

Universidad Nacional Autónoma de México
FACULTAD DE CIENCIAS

BLANCO DE GAS SIN PAREDES
PARA REACCIONES NUCLEARES

T E S I S

Que para obtener el Título de:

F I S I C O

p r e s e n t a:

ALFONSO MARTINEZ BACA D.

INSTITUTO DE FÍSICA



México, D. F.
1964

BIBLIOTECA
JUAN B. DE OYARZABAL



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

GF.T. 106



INSTITUTO DE FISICA

A mis padres

A mi hermana

A mis maestros

21

106

~~30755~~

I N D I C E .

- I.- Introducción.
- II.- Geometría del Estereo-espectrógrafo.
- III.- Estimación teórica de presiones y flujos de gas.
- IV.- Diseño y construcción.
- V.- Resultados experimentales.
- VI.- Conclusiones y sugerencias.
- Agradecimientos.
- Referencias.

I.- INTRODUCCION.

Se han hecho notar en varios artículos (1,2) las dificultades que se encuentran al tratar de obtener distribu---ciones angulares de reacciones nucleares, debido a cambios no controlables en los blancos. Con gran frecuencia se utilizan blancos sólidos (3), en general sustancias evaporadas al vacío sobre películas, por ejemplo de Formvar. Su fabrica---ción y manejo requieren gran cuidado y es imposible construir dos blancos idénticos debido a cambios inevitables tanto en la intensidad como en la uniformidad de la substancia evaporada, es decir, no se dispone de una manera de controlar el grueso de la película. Esto hace imposible reemplazar un blanco de idénticas características durante un experimento. Es difícil por otro lado evaluar en estos blancos el número absoluto de partículas que contienen; este dato es indispensable para determinar la sección diferencial o la probabilidad de una reacción nuclear.

Para conocer exactamente el número de partículas en el blanco, por lo menos para ciertas reacciones, se emplean blancos de gas a presiones conocidas. De su presión y su temperatura se estima el número de partículas de la substancia de interés; ésto hace que inclusive, puedan servir para fines de calibración. Con este objeto se han usado por ejemplo blan

cos de gases contenidos en cilindros metálicos de 3.25 cm de diámetro y 4.8 cm de largo, a los que se le hace una abertura de 4 mm de ancho a la altura por la que pasa el haz de proyectiles. Cubriendo esta abertura se colocan aproximadamente 15 capas de Formvar para retener el gas en su interior a una presión conocida, con una precisión aproximada de 1 mm de aceite (4,5). A este cilindro se le hace girar normalmente entre 10 y 15 revoluciones por minuto para evitar que la película de Formvar se rompa por el calentamiento al incidir sobre ella el haz de proyectiles.

Una objeción importante surge si el acelerador usado es de gran corriente, ya que su haz de proyectiles puede quemar la película si es demasiado delgado, además de que en una barrera de Formvar gruesa, tanto las partículas de bombardeo como las de reacción, se dispersan y pierden una parte importante de su energía en su paso a través de ella.

Actualmente se cuenta en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México con un acelerador de 3 MeV de energía capaz de producir una corriente de 1 mA de partículas positivas.

Una manera de lograr blancos de gas sin paredes capaces de soportar la corriente antes mencionada, puede ser mediante bombeo diferencial. Este método ha sido usado por ejemplo por C. M. Jones (7), exclusivamente a lo largo del haz de proyectiles.

A la fecha se encuentra en construcción un estereo-

espectrógrafo cuya finalidad es observar simultáneamente una distribución angular completa. Debido a la posibilidad de registrar simultáneamente partículas de reacciones nucleares a varios ángulos, se propone el problema de construir un blanco de gas que permita efectuar dichas observaciones comunes en un solo experimento nuclear.

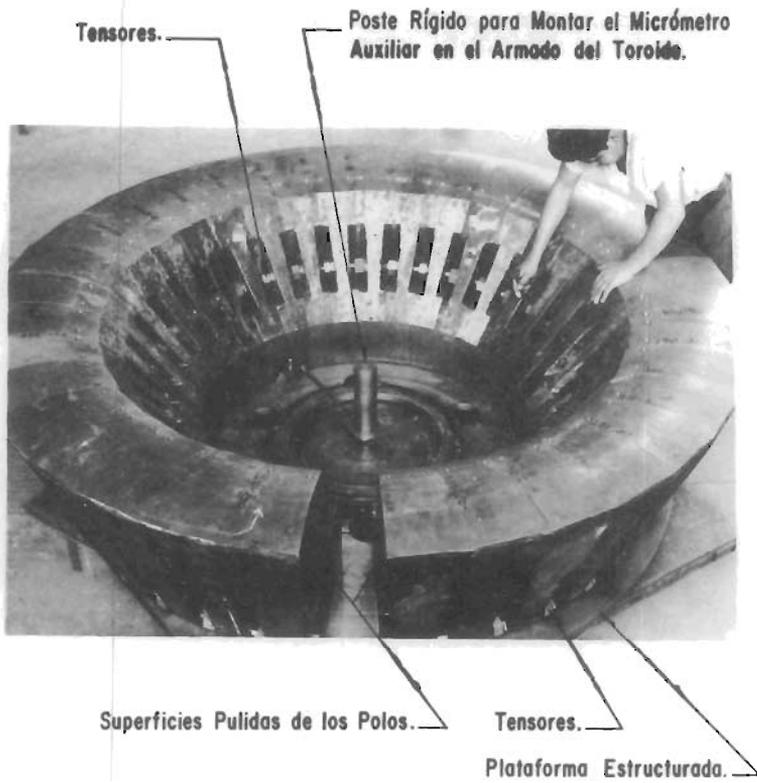
Este tipo de blanco resulta ventajoso, puesto que no tiene paredes que puedan romperse, si es posible mantenerlo estable con una alimentación adecuada de gas. Sin embargo esto lo hace prohibitivo en el caso de gases muy costosos, a menos que para estos casos se diseñara un sistema de recuperación de dicho gas; otra desventaja es la de no poder medir con suficiente aproximación la presión absoluta en la zona de estudio. Esta objeción podría resolverse por comparación con un blanco de pared o por medio de reacciones nucleares en las que interviniera dispersión elástica exclusivamente.

II.- GEOMETRIA DEL ESTEREO-ESPECTROGRAFO.

El estereo-espectrógrafo (8) está formado en esencia por una serie de piezas polares montadas sobre una plataforma plana y rígida. El frente de las fronteras de los polos se localiza en un círculo con radio R . El radio efectivo R_0 se ha entregado que es muy próximo al radio mecánico R de las piezas polares más 0.7 veces del entrehierro. Cada pieza está unida a sus vecinas por medio de pares de tensores situados en huecos dispuestos para tal propósito formándose así un toro magnético (Fig. 2,1).

El blanco se coloca en el centro del círculo y la entrada del haz de proyectiles se efectúa a través del hierro del toroide, por medio de un orificio de tres pulgadas de diámetro blindado del campo magnético. Dentro del orificio se ha colocado una doble lente electrostática de fuerte enfoque para regular la forma y el tamaño del haz sobre el blanco.

La entrada y la salida del haz se realiza a los 180° y 0° respectivamente. Se puede ver en la figura anterior que los entrehierros están colocados a cada 10° en los intervalos de 0° a 90° por un lado y de 90° a 170° por el otro, con dos entrehierros adicionales a los 5° y 15° . La magnitud de los entrehierros es de 1 cm en todos los canales. Cada entrehierro forma así un espectrógrafo de un canal del tipo



Toroide de Fierro Magnético.

Fig. 2,1

Bainbridge-Buechner (9); para éstos la superficie focal óptima queda muy próxima a la determinada por la hipérbola teórica, cuya ecuación es:

$$y^2 + 4R_0x - 3x^2 = 0$$

correspondiente a campos magnéticos de fronteras circulares. En esta ecuación el origen de coordenadas coincide con la posición del blanco (Fig. 2,2); R_0 representa el radio efectivo del campo magnético, en éste se incluye el efecto medio del campo disperso en las fronteras tanto a la entrada como a la salida de las superficies polares.

En el caso de bombardear el área de un blanco sólido totalmente comprendido por cualquier canal de observación, la intensidad de reacción registrada, requerida para la medición experimental de las secciones nucleares, es función de su ángulo sólido, que es relativamente fácil de determinar. Su penumbra normalmente es despreciable.

Para un blanco gaseoso se tiene una indeterminación del ángulo sólido requerido para el cálculo de la sección transversal, ya que; al pasar el haz a través del blanco va ionizando las partículas de gas que encuentra a su paso dejando así todo un canal de ionización muy grande, como se podrá ver en el capítulo IV; esto obliga a corregir la geometría de acuerdo con los sistemas de rejillas. Antes de las rejillas se ha visto la conveniencia de dispersar el gas lo más posible para evitar en lo que cabe su paso al sistema. A estas rendijas se les llamará ventanas del blanco de gas. Las ven-

tanás de observación colocadas en los ángulos correspondientes a los entrehierros y permiten el paso sin restricción, de las partículas de interés. Las rejillas consisten primero, de una serie de cilindros ajustables que definen el ángulo sólido requerido para cada canal y de otras cercanas a las placas nucleares haciendo posible medir de esta manera el ángulo sólido para calcular la sección diferencial.

Todavía más, cuando se trate de reacciones nucleares en las que intervinieran la dispersión elástica exclusivamente, podría construirse un tercer sistema de rejillas que compensaran la intensidad del haz resultante para cualquier ángulo de observación. Sin embargo si solamente, como en los casos anteriores, se modifica la dimensión horizontal ésta variará desde el orden de micras, para una dispersión a los 5° . hasta unos cuantos milímetros para los 170° .

Propiedades de Enfoque de un Campo Magnético Circular.

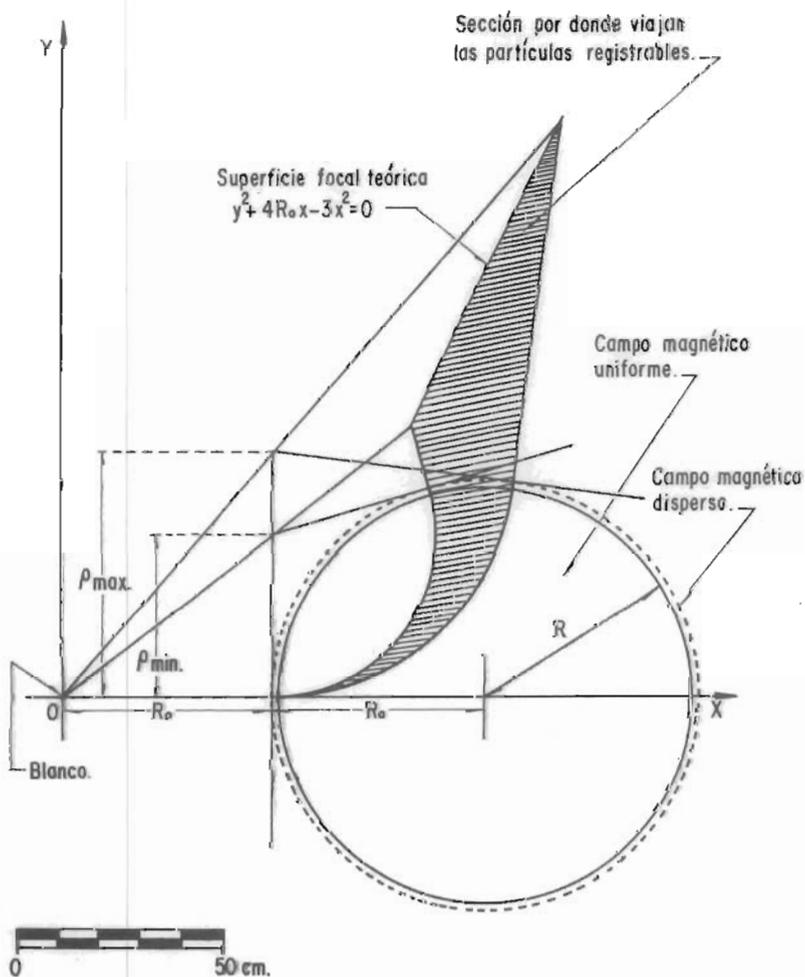


Fig. 2,2

III.- ESTIMACION TEORICA DE PRESIONES Y FLUJOS DE GAS.

