



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO DE UN LABORATORIO  
DE  
IMPLANTACION DE IONES

TESIS PROFESIONAL

que para obtener el título de  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
AREA MECANICA

p r e s e n t a n :

WALTER HUGO CORREA MOGOLLON

ROBERTO FUENTES CASTILLO

GUSTAVO ROGELIO FUENTES MAIRENA



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## I N D I C E

Introducción		1
Capítulo I	Conceptos físicos que intervienen en el desarrollo de un Implantador de Iones.	7
I.1	Fuente de iones y enfoque de un haz de proyectiles.	11
I.2	Aceleradores de partículas.	43
I.3	Deflector magnético.	61
I.4	Cámara de blancos.	71
I.5	Técnicas del alto vacío.	80
Capítulo II	Desarrollo del laboratorio de Implantación de Iones.	96
II.1	Distribución del laboratorio.	97
II.2	Diseño de componentes principales.	101
II.3	Líneas de bombardeo.	104
II.4	Diseño de una grúa para el montaje de equipo.	111

Capítulo III	Aplicaciones de la Implantación de Iones.	121
III.1	Ventajas y limitaciones de la técnica de implantación.	126
III.2	Fricción.	129
III.3	Diseño y construcción de fricciómetros.	144
III.4	Técnica alternativa a la de Implantación de Iones.	148
Conclusiones y Sugerencias		158
Agradecimientos		160
Referencias		161

## INTRODUCCION

Históricamente hablando, el hecho de que la presencia de partículas atómicas en materiales sólidos produzcan cambios de sus propiedades físicas, ha sido reconocido desde hace varias décadas. Los físicos nucleares que durante la década de 1930, haciendo uso de los primeros aceleradores de iones que entonces se habían construido, no observaron posibles alteraciones físicas en ciertos materiales usados como blanco, ya que como efectos de problemas laterales, no les dieron la debida importancia. Con el desarrollo de los reactores nucleares en los primeros años de la década de los 40, la situación llegó a ser muy diferente; por primera vez algunos materiales se sujetaron a la acción intensa de neutrones rápidos produciéndose colisiones con energías de rechazo de hasta unos cientos de KeV, además de los fragmentos de fisión que también operan como una fuente potente de daño. Los aspectos teóricos de estos problemas fueron considerados por E.P. Wigner por el año de 1942 y publicados más tarde.

Al progresar el estudio sobre las reacciones nucleares producidas por iones acelerados, se llegó muy pronto a la necesidad de conocer, en función de la energía, la posición y los efectos, no siempre dañinos, que un ión tiene a diferentes profundidades de un cierto espécimen sólido usado como blanco. Esto condujo directamente al trabajo clásico de Bohr en 1948 y otros más, sobre la penetración de distintos tipos de radiación a través de la materia. Por estas fechas, las propiedades eléctricas de semiconductores como el germanio y el silicio comenzaron a explotarse, época ( 1948 ) en la que

se produjo el primer transistor.

Estos descubrimientos promovieron de manera natural el estudio de nuevas formas por las cuales ciertas impurezas en cantidades conocidas, pudieron ser introducidas en estructuras cristalinas para formar semiconductores, además de otras aplicaciones que esos detectores o transistores tuvieron dentro del campo de la energía nuclear, estimulándose además el estudio de los daños por radiación.

En 1961 fué publicado el primer trabajo que distinguía entre los efectos de daño y de agregado ( doping ) por implantación, dado a conocer por Bredov y colaboradores en la U.R.S.S. . En 1962 Alvager y Hansen implantaron fósforo en silicio y después de un recocido de 600°C obtuvieron diodos apropiados para la detección de partículas nucleares. Este trabajo reveló que fósforo implantado en silicio y subsecuente - mente recocido, podría producir un efecto de agregado similar al introducido por la difusión térmica y eléctrica convencional.

Un gran interés en la implantación de iones ( I de I ) se inicia en este tiempo, sin embargo el progreso quedó afectado por una falta de asociación estrecha con la industria de dispositivos semiconductores, la cual consideraba el uso de aceleradores iónicos una técnica costosa y arriesgada.

En 1963 se descubrió el fenómeno de canalización iónica ( channeling ) en cristales. Científicos de los grandes laboratorios nucleares como Chalk River en Canadá, Oak Ridge National Laboratory en U.S.A y The Atomic Energy Research Establishment en Harwell, Inglaterra, comenzaron a estudiar el movimiento de iones a través de cristales. Para 1965 ya se había despertado un gran interés en la implantación de iones como potencial tecnológico, particularmente para el agregado de

semiconductores.

A partir de 1965 se inició en varios países un programa de actividades para explorar ampliamente la física y tecnología del proceso de I de I, el cual incluyó un avance en la comprensión básica de la penetración iónica y el daño por radiación que le acompaña, los efectos eléctricos en las estructuras semiconductoras y el diseño y producción de máquinas capaces de llevar a cabo el proceso a una escala industrial. Para 1970 se inició una serie de conferencias sobre aplicación de un haz iónico en la tecnología de semiconductores.

El interés industrial creció rápidamente desde que los dispositivos implantados con iones mostraron una gran estabilidad sobre las estructuras manufacturadas convencionalmente. Los laboratorios Bell Telephone, Hughes Research e I.B.M. en U.S.A., Hitachi y Toshiba en Japón, y Mullard y G.E.C. en Inglaterra, son ejemplos de compañías importantes que fabrican dispositivos semiconductores empleando la implantación iónica a gran escala, además de un número considerable de pequeñas firmas que proveen al mercado con dispositivos implantados.

En paralelo se inició y ha crecido rápidamente un mercado para unidades de I de I pesados. Estados Unidos, Inglaterra, Dinamarca, Suiza y Francia se encontraron en posición de poder ofrecer una variedad de tales equipos, algunos de los cuales son capaces de una amplia producción. Actualmente la implantación iónica es una técnica de alta calidad comúnmente usada para la fabricación de aparatos de circuitos integrados, como por ejemplo las calculadoras construidas masivamente y a un bajo costo por unidad.

Investigaciones más recientes han abierto aplicaciones de las técnicas de I de I hacia otras ramas, en las que la modificación de propiedades físicas en la superficie de materia

les son importantes.

Existen trabajos que se refieren a la transferencia de esta tecnología de I de I hacia otros campos como son: Meta - lurgia, óptica, electromecánica, materiales magnéticos, superconductividad.

Toda esta información aparece en varias páginas del li - bro ( Dearnaley, 1973 ), que cuenta además con una amplia bi - bliografía.

Al irse desarrollando la I de I como una técnica de tratamiento superficial, se ha conseguido un cambio sobre las propiedades tribológicas<sup>(1)</sup> de los materiales, logrando redu - cir la fricción y el desgaste entre superficies con ventajas evidentes. Sólo en los Estados Unidos se gastan al año varios billones de dólares para reemplazar pistones, bujes, herrami - entas de corte, etc.

Es indudable que una mejora al desgaste y a la fricción, no sólo tiene un gran impacto económico, sino que también pue - de abrir oportunidades de estudio, diseño, manufactura y em - pleo de nuevos materiales, con la participación multidiscipli - naria de técnicos y profesionistas.

Como toda nueva técnica a seguir, ésta tiene ventajas en su aplicación, pero también limitantes, que en algunos casos pueden sustituirse mediante técnicas alternativas. En el tra - tamiento de superficies para alterar las propiedades triboló - gicas de metales en una forma comercial, se cuenta con la ni - trogenación iónica al vacío y procesos de depósito de metales evaporados.

(1) El prefijo TRIBO es derivado del griego TRIBOS, frotar; la tribología puede definirse como el tratado de las interaccio - nes entre las superficies en frotamiento, que comprende a la fricción, dureza, el desgaste y la lubricación. ( Singer, 1980 )

Recientemente la I de I ha mostrado promesas como un método de mejoramiento no sólo de propiedades de fricción y desgaste, sino también de fatiga, corrosión y oxidación de los metales.

Entiéndase por ahora que la I de I es un proceso por el cual partículas aceleradas, penetran en un blanco sólido localizado en una cámara al alto vacío. Esta técnica comprende aspectos físico-químicos, teórico-prácticos, y requieren de una instrumentación variada.

En la década pasada varios investigadores han demostrado que la I de I mejora propiedades físicas en metales, tales como fricción y desgaste. Sin embargo las propiedades tribológicas generales no han sido aún claramente establecidas. Estudios en esta especialidad indican que un conocimiento básico de la física, la química y las modificaciones mecánicas de las superficies implantadas, serán necesarias para el entendimiento de la fricción y el desgaste en los metales.

Dada la importancia de la I de I y sus perspectivas futuras en los diversos campos de aplicación y con las necesidades siempre crecientes del país, el cual requiere con urgen-cia de una tecnología avanzada e independiente, se pensó en el desarrollo, diseño y construcción de un laboratorio de I de I pesados, en el Instituto de Física de la U.N.A.M. ( Boletín No. 4, 1977 ).

Para conseguir este objetivo, se ha venido realizando el desarrollo del laboratorio para la I de I, en el cual se están aprovechando, el donativo de una fuente de iones pesados de la Universidad de Oxford, el deflector magnético del antiguo acelerador de iones positivos del grupo de colisiones y un tanque de amplio volúmen del Instituto de Física, siendo posible así, a un muy bajo costo implementar el laboratorio.

Durante este período se ha terminado el diseño de todas las partes, pero su funcionamiento dependerá de la construcción de las mismas ( ver capítulos I y II ).

Pudieron sin embargo iniciarse algunas técnicas alternativas como son la aluminización y la nitrogenación iónica, usando algunos elementos ya existentes del equipo. Espejos de telescopios astronómicos del Instituto de Astronomía y de la Sociedad Astronómica Mexicana fueron aluminizados empleando esta técnica con muy buenos resultados.

Durante el desarrollo de este trabajo se ilustrará en que consiste este proceso de I de I, explicando los conceptos principales de sus partes y su función. Se comparan las ventajas y limitaciones de este método contra otras técnicas alternativas. Como parte del mismo, por lo antes mencionado, se escogió a la fricción desde el punto de vista mecánico como tema de estudio, introduciendo algunos conceptos de la plasticidad, elasticidad y la mecánica de suelos, como vía para un mejor entendimiento del fenómeno de fricción.

Para medir la fricción que ocurre entre sólidos, se diseñaron dos fricciómetros, uno para cargas en el intervalo de 10 a 400 gramos y otro de 1 a 25 kilogramos, los cuales se muestran en el capítulo III.

Con este trabajo se desea introducir y promover la participación de futuros profesionistas y estudiantes de diversas disciplinas en estos temas.

## CAPITULO I

### CONCEPTOS FISICOS Y COMPONENTES QUE INTERVIENEN EN EL DESARROLLO DE UN IMPLANTADOR DE IONES.

Un implantador de iones, es el equipo capaz de poder producir una corriente de iones pesados de cierto elemento estable, a una energía cinética predeterminada, suficiente para penetrar a la profundidad deseada, próxima a la superficie de un blanco seleccionado; de esta manera pueden cambiarse algunas propiedades físicas de la muestra. En estos equipos se procura obtener la mayor corriente posible de iones, la cual depende de muchos factores.

Una de las partes principales de un implantador, es la fuente de iones, equipo en el que se produce la ionización y extracción del elemento por implantar, formándose a partir de un plasma gaseoso.

Esta ionización consiste en la pérdida ó ganancia de uno ó más electrones en el elemento por implantar, quedando en el primer caso cargado positivamente ( ión positivo ) y en el segundo negativamente .

Una vez formado el plasma en la fuente, es necesario extraer del mismo a los iones que se requieren implantar, lo que se consigue por medio de un electrodo extractor, muy cerca de la frontera del plasma y a un determinado potencial ( la polaridad y nivel de este potencial, depende fundamentalmente del tipo de ión, su masa, la geometría del haz requerido y la aceleración deseada ). Los iones al sentir la presencia de este campo eléctrico tienden a salir del plasma en forma perpendicular a su frontera.

Dependiendo de la geometría en la región, los iones al salir pueden enfocarse ó desenfocarse; para evitar una pérdida por dispersión de iones, en muchos equipos se acostumbra colocar un sistema de enfoque , antes de que los iones sean acelerados.

Este enfoque puede lograrse usando campos eléctricos ó campos magnéticos. Normalmente se acostumbra en esta primera etapa el uso de los campos eléctricos, por medio de un mecanismo denominado Lente Einzel. El siguiente paso, una vez enfocado el haz de iones en una línea recta, será el de acelerar ó cambiar la velocidad de dichas partículas. La alteración de la velocidad se realiza através de campos eléctricos.

El haz de iones al salir del acelerador, generalmente está formado de partículas con direcciones divergentes, por lo que es necesario volver a enfocarlo sobre un eje y así evitar la pérdida de iones en la línea de conducción. Este enfoque se realiza generalmente usando sistemas de lentes dipolares ó cuadrupolares, ya sea magnéticas ó electrostáticas. Mediante la óptica de iones, se diseña el equipo de modo que en la región de implantación se logre cubrir la región deseada con la uniformidad y el número de iones requerido.

