor se transmite por conducción de una región de un gas a otra, las moléculas que se mueven en una región, hacen que aumente la rapidez del movimiento de las moléculas que se encuentran en la región próxima. La velocidad de esta transmisión de energía depende de la distancia que, por término medio, recorren las moléculas entre choques sucesivos.

### 3. VISCOSIDAD.

Ocurren cuando moléculas con un cierto momento lineal se mezclan con moléculas de menor momento lineal.

TABLA

Magnitud de  $\lambda$  para moléculas de aire a 0 °C (en función de la presión\*), y frecuencia de choques de moléculas de aire a 0 °C •

Presión (Torr)	$\lambda$ (en metros.)	Frecuencia de choques (No. de choques/seg)
760	$10^{-7}$	$10^{10}$
$10^{-3}$	$10^1$	$10^5$
$10^{-6}$	$10^4$	$10^1$

\* "Física", vol 2 , R. Resnick  
Ed. CECSA .

• No. de choques = (vel. átomo) /  $\lambda$   
Vel. átomos de aire =  $10^3$  m/seg.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## APENDICE C

### TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE TUBO ABSORBEDOR Y ENVOLVENTE

La geometría utilizada para el tubo absorbedor consiste en un tubo metálico que sea buen conductor de calor y se encuentre colocado en forma concéntrica dentro de un tubo de vidrio Pyrex, el cual lo envuelve para reducir las pérdidas de calor por convección desde el tubo absorbedor hacia el medio ambiente.

Dado que este flujo de calor hacia el ambiente se efectúa a través del aire contenido en la región anular entre el absorbedor y la envolvente, para minimizar este flujo es deseable un coeficiente de transferencia de calor del aire entre el tubo metálico y su cubierta de vidrio lo más pequeño posible para mejorar la eficiencia en la captación de la radiación solar.

Kraushold (ref. 16) muestra que el flujo promedio de calor por convección ( $q_m$ ) por unidad de área entre dos tubos cilíndricos concéntricos, para un fluido estático (aire), es caracterizado por medio de la conductividad asociada al sistema ( $K'$ ), la cual es función del número de Rayleigh (Ra) y de la conductividad (K) del fluido, siendo de la forma mostrada a continuación:

$$K' = \begin{cases} K & \text{si } \log_{10} Ra < 3 \\ K (0.29 Ra^{0.18}) & \text{si } 3 < \log_{10} Ra < 3.8 \\ K (0.11 Ra^{0.29}) & \text{si } 3.8 < \log_{10} Ra < 6 \\ K (0.40 Ra^{0.20}) & \text{si } 6 < \log_{10} Ra < 8 \end{cases}$$



Es de notarse que cuando  $K' = K$ , el número de Rayleigh es menor que 1000, indicando con esto que el transporte de calor en la región anular es en gran medida efectuado por conducción molecular, siendo esta conducción altamente influenciada por la baja presión existente en la región anular (ver apéndice A).

La transferencia de calor por convección en la región anular está dada por la siguiente relación:

$$q_m = -\frac{K'}{b} (T_c - T_f)$$

donde

$b$  es el espacio entre tubos

$T_c$  es la temperatura de la superficie caliente

$T_f$  es la temperatura de la superficie fría

siendo  $h = K'/b$  el coeficiente de transferencia de calor asociado al flujo de calor entre absorbedor y envolvente, cuando el flujo de aire en la región anular es molecular, tendiendo  $h$  a cero cuando la presión en esta región tiende a cero, resultando que el flujo de calor es únicamente por radiación.

El comportamiento térmico de un tubo absorbedor varía al modificar:

- a) El espaciado entre el tubo metálico y el tubo de vidrio, y
- b) El espesor de la pared del tubo de vidrio

El efecto producido sobre el comportamiento térmico entre absorbedor y envolvente puede verse en las gráficas de las figuras C 1 y C 2 en las que se observa el porcentaje de pérdidas de calor del absorbedor en función del espaciado anular para un valor  $(T_c - T_f)$  fijo.

En lo que se refiere a pérdidas térmicas por radiación y convección en el espacio anular entre absorbedor y cubierta de vidrio, estas se pueden disminuir al depositar una película selectiva sobre el tubo absorbedor (ver figuras C 3 y C 4).

De las gráficas de las figuras C1, C2, C3 y C4 se observa que las pérdidas de calor son mayores al no utilizar películas selectivas y no evacuar el espacio anular.