Con base en la Teoría Cinética de los Gases se deducen fórmulas para la presión (fórmula 4a, pag. 8, ref (10)), a partir del cálculo de la fuerza media que las partículas ejercen al chocar contra una superficie. Es posible también encontrar una expresión para el camino libre medio de las partículas cuando se ha escogido un gas en particular (fórmula 13-2, pag. 254, ref (11)); para el problema de este instrumento el gas elegido es el oxígeno.

La geometría del estereo-espectrógrafo, de la que se ha hablado antes, y la necesidad de lograr un buen ángulo sólido, obliga a que el blanco tenga una serie de ventanas de dimensiones apropiadas.

Para efectuar una estimación del flujo de gas en las condiciones especificadas y para lograr, mediante bombeo diferencial, una presión extrema última de 10^{-5} mm Hg se hace uso de las fórmulas mencionadas en el primer párrafo y cuya deducción puede consultarse en las referencias (10, 11).

Antes de empezar con el cálculo, debe hacerse notar que si bien la forma del blanco es la misma que la que se observa en las Figs. (4,1, 4,2, 4,3), sus dimensiones varían un poco, como se indica en la Fig. (3,1), pero no lo suficiente para que estas estimaciones dejen de tener una aproximación

razonable de las presiones esperadas.

Las dimensiones verticales de las ventanas en los sistemas de rejillas, para fines del cálculo, están dadas por un ángulo de $\pm 2.5^\circ$ medido a partir del centro del blanco. Sus dimensiones horizontales por otro lado son de 2 mm para todos los juegos de ventanas; el ajuste final para definir el ángulo sólido se hará por medio de otros sistemas de rejillas unos ajustables en el blanco de gas y otros frente a las placas nucleares. Existen también dos ventanas adicionales de 5 mm para la entrada y la salida del haz de proyectiles.

No se espera desde luego que las estimaciones siguientes den una representación realista de lo que le sucede al gas dentro de la cámara ya que en primer lugar las hipótesis inherentes a esta teoría no se cumplen rigurosamente en el experimento; en segundo lugar y como factor más importante es necesario notar que para el cálculo posterior no se tomó en cuenta ni el gradiente de presión que existe entre el centro del blanco y el sistema exterior, ni la influencia que la velocidad de evacuado de las bombas en las diferentes etapas ejerce sobre el gas, ya que se espera que la presión final de la bomba contrarreste en cierta medida el gradiente de presiones.

Con la geometría anterior se procede al cálculo.

Para el oxígeno con una temperatura absoluta

$T = 290^\circ \text{ K}$ se obtiene que.

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{m}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23})(2.9 \times 10^2)(6.02 \times 10^{26})}{32}} = 475 \text{ m/sec}$$

y como $P = \frac{1}{3} n m v^2_{rms}$, se puede calcular el número de moléculas por unidad de volumen con suponer que la presión en la cámara central es de 5 mm Hg.

La presión de 5 mm Hg (1.66×10^{17} moléculas/cm³) es suficiente para los experimentos planteados ya que si se compara el número de moléculas que se tienen en un blanco sólido de aluminio, de orden de 0.1 mgr/cm² y se conoce que la masa de una molécula de aluminio es

$$m_{Al} = \frac{27}{6.02 \times 10^{26}} = 4.48 \times 10^{-26} \text{ Kg}$$

se tiene que en un miligramo habrá :

$$\frac{10^{-6}}{4.48 \times 10^{-26}} = 0.223 \times 10^{20} \text{ moléculas}$$

es decir que la película mencionada tendrá 2.23×10^{18} moléculas/cm² de la substancia evaporada. Con este número de moléculas en el blanco sólido y con exposiciones del orden de 1000 μ Coulombs que fácilmente se logran en una jornada usual de 8 horas de trabajo, incluyendo tiempos muertos, disponiendo en los aceleradores de corrientes de bombardeo de 0.1 μ A; blancos de este tipo no soportan corrientes mucho mayores.

Para el caso del blanco de gas que nos ocupa, el número de moléculas por cm³ es de 1.66×10^{17} ; con una anchura de observación de 3 mm para el ángulo más crítico situado a los 90°, el número de moléculas subtendido por la intersección del área del haz y del canal de registro es de 4.98×10^{16} moléculas/cm².

Seguramente podrán emplearse corrientes de 1 mA, producidas por el acelerador Dynamitrón, lo que permitirá estudios nucleares en tiempos senejantes.

Estos últimos cálculos concuerdan aproximadamente con los realizados por A. Sperduto y W. W. Buechner en los que describen la preparación de blancos de hierro sobre Formvar para sus experimentos (12).

Así pues si:

$$P = 5 \text{ mm Hg} = 6.665 \times 10^{-3} \text{ bar} = 6.665 \times 10^2 \text{ Newtons/m}^2$$

el número de partículas por unidad de volumen a esta presión resulta:

$$n = \frac{3P}{m \bar{v}_{rms}^2} = \frac{3(6.665 \times 10^2)(6.02 \times 10^{26})}{32(4.75)^2 \times 10^4} = 1.66 \times 10^{23} \frac{\text{moléculas}}{\text{m}^3}$$

el número de moléculas que chocan por unidad de área y tiempo será entonces $\frac{1}{4} n \bar{v}$

Es conocido que la velocidad media aritmética es igual a 0.95 de la raíz de la velocidad media cuadrática

$$\bar{v} = 0.95 v_{rms} = 0.95 \times 475 = 450 \text{ m}$$

entonces

$$\frac{1}{4} n \bar{v} = \frac{1}{4} \times 1.66 \times 10^{23} \times 450 = 185 \times 10^{23} \frac{\text{moléculas}}{\text{m}^2 \text{ seg}}$$

ahora bien, si la forma de la cámara central es cilíndrica con radio de $5 \times 10^{-3} \text{ m}$ y la altura de $6 \times 10^{-2} \text{ m}$, el volumen será $V = \pi r^2 h = 3.14 \times 25 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-2} \text{ m}^3 = 471 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ si en un metro cúbico a 290°K y 5 mm Hg de presión se tienen 1.66×10^{23} moléculas, en $471 \times 10^8 \text{ m}^3$ habrá :

$$1.66 \times 10^{23} \times 471 \times 10^{-8} = 7.8 \times 10^{17} \text{ moléculas}$$

este número corresponde al total de moléculas dentro del blanco.

El gas solamente se podrá escapar por las ya mencionadas ventanas así que el área total de escape será de:

$$18 \times .5 \times 2 + 2 \times 5 \times .5 = 23 \text{ mm}^2$$

así pues todas las moléculas que choquen contra esta área escaparán de la cámara central. Como son 1.85×10^{17} las moléculas que chocan por mm^2 y por segundo, escaparán:

$$185 \times 23 \times 10^{17} = 4.2 \times 10^{20} \text{ moléculas/seg.}$$

Si este es el número de moléculas que se pierden, se estima cuántos litros por segundo de oxígeno habrá que inyectar para conservar la presión. Sean 2.7×10^{25} el número de moléculas de oxígeno por metro cúbico a una atmósfera de presión; el volumen ocupado por el número de moléculas antes calculado a la presión atmosférica será:

$$\frac{4.2 \times 10^{20}}{2.7 \times 10^{25}} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

es decir habrá que inyectar 1.52×10^{-2} litros por segundo.

Se pasa entonces a la primera cámara anular, la que después de un cierto tiempo, alcanzará una presión semejante a la de la cámara central ya que no existe en ella ningún bombeo. De esta manera el número de partículas por segundo que escaparán de esta segunda cámara hacia la tercera cuando el área total descubierta es de:

$$18 \times 1 \times 2 + 2 \times 5 \times 1 = 46 \text{ mm}^2 \text{ será}$$

$$185 \times 46 \times 10^{17} = 8,5 \times 10^{20} \text{ moléculas/seg.}$$

Pero en esta tercera cámara está localizado el primer paso de bombeo mecánico; el área de bombeo se supone ocupada por toda la base inferior del anillo, siendo en total:

$$\pi r_2^2 - \pi r_1^2 = \pi(18^2 - 13^2) = 486,7 \text{ mm}^2,$$

mientras que el área de escape para el gas hacia la cámara siguiente es de:

$$18 \times 2 \times 1,5 + 2 \times 5 \times 1,5 = 69 \text{ mm}^2.$$

La proporción de escape del gas está dada aproximadamente por la relación de áreas

$$\frac{69}{486,7} = 0,142$$

De la segunda cámara saldrán hacia la tercera el siguiente número de moléculas por segundo:

$$8,5 \times 10^{20} \times 1,42 \times 10^{-1} = 12 \times 10^{19} \text{ moléculas/seg.}$$

Debido a la extracción de gas y como la presión es directamente proporcional al número de partículas, se espera en esta cámara una presión de:

$$5 \times 0,142 = 0,710 \text{ mm Hg.}$$

Para la tercera cámara el razonamiento es similar:

$$A_{\text{b}} = \pi r_3^2 - \pi (r_2')^2 = \pi(23,5^2 - 18,5^2) = 659 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{e}} = 18 \times 2 \times 2 + 2 \times 5 \times 2 = 92 \text{ mm}^2$$

$$F_3 = \frac{92}{659} = 1,4 \times 10^{-1}$$

$$N = 12 \times 10^{19} \times 1.4 \times 10^{-1} = 16.8 \times 10^{18}$$

$$P_e = 0.71 \times 0.14 = 0.0994 = 9.94 \times 10^{-2} \text{ mm Hg.}$$

Donde:

A_b = Área de bombeo.

A_e = Área de escape a la cámara siguiente.

F_g = Fracción de gas que se escapa.

N = Número de partículas que pasan a la siguiente cámara.

P_e = Presión esperada en la etapa.

Para la cuarta cámara y con la misma nomenclatura:

$$A_b = \pi r_4^2 - \pi (r_3')^2 = \pi (45^2 - 25^2) = 4396 \text{ mm}^2$$

$$A_e = 18 \times 2 \times 3.3 + 2 \times 3.3 \times 5 = 151.8 \text{ mm}^2$$

$$F_g = \frac{151.8}{4396} = 3.46 \times 10^{-2}$$

$$N = 16.8 \times 10^{18} \times 3.46 \times 10^{-2} = 58 \times 10^{16} \text{ moléculas}$$

$$P_e = 9.94 \times 10^{-2} \times 3.46 \times 10^{-2} = 3.44 \times 10^{-3} \text{ mm Hg.}$$

Para la quinta cámara y último paso de bombeo se tiene:

$$A_b = \pi r_5^2 - \pi (r_4')^2 = \pi (71.5^2 - 46.5^2) = 9263 \text{ mm}^2$$

$$A_e = 5.7 \times 18 \times 2 + 2 \times 5 \times 5.7 = 262.2 \text{ mm}^2$$

$$F_g = \frac{262.2}{9263} = 2.83 \times 10^{-2}$$

$$N = 5.8 \times 10^{17} \times 2.83 \times 10^{-2} = 16.4 \times 10^{15} \text{ moléculas}$$

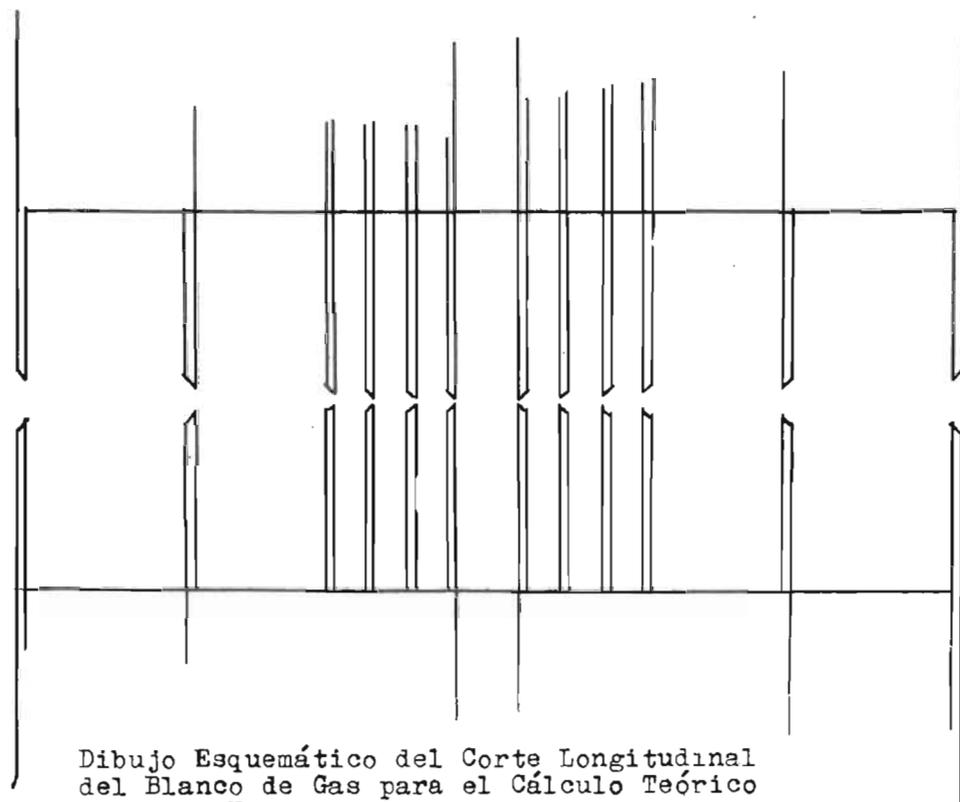
$$P_e = 3.44 \times 10^{-3} \times 2.83 \times 10^{-2} = 9.7 \times 10^{-5} \text{ mm Hg.}$$

Al final del capítulo se ha presentado una tabla en la que se indica la frecuencia de choque entre partículas a varias presiones y el camino libre medio de ellas esperado en

cada una de las cavidades mantenidas a presiones diferentes.