La extracción de iones desde una fuente de iones, comprende un número grande de diferentes especies moleculares y cargas; además impurezas de elementos que viajan en el haz. La implantación de iones requiere que los iones depositados en la superficie de un blanco determinado, sean significativamente puros, por lo que debe construirse un mecanismo capaz de un alto grado de discriminación de masas.

El propósito en este caso, se puede resolver mediante un analizador ó deflector magnético de 90°, después del cual

puede asegurarse con un grado alto de resolución que los iones en el haz sean limpios y de una energía perfectamente determinada. Esto es importante, para establecer la profundidad a la que el ión quedará localizado en la muestra.

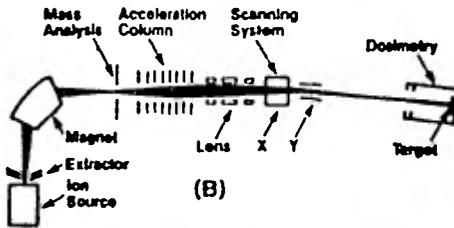
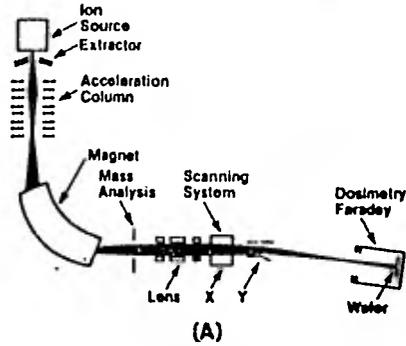
Los iones al irse acercando al imán, presentan componentes de dispersión por lo que se aprovechan después de pasar la primera rejilla de control, las fronteras magnéticas como lentes ópticas, para que al salir de él, éstos vuelvan a enfocarse en una región, lugar donde se coloca nuevamente otra rejilla. Después de la segunda rejilla es necesario diseñar un segundo sistema de enfoque ó de barrido, de tal forma de poder gobernar los iones y así depositarlos en una región determinada de manera homogénea.

La interacción entre los iones y el blanco se lleva a cabo en una cámara de blancos, la cual debe estar provista de un mecanismo capaz de lograr que, después de determinado tiempo, y de manera homogénea, el haz haya incidido sobre cada una de las partes que se desean implantar.

En todo el trayecto del haz de partículas, es necesario mantener el equipo bajo un alto vacío, por lo que es muy importante implementar esta parte. Por ejemplo, para lograr una buena eficiencia en la cámara de ionización, es deseable tener solamente átomos ó moléculas del elemento por implantar y en una cantidad no muy grande para conseguir una presión de  $10^{-3}$  mm de Hg . Por consiguiente, una vez establecido el vacío en la cámara de ionización, será indispensable mantener el resto del equipo a un alto vacío ( menor de  $10^{-5}$  mm de Hg) para garantizar una mejor conducción del haz de iones pesados.

En la Fig. I,1 ( Keller, 1981 ) se ilustran dos arreglos generales de un sistema de implantación de iones, en donde se puede apreciar el equipo necesario para llevar a cabo

este proceso.



Diferentes arreglos de un sistema de implantación de iones. Fig. 1,1

Cabe mencionar que el segundo arreglo, presenta mayores ventajas sobre el primero, sobre todo por lo compacto y en el ahorro de energía del imán deflector.

Siendo la fuente de iones, el acelerador, el selector, y la cámara de blancos, las partes esenciales de un I de I, se hará la descripción de cada una de éstas, así como de sus principios de operación.

## I.1 FUENTE DE IONES Y ENFOQUE DE UN HAZ DE PROYECTILES

### I.1.a) Fuente de iones.-

Es la parte esencial pero compleja de un acelerador, en la cual ocurren dos procesos fundamentales: i) la formación de un plasma<sup>(1)</sup> y ii) la extracción de iones del mismo.

La formación del plasma puede lograrse mediante distintos procesos; consiste en la producción de pares de iones (ionización) a partir de un determinado vapor de gas, lo cual ocurre cuando a alguno de los electrones que giran alrededor del núcleo del átomo del gas se le suministra una energía mayor que el primer potencial de ionización del mismo ( iones - positivos ); ó también que existan electrones con suficiente energía como para poder penetrar y quedarse girando en el átomo ( iones negativos ). Este potencial de ionización se ha de terminado de manera experimental, y su valor depende principalmente del elemento por ionizar, tal como se muestra en la siguiente tabla ( Enge, 1972 ) .

---

(1) Disociación de un gas en electrones y iones positivos de manera continua.

TABLA I.1,1 Propiedades físicas de algunos elementos.

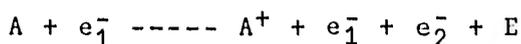
Número atómico (Z)	Elemento	Masa atómica (A)	Energía de ionización (eV)	Temperatura de fusión (°C)
1	H	1.00797	13.595	180
5	B	10.811	8.296	2400
7	N	14.0067	14.53	-210
13	Al	26.9815	5.984	658
14	Si	28.086	8.150	1414
15	P	30.9738	10.49	44
42	Mo	95.94	7.11	2500
92	U	238.4	18.9	1690

i) Mecanismos de formación del plasma.

En toda fuente de iones lo que generalmente se trata, es de que el átomo pierda uno ó más electrones de sus órbitas exteriores, objetivo que puede lograrse por diferentes formas tales como: una descarga eléctrica, por radio frecuencia, por colisiones entre dos átomos, por la presencia de campos eléctricos o por radiación ( efecto foto-eléctrico).

El proceso más común para producir la ionización, es por medio de la exposición del vapor del elemento por ionizar, al impacto de electrones energizados, los cuales al chocar con uno ó más electrones de las órbitas externas del átomo del gas, les transfiere parte de su energía cinética quedando éstos en un estado excitado. Cuando esta energía de excitación de los electrones llega a ser mayor que la energía de amarre de los mismos, éstos abandonarán el átomo quedando el mismo en des

equilibrio de cargas (  $n_p > n_e$  ) y por lo tanto ionizado positivamente. Cuando la energía de los mismos ( proyectiles ) es muy alta, éstos pueden ser capaces de arrancar electrones de una capa más profunda del átomo. Todo lo anterior va acompañado de una radiación de energía subsecuente, tratándose en el segundo caso de rayos-X. Esto es mostrado esquemáticamente mediante la siguiente relación:



E - energía de excitación

$e_1$ - electrón que incide sobre el átomo A

$e_2$ - electrón que sale del mismo átomo dejándolo ionizado

La carga del ión positivo resultante, es igual y de signo contrario al número de electrones extraídos del átomo.

Una fuente de electrones generalmente se forma con un filamento, el cual con el paso de una corriente eléctrica se calienta y comienza a emitir electrones ( efecto termoiónico) los cuales son energizados mediante una diferencia de potencial existente entre el filamento ( cátodo ) y un ánodo, en medio de los cuales se encuentra el vapor del gas por ionizar ( ver Fig. I.1,1 ) .

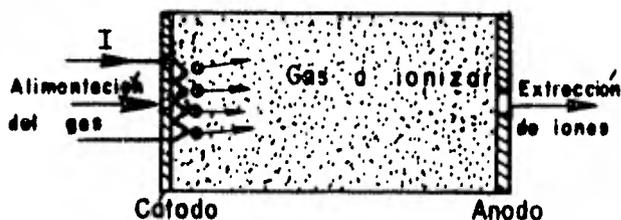


Fig. I,1,1

El número de electrones emitidos por el filamento por unidad

de área depende de la composición de éste y de su temperatura ( Dearnaley, 1973 ).

Existe un fenómeno de retrodispersión de electrones contra el filamento causando un efecto sobre éste, denominado erosión iónica ( sputtering ), y un envenenamiento progresivo causado por las impurezas producidas por la evaporación de los materiales con que está construida la fuente.

El número de pares de iones por unidad de longitud y presión ( coeficiente diferencial de ionización =  $S_e$  {pares de iones/cm - mm Hg} ) producidos por los electrones, depende básicamente de la energía de amarre que éstos tengan y del elemento por ionizar, obteniéndose un valor máximo para cada elemento a una determinada energía, tal como se muestra en la Fig. I.1,2 ( Dearnaley, 1978 ) en la cual se ve que varía desde unas decenas a centenas de eV.

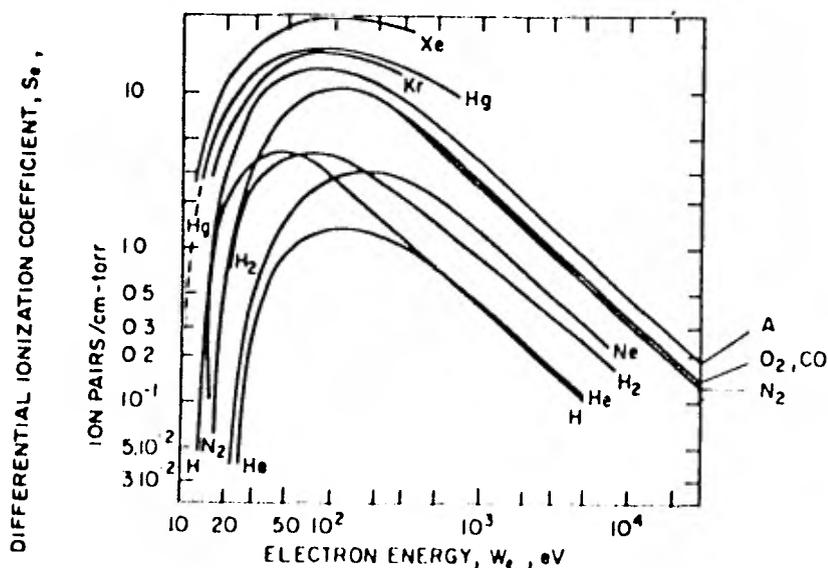


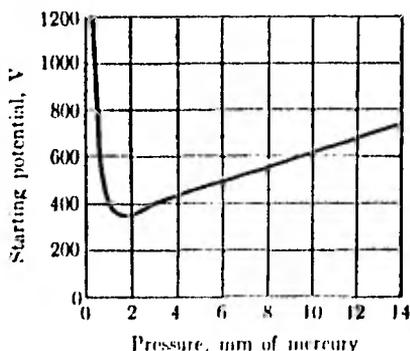
Fig. I.1,2

Los electrones con esta energía tienen que ser inyectados continuamente a la fuente debido a la dificultad de poder obtenerse y sus trayectorias ser controladas desde el exterior por medio de campos eléctricos y magnéticos.

Cuando la trayectoria libre media de los electrones llega a ser mayor que las dimensiones de la cámara de ionización, existe una alta probabilidad de que colisione con las paredes de dicha cámara y produzcan impurezas y electrones secundarios de baja energía que ayudan a mantener al plasma neutro. Algunos de estos electrones secundarios pueden tener la suficiente energía como para poder producir nuevas ionizaciones.

Una manera de incrementar la probabilidad de ionización de todo electrón, es aumentando su trayectoria de recorrido a través del gas, antes que los mismos terminen incidiendo con las paredes de la cámara de ionización, lo cual puede lograrse mediante la utilización de platos repulsores cargados negativamente ó utilizando campos magnéticos.

La eficiencia de ionización del sistema depende básicamente de la presión a la que se encuentre el gas por ionizar entre el ánodo y el cátodo, ya que la diferencia de potencial requerida para obtener una descarga eléctrica en el gas depende del número de átomos ( presión ) existentes entre ánodo y cátodo, tal como se muestra en la Fig. I.1,3 (Enge,1972).



Eficiencia de ionización. Fig. I.1,3

Tomando en cuenta lo anterior, se ha llegado a la conclusión de que la presión óptima en la cámara de ionización se encuentra entre  $10^{-1}$  y  $10^{-3}$  mm Hg ( Livingston, 1962 ).

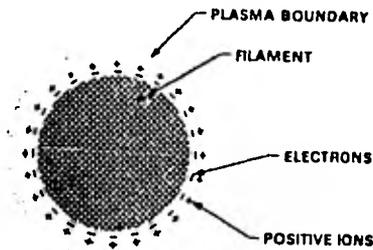
La continua ionización del vapor del gas, logra que el plasma se encienda, tomando una coloración que depende del gas ionizado ( rojo para neón y morado para el aire ). El comportamiento que presenta el plasma es una de las cosas más difíciles de predecir, dado que los fenómenos que en ella ocurren son muy complejos.

Una caracterización muy importante del plasma es la de tratar que el campo eléctrico resultante ( carga espacial ) sea siempre cero; lo cual ocurre cuando el número de cargas ( + ) y ( - ) presentes en el plasma es el mismo ( igual densidad de cargas ).