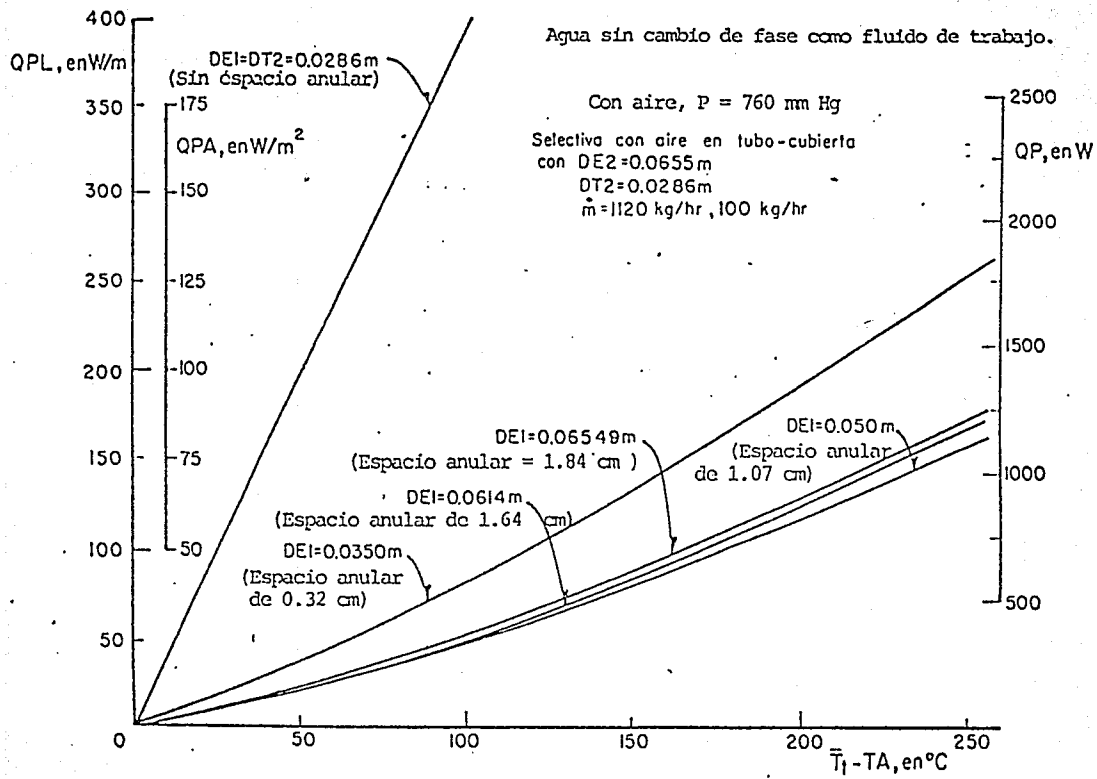


Fig C I Pérdidas vs temperatura promedio del absorbedor sobre el ambiente

Agua sin cambio de fase como fluido de trabajo.