Se nota que el camino libre medio es muy pequeño, y la frecuencia de choque muy alta para las tres primeras cámaras, por lo tanto se espera que el haz de partículas positivas provoque en su paso una ionización intensa en la región central abarcando hasta la segunda etapa de bombeo. El diseño del sistema de rejillas ajustables móviles (ver Cap. IV) tiene por objeto compensar y calibrar el ángulo sólido observado a cada ángulo hacia los entrehierros del estereo-espectrógrafo.

P ● mm Hg	P dinas/cm ²	N moléculas/cm ³	z = frecuencia de choque dimensional	camino λ = libre medio cm.
760	10.108 x 10 ⁵	2.69 x 10 ¹⁹	4.8 x 10 ⁹	9.3 x 10 ⁻⁶
5	6.65 x 10 ³	1.77 x 10 ¹⁷	3.2 x 10 ⁷	1.41 x 10 ⁻³
0.71	9.44 x 10 ²	2.51 x 10 ¹⁶	4.5 x 10 ⁶	9.96 x 10 ⁻³
9.9 x 10 ⁻²	131.6	3.5 x 10 ¹⁵	6.3 x 10 ⁵	7.14 x 10 ⁻²
3.4 x 10 ⁻³	4.52	1.2 x 10 ¹⁴	2.16 x 10 ⁴	2.08
9.7 x 10 ⁻⁵	12.9 x 10 ⁻²	3.43 x 10 ¹²	6.2 x 10 ²	72.9
1 x 10 ⁻⁵	1.33 x 10 ⁻²	3.54 x 10 ¹¹	63.7	706



Dibujo Esquemático del Corte Longitudinal
del Blanco de Gas para el Cálculo Teórico
a Escala Natural

IV.- DISEÑO Y CONSTRUCCION.

La forma del blanco más conveniente para las necesidades de geometría del estereo-espectrógrafo es la cilíndrica, que además facilita el trabajo de taller.

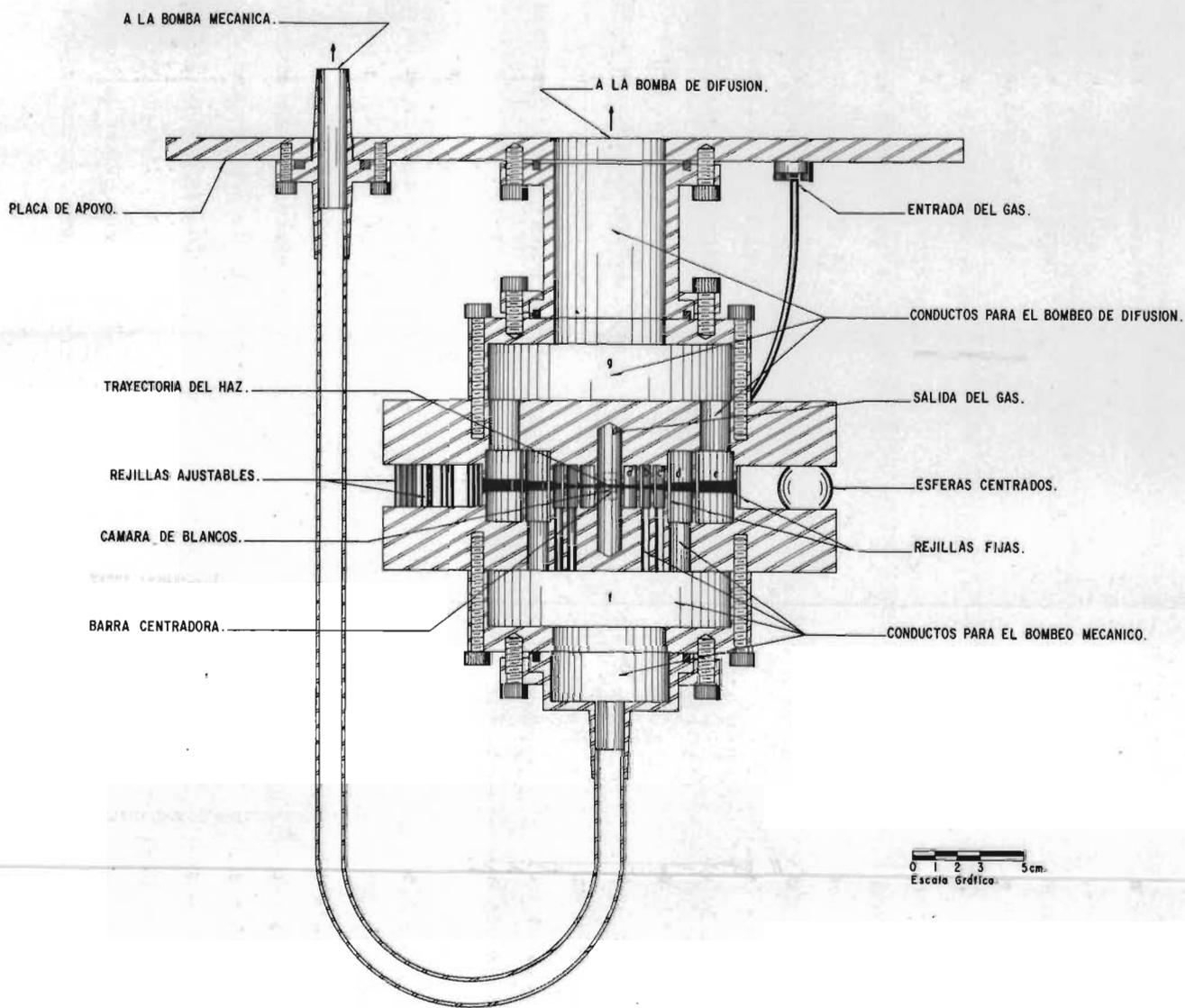
Para observar los productos de reacción fué necesario proporcionarle al blanco 20 salidas que corresponden a otros tantos entrehierros del toroide, además de construirle dos ventanas apropiadas para que el haz atravesase la cámara del blanco sin interferencia directa con las paredes. Todas estas rendijas son concéntricas y sus dimensiones por lo tanto iguales, para cada radio; esto simplifica su construcción.

Adoptada la forma cilíndrica se tiene que solucionar los siguientes problemas: para que en las placas, (atravesando un ángulo sólido del orden de 4×10^{-4}) se obtenga una intensidad de partículas útil, es necesario que la presión en el centro del blanco (proporcional al número de moléculas que se van a bombardear) sea del orden de los 5 mm Hg, manteniendo el vacío que rodea al blanco del orden de 10^{-4} mm Hg, es decir, es necesario reducir en forma enérgica la cantidad de gas que se escapa desde el centro del aparato al sistema, provocado por el gradiente de presión. El bombeo diferencial es útil para tal fin.

Para restringir en lo posible el paso del gas de la

zona central al exterior se construyeron en las piezas principales del aparato (Figs. 4-1, 4-2, 4-3) una serie de cavidades. La central, siendo el blanco propiamente dicho, será la que reciba el gas inyectado por medio de una perforación transversal construida en la tapa superior. Aparte de la central se maquinaron otras 5 cavidades anulares, cada una de ellas separadas de sus vecinas por una pared que termina en una arista, con el objeto de limitar, hacia los distintos pasos sucesivos, las moléculas del gas que salieron de la cámara central por el ángulo sólido de escape (abertura entre las dos tapas cilíndricas). Esto hace posible disminuir el gasto al mantener encerradas a las moléculas un tiempo mayor en cada cavidad, y el gas que escape con dirección diferente a la de este ángulo sólido, rebotará o contra otras partículas gaseosas o en las paredes y será atraído en buena parte por las bombas que producen los pasos diferenciales deseados.

La primera cavidad anular (a) está separada de la central por una pared de 1.5 mm de espesor, su espacio radial es de 5 mm y no está sujeta a bombeo. Como se observa en las figuras, las paredes que separan a una cámara de otra son del mismo espesor. Desde la segunda cámara (b) se empieza a bombear el gas por medio de una serie de perforaciones hechas en la parte inferior de la cavidad. Nótese que en la tercera y cuarta cavidades anulares (marcadas con las letras c y d en los esquemas), la situación de los conductos de bombeo es la misma, esto es, se localiza en la parte inferior de la cámara,



VISTA EN SECCION , NORMAL AL HAZ.