Esta neutralidad de la carga en el plasma es regulada por los iones ( + ) y ( - ) y electrones secundarios producidos, así como también por los electrones que continuamente son inyectados desde el filamento al plasma, los cuales son capaces de distribuirse de manera rápida para compensar cualquier gradiente de campo. Desafortunadamente esta neutralidad en la carga no puede ser mantenida a lo largo de todo el plasma, observándose que en la región central del mismo, la carga espacial adquiere un valor que oscila entre 5 y 10 volts positivos relativo a las paredes de la fuente, lo cual obliga a los iones ( + ) a viajar hacia el exterior concentrándose cerca de la frontera del plasma. Algunos de estos iones tienden a difundirse hacia las paredes de la fuente pudiendo evitarse esto con la utilización de un campo magnético que sea capaz de concentrar el plasma en una zona determinada. Dado que la carga espacial no puede ser nula, esto originará que el campo eléctrico radial producido afecte grandemente a :

- i ) la descarga eléctrica
- ii ) la estabilidad del plasma y
- iii ) la extracción de los iones

En toda descarga eléctrica se observa que los electrones se concentran cerca del filamento (cátodo) donde presentan la mínima velocidad, mientras que los iones positivos, por lo que se explicó anteriormente, tienden a concentrarse en una doble capa como se muestra en la Fig. I.1,4 ( Alton, 1980 ) .

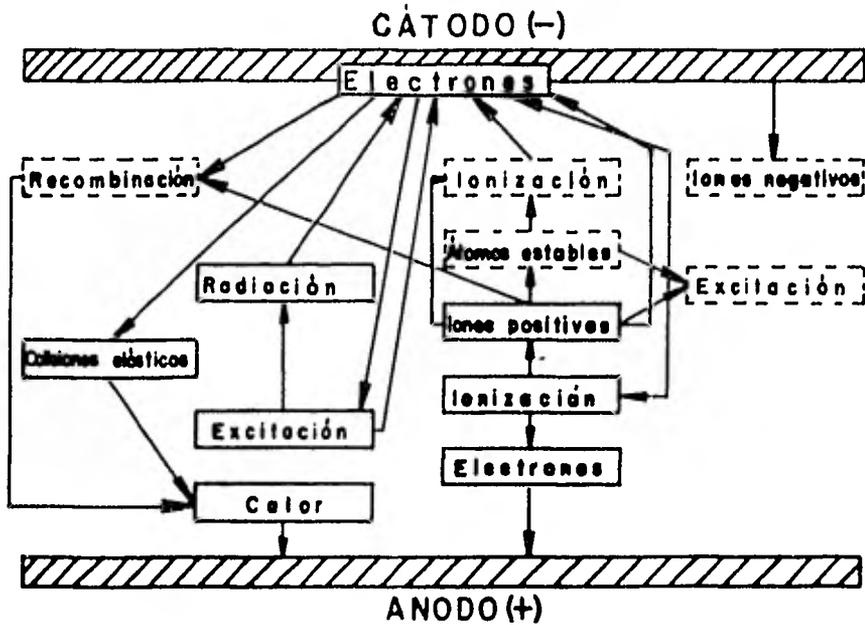


Concentración de iones y electrones  
cerca del filamento. Fig. I.1,4

Esta concentración de electrones alrededor del filamento, crea una barrera potencial que sólo permitirá el paso de electrones que tengan suficiente energía como para poderla penetrar.

Los electrones emitidos desde el cátodo se dirigen hacia el ánodo con una velocidad alta, comparada con la movilidad con que se desplazan los iones ( + ) creados en el plasma hacia el cátodo, que es muy lenta.

Durante la descarga eléctrica en el plasma, ocurre una diversidad de fenómenos que son difíciles de predecir, mismos que se resumen en la siguiente Fig. I.1,5 ( Dearnaley,1973 ), y explicados en esta tesis " Un estudio de fuentes de iones para gases y sólidos " ( Pérez,1975 ) .



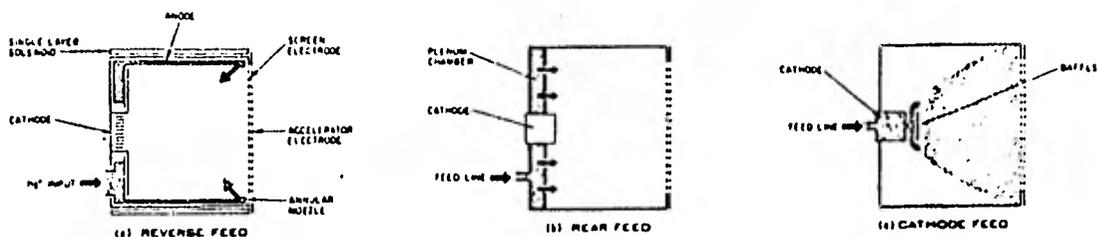
Fenómenos que ocurren durante una descarga eléctrica en un gas.

Fig. I,1,5

Una vez formado el plasma en la cámara de ionización es necesario extraer del mismo los iones (+), lo cual se realiza utilizando un electrodo extractor colocado en un orificio en la cámara a un elevado potencial con respecto a las paredes de la cámara. Se usa de tamaño generalmente pequeño con el fin de evitar una alta pérdida de gas desde la cámara de ionización, debido al bombeo diferencial existente entre éstas ( $10^{-5}$  mm Hg; acelerador ó lentes Einzel).

Algo muy importante en toda fuente de iones, es la manera lenta de alimentar a la cámara de ionización el gas ó vapor, pues una mala alimentación traería como consecuencia u-

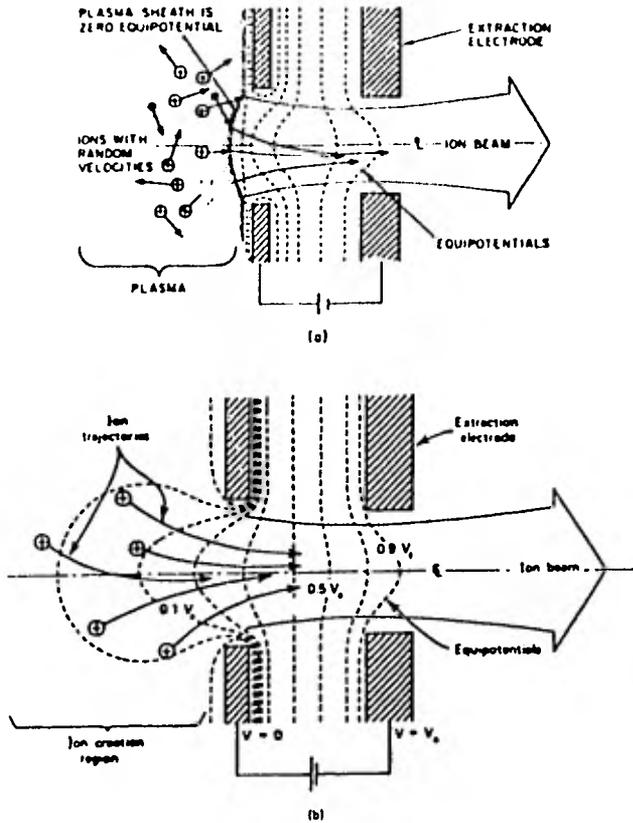
na inestabilidad grande en el plasma. En la Fig. I.1,6 se presentan 3 maneras diferentes de obtener una buena alimentación. En ellas la alimentación se realiza de manera simétrica con respecto al electrodo de extracción ( Dearnaley, 1978 ) .



Tres maneras diferentes de alimentar el gas a la cámara de de ionización. Fig. I.1,6

El sistema de extracción, consiste en el mecanismo necesario para que por medio de un campo eléctrico determinado, puedan ser extraídos los iones desde el límite del plasma. Esto tiene su complicación, debido a que el plasma tiene en su superficie exterior, una zona de electrones que origina una carga especial negativa.

Como los iones que se desean extraer son positivos, es necesario que el electrodo extractor se encuentre a un determinado potencial negativo (  $V_{ext}$  ), originando así, un campo eléctrico de atracción a los iones ( + ) y, por lo tanto, de repulsión a los iones negativos y electrones ( ver Fig. I.1,7 ) ( Alton, 1980 ) .



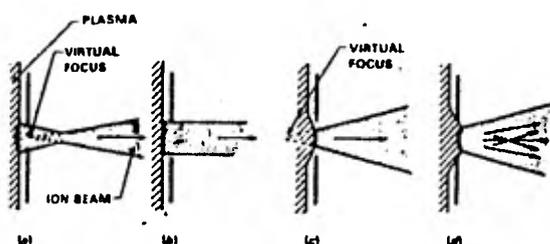
Extracción de los iones positivos. Fig. 1.1,7

El resultado final, es una interacción entre ambos campos negativos, no permitiendo de esta manera, que el campo de extracción penetre con facilidad en el plasma y extraiga a los iones de manera eficiente. Esta interacción entre ambos campos provoca que el plasma se aleje un poco del electrodo extractor, originándose una región límite entre los dos, denominada cubierta del plasma, la cual es una superficie equipotencial y cuyo espesor depende del valor de la carga espacial y del potencial al que se encuentre el electrodo extractor.

En el límite del plasma, que se encuentra enfrente de la abertura del electrodo extractor, se forma una frontera de extracción del ión ( menisco ), la cual puede asumir una variedad de formas tal como se muestra en la Fig. 1.1,8 ( Alton,

1980 ), la que depende de la densidad del plasma y de sus variaciones, así como también del potencial extractor (  $V_{ext}$  ).

Todos estos efectos locales son críticos para el enfoque del haz en su inicio, ya que éste depende en gran parte del número de partículas útiles que se conserve en él.



Diversas formas de la frontera de extracción del ión. Fig.1.1,8

La máxima corriente del haz de iones que puede ser extraída desde el plasma depende de varios factores como: El grado de ionización en el plasma ( densidad de iones ); la forma y el tamaño de la superficie de extracción; la variación lenta del voltaje de extracción en el electrodo, así como la naturaleza de las moléculas y la geometría del extractor.

Respecto a la forma y el tamaño, varios programas de computadora han sido desarrollados ( Kirstein,1980; Hornsby,1980 ), para su optimización.

Los parámetros más críticos en este diseño, son los radios de la apertura de la extracción, porque de él depende la densidad de la corriente y el enfoque obtenido. Según Coupland y Hamilton ( Hamilton,1971 ) el máximo voltaje  $V_b$ , que puede ser aplicado a un electrodo extractor, depende del tamaño del orificio de extracción "  $d$  ", mediante la siguiente relación:

$$v = 6 \times 10^4 d^{1/2} \quad " d " \text{ será en cm .}$$

En conclusión a esta parte se puede decir que todo buen extractor de iones debe reunir dos condiciones fundamentales:

- i ) Obtener un haz de iones lo más intenso posible, pero con la mínima divergencia.
- ii ) Evitar al máximo posible pérdida de átomos neutros.

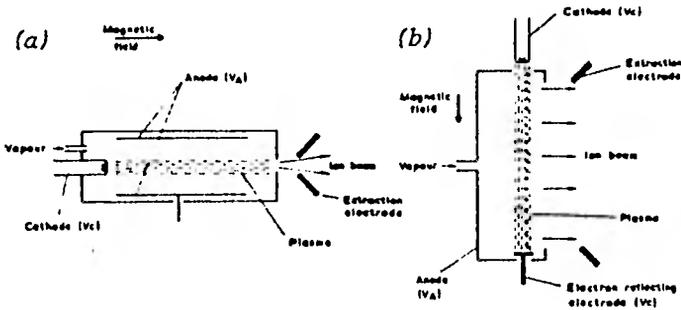
#### Tipos de fuentes de iones

Existe una buena variedad de fuentes de iones, cuyos diseños dependen del uso que se les quiera dar ( tipo del ión, corriente, estabilidad, etc. ). En esta parte se describirán algunas de las fuentes más usadas, así como el tipo de fuente empleada en el laboratorio.

- i ) Fuente de iones de electrones oscilantes ( PIG ) o de descarga Penning

Esta fuente fué originalmente diseñada por Nielsen para ser usada en un separador de isópos. En 1937 Penning presenta una mejoría de la misma. Pero no fué sino hasta 1939 cuando Finkelstein ( Finkelstein, 1940 ), desarrolla la primera fuente de iones práctica de este estilo. En esta fuente, los electrones producidos en la descarga eléctrica son obligados a oscilar entre dos cátodos localizados en el final de un ánodo cilíndrico hueco, estando el movimiento de estos electrones restringido a una zona determinada ( paralelos al ánodo ) como consecuencia de la aplicación de un campo magnético dirigido paralela - mente al eje del ánodo ( ver Fig.I.1,9 ) ( Dearnaley, 1978 )

En esta misma se aprecia que la extracción de los iones desde el plasma formado, puede ser realizada de dos maneras, ya sea a través de una apertura en la cara del ánodo ó a través de uno de los cátodos.



Fuente de iones de electrones  
oscilantes ( PIG ). Fig. 1.1,9

Su funcionamiento se basa en que los electrones emitidos desde el cátodo son acelerados por el campo eléctrico existente entre cátodo y ánodo, y que con la utilización de un campo magnético, estos electrones son obligados a viajar en forma paralela al ánodo, hacia su otro extremo, donde también existe otro cátodo. Los electrones al irse acercando a este último van perdiendo energía hasta ser completamente detenidos, para luego volver a ser acelerados hacia el otro extremo donde llega a ocurrir lo mismo y así se mantienen oscilando de un lado a otro.