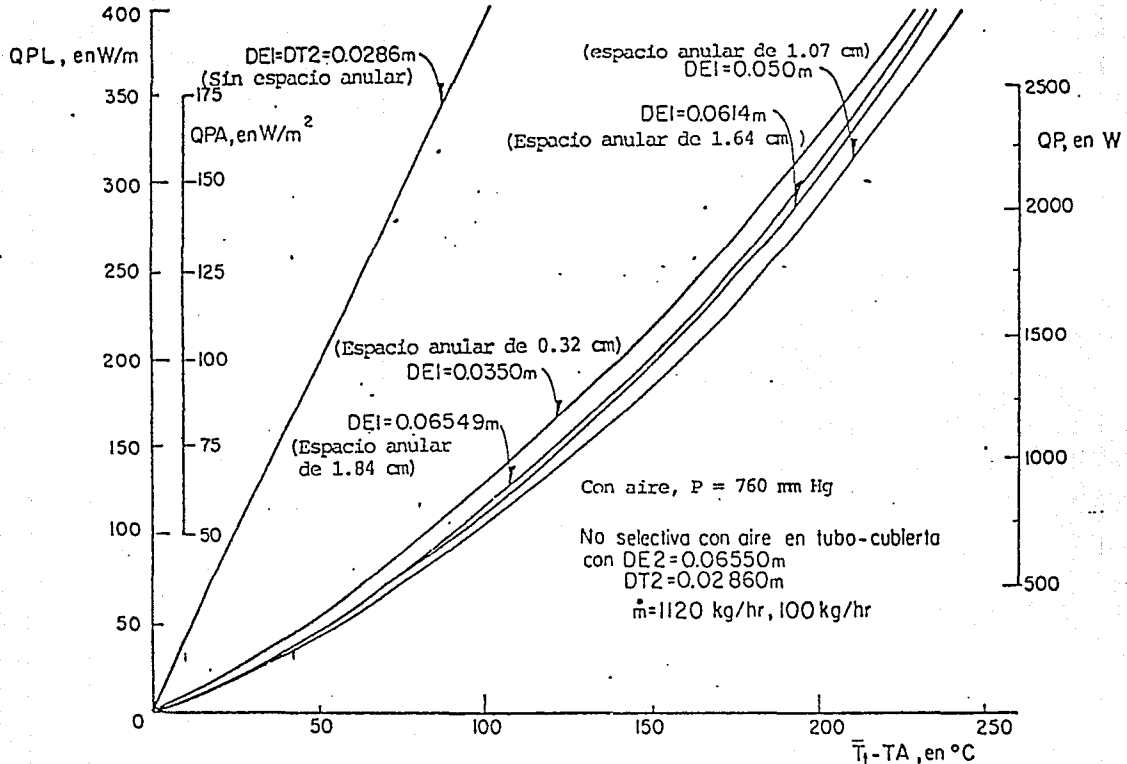


Fig 2 Pérdidas vs temperatura promedio del absorbedor sobre el ambiente

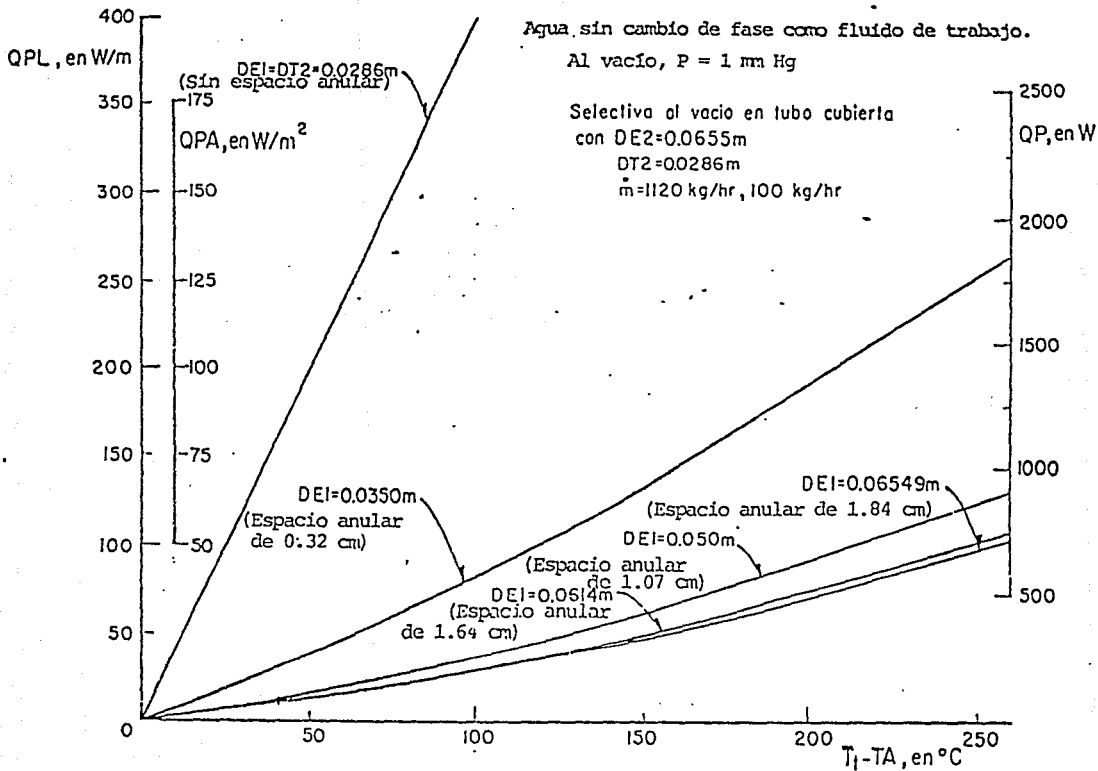


Fig c 3 Pérdidas vs temperatura promedio del absorbedor sobre el ambiente

Agua sin cambio de fase como fluido de trabajo.