Fig. 4,1

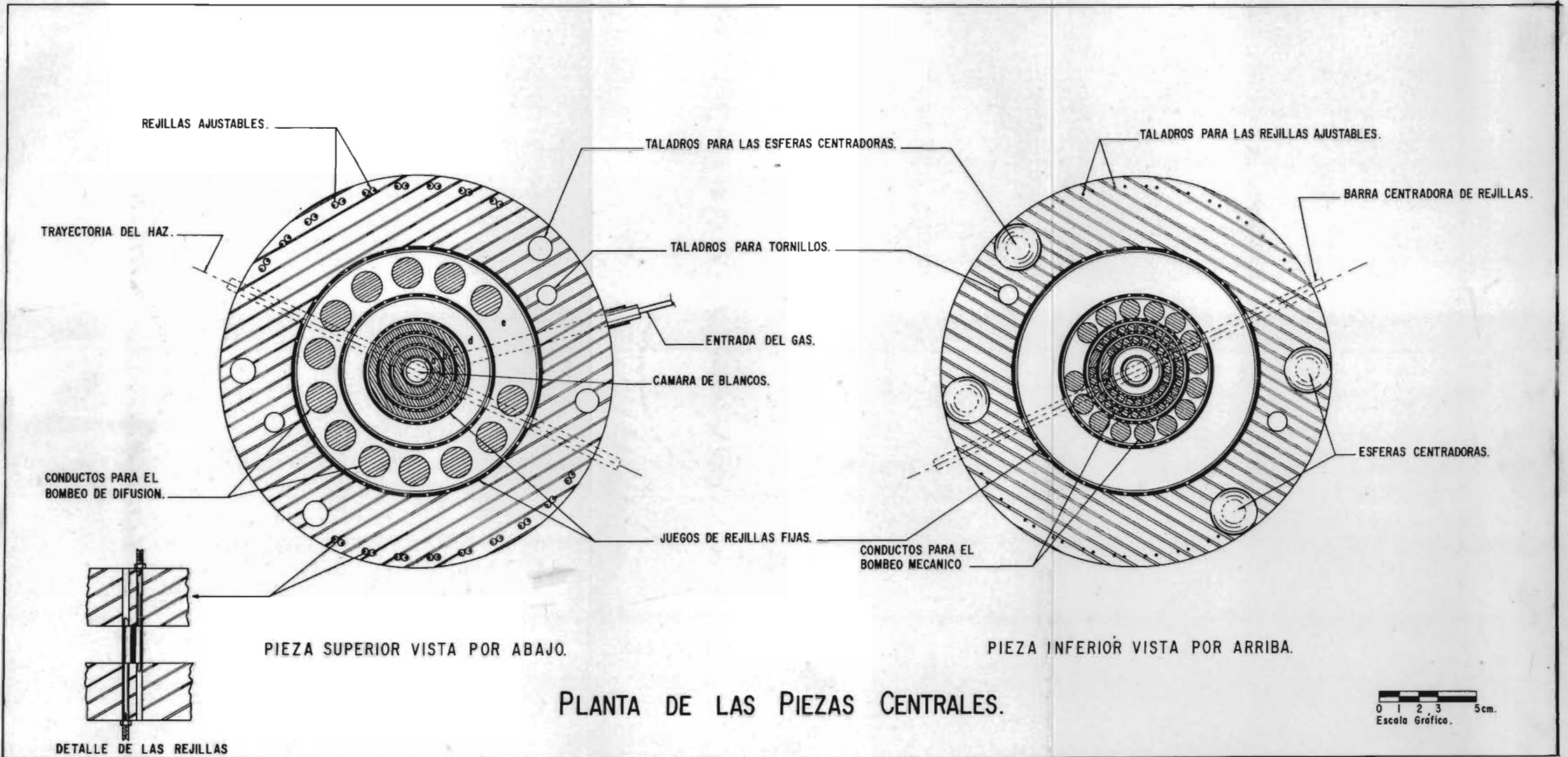
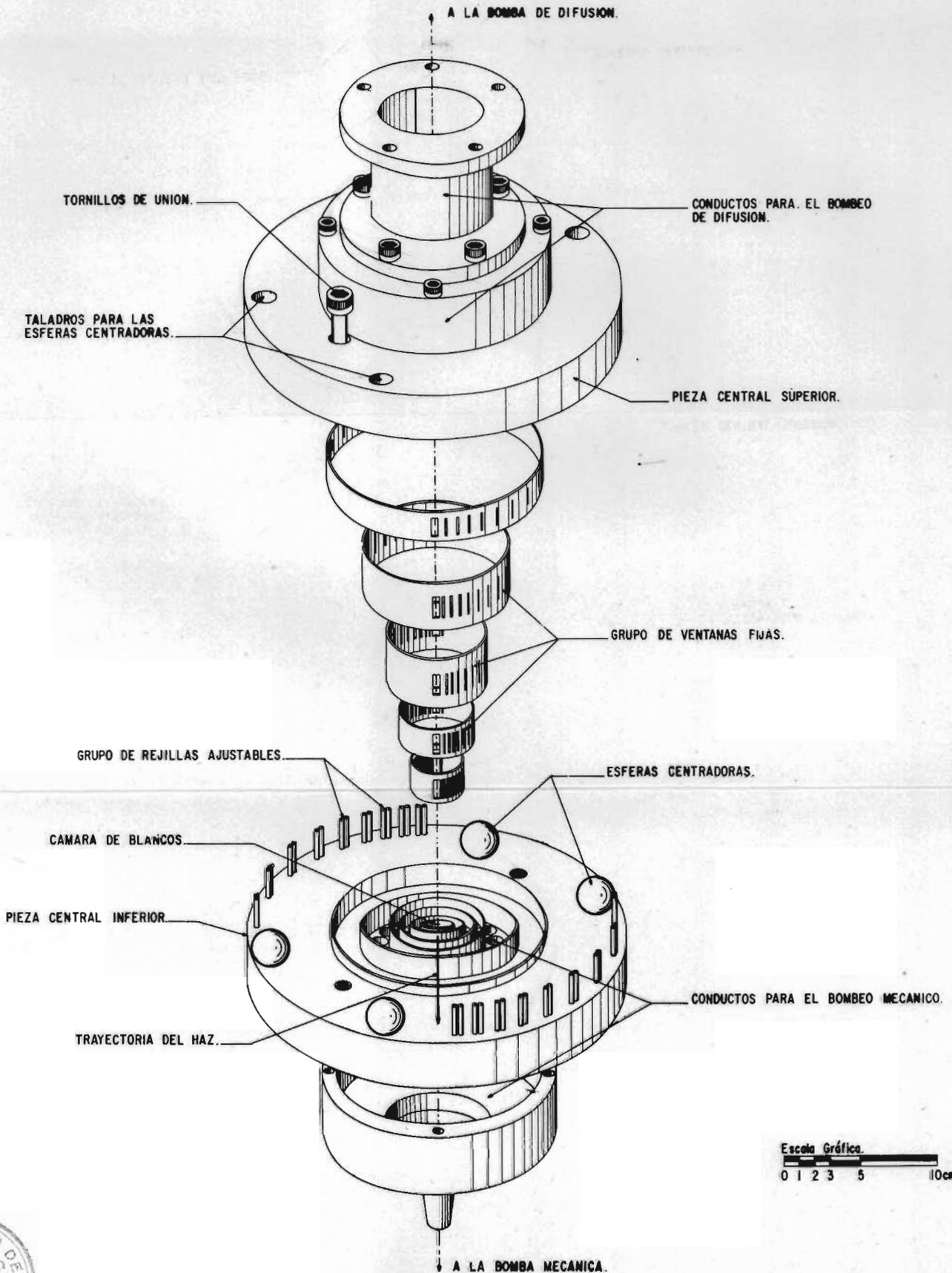


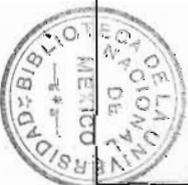
Fig. 4,2





DIBUJO ISOMETRICO DEL BLANCO DE GAS.

Fig. 4,3



con la diferencia que el área de perforaciones aumenta de un paso al siguiente, obteniéndose así una mayor superficie de bombeo.

La segunda y tercera cámaras anulares que corresponden al primero y segundo pasos de bombeo mecánico tienen una dimensión anular de 5 mm y presentan una área total para el bombeo (perforaciones) de 225 mm^2 y 304 mm^2 , respectivamente. La cuarta cámara que corresponde al tercero y último paso de bombeo mecánico tiene un ancho radial de 10 mm, y presenta una área para la extracción de 1020 m^2 . Aunque la evacuación del gas en estas tres cavidades se efectúa con la misma bomba mecánica, se logra bombeo diferencial debido a que la conductancia al paso del gas aumenta al aumentar el área de bombeo, incrementando de esta manera la rapidez de extracción.

La quinta y última cavidad (e) está destinada al evacuado de difusión; es el único paso en el que se efectúa el bombeo de este tipo. La anchura de la cámara es de 17 mm, y el área que presenta para el bombeo, construida en este caso en la parte superior de la cavidad es en total de 2150 mm^2 .

El gas extraído por el bombeo mecánico pasa a una cámara general (f) en la parte inferior del blanco y de ahí es extraído del sistema. En cambio el gas recolectado por el bombeo de difusión pasa a otra cámara (g) situada esta última en la parte superior del aparato de donde se expulsa.

Como se ve en la Fig. 4,1, la separación entre las

dos piezas centrales crece con la distancia al centro, debido a que se dejó entre ellas un ángulo de $\pm 2.5^{\circ}$, con el objeto de mantener el ángulo de observación requerido por las piezas polarés. Esta separación vertical puede aumentarse o disminuirse cambiando el diámetro de las esferas centradoras, las que además permiten una buena reproducción mecánica en caso de que se deba desarmar el blanco, por ejemplo; para su limpieza.

Hasta este punto del diseño, el espacio de escape para el gas resulta aún demasiado grande; para reducirlo es necesario obstruir parte de esta abertura. Si se considera que la reacción sólo va a ser observada a ciertos ángulos reducidos que miren a los entrehierros del estereo-espectrógrafo, pueden dejarse en dichos lugares pequeñas ventanas obstruyendo el resto de la abertura. La dimensión vertical de las ventanas estará dada por el ángulo con el que se construyeron las piezas principales. En cambio para determinar la dimensión horizontal de ellas se analizaron varios criterios, entre éstos los siguientes:

1o.- Se supuso que el blanco en cuestión es puntual. Según esto, para un sistema de ranuras situado a la misma distancia del centro, cada una de las ventanas tendría la misma abertura que iría creciendo proporcionalmente con la distancia al eje central. La Fig. 4,4 muestra una gráfica que indica las diferentes aberturas para distintas distancias, suponiendo un ángulo sólido limitado por un sistema de reji-

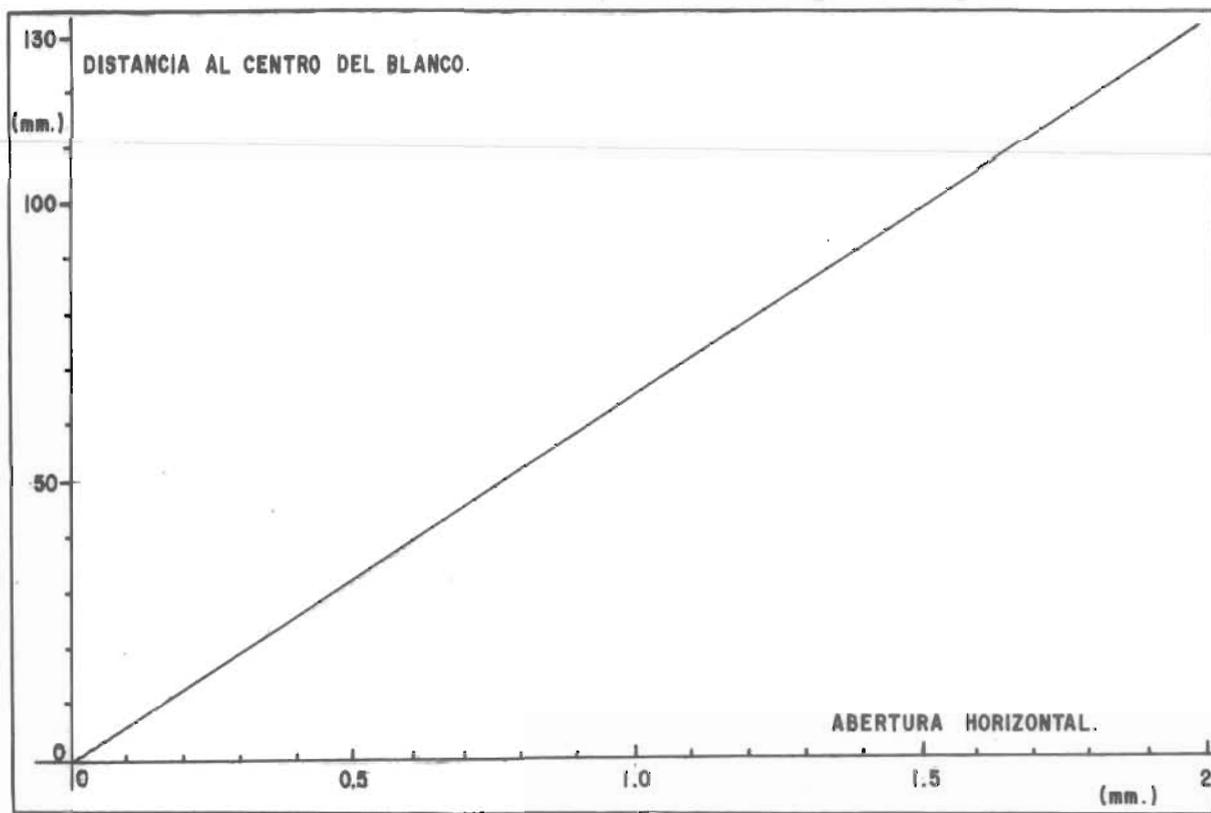


Fig. 4,4

llas más amplio que el reducido del real a los 52 cm, equivalente a trayectorias de partículas que finalmente alcancen a las placas fotográficas con distancias mínimas de 138 cm y máximas de 221 cm, es decir estas ventanas no actuarían como limitadoras del ángulo sólido en el sentido horizontal. Esto se eligió de este modo debido a los errores de construcción inevitables en el taller. Claro está, este cálculo sólo deberá tomarse como primera aproximación ya que el blanco en cuestión no es puntual, esto es, tiene dimensiones finitas.

2o.- El hecho que la parte activa de reacciones nucleares sea finita, origina el problema geométrico siguiente:

Cuál deberá ser el ancho de cada rendija de tal manera que un observador situado en un entrehierro cualquiera, vea la misma cantidad de gas a todos los ángulos?. Para ejemplificar este problema tómesese la situación simplificada de la Fig. 4,5. En ésta el haz tiene la dirección HH y la dirección del observador OO'; se considera que se forma entre estas dos direcciones una intersección volumétrica de secciones rectangulares con un ángulo Θ . El volumen limitado por la geometría estará dado por la abertura horizontal a, dependerá también del ancho del haz b y del ángulo de observación. Además como se supuso que la altura y el ancho del haz son constantes, el volumen activo será máximo a 0° (dirección del haz) y mínimo a 90° .

Cuando las dimensiones verticales de las rejillas permanecen constantes, al cambiar el ángulo Θ , varía el volu

men activo de la reacción en función de el área de intersección, cálculo que puede tomarse como verdadero ya que las rendijas abarcan toda la altura del haz.