Algunas fuentes de este estilo emplean cátodos calien -

tes para la emisión termoiónica de los electrones, mientras que otros usan cátodos fríos, en donde los electrones son emitidos por otros procesos.

Estas fuentes de iones son muy versátiles dado que en ellas pueden ionizarse una gran variedad de materiales, cuya alimentación gaseosa puede ser externa o interna. La alimentación interna, se logra mediante un horno que se encuentra en la parte interior de la fuente y cuyo intervalo de temperaturas varía entre los 600 y los 1200°C. La corriente de iones típica producida por estas fuentes es de unos pocos a varios cientos de micro-amperes, siendo por lo tanto de muy buena aplicación como fuente de iones en los ciclotrones.

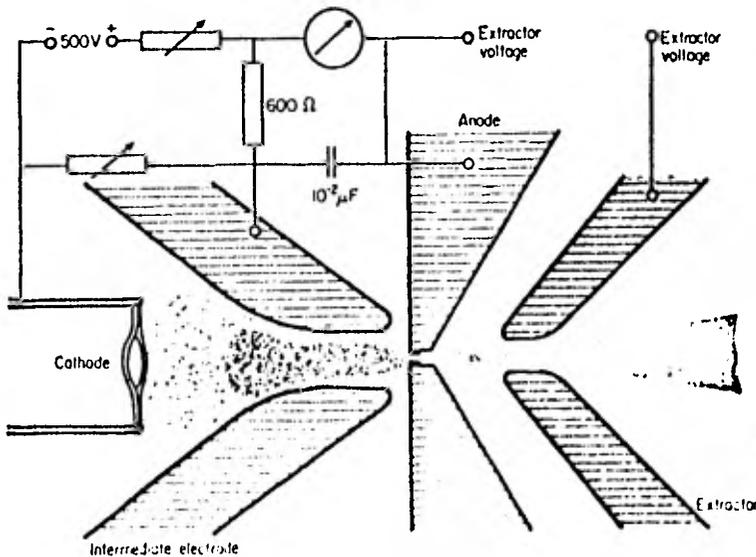
## ii) Fuente de iones duoplasmatrón

Estas fuentes han culminado en el desarrollo del tipo simple de fuentes de iones de arco de descarga eléctrica, en las cuales los electrones emitidos desde un filamento caliente, son acelerados a bajo voltaje, a través de un gas ionizándolo, el cual se encuentra en la zona entre el cátodo y el ánodo. La diferencia con el anterior reside en que cerca del ánodo se tiene un electrodo cónico con una apertura de unos cuantos mm de diámetro, el cual es mantenido a un potencial intermedio entre el cátodo y el ánodo. Este electrodo es diseñado para poder enfocar los iones ( + ) en la región de la

apertura de extracción del ánodo y así obtener una mayor concentración de los mismos.

La concentración iónica es ayudada por una campo magnético axial intenso producido por una bobina ( B ) que se encuentra entre el electrodo intermedio y el ánodo, ver fig.

I.1, 10 ( Townsend, 1976 ), cuyas líneas de inducción magnética convergen hacia el orificio del ánodo lográndose de esta manera que la densidad del plasma en la región del ánodo sea alta del orden de  $10^{18}$  iones/cm<sup>2</sup> y por lo consiguiente la densidad de la corriente obtenida y la eficiencia de ionización es muy alta ( por ejemplo la del Hidrógeno es del 80% ). Para haces de iones de esta alta intensidad, el calentamiento y por lo mismo la contaminación del haz es de consideración.



Fuente de iones Duoplasmatrón. Fig. I.1,10

iii) Fuente de iones de radiofrecuencia

Su principio de operación, consiste en la oscilación im puesta a los átomos del gas por ionizar por medio de una inducción electro-magnética; esta agitación llega a ser tan brusca, que la energía de amarre existente entre el núcleo y los electrones orbitales, no es suficiente como para poder im pedir que los mismos sean despedidos de su posición en el átomo, produciéndose de esta manera la ionización.

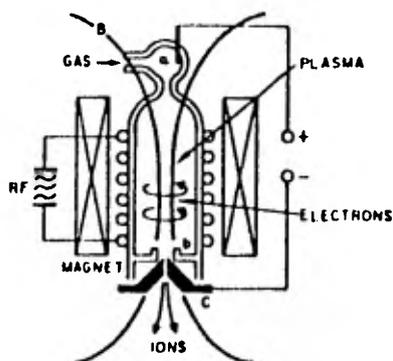
Existe la probabilidad que durante la agitación de los átomos, éstos lleguen a chocar entre sí, dando como resultado la ionización de uno ó los dos átomos en colisión y por con siguiente electrones libres.

Estos electrones liberados durante el proceso anterior, también son acelerados por la inducción electromagnética ó por el uso de un potencial alterno de alta frecuencia aplicado entre dos electrodos insertados en el sistema, adquiriendo la energía suficiente como para causar ionización por impacto con el gas. Un campo magnético axial es usado para incrementar la longitud de la trayectoria de los electrones, aumentando de esta manera la cantidad de ionización producida por éste y por lo tanto la corriente de iones disponibles.

La inducción electromagnética se genera por medio de un oscilador en intervalos de frecuencia entre 1 y 100 MHz.

Un arreglo común de esta fuente, es la colocación de un tubo que puede ser de vidrio Pyrex, cuarzo o cerámica, dentro de un solenoide, por el que se hace circular una corriente alterna. En la parte superior del tubo es insertado un electrodo repulsor ( + ) mientras que en la parte inferior ( base ) se coloca un electrodo de extracción cilíndrico, entre los cuales se aplica un diferencia de potencial, con el fin de poder extraer los iones desde el plasma y también de conducir en sentido contrario a tierra los electrones del mismo, ver Fig. I.1,11 ( Dearnaley, 1978 ).

En la región del plasma se localiza un campo eléctrico coaxial cuya finalidad es la de concentrar y enfocar los iones extraídos. La presión que generalmente se requiere en este tipo de fuentes es del orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-1}$  mm Hg.



Fuente de iones de radiofrecuencia. Fig. I.1,11

Este tipo de fuentes son usadas generalmente en aceleradores electrostáticos tipo Van de Graaff y se ha logrado un

considerable éxito en la producción de iones de boro y fósforo para la implantación.

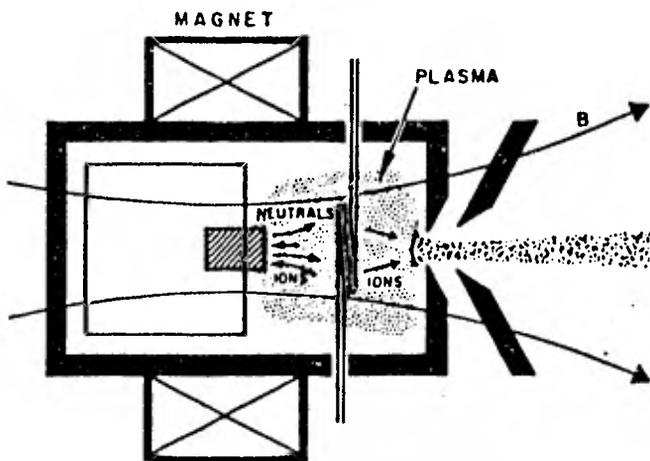
iv) Fuente de iones usando Erosión Iónica

El fenómeno de erosión iónica es usado en esta fuente de iones, como un medio muy útil en la producción de vapores, a partir de materiales metálicos que no son fáciles de vaporizar ( Middleton ).

El método consiste primeramente en la producción de un plasma en la cámara de ionización a partir de una gas con un alto coeficiente de erosión ( Argón., Kriptón ó Xenón ), dentro de la misma cámara de descarga y colocado cerca de la región de extracción el metal por ionizar. Una vez formado el plasma, se comienza a mantener el material a un potencial negativo ( entre -1 y -2 KeV ), con la finalidad de poder orientar a los iones ( + ) producidos en el gas hacia la superficie deseada y proveerles de suficiente energía cinética para que sean capaces de arrancar iones ( vaporización del metal ), los cuales pueden salir como átomos neutros ó como iones.

Estos átomos neutrales son ionizados en el plasma ya sea por intercambio de cargas ó por el impacto de electrones energizados producidos por un cátodo caliente usado para mantener el gaz ionizado.

Una característica muy ventajosa de esta fuente es la facilidad con que diferentes especies pueden ser generadas, simplemente cambiando el cono de metal, así como el bajo consumo de potencia debido a la ausencia de un horno. Hill y Nelson fueron los primeros en desarrollar este tipo de fuente cuyo esquema se presenta en la Fig. I.1,12 ( Dearnaley, 1978); la descarga gaseosa se realiza entre un filamento de forma helicoidal localizado entre el cátodo caliente y el ánodo, el cual tiene una abertura circular para la extracción, quedando montada la probeta de metal en el fondo de la cámara de descarga.



Fuente de iones usando Erosión Iónica. Fig. I.1,12

Alton desarrolla después una fuente con una geometría de extracción axial, la cual sirve para la producción tanto de iones ( + ) como de iones ( - ) ( polaridad reversible ) y está equipada con un imán permanente cuyo campo magnético es del orden de 350 Gauss, ver Fig. I.1,13 ( Alton. 1979 ).

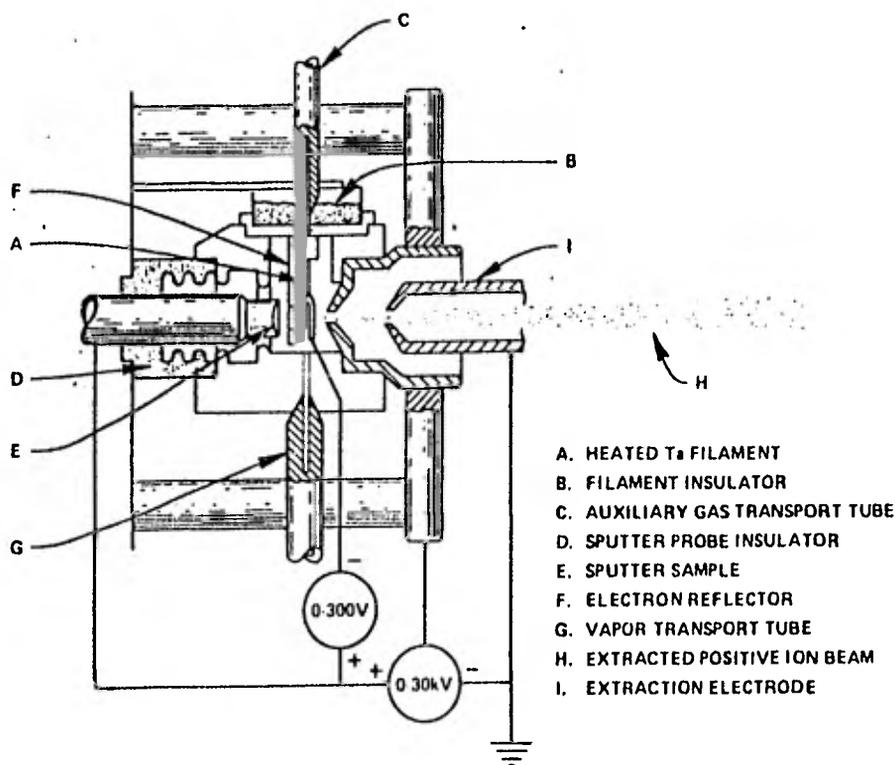


Fig. I.1,13

v) Fuente de ionización superficial

Su principio de funcionamiento se basa en que los átomos de un determinado elemento, pueden perder un electrón al incidir sobre una superficie metálica previamente calentada y convertirse de esta manera en un ión.

Según Saha- Langmuir, el flujo de iones que pueden ser producidos por este proceso, se puede valorar mediante la siguiente relación:

$$\frac{\eta_+}{\eta_0} = \frac{1 - r_+}{1 - r_0} \frac{g_+}{g_0} e^{(\phi - I_p / kT)}$$

$\eta_+$  = número de iones positivos producidos

$\eta_0$  = número de átomos neutros

$r_+$  y  $r_0$  = coeficientes de reflexión de las partículas ( + ) y neutras de la superficie

$\phi$  = función de trabajo

$g_+$ ,  $g_0$  = factor de peso estadístico

T = Temperatura absoluta

K = constante de Boltzmann (  $8.63 \times 10^{-5}$  eV/°K )

$I_p$  = potencial de ionización atómico.

De esta relación se observa que la producción de iones es exponencialmente dependiente de la diferencia que existe entre la función de trabajo (  $\phi$  ) de la superficie metálica y el primer potencial de ionización del átomo (  $I_p$  ), siendo más eficiente para superficies de muy alta función de trabajo y también de muy alto punto de fusión, tales como: el tungsteno, osmio, tantalio, platino ó níquel, y para átomos cuyo primer valor de ionización sea bajo.

La función de trabajo ( $\phi$ ) se define, como el trabajo necesario para poder remover un electrón de un elemento que se encuentra a una determinada profundidad del medio, denominado nivel de Fermi. Este nivel no es otra cosa, que el límite superior del continuo de niveles de energía dentro de un pozo de potencial.