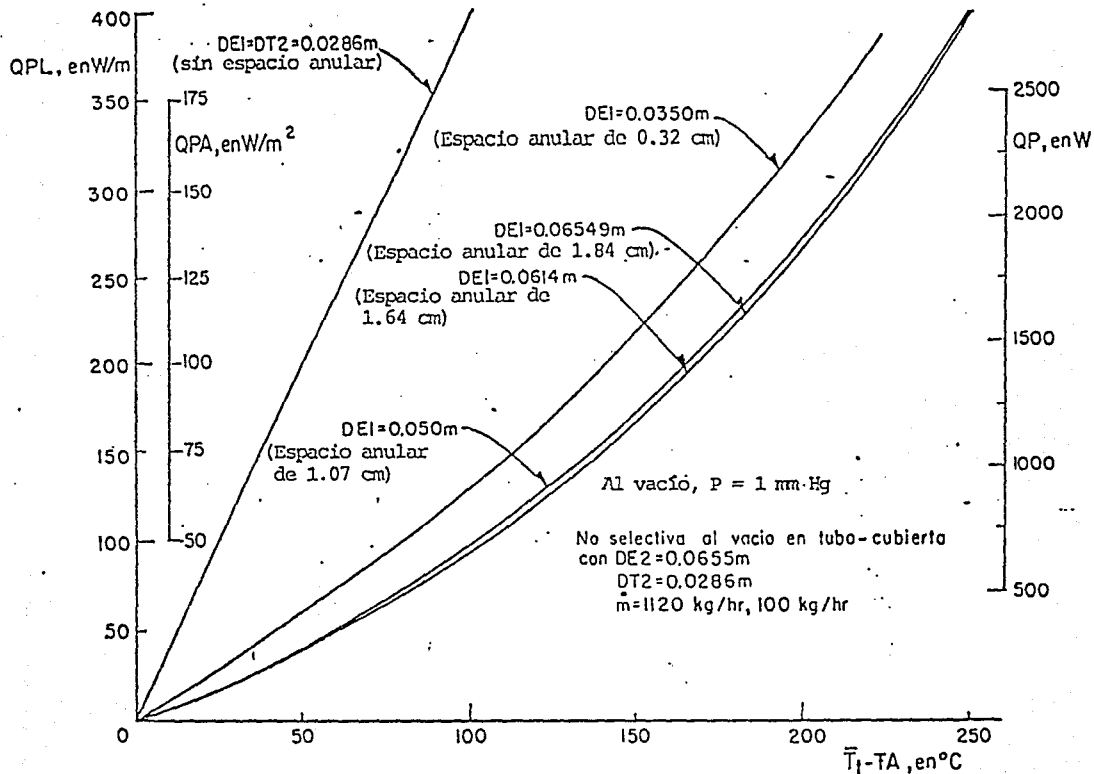


Fig 04 Pérdidas vs temperatura promedio del absorbedor sobre el ambiente

## APENDICE D

### CONCENTRACION DE ESFUERZOS Y PROPIEDADES DE METALES Y ALGUNAS ALEACIONES

Cuando un cuerpo es sometido a esfuerzos de tensión o de compresión, la concentración de tensiones en el interior del sólido llega a ser de tal magnitud alrededor de orificios y cortaduras que pueden surgir grietas en el material. Los remaches y piezas con funcionamiento similar se destruyen siempre en los lugares donde existe un brusco cambio de sección en la región comprendida entre el vástago y la cabeza, recomendándose hacer uso de remaches con paso cónico para evitar la concentración excesiva de esfuerzos en dicha zona.

Las deducciones puramente matemáticas sobre la concentración de tensiones tropezaron con un gran escepticismo, pues sabiendo las fuerzas de cohesión que ligan a dos átomos en un cuerpo sólido y de estructura cristalina, puede determinarse la resistencia mecánica del material. En base a esto, se puede determinar la resistencia mecánica teórica del material.

También se puede determinar experimentalmente el valor de la resistencia mecánica de un material. conociéndose ésta como resistencia mecánica técnica. Resultando que la resistencia mecánica técnica siempre es inferior a la resistencia teórica.