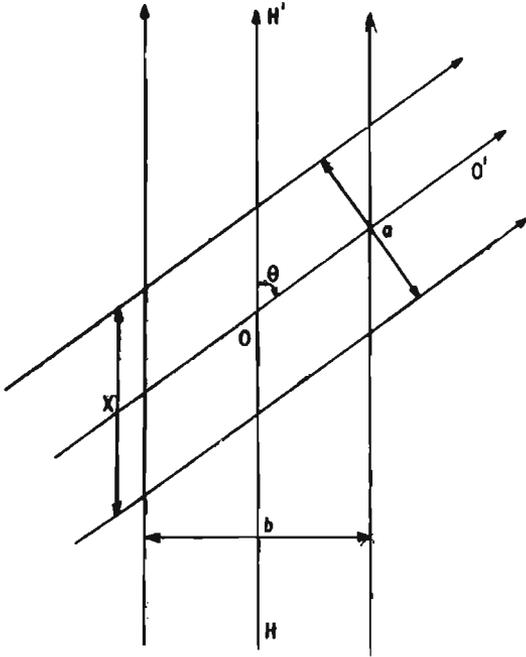


Fig. 4,5

La mínima superficie proyectada S localizada al ángulo de observación de 90° es igual a $S = ab$. En general, para un ángulo entre $0 \leq \theta \leq \pi$ el área de la base esta dado por $S' = x b$ pero :

$$x = \frac{a}{\text{sen} \theta} \quad \therefore$$

$$S' = \frac{ab}{\text{sen} \theta}$$

Esta superficie al ser multiplicada por la altura h , representa el volumen que contribuye en forma efectiva, lo que da como resultado una intensidad extremadamente fuer

te del haz producido hacia ángulos cercanos a los de la dirección del haz.

Este fenómeno se corrige en forma teórica al medir la intensidad registrada sobre las placas y multiplicarlas por el seno del ángulo de observación. La ecuación tomará la forma siguiente:

$$I_{\text{norm}} = I_{\text{reg}} \text{Sen } \theta$$

I normalizada representa el número de partículas corregidas por efecto geométrico. I registrada es el número de partículas colectadas.

La corrección descrita en el párrafo anterior es de importancia cuando se trabaja con reacciones nucleares para hacerlas comparables en los diferentes ángulos, en cambio si se quiere relacionar el número de rebotes elásticos producidos en una reacción, el fenómeno conocido como efecto Rutherford (13, 14), el tamaño de las rejillas adquiere gran importancia. Consiste éste, en la dispersión Coulombiana de una partícula positiva por un núcleo, en el cual la sección diferencial varía en función de la $\text{csc}^4 \Theta_{CM}$ donde Θ_{CM} es el ángulo en el sistema centro de masa.

Para corregir este par de efectos experimentalmente es necesario que las aberturas horizontales de las rejillas varíen de ángulo en ángulo, tomando valores sumamente críticos para cada posición. No es fácil estimar el verdadero efecto de la penumbra.

En todos los sistemas de rejillas fijas antes mencionados las aberturas horizontales permanecen constantes; sin embargo, para corregir los efectos mencionados se construyó a una distancia de 8.6 cm. del centro otro sistema de rejillas variables que consta de pares de cilindros excéntricos situados a cada 10° rodeando al blanco. Los cilindros tienen 5 mm de diámetro y están colocados de tal manera que al girarse produzcan una abertura máxima de 4 mm, o puedan

cerrarse completamente. De esta manera se logra que la dimensi3n horizontal sea ajustable entre 0 y 4 mm. Es posible que bajo un sistema 3ptico adecuado puedan quedar colocadas con precisiones del orden de 0.01 mm o mejor.

Sin embargo el ajuste para que los rebotes el3sticos resultaran de intensidad semejante no es sencillo debido a que para 3ngulos cercanos a los 0° con intensidades relativas comunes, la abertura entre los cilindros ser3a demasiado peque1a para ser centrados con gran exactitud y en donde el efecto de penumbra se volver3a muy importante.

V.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Una vez que el blanco quedó ensamblado y las rejillas orientadas en su posición correcta, fué montado dentro del sistema de vacío. Este último consta de un cilindro de hierro de 38 cm de altura con 30 cm de diámetro interior y 2 tapas que sellan contra el cilindro por medio de 2 anillos de hule neopreno, recubiertos con una ligera capa de grasa para vacío. El blanco cuelga de la tapa superior de tal manera que el bombeo de difusión en el blanco mismo se efectúa por medio de un conducto de 2 pulgadas de diámetro interior que desemboca hacia el sistema de extracción de gases a través de una válvula de 2 pulgadas (Fig. 5-1). Este sistema está constituido por una bomba de mercurio de 100 lt/seg con su trampa de aire líquido, y una bomba mecánica de 2 metros cúbicos por hora (D-2), que mantiene el antevacío necesario para el buen funcionamiento de la bomba difusora (Fig. 5-2).

El sistema mecánico de bombeo también se conecta al blanco a través de la tapa superior por medio de un tubo de cobre soldado en la parte inferior del aparato, destinada a la salida de los pasos mecánicos y comunicada con la cara interna de la tapa superior del recipiente. Este tubo se conecta por medio de un cono doble, atornillado en el interior de la tapa, a la manguera de la bomba mecánica de

$6\text{m}^3/\text{hr}$ (Fig. 4-1).

Sobre esta etapa se colocó también un manómetro de aceite que puede apreciarse en la Fig. 5-1, con la finalidad de medir la diferencia de presiones que existe entre la cámara central del blanco y el recipiente evacuado.

La tapa inferior la constituye la plancha del evaporador Fig. 5-3; dicho evaporador tiene su propio sistema de bombeo así como sus aparatos de medida de tal manera que puede conocerse la presión que tiene el recipiente por las mediciones con estos aparatos. El sistema de bombeo propio del evaporador está constituido por una bomba de difusión con su trampa de aire líquido correspondiente, y una bomba mecánica de $6\text{ m}^3/\text{hr}$ (D-6). Por último existe entre el sistema de bombeo general y el recipiente una válvula que permite independizar tales zonas.

La medida de la presión en los pasos mecánicos se realizó por medio de un termopar colocado entre el cono doble y la bomba mecánica (Fig. 5-1). Es por esto que las lecturas tomadas en este medidor son un poco engañosas ya que no es la presión real de los pasos mecánicos la que se mide, debido a que; el medidor queda bastante lejos de la cámara inferior de recolección y está situado en cambio en el conducto a la bomba.

En el paso de difusión se determina su presión por medio de un medidor Philips (Fig. 5-2) que está colocado en el codo que une al blanco con la válvula de 2 pulgadas.