El valor de este trabajo resulta ser el producto de la carga del electrón a extraer por el voltaje necesario para extraerlo, oscilando el mismo entre 1 y 6 eV. Lo anterior se muestra esquemáticamente en la Fig. I.1,14 ( Vlack, 1973 ) y en la tabla I.1.2 ( Gauss, 1939 ) algunos valores de elementos considerados importantes para estos métodos.

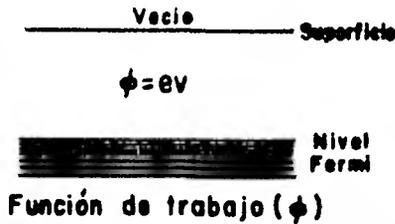


Fig I,1,14

En la Fig. I.1,15 ( Daley, 1971 ) se muestran dos arreglos de esta fuente usados por Daley, en el que el vapor del metal es difundido a través de un ionizador de tungsteno poroso, cuya función de trabajo es incrementada a 6 eV, utilizando un rociado de oxígeno controlado sobre el mismo.

Esto se debe a que la introducción de impurezas sobre la superficie de tungsteno origina que el nivel de energía de Fermi dentro de la misma baje, siendo más difícil extraer electrones, debido a que se necesita un mayor potencial.

Otra forma de producir iones metálicos por este método es mediante el uso de óxidos o haluros de metal, los cuales por calentamiento a muy altas temperaturas en un crisol de

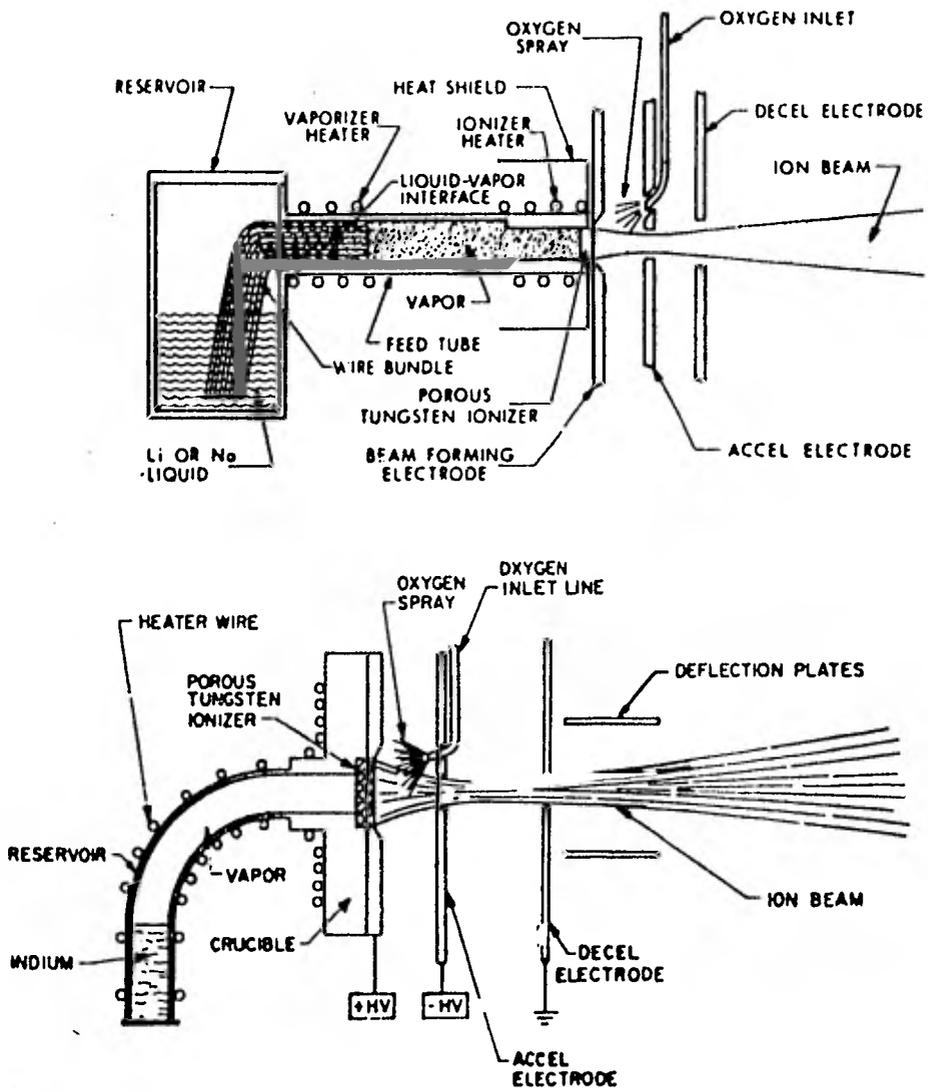
un material de alta función de trabajo, inician la emisión de iones metálicos.

Cabe mencionar que existen varios tipos más de fuentes de iones en estudio, en las cuales se pretende aplicar principios diferentes a los usados en las anteriormente descritas.

Entre las más importantes y más prometedoras se tienen: Fuente de iones laser, colutrón, magnetrón, de microondas, freeman, etc.

TABLA I.1,2 Valores de función de trabajo de algunos elementos.

Número atómico (Z)	Elemento	Función de trabajo termoiónico (eV)	Temperatura de fusión (°C)
6	C	4.39	3500
24	Cr	4.6 y 4.7	1800
26	Fe	4.77	1525
80	Hg	4.5	-39
42	Mo	4.44	2500
46	Pd	4.97	1557
74	W	4.5	3370
73	Ta	4.19	3030
76	Os	4.55	2700
28	Ni	4.61 y 5.24	1452



Dos arreglos distintos de una fuente de ionización superficial. Fig. 1.1,15

vi) Fuente de iones Dawton

Es una fuente para iones pesados que persigue un objetivo similar a las anteriormente descritas, con la diferencia de que el filamento es sustituido por una pila de mercurio, lográndose con esto, que la ionización sea el resultado de la colisión de un átomo de gas con un átomo de mercurio. Un esquema de esta fuente se muestra en la Fig. I.1,16 .

En la región del cátodo puede observarse un depósito con mercurio y cinco ánodos. A través de un disparador de 700 A instantáneos se inicia la vaporización del mercurio manteniendo una descarga continua sobre el mercurio de 4 A a 20 V .

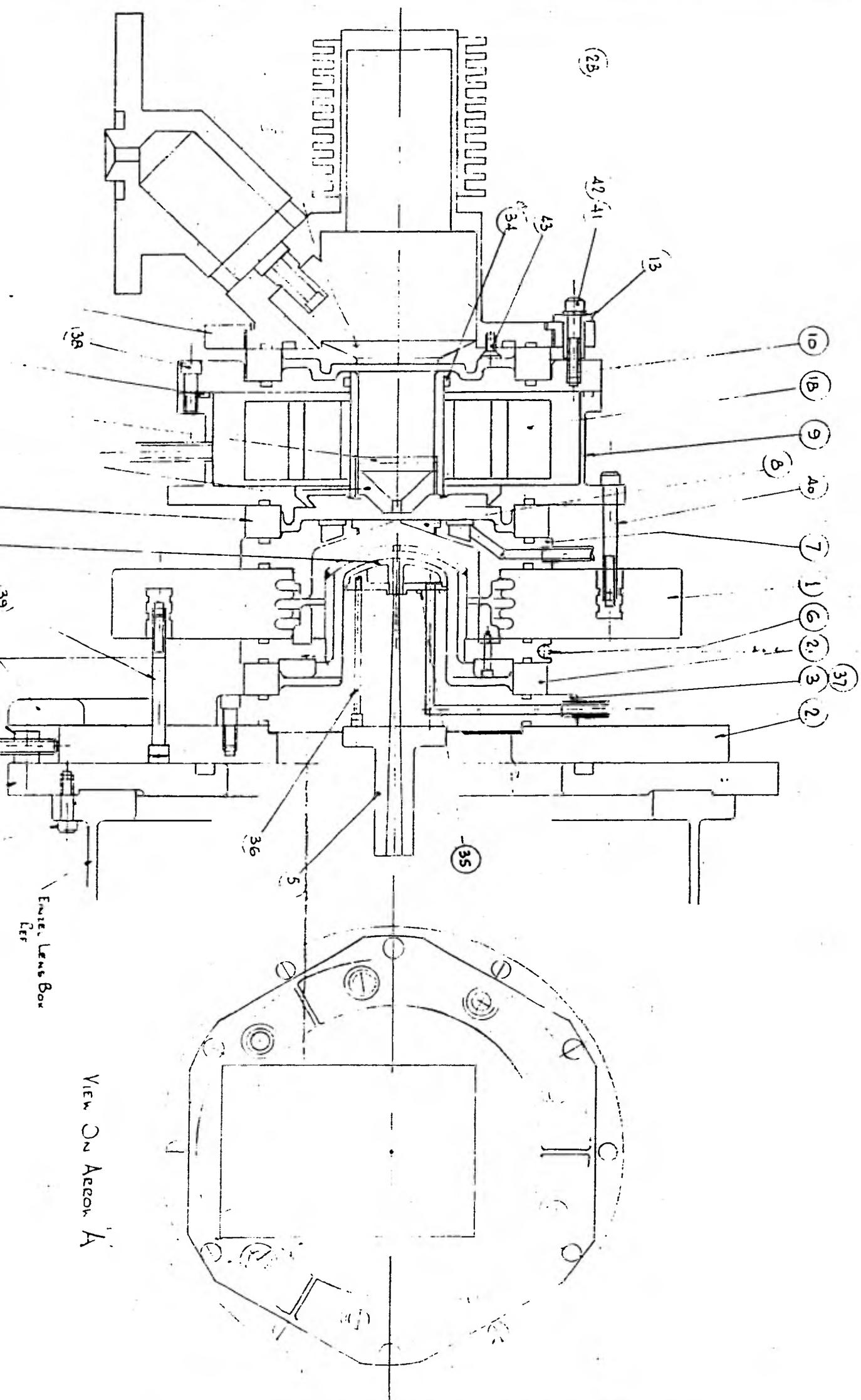
Este gas ionizado es acelerado por pequeñas diferencias de potencial existentes entre los ánodos sucesivos hasta la cámara localizada entre los ánodos 4 y 5, donde el plasma es confinado por medio de un campo magnético. Mediante un electrodo extractor a un potencial de 50 KV, colocado cerca del ánodo 5, se logra extraer un haz de iones de 15mA.

Algo muy importante de esta fuente es tratar que las moléculas de mercurio no lleguen a la zona de extracción para evitar la contaminación, por lo que en la cámara 3 ( entre los ánodos 2 y 3 ) se cuenta con dos trampas de aire líquido.

La alimentación del gas se lleva a cabo cerca de la zona de extracción, teniendo tres entradas de alimentación colocadas a 120° para que esta se realice de manera homogénea.

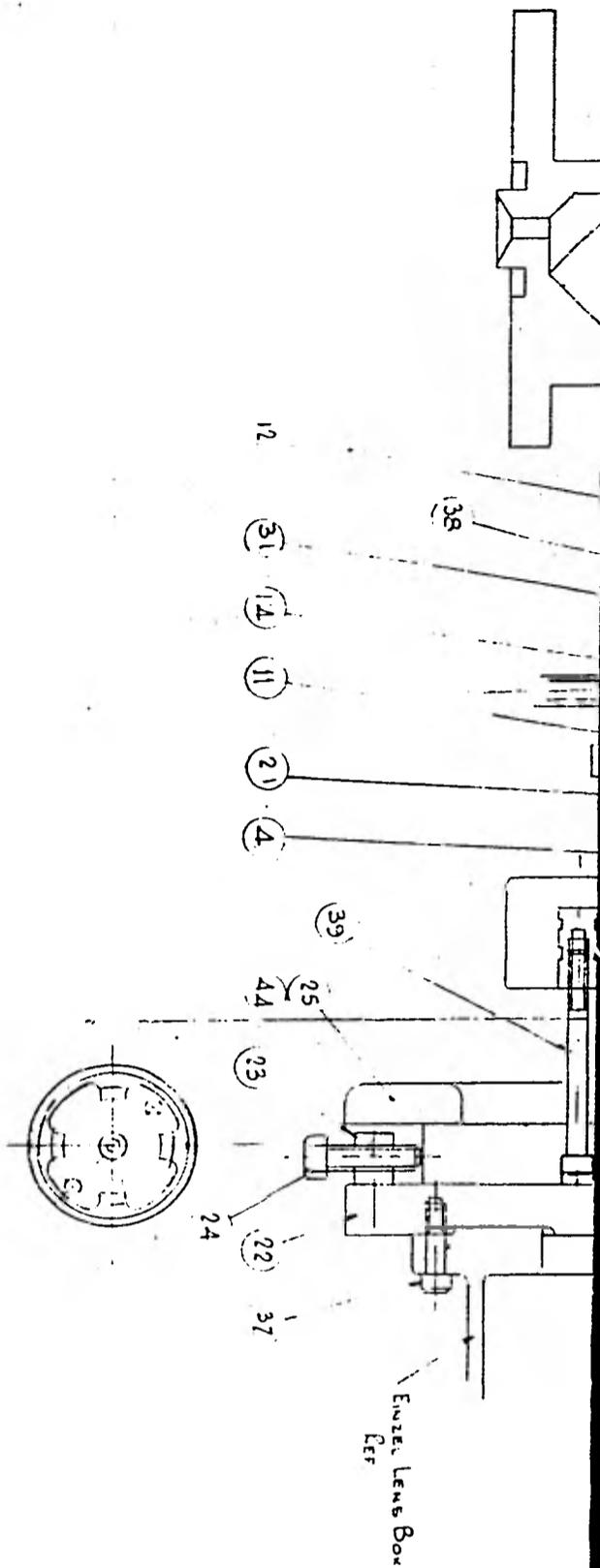
La ventaja más grande de esta fuente de iones es que puede ser utilizada para la ionización de una gran cantidad de gases incluyendo a los corrosivos como el oxígeno o sulfuros, y el trabajo continuo de cientos de horas de operación.