En el año de 1920, el académico soviético A. T. Ioffe explicó el porqué de la diferencia tan grande entre la resistencia teórica y la experimental. La explicación es el resultado del experimento descrito a continuación:

Se toma un cristal de sal gema y se mide experimentalmente su resistencia mecánica, siendo ésta de varias decenas de MPa . Luego, el cristal se sumerge en agua caliente, en donde se disuelve un pequeño grosor de la capa superficial del cristal. Se mide de nuevo la resistencia mecánica del cristal, resultando ser mucho más alta, del orden de  $2000 \text{ MN/m}^2$  , el cual es un valor dos veces menor del valor teórico.

La explicación de este comportamiento es el siguiente:

Cuando al cristal le es disuelta la capa superficial, al cristal se le libera de las numerosas heridas que acumuló en su superficie a lo largo de toda su existencia, heridas tales como rasguños, grietas, huellas de golpes y otros defectos superficiales.



## REFERENCIAS

1. Rafael Almanza S., Vicente Estrada-Cajigal R., Joel Barrientos A. "Actualización de los Mapas de Irradiación Global Solar en la República Mexicana", serie del Inst. de Ing. No. 543, UNAM.
2. Rafael Almanza S., Alberto Valdez, Serafin López, "Concentradores Solares", Serie del Inst. de Ing. No. D-16, Junio 1981, UNAM
3. Rafael Almanza S., Serafin López, "Utilización de las Superficies Selectivas en la Energía Solar", Inst. de Ing. No. 378, 1976, UNAM
4. Meinel A.B., P.M. Meinel, "Applied Solar Energy. An Introduction", Addison- Wesley, 1976
5. Robert Lamb, Hank Morgan, "El Poder de la Luz", Science Photo Lybrary, 1991
6. Jaffew D., Fried Lander S., Kearnex D., "The Luz Solar Electric Generating System in California", ISES Solar World Congress, 1987
7. Rafael Almanza S., Felipe Muñoz, "Utilización de la Energía Solar en Comunidades Rurales", Serie del Inst. de Ing. No. 490, Abril/1985

8. S.P. Chow, G.L. Harding and R.E. Collins, "Degradation of All-Glass Evacuated Solar Collector Tubes", Solar Energy materials, 12 (1985) 1-41, North Holland Amsterdam
9. Timoshenko S., "Theory of Elasticity", McGraw-Hill, 1934
10. Roark R.J., "Fórmulas de Resistencia de Materiales, Esfuerzos y Deformaciones", Ed. Aguilar, 1952
11. Carrillo N., "Investigaciones Sobre Estabilidad de Taludes y Fundaciones", UNAM, 1984
12. Taylor D. W., "Fundamentals of Soils Mechanics of Earth Dams", Trans. 2nd con. on Large Dams, Vol. 4, Washington, 1936
13. Perchard E., "Resistencia de Materiales", UNAM, 1973
14. A. Roth, "Vacuum Sealing Techniques", Ed. Pergamon Press, Oxford 1966
15. Parker Seals de México, "Catálogo de Arosellos Plm-1"
16. Yu. M. Lajtim, "Metalografía y Tratamiento Térmico de los Metales", Ed. Mir, Moscu
17. "Metals Handbook", 9a. Ed.
18. Andrew Guthrie, "Vacuum Thechnology", Ed. John Wiley and Sons Inc. New York

19. Sargent-Welch División , "Manual de Bombas de Vacío y de Bombas de Difusión"
20. Varian Vacuum División - NCR, "Manual de Medidores de Termopar", IMSS, 1948
21. Varian Vacuum División - NRC, "Manual de medidores de Ionización", Mass. USA
22. Almansa Salgado R., Muños Felipe, libro en proceso de edición.

## BIBLIOGRAFIA

- Garcia Colín Scherer Leopoldo. "Teoría Cinética de la materia". Edit. Fondo de Cultura Económica.
- Young Hugn D., "Fundamentos de Mecánica y Calor", Edit. Del Castillo.
- Gamow George y Cleveland John M., "Física". Edit. Aguilar.
- Zemanssky Mark W. y Dittman Richard H. , "Calor y Termodinámica", Edit. MacGraw-Hill.
- Perchard E., "Resistencia de Materiales", Edit. UNAM, 1973.