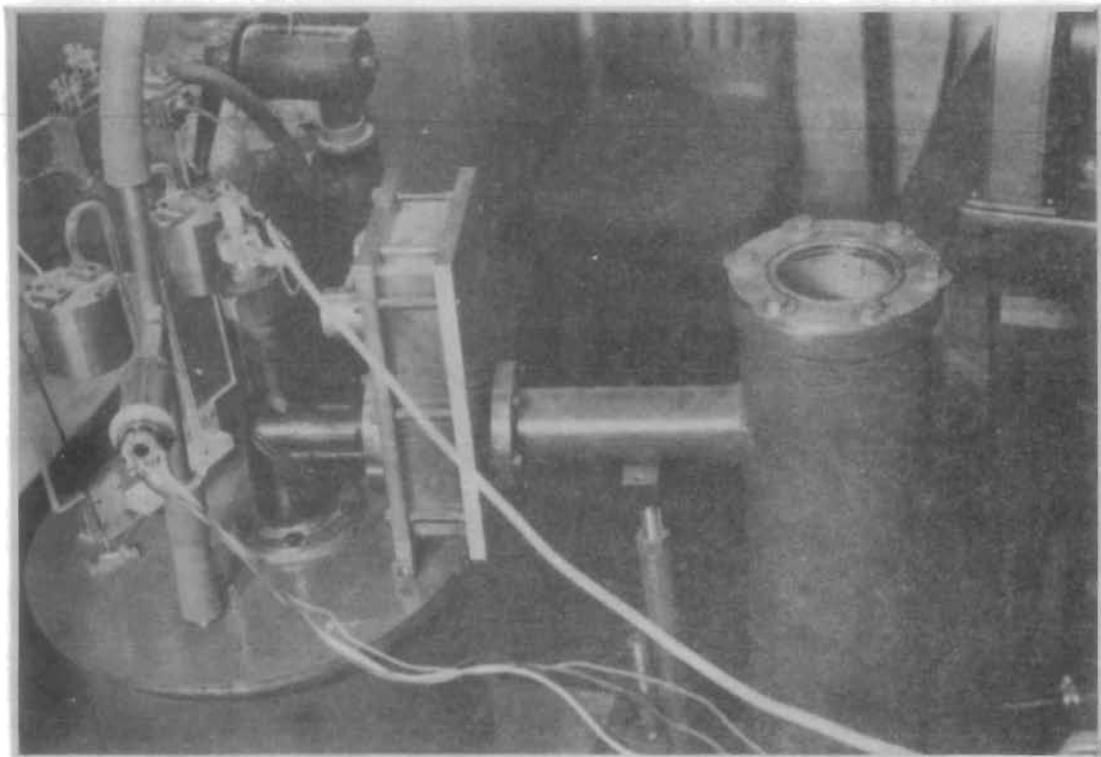


Fig. 5, 1

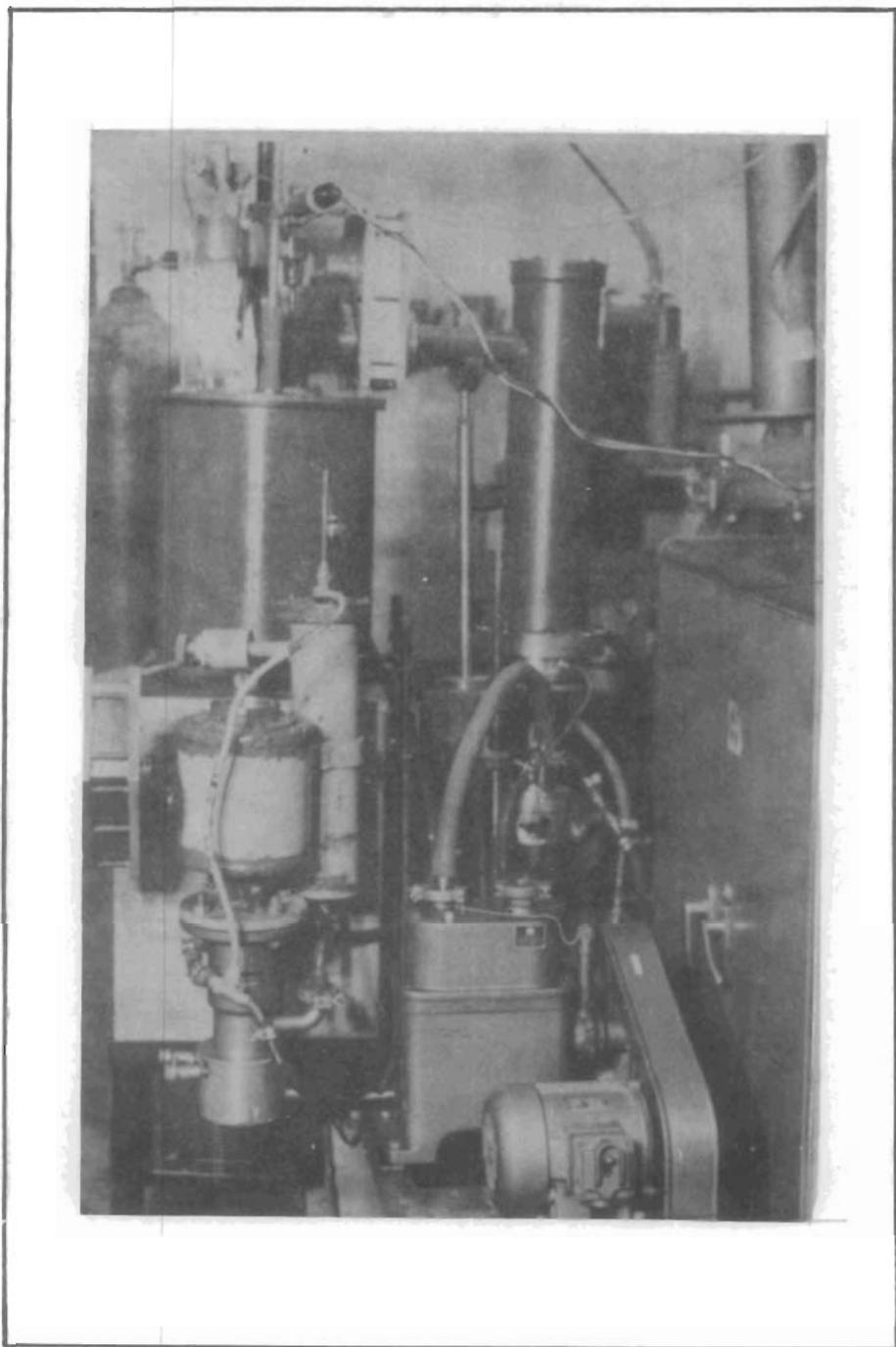


Fig. 5, 2

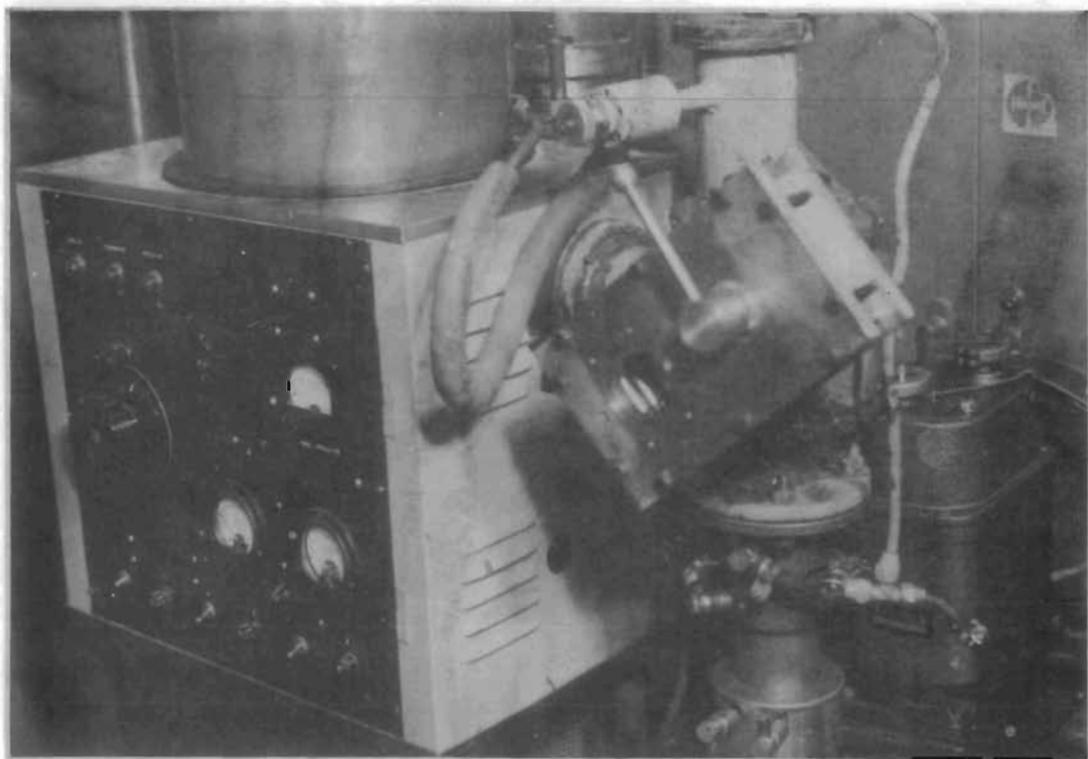


Fig. 5, 3

•

Debido a la distancia tan corta que existe entre la cámara superior de recolección de gases es de esperarse que la lectura obtenida se acerque mucho más a la realidad en comparación con lo que sucede en los pasos mecánicos.

Si se observa con cuidado la Fig. 5-4 se nota que se puede dejar de bombear independientemente, ya sea en el sistema mismo, en los pasos mecánicos, o en los de difusión sin que el vacío del recipiente se pierda, cerrando simplemente las válvulas que para este objeto fueron colocadas en cada salida.

Las primeras pruebas tendientes a mostrar la efectividad del blanco se realizaron sin que hubiera bombeo en los pasos mecánicos ni en el paso de difusión. El gas admitido fué aire y las diferencias de presiones que lograron estabilizarse entre el centro del blanco y el recipiente fueron de 1 y 1.2 cm de aceite a los tiempos de 1 minuto y 1 minuto con 45 segundos respectivamente, decayendo la presión de 4.4×10^{-5} a 5.9×10^{-4} mm Hg en el primer caso y de 3.3×10^{-5} a 6.6×10^{-4} mm Hg en el segundo. En cambio con 6 cm de aceite la presión subió a 6×10^{-2} mm Hg en minuto y medio no lográndose estabilizar el sistema. La Fig. 5-5 representa las gráficas de pérdida de vacío - estabilidad y recuperación del mismo para los tres casos anteriores. Estas curvas son bastante representativas de lo que ocurrió en el sistema completo.

Las mediciones efectuadas a continuación se reali-

zaron evacuando en los pasos destinados a bombeo mecánico con una D-6 ayudando en el exterior con el bombeo de difusión del sistema. Como en el caso anterior el gas admitido fué aire y las diferencias de presiones entre la cámara central y el recipiente que se conservaron estables fueron: 0.8, 1.5 y 2 cm de aceite en los tiempos de 2 minutos 15 segundos, 6 minutos y 8 minutos respectivamente. El sistema se estabilizó para el primer caso a los 9.8×10^{-5} mm Hg habiendo partido de una presión de 2.8×10^{-5} mm Hg; para el segundo caso se inició el experimento con una presión de 3.2×10^{-5} mm Hg y se alcanzó el equilibrio a los 8.3×10^{-4} mm Hg; para la tercera medición se partió de una presión de 3.7×10^{-5} mm Hg y se alcanzó el equilibrio a los 5×10^{-3} mm Hg sin embargo, al inyectar aire con este último arreglo hasta una diferencia de presiones de 5 cm de aceite no se alcanzó el equilibrio. La Fig. 5-6 muestra lo que sucedió en el sistema al admitir el gas mencionado a diferentes presiones.

Posteriormente se efectuó un bombeo mecánico utilizando primeramente una bomba de $6 \text{ m}^3/\text{hr}$, para aquellos pasos destinados a este tipo de extracciones y otra bomba mecánica del mismo tipo en la última etapa de bombeo destinada al evacuado de difusión, transformando de esta manera el último paso en mecánico en lugar del de difusión. Las diferencias obtenidas, entre otras, en las que se logró el equilibrio fueron: 0.5 cm, 0.8 cm y 1 cm de aceite, el tiempo necesario para estabilizar el sistema en las pruebas anteriores fue de:

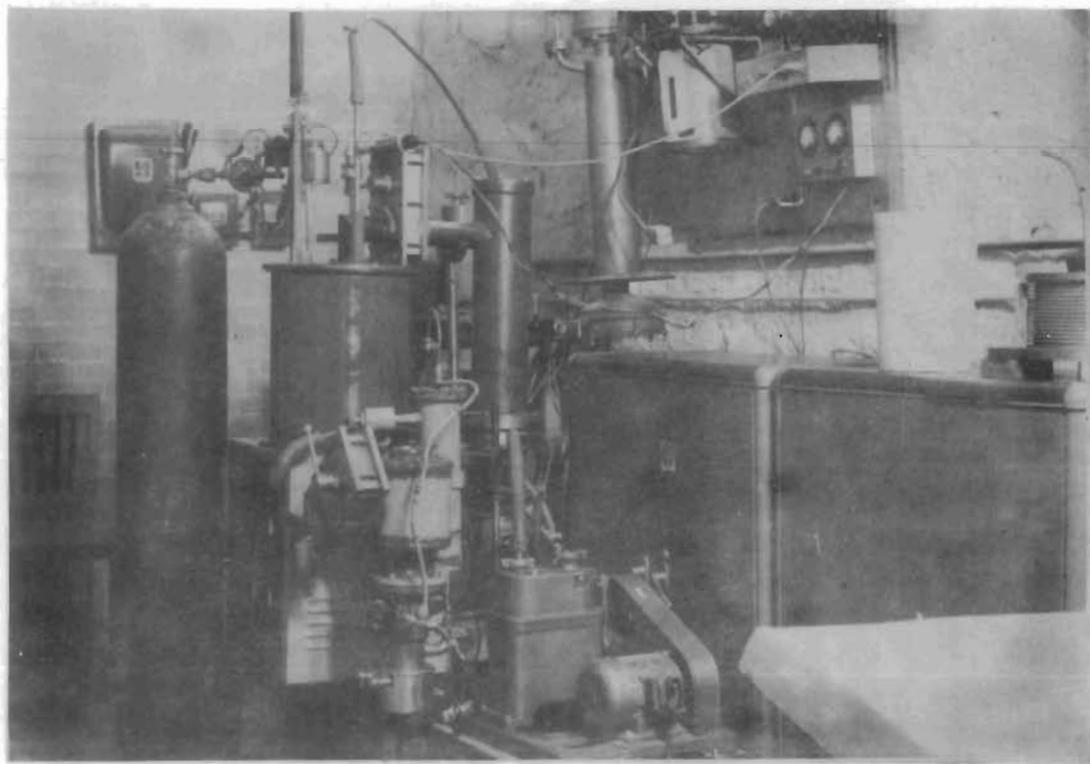
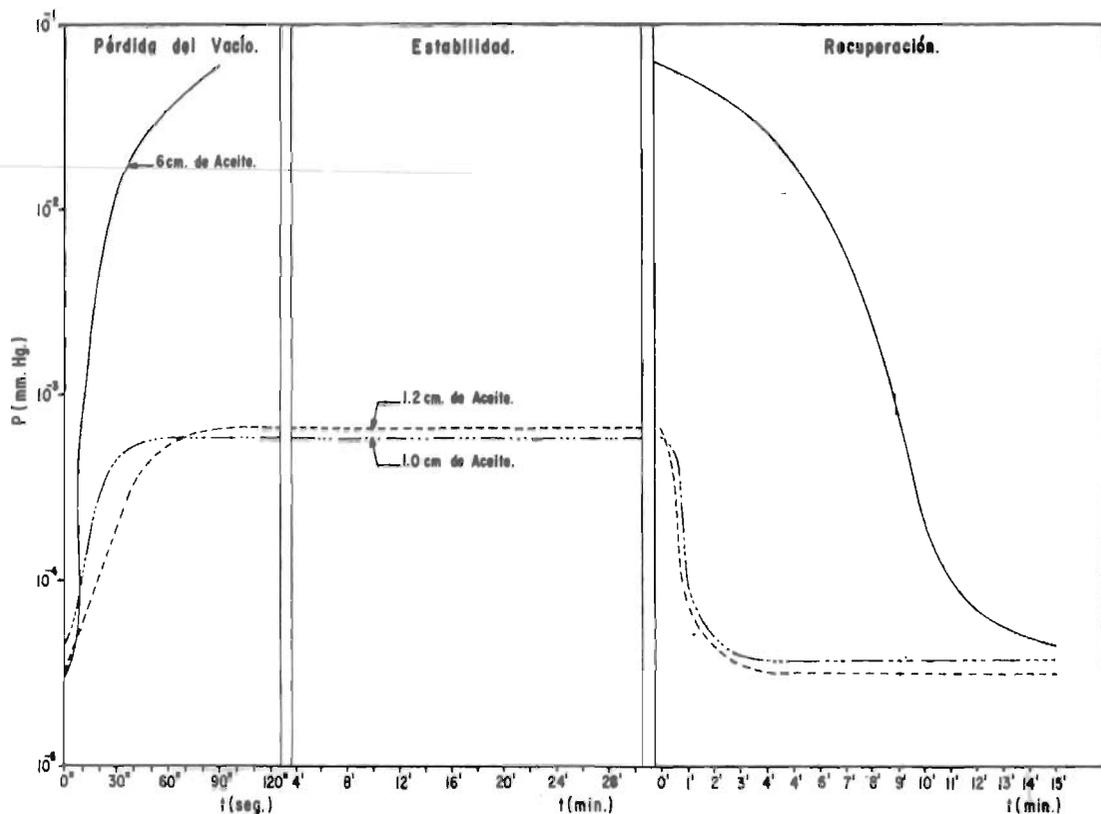
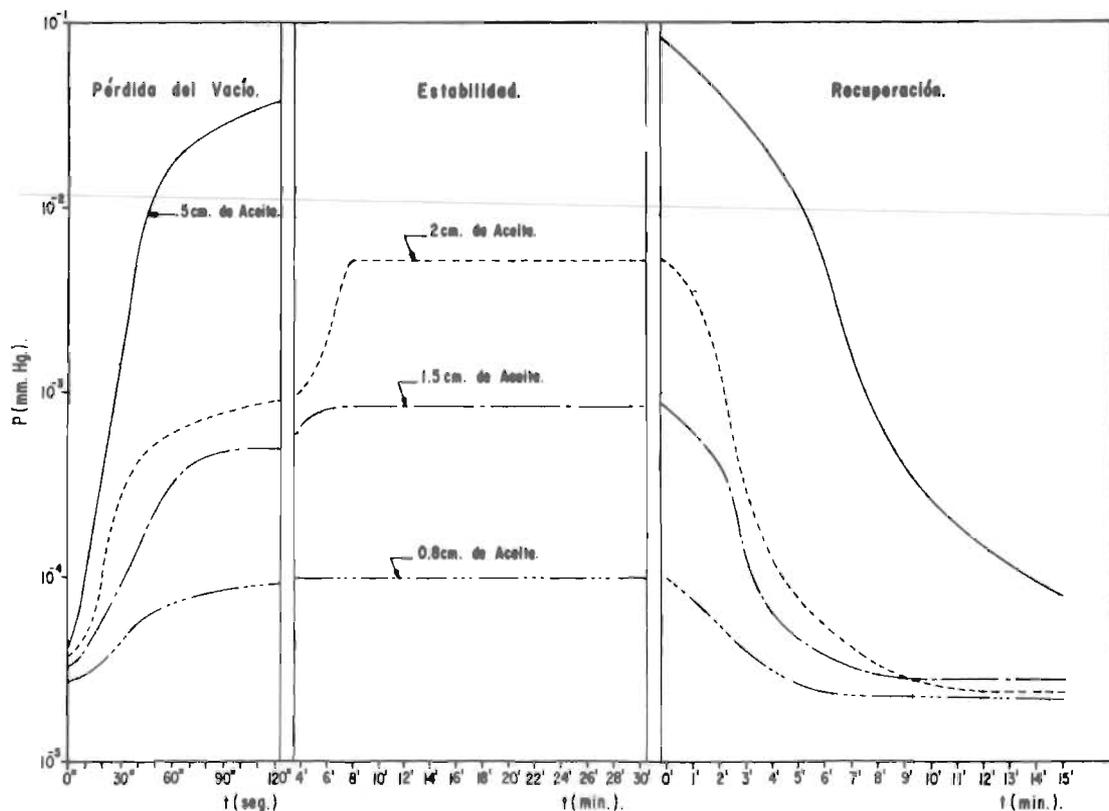