DO NOT SCALE - USE DIMENSION SPECIFICATION FIRST TO DRAWING OFFICE

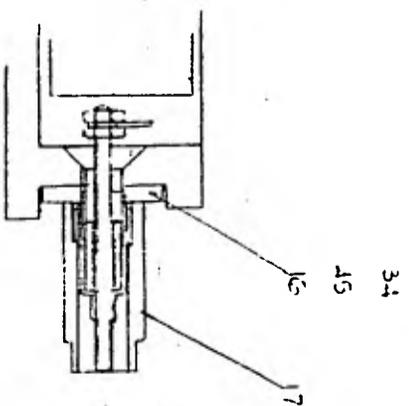


VIEW ON ARROW A

ITEM	QTY	DESCRIPTION	REMARKS
1	1	INSULATOR	
2	1	SHIELD PLATE	
3	1	EXTRACT ELECTRODE HOUSING	
4	1	EXTRACT ELECTRODE 1	
5	1	POWER CHAIN EXTENSION	
6	1	SUPPRESSOR CAP	
7	1	ANODE MOUNT	
8	1	ANODE INSERT	
9	1	CON. HOUSING	
10	1	CONTRAPID CAP	
11	1	CONTRAPID	
12	1	SHAMP	
13	1	INSULATING BUSH	
14	1	SHIELD	
15	1	SHIELD	
16	1	ELECTRICAL FEEDTHRU	
17	1	INDUCTIVE SLEEVE	
18	1	INSULATOR	
19	1	SHIELD PLATE	
20	1	BUS BAR	
21	1	SHIELD PLATE	
22	1	SHIELD PLATE	
23	1	SHIELD PLATE	
24	1	SHIELD PLATE	
25	1	SHIELD PLATE	
26	1	SHIELD PLATE	
27	1	SHIELD PLATE	
28	1	SHIELD PLATE	
29	1	SHIELD PLATE	
30	1	SHIELD PLATE	
31	1	SHIELD PLATE	
32	1	SHIELD PLATE	
33	1	SHIELD PLATE	
34	1	SHIELD PLATE	
35	1	SHIELD PLATE	
36	1	SHIELD PLATE	
37	1	SHIELD PLATE	
38	1	SHIELD PLATE	
39	1	SHIELD PLATE	



VIEW ON ARROW A



SECTION THROUGH TERMINAL

Fig. I, 1, 16

NO.	DESCRIPTION	QTY	UNIT PRICE	TOTAL PRICE	REMARKS
1	TERMINAL	1	1.00	1.00	
2	LENS	1	1.00	1.00	
3	HOUSING	1	1.00	1.00	
4	SCREW	1	1.00	1.00	
5	WASHER	1	1.00	1.00	
6	SPACER	1	1.00	1.00	
7	WASHER	1	1.00	1.00	
8	SCREW	1	1.00	1.00	
9	WASHER	1	1.00	1.00	
10	SCREW	1	1.00	1.00	
11	WASHER	1	1.00	1.00	
12	SCREW	1	1.00	1.00	
13	WASHER	1	1.00	1.00	
14	SCREW	1	1.00	1.00	
15	WASHER	1	1.00	1.00	
16	SCREW	1	1.00	1.00	
17	WASHER	1	1.00	1.00	
18	SCREW	1	1.00	1.00	
19	WASHER	1	1.00	1.00	
20	SCREW	1	1.00	1.00	
21	WASHER	1	1.00	1.00	
22	SCREW	1	1.00	1.00	
23	WASHER	1	1.00	1.00	
24	SCREW	1	1.00	1.00	
25	WASHER	1	1.00	1.00	
26	SCREW	1	1.00	1.00	
27	WASHER	1	1.00	1.00	
28	SCREW	1	1.00	1.00	
29	WASHER	1	1.00	1.00	
30	SCREW	1	1.00	1.00	
31	WASHER	1	1.00	1.00	
32	SCREW	1	1.00	1.00	
33	WASHER	1	1.00	1.00	
34	SCREW	1	1.00	1.00	
35	WASHER	1	1.00	1.00	
36	SCREW	1	1.00	1.00	
37	WASHER	1	1.00	1.00	
38	SCREW	1	1.00	1.00	
39	WASHER	1	1.00	1.00	
40	SCREW	1	1.00	1.00	
41	WASHER	1	1.00	1.00	
42	SCREW	1	1.00	1.00	
43	WASHER	1	1.00	1.00	
44	SCREW	1	1.00	1.00	
45	WASHER	1	1.00	1.00	
46	SCREW	1	1.00	1.00	
47	WASHER	1	1.00	1.00	
48	SCREW	1	1.00	1.00	
49	WASHER	1	1.00	1.00	
50	SCREW	1	1.00	1.00	

UNIVERSITY OF OXFORD NUCLEAR PHYSICS LABORATORY  
 SEE P/1  
 HIGH INTENSITY POOL SWITZERLAND

Otra ventaja es que el gas por ionizar puede ser cambiado sin mucha dificultad, requiriéndose algunas horas de servicio de la máquina, para obtener una potencia óptima del nuevo gas.

En las siguientes hojas aparecen datos relacionados con la fuente, obtenidos en la Universidad de Oxford, donde operó con anterioridad. Esta es la fuente que inicialmente va a tratarse de poner en operación en el laboratorio de I de I.

Características de la potencia 230V 50Hz

- Arco en el depósito de mercurio	100V	5A
- Arco auxiliar	200V	1A
- Arco principal	200V	1A
- Voltaje de extracción	50KV	10A
- Voltaje de enfoque	50KV	5A
- Voltaje en la abertura de la lente	60KV	10A
- Circuito del solenoide (cabeza)	100V	5A
- Supresor-Donor canal	200-300V	

Operación

- (i ) Mantener una presión en la caja de lentes  $\approx 5 \times 10^{-6}$  mm Hg
- (ii ) Llenar las trampas de enfriamiento con nitrógeno líquido
- (iii) Admisión del gas a la fuente-controlar la presión en un indicador pirani ó termopar, colocado en la apertura de un ánodo ( ejemplo ánodo 5 ).
- (iv ) Colocar un interruptor para los voltajes aplicados para el arco y el solenoide.
- (v ) Ajustar el solenoide en el circuito magnético a  $\approx 2A$ .
- (vi ) Llevar un control de la intensidad de corriente inicial-

para lograr la descarga en el gas. Para lograr esto, hay que tener una presión constante de  $1 \times 10^{-3}$  mm Hg.

- (vii) Después de lograr la descarga entre los ánodos 1 y 2, mantener un control en el arco principal. Con esto se podrá continuar la descarga al ánodo 4.
- (viii) Extracción del haz. Aumentar el voltaje de extracción a 28 KV. ( negativos ). Este puede realizarse entre el ánodo 5 y el canal donador.
- (iv) La salida del haz es controlada con el arco principal.

Mezclas de gas y condiciones para la producción del haz de iones pesados.-

ION	MEZCLA DE GASES	TRAMPA DE ENFRIAMIENTO	VOLTAJE DE EXTRACCION	VOLTAJE DE ENFOQUE	CORRIENTE A LA SALIDA.
OXIGENO-16	10% oxígeno 90% hidrógeno	Hielo seco y Metanol	25.5KV	31KV	3.0
OXIGENO-18	10% oxígeno 18 90% hidrógeno	" "	25.	33.	1.0
CARBON -18	25% Etano(C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ) 75% hidrógeno	" "	25.	29.	0.2
CARBON -13	25% Metano (CH <sub>4</sub> ) enriquecido	" "	25.	34.	0.3
NITROGENO-14	20% nitrógeno 80% hidrógeno	Nitrógeno	26.	36.	0.6
FLUORURO -12	3% fluor-14	Hielo seco y mezcla de 50% metanol y 50% H <sub>2</sub> O	25.	35.	2.2

I.1,b) Enfoque de un haz de proyectiles.-

Toda partícula cargada que se encuentra en movimiento a través de un campo ya sea eléctrico, magnético ó la combinación de ambos, sufre un continuo cambio en el valor de su velocidad, así como en la dirección de su desplazamiento. Este fenómeno es aprovechado con el fin de construir un sistema capaz de enfocar ó desenfocar, según sean los requerimientos, a un haz de proyectiles, recibiendo por nombre: Sistema de lentes. Cabe señalar que el mecanismo empleado en este proceso ( óptica iónica ), es análogo al conseguido en la óptica luminosa, en la cual la dirección de un haz de luz es desviada al pasar de un medio a otro cuyo índice de refracción es diferente, pudiéndose por lo tanto emplear las mismas relaciones matemáticas de la óptica geométrica en la óptica iónica.

El sistema de lentes puede ser de dos tipos, dependiendo del principio empleado en el enfoque ó desenfoque:

- i) lentes electrostáticas
- ii) lentes magnéticas

i) Lentes electrostáticas.

Son aquellas cuyo enfoque ó desenfoque del haz de proyectiles es logrado mediante la utilización de campos eléctricos formado entre electrodos cilíndricos sucesivos.

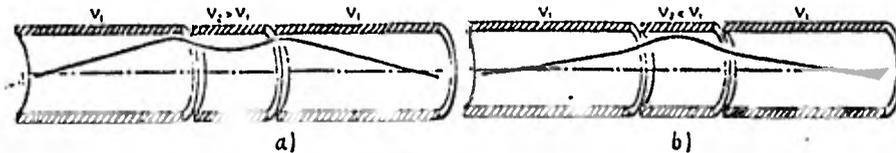
La trayectoria de las partículas, al ser aceleradas longitudinal y radialmente, se pueden calcular incluso con ecuaciones de movimiento clásicas ( Sandoval, 1970 ).

De esta manera pueden diseñarse sistemas de control sobre el enfoque y desenfoque de haces de partículas cargadas.

Lentes Einzel.-

Son lentes electrostáticas, cuyo arreglo consiste de tres electrodos circulares de igual diámetro y colineales, estando conectados tanto el primer como el tercer electrodo a un mismo potencial ( $V_1$ ), mientras el segundo a un potencial  $V_2$ .

En la Fig. I.1,17 ( Pérez, 1975 ) se muestra un arreglo típico de este tipo de lentes y esquemáticamente las posibles trayectorias de partículas.



Sistema de lentes Einzel. Fig. I.1,17

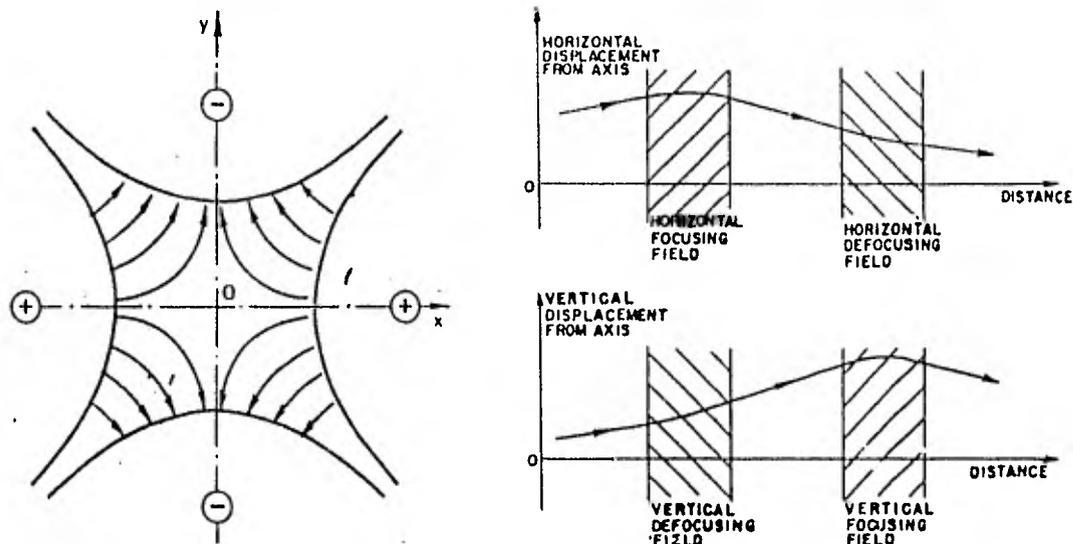
Cabe señalar que la energía cinética del haz de partículas no sufre ninguna alteración, debido a que los electrodos externos se encuentran conectados a un mismo potencial ( $V_1$ ). Lo que se aceleró en la primera región, lo pierde en la segunda.

Sistema de lentes cuadrupolares.-

Es el arreglo de un par de cuatro electrodos cada uno de forma hiperbólica y de potencial alterno, tal como se muestra en la Fig. I.1,18 ( Artsimovich, 1974 ); con la que se puede lograr un enfoque intenso de los haces de partículas cargadas.

Una partícula positiva que se desplaza a través de la lente, aproximadamente a lo largo del eje Z, se va a encontrar sometida a una fuerza F que enfocará su trayectoria en la di -

rección paralela al eje X y la desenfocherà en el eje de las Y.

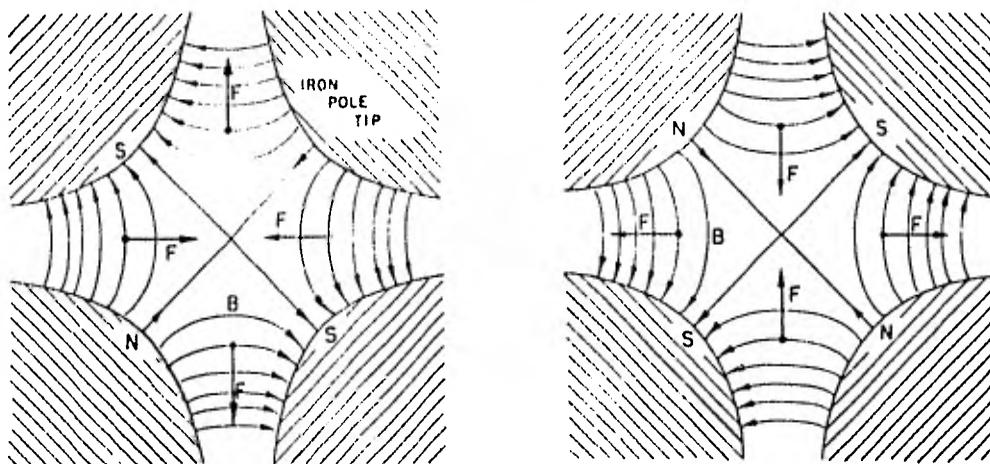


Sistema de lentes cuadrupolares. Fig. I.1,18

Si la polaridad de los electrodos es invertida y con distinto valor los efectos logrados son contrarios. enfoque en el eje de las Y y desenfoque en eje de las X: por lo que con una combinación de un juego de dos lentes electrostáticas cuadrupolares cuyos campos eléctricos formen entre sí un arreglo de  $90^\circ$  puede lograrse un enfoque intenso del haz de partículas a distintas distancias.

ii) Lentes magnéticas cuadrupolares.

Es el dispositivo capaz de enfocar ó desenfocar un haz de partículas utilizando campos magnéticos no uniformes en una determinada región. Su principio de operación es análogo al de las lentes electrostáticas, Fig. I.1,19 ( Feynman, 1964 ). En este caso los polos físicos están girados  $45^\circ$  con respecto a las electrostáticas.



Lentes magnéticas cuadrupolares. Fig. 1.1,19

Para altas energías o masas es usual emplear los métodos magnéticos sobre los electrostáticos, además de la sencillez de su operación. La corrección vertical u horizontal de un haz puede hacerse mediante el empleo de polos magnéticos.

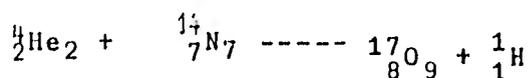
## I.2 ACELERADORES DE PARTICULAS

Un acelerador en el amplio sentido de la palabra, es el dispositivo capaz de poder cambiar la velocidad y por lo tanto la energía cinética de una partícula cargada ( ión, protón ó electrón ) con el fin de tener proyectiles con la suficiente energía como para ocasionar cambios en la estructura misma de la materia, cambios químicos, transmutaciones nucleares y lo que es más importante en nuestro tiempo, la de descubrir las partículas elementales de las que se encuentra formado nuestro universo.

A finales del siglo pasado y a principios del presente fueron descubiertas dos fuentes naturales emisoras de partículas de alta energía: Los rayos cósmicos y los núcleos radioactivos. El inconveniente que tienen los primeros es de que se trata de un flujo de partículas difuso y está fuera del control del experimentador, lo cual hace difícil su uso en muchos experimentos. Los núcleos radiactivos son núcleos inestables que buscan su estabilidad de fuerzas ( fuerza nuclear y fuerza de repulsión coulombiana ) con la emisión de alguno de sus elementos constituyentes ( partículas  $\alpha$  y  $\beta$  ), o con la radiación del exceso de energía que tienen ( radiación electromagnética  $\gamma$  ).

En algunos casos es de mayor interés el estudio de los núcleos radiactivos emisores de partículas  $\alpha$  ( núcleos de Helio -  ${}^4\text{He}_2$  ), tales como el radio y el torio que emiten partículas  $\alpha$  en un intervalo de energía que varía entre 5 y 8 millones de electrón-volts ( MeV ).

No fue sino hasta 1919 cuando se observa la primera transmutación nuclear, al bombardear Rutherford un blanco de nitrógeno con partículas  $\alpha$  emitidas por una fuente radiactiva, dando como resultado.



Esto abrió un nuevo camino en la física, debido a la necesidad de crear fuentes artificiales que produjeran haces de partículas de muy alta energía, como para ocasionar desintegraciones en más núcleos, lo cual fue expresado por Rutherford en una reunión de la sociedad real inglesa. En esos años ( años 20 ), sólo se habían desarrollado máquinas de 100 a 200 KeV, que eran usadas en la producción de rayos-X.

En 1928 Lawrence, construye uno de los primeros aceleradores circulares de unos cuantos cm de diámetro, el cual al final no funcionó.

Alrededor de 1929 se inicia la experimentación en diversos laboratorios del mundo, para tratar de desarrollar un aparato para la aceleración de partículas.

En 1930 Rutherford estimula en el laboratorio de Cavendish ( Cambridge, Inglaterra ), la construcción de un generador de alto voltaje y corriente continua de un millón de voltios; propósito que no fue alcanzado debido a la limitante que se tenía en la ruptura de los aisladores y a la descarga entre los electrodos. Sin embargo Cockcroft y Walton, lograron desarrollar un sistema multiplicador de voltaje utilizado como acelerador de protones con el que, en el año de 1932 lograron producir la primera transmutación artificial con partículas aceleradas, al incidir sobre un blanco de litio, un haz de protones con una energía cercana a los 400 KeV;



El día histórico en que fue lograda esta primera transmutación se marca como el punto de partida en la historia de los aceleradores de partículas, cobrando a partir de este momento un gran impulso el desarrollo de estas máquinas, a tal grado que en la actualidad los grandes aceleradores instalados, la máquina ya no se construye en un laboratorio sino que es el laboratorio el que se construye alrededor de la máquina. Otro hecho importante ocurrido en ese mismo año es el descubrimiento del neutrón por parte de Chadwick.

Inicialmente el desarrollo de estos equipos se realizó por dos caminos, utilizando dos conceptos de aceleración diferentes:

- Aceleración por voltaje directo
- Aceleración por resonancia

Del primer grupo aparecen los llamados aceleradores tipo Van de Graaff , y del segundo los ciclotrones; sin embargo más tarde se generan otras familias de aceleradores empleando principios de aceleración diferentes, como es el caso de la familia de los sincroaceleradores.

La unidad estándar de medida de la energía de una partícula es el electrón-volt ( eV ) que se define como la energía adquirida por un electrón o partícula con la carga de un electrón, al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio. Sus multiples más empleados son:

- Kiloelectrón-volt = 1 KeV =  $10^3$  eV
- Megaelectrón-volt = 1 MeV =  $10^6$  eV
- Gigaelectrón-volt = 1 GeV =  $10^9$  eV
- Teraelectrón-volt = 1 TeV =  $10^{12}$  eV

### Aceleradores de corriente directa.

Su principio de funcionamiento se basa, en la aceleración de una partícula cargada por medio de un campo eléctrico generado entre un par de electrodos que son mantenidos a una muy alta diferencia de potencial, por medio de la rectificación continua de la corriente alterna ( multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton ) ó por el continuo transporte mecánico de cargas eléctricas desde tierra hasta la terminal de alto voltaje ( Generador Van de Graaff ).

Con este acelerador puede alcanzarse teóricamente cualquier energía, basta con que se incremente la diferencia de potencial entre los electrodos; sin embargo en la práctica a presión atmosférica tiene un límite a no más de unos dos MeV debido al efecto de corona existente alrededor de los electrodos ó provocándose en un momento dado una descarga eléctrica por la ruptura del aislamiento. Para reducir su tamaño y alcanzar mayores potenciales, los electrodos son sumergidos en un gas aislante a cierta presión, convirtiéndose así en los aceleradores más empleados dentro de la investigación, debido a las múltiples ventajas que presentan, tales como:

- Una sección transversal del haz de partículas pequeña
- Una corriente constante ó pulsados durante el experimento
- Un haz de partículas con muy pequeña dispersión, en un gran intervalo de energía
- Mecanismos sencillos

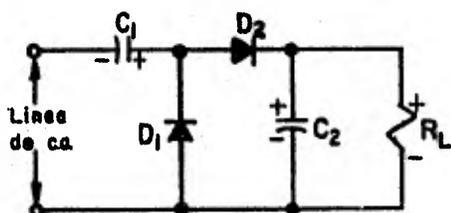
i) Multiplicador de voltaje.

Se trata de un circuito capacitor-rectificador capaz de poder multiplicar el voltaje producido por un transformador . Este circuito fue inicialmente diseñado por Greinacher en el año de 1921 para duplicar el voltaje de línea, y años más

tarde mejorado por Cockcroft y Walton los que lograron multiplicar el voltaje disponible en un factor de 4.

El multiplicador de voltaje es en principio un circuito para cargar capacitores en paralelo y descargarlos después en serie; a partir de un transformador ó generador oscilador que es operado con corriente alterna, utilizando rectificadores para cargar los capacitores durante una mitad del ciclo y para transferir la carga durante la otra mitad del ciclo.

El circuito más sencillo es el doblador de voltaje mostrado en la Fig. 1.2,1 ( Marcus, 1979 ) en el cual durante la primera mitad del ciclo o sea cuando se aplica la carga positiva sobre el ánodo del rectificador  $D_1$ , éste se vuelve conductor, cargándose el capacitor  $C_1$ , con la polaridad mostrada en la figura, hasta un valor que es aproximadamente el voltaje del transformador.

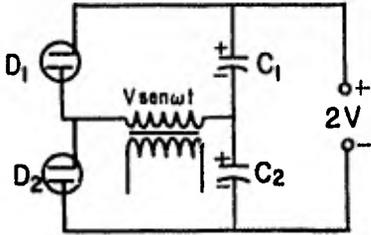


Doblador de voltaje.  
Fig. 1.2,1

El capacitor  $C_2$  no se carga debido a que el rectificador  $D_2$  no es conductor, dado que en ese momento su cátodo tiene polaridad positiva.

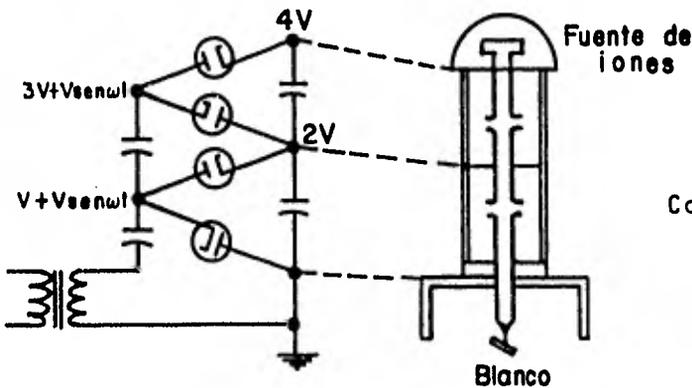
Durante el siguiente medio ciclo,  $D_2$  pasa a ser conductor y  $D_1$  no conductor, cargándose de esta manera el condensador  $C_2$  con un voltaje que es igual al voltaje de línea más el potencial del capacitor  $C_1$ , obteniéndose de esta manera una duplicación del voltaje.

A este circuito se le conoce con el nombre de Duplicador de voltaje de media onda, mientras que el circuito de la Fig. I.2,2 ( Livingston, 1962 ) es un Duplicador de voltaje de onda completa.



Duplicador de voltaje de onda completa. Fig. I.2,2

En la Fig. I.2,3 ( Cockcroft, 1932 ) se muestra el arreglo del acelerador Cockcroft-Walton, teniéndose que el multiplicador de voltaje es simplemente el acoplamiento de dos duplicadores de voltajes de media onda; en este los capacitores  $C_2$  y  $C_4$  se cargan uno al doble del voltaje máximo de línea y como se encuentran conectados en serie dan como resultado la cuadruplicación del voltaje del transformador.



Acelerador Cockcroft-Walton Fig. I.2,3

Por la adición de unidades de un total de  $N$  capacitores y  $N$  rectificadores se puede obtener una multiplicación de vol

taje por un factor de N, lo cual esta limitado por la iniciación de la descarga o la ruptura del aislante.

Generalmente se usa en la actualidad el hexafluoruro de azufre ( como aislante ), el cual resulta muy caro para nuestro país dado que es un producto de importación; el cual puede ser sustituido con ventaja, por una mezcla de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> ( 20, 80% ) a una presión que sea aproximadamente 2.5 veces mayor que la usada con el hexafluoruro de azufre ( Trump, 1982 ).

#### ii) El Generador Electroestático.

La idea original proviene de Righi aproximadamente en el año de 1890 como una modificación de el generador de cargas por caída de agua de Lord-Kelvin. En 1927 y 1928 siendo estudiante en Oxford, R.J. Van de Graaff se ve interesado en el diseño de una máquina de alto voltaje, logrando construir en el año de 1929 en la Universidad de Princeton, el primer generador electroestático de este tipo, en el cual se generaba una diferencia de potencial de aproximadamente 80 KV. Sin embargo la idea fué expuesta por primera vez en el año de 1931, ante la sociedad americana de física, tratándose entonces de un generador electroestático de 1.1 MV.

A partir de este momento se desarrollan modelos de mayor potencial, cuyo principal problema era el efecto de corona y la descarga eléctrica.

Van de Graaff, L.C. Van Atta, Northrup y C.M. Van Atta, desarrollaron en un viejo hangar una terminal positiva de 2.4 MV y una negativa de 2.7 MV. con una diferencia de potencial total de 5.1 MV, con la que se provocaban descargas entre las terminales y el techo del hangar.

En el laboratorio Carnegie de Washington se hizo una aportación muy grande en el desarrollo de estas máquinas, como

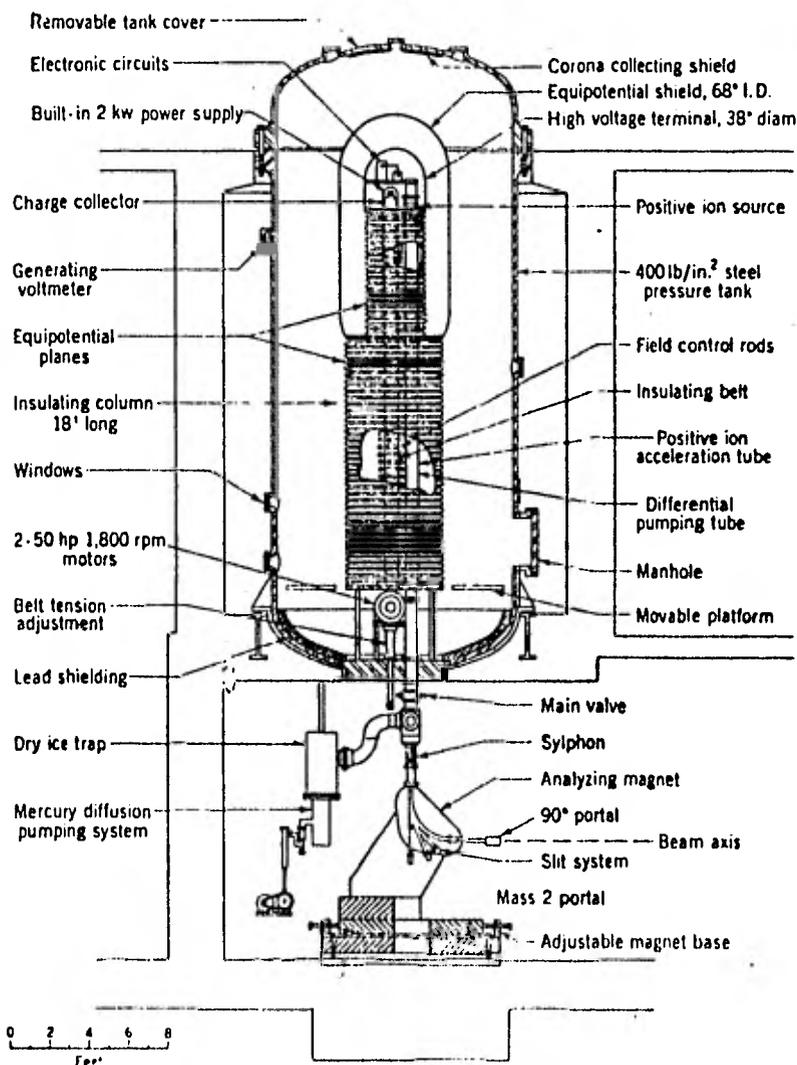
fué el estudio sobre la calibración del voltaje. En 1940 Herb Turner, Hudson y Warren, con tres electrodos concentradores de alto potencial, logran distribuir el potencial a lo largo de todo el acelerador de 4 MV. Más tarde Herb diseñó el equipo dentro de un recipiente con gas aislante a presión, lo que dió buenos resultados y por el año de 1938 Trump y Van de Graaff, reportaron los primeros generadores de electrones para ser usados como fuentes de rayos-X para propósitos médicos e industriales. En 1947 Trump, Van de Graaff, Robinson y otros formaron la corporación de ingeniería de alto voltaje ( High voltage engineering corporation HVEC ) en Cambridge, Massachusetts, para la producción comercial de los generadores de Graaff.

Principio de Operación: Es básicamente muy simple, consistiendo en el transporte mecánico de cargas eléctricas, requiriendo sin embargo del desarrollo de una perfecta y complicada técnica y diseño.

En la Fig. I.2,4 ( Livingston, 1962 ), se muestran las componentes principales del acelerador de Trump y Van de Graaff; se observa en esta, una terminal de alto voltaje soportada por una columna aisladora y una banda aislante construida de un material especial, que es la encargada de transportar las cargas eléctricas desde las puntas de corona de una fuente de alta tensión hasta la terminal de alto voltaje y el tubo acelerador. La banda es movida mediante un motor rápido entre dos poleas aisladas, una de las cuales se encuentra colocada en la parte interior de la terminal de alto voltaje y la otra aislada a través de la fuente de alto voltaje a tierra.

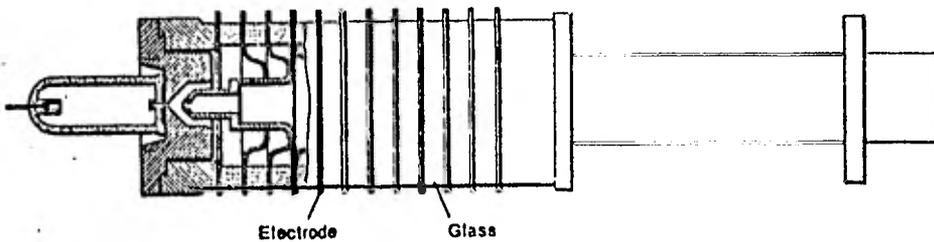
La alimentación de la banda desde la fuente de alta tensión se realiza utilizando un peine de puntas, del cual saltan las cargas a la banda.

Esta carga es removida en la terminal de alto voltaje utilizando un colector similar al peine de puntas, el cual se encuentra eléctricamente conectado a la terminal. Estas cargas aceptadas de manera continua desde el interior de la coraza equipotencial, son distribuidas por repulsión en la superficie exterior de la terminal



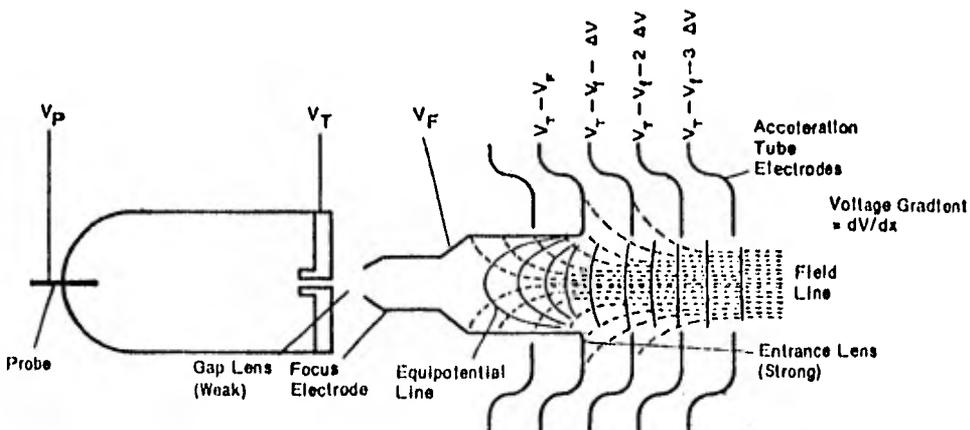
Generador electrostático de 9-MV. Fig. 1.2,4

El tubo de aceleración es uno de los componentes más críticos y está construido por un gran número  $N$  de platos equipotenciales ( electrodos metálicos de gran diámetro ), los cuales se encuentran separados entre si por material aislante ( comúnmente porcelana ó vidrio pyrex ) ver Fig. 1.2,5 .



Tubo de aceleración. Fig. 1.2,5

Estos planos equipotenciales son conectados a una serie de resistencias, que los mantiene a un gradiente de voltaje uniforme, entre la terminal de alto voltaje y tierra, lográndose de esta manera el campo eléctrico para la aceleración de las partículas, Fig. 1.2,6 ( Bygrave, 1970 ) .



Alto voltaje al final del tubo acelerador. Fig. 1.2,6

Cabe señalar que en la terminal de alto voltaje, se encuentra colocada la fuente de iones y los circuitos de control, siendo manipulados desde tierra por medio de barras aisladoras.

En el Centro Nuclear se ha desarrollado un acelerador tipo peletrón para electrones. En lo que respecta a la óptica de tubos aceleradores, ha sido también estudiada con computadora por David y Armando López.

#### Aceleración por Resonancia.

Estos aceleradores basan su principio en la aceleración de partículas por etapas, dándole una sucesión de pequeños impulsos en vez de un empuje único, empleando para este fin un voltaje alterno de radiofrecuencia de algunas decenas de Kilovoltios. Cabe destacar entre los aceleradores de este tipo:

- Acelerador lineal
- Ciclotrón
- Bevatrón
- Sincrotrón
- Sincrociclotrón
- Tevatrón

#### i) Acelerador Lineal ( Linac )

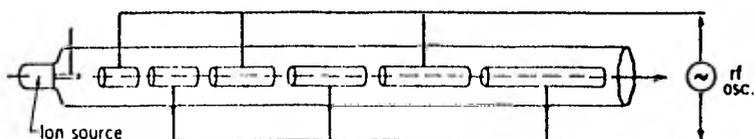
La idea original fué desarrollada en 1925 por Ising, no siendo sino hasta 1928 cuando Wideroe opera el primer acelerador lineal con iones de sodio y potasio, con una energía correspondiente al doble del voltaje aplicado que era de 25 KV, pero sin embargo no resultó satisfactoria del todo.

En este aparato, la aceleración gradual se lleva a cabo en una hilera de muchas y breves etapas aceleradoras, una detrás de otra; estableciéndose entre ellas un campo eléctrico alternante producido mediante un oscilador, el cual es conecta

tado a cada conjunto de electrodos, formando de esta manera una estructura llamada cavidad de radiofrecuencia.

Los osciladores de las cavidades sucesivas, se sincronizan de suerte que el campo eléctrico tenga siempre el signo correcto para acelerar en vez de retardar la partícula en movimiento.

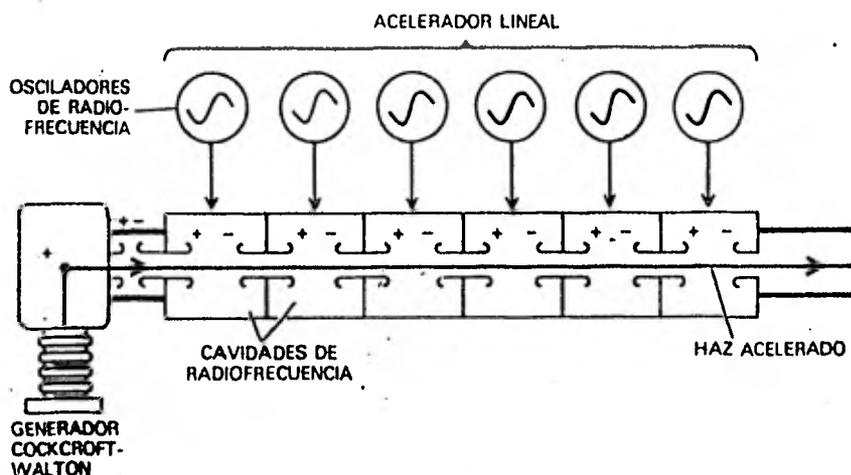
El más grande acelerador Linac en funcionamiento se encuentra instalado en la Universidad de Stanford, el que se acabó de construir en 1961, midiendo 3050 m de largo y formado por 82,560 cavidades