Fig. 5, 4



Comportamiento del Sistema de Vacío, Evacuado Solamente con sus Propias Bombas.



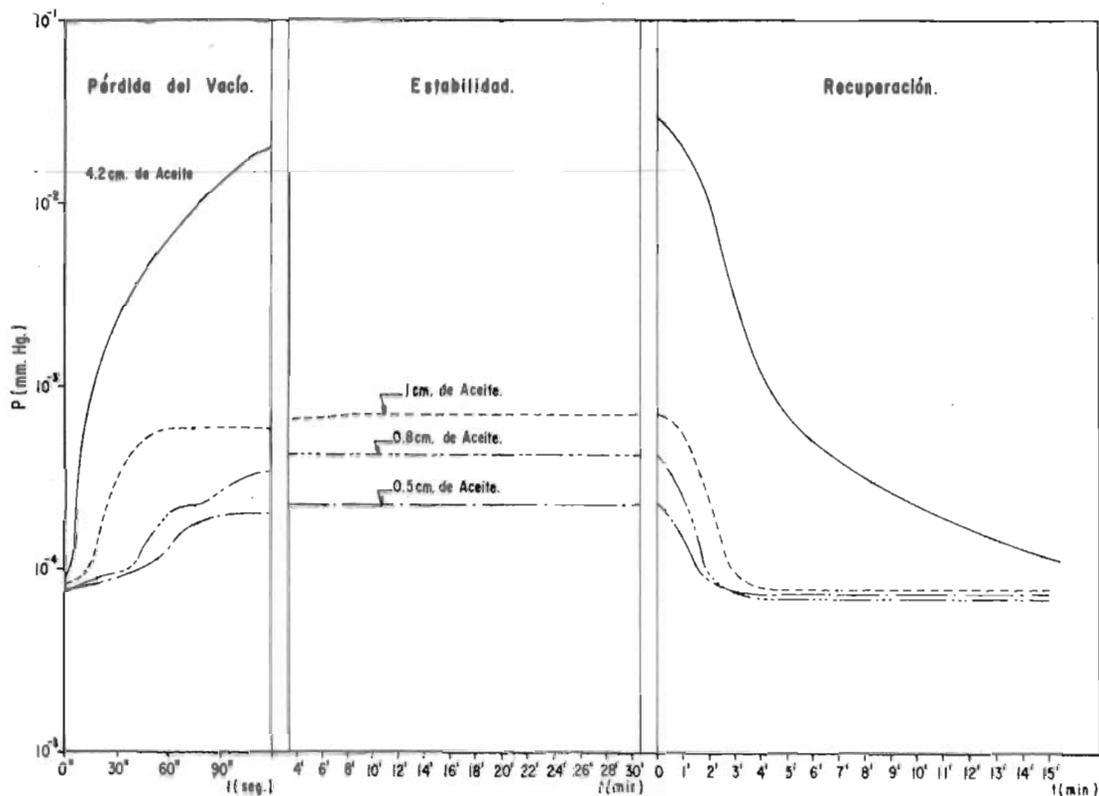
Bombeo Mecánico en los Lugares Correspondientes a Este Tipo de Succión,
con Ayuda Exterior del Bombeo de Difusión del Sistema.

1 minuto con 45 segundos, 2 minutos con 15 segundos y 3 minutos, respectivamente. La presión inicial para la primera prueba de este tercer grupo de experimentos fué de 7.8×10^{-5} mm Hg mientras que la presión final de 2.1×10^{-4} mm Hg. Para las pruebas siguientes las presiones iniciales fueron de 7.6×10^{-5} y 8.2×10^{-5} mm Hg, habiendo alcanzado en el segundo intento una presión final de 4.2×10^{-4} mm Hg y el tercero 7×10^{-4} mm Hg. Sin embargo el sistema no alcanzó el equilibrio cuando se le produjo una inyección de gas equivalente a 4.2 cm de aceite ya que, partiendo de una presión inicial de 8.4×10^{-5} mm Hg alcanzó a los 2 minutos con 45 segundos la presión de 3×10^{-2} mm Hg. La Fig. 5,7 muestra en forma gráfica el comportamiento del sistema para estas cuatro últimas pruebas.

Por último se efectuaron mediciones con el sistema completo (Fig. 5,8), es decir manteniendo el bombeo del evaporador, el bombeo en los pasos mecánicos y utilizando para la última etapa del blanco con una bomba de difusión de 100 lt/seg, con trampa de aire líquido y bomba mecánica de $2 \text{ m}^3/\text{hr}$ para mantener el antevacío. En este caso el gas admitido fué nitrógeno y las diferencias de presiones estables obtenidas entre el centro del blanco y el recipiente fueron de 1.8, 3.5 y 7.6 cm de aceite, lográndose el equilibrio a los 40 segundos 4 minutos y 14 minutos respectivamente, habiendo partido de las siguientes presiones iniciales 4.4×10^{-5} , 2.5×10^{-5} y 2.0×10^{-5} mm Hg para la primera,

segunda y tercera pruebas. Se alcanzó el equilibrio para cada uno de estos ensayos a los 9.3×10^{-5} , 9.5×10^{-5} y 4×10^{-4} mm Hg, manteniéndose la inyección del gas para conservar las presiones anteriores por espacio de 3 horas, tiempo en el que se conservó la situación estable. Posteriormente se aumentó la cantidad de gas para pasar de los 7.6 cm a 9.5 cm de aceite con el resultado que el equilibrio se perdió casi instantáneamente sin lograr un nuevo estado estable. La Fig. 5,9 muestra estas cuatro pruebas, indicando la forma de pérdida del vacío al transcurrir el tiempo.

Finalmente la Fig 5,10 sirve para comparar las presiones obtenidas en las etapas sucesivas de bombeo, cuando las inyecciones de nitrógeno produjeron diferencias de presiones de 1.8, 3.5 y 7.6 cm de aceite. Observando las figuras con cuidado se nota que para una presión de 7.6 cm de aceite la bomba de difusión que actúa en el último paso de evacuado del blanco ha llegado a la presión mínima requerida para su buen funcionamiento por lo que se puede sacar en conclusión que los 7.6 cm de aceite equivalentes a 5.8 mm Hg dan la diferencia de presión máxima que se puede establecer entre el centro del blanco y el sistema externo. Así mismo las curvas muestran como se redujo la presión de un paso a otro por lo que con un número suficiente de estas curvas podría asignarse al gradiente de presión medido una función algebraica que permitiera en cierta forma predecir el orden de magnitud del comportamiento del aparato para diferentes inyecciones de



Bombeo Mecánico en Todas las Etapas, inclusive la Destinada a Difusión.
 Vacío Externo al Blanco con Bomba de Difusión del Sistema.

Fig. 5,7

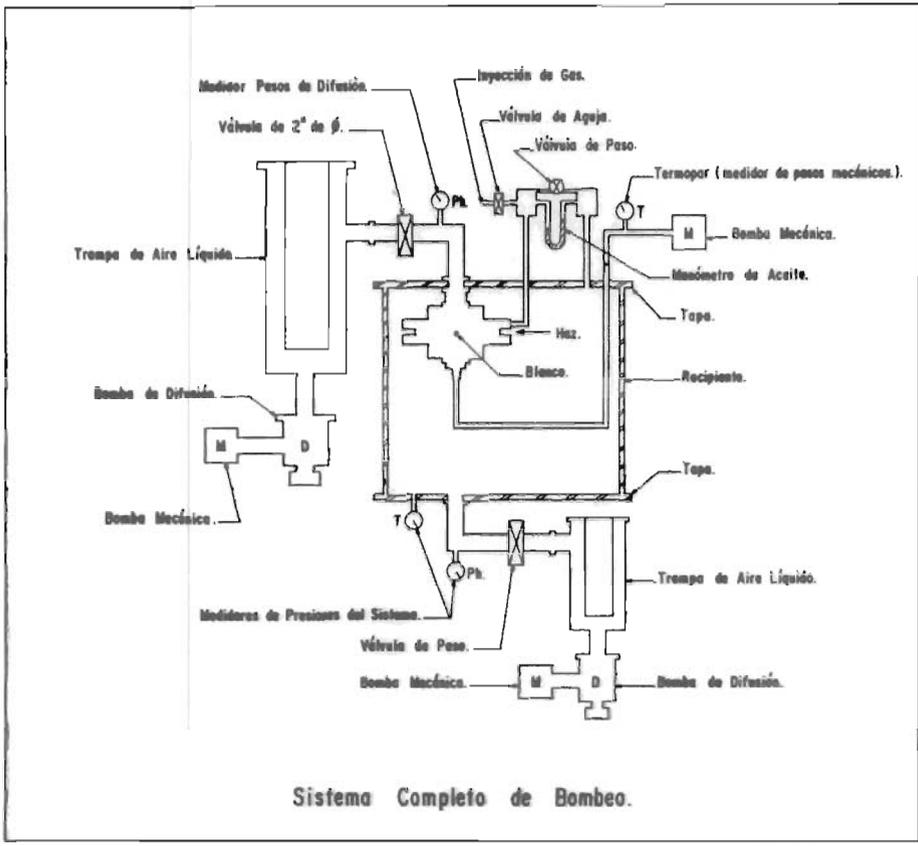
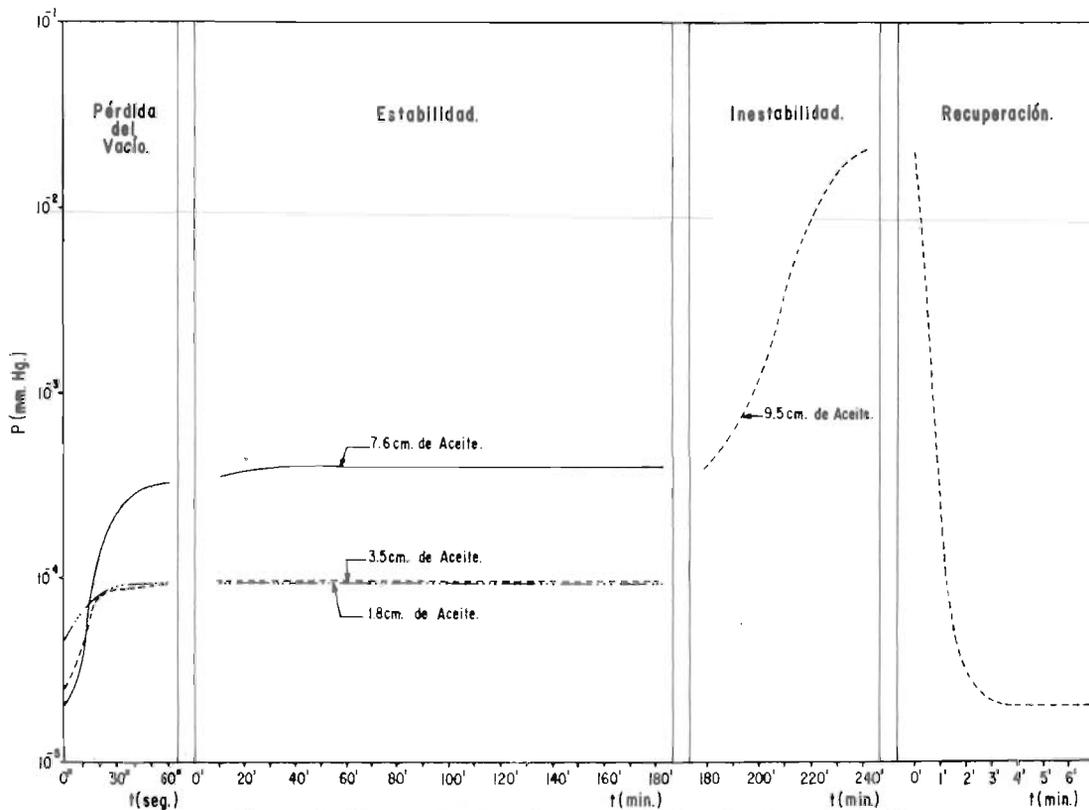


Fig. 3,8



Cámara de Blancos Funcionando con el Equipo Completo de Bombeo.
 Pasos Mecánicos con Bomba D-6, Pasos de Difusión con Bomba de Mercurio de 100 lt./seg.
 y Evaporador Dotado de Bomba de Difusión de Mercurio de 100 lt./seg.

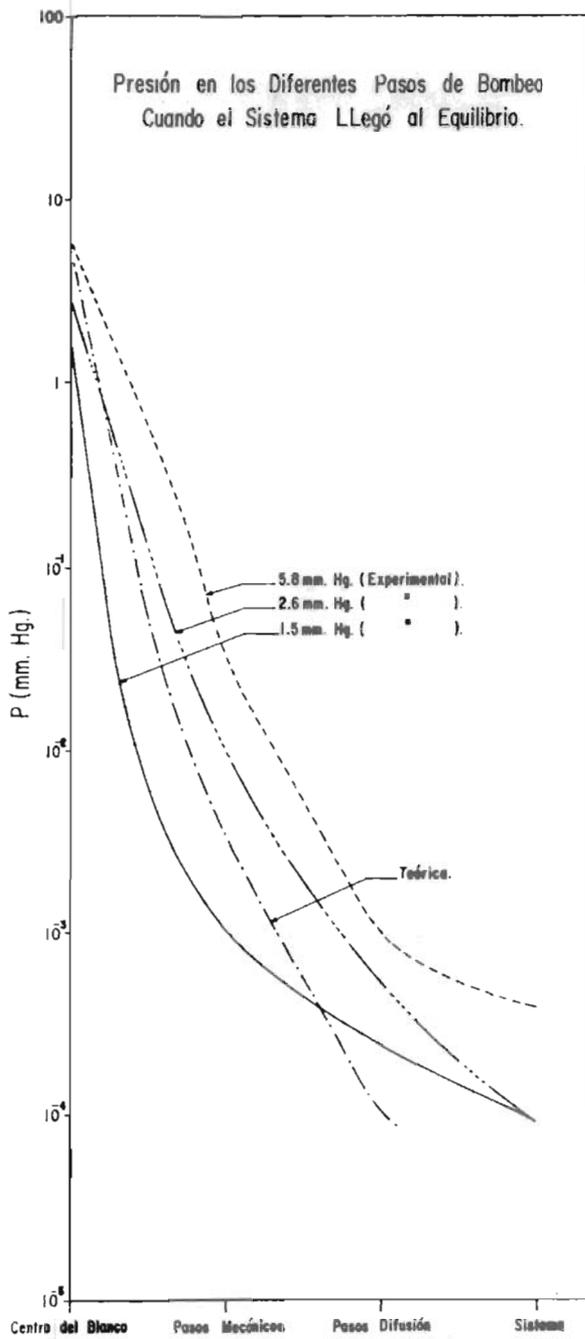


Fig. 5,10

gas. Vemos en la última figura que la curva teórica para el decaimiento de la presión es semejante al encontrado experimentalmente, lo que nos indica que los razonamientos seguidos en el capítulo anterior dan una estimación aceptable de los gradientes de presión en las cámaras sucesivas. En el sistema la presión estimada fué del orden de 10^{-4} mm Hg, la medida es de 3.5×10^{-4} mm Hg, situación que es de esperarse considerando las eficiencias reales de conducciones y bombas no tomadas en consideración en el cálculo.

VI.- CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.

El diseño del aparato, objeto de este trabajo es solamente la primera etapa de un programa que tiene por objeto fabricar blancos adecuados para el aprovechamiento del acelerador de alta corriente de que se dispone en el Instituto de Física. Este es uno de los primeros aceleradores de gran intensidad, que seguramente abrirá nuevos campos de investigación en el núcleo.

Actualmente en el Instituto se construye otro tipo de blanco sin paredes tomado del modelo de C. M Jones (7) que consiste en una cámara dentro de la cual, se instala una serie de contadores a diferentes ángulos. De esta manera el gas solamente podrá escaparse por el orificio circular de 3 mm de diámetro por el que se hace incidir el haz. Con este arreglo y mediante el bombeo diferencial en el conducto, C. M. Jones a logrado una presión en la cámara aproximadamente 12 mm Hg.

Las conclusiones que se pueden sacar del trabajo desarrollado en esta tesis son:

- 1.- La presión de 5.8 mm Hg alcanzada en la cámara central con alteraciones del vacío en el sistema, todavía dentro de límites permisibles para el paso del haz de proyectiles y de las partículas de reacción, permitirá efectuar distribuciones

angulares de reacciones nucleares en tiempos razonables.

2.- La estimación teórica de flujos de gas en el blanco desarrollada en el capítulo tercero muestra una aproximación aceptable con los resultados obtenidos, tomando en cuenta las restricciones impuestas al cálculo.

3.- En base al cálculo teórico puede predecirse, para el caso en el que se requieran presiones mayores en la cámara central, el número de pasos necesarios para el buen funcionamiento del aparato.

Se sugieren los siguientes puntos para mejorar el diseño actual del blanco:

1.- Como se nota en la gráfica 5,9, el gradiente de presión decae rápidamente en su paso por las etapas de evacuado mecánico, por lo que se sugiere que para estos pasos de extracción se usen bombas más rápidas que las de $6 \text{ m}^3/\text{hr}$; así como también ampliar el diámetro del conducto de succión mecánica. Con este arreglo es probable que se puedan alcanzar presiones mayores en la cámara central.

2.- Se sugiere también el uso de un tercer sistema de rejillas para el caso de dispersión elástica nuclear, con la característica de que en este tercer sistema se cambie solamente la dimensión horizontal de las ventanas con el objeto de no modificar el ángulo vertical de aceptación de las rendijas y simplificar así el cálculo de la sección.

Esta abertura variará desde unas cuantas micras para ángulos cercanos a los 0° hasta 2 o 3 milímetros a 170° .

De no compensar las intensidades de partículas de esta manera, los grupos de partículas se harían ilegibles al microscopio.

3.- Otro modo de lograr una presión de gas en la cámara central sin que el vacío exterior empere notablemente, puede hacerse posiblemente aumentando los pasos de bombeo cercanos al centro. Esto puede lograrse succionando el gas desde la misma cámara central y en la primera cavidad anular; solamente que en este caso el gasto del gas sería mucho mayor.

4.- En caso que se adoptara la sugestión anterior es conveniente entonces diseñar un sistema de recuperación de gas con lo que se lograría efectuar experimentos con gases costosos. También serviría en casos especiales para el empleo de gases radiactivos.

5.- Un primer experimento que se sugiere para este tipo de blanco sin paredes, es el de repetir y verificar características físicas del ^{40}Ar ; y efectuar las distribuciones angulares de los isótopos del Argón utilizando para este objeto gas comercial purificado. ^{36}Ar , ^{38}Ar y ^{40}Ar son los isótopos estables que existen en la naturaleza con porcentajes relativos de éstos de: 0.377, 0.063 y 99.60, respectivamente. Este experimento se hizo empleando cámara de gas con paredes⁽⁷⁾, en la que no pueden usarse grandes corrientes de proyectiles. Las paredes afectan las medidas de niveles de excitación nucleares por pérdida de energía tanto de las partículas incidentes como de las emergentes de la reacción.

6.- Es posible que en reacciones sobre gas con intensidades

importantes de proyectiles puedan iniciarse experimentos en los que se tengan partículas polarizadas. Este tipo de información sería muy útil para obtener información de características físicas del núcleo.

7.- Se sugiere por último, la construcción de un tercer tipo de blanco gaseoso que consista de un plasma metálico de tal manera que éste pueda ser interceptado por iones acelerados controlando su forma y tamaño, de preferencia por campos eléctricos. Una forma de resolver esta sugerencia podría ser: interceptando el haz producido por una fuente de iones de gran intensidad.

A G R A D E C I M I E N T O S .

Agradezco sinceramente al Ing. Marcos Mazari M., al Dr. Fernando Alba A. y al Fis. Gilberto López A., su valiosa ayuda en la discusión de los problemas que se presentaron durante el desarrollo de esta tesis. Al Sr. Hiram Galván por la construcción, en el taller, del blanco. Al Sr. José Manuel Ramos por el dibujo de los planos y las gráficas. A la Srta. Blanca E. Galván A. por la mecanografía de este trabajo.

REFERENCIAS .

- (1) J. Rickards, Rev. Mex. Fís. 9, 35 (1960) y tesis profesional Fac. Cienc. UNAM. (1960).
- (2) M. E. Ortiz de López, Rev. Mex. Fís. 10, 283 (1961) y tesis profesional Fac. Cienc. UNAM (1961).
- (3) Jáidar, López, Mazari y Domínguez, Rev. Mex. Fís. 10, 247 (1961) y tesis profesional de A. Jáidar. Fac. Cienc. UNAM (1961).
- (4) Kashy, Hoogenboom and Buechner; Phys. Rev. 124, 1917 (1961).
- (5) Análisis de las propiedades geométricas generales de espectrógrafos del tipo Bainbridge - Buechner y sus aplicaciones a determinaciones precisas de secciones diferenciales y valores Q de reacciones nucleares. Tesis profesional Fac. Cienc. UNAM. R. Domínguez (1963).
- (6) Nuclear Data Tables, part 3. J. B. Marion. National Academy of Sciences (1960)
- (7) The Scattering of Alpha Particles from C^{12} . C. M. Jones Tesis Doctoral, Universidad de Rice (1961).
- (8) Diseño y construcción de un estereo-espectrógrafo para el estudio de propiedades físicas de núcleos a través

de reacciones con partículas cargadas. Tesis profesional
Fac. Cienc. UNAM G. López A. (1963).

- (9) C. P. Browne y W. W. Buechner. Rev. Sci. Instr. 27, 899
(1956).
- (10) Scientific Foundations of Vacuum Technique. Saul
Dushman - John Wiley and Sons (1949).
- (11) An Introduction to Thermodynamics, The Kinetic Theory
of Gases, and Statistical Mechanics.
Francis Weston Sears Addison - Wesley (1950).
- (12) Reactions Energies and Energy Levels from Proton and
Deuteron Bombardment of the Iron Isotopes. A Sperduto
and W. W. Buechner. The Phys. Rev. 134, 142 (1964)
- (13) Classical Mechanics. Herbert Goldstein Addison - Wesley
book 81 (1959).
- (14) Nuclear Physics. Alex E. S. Green Mc Graw-Hill book 232
(1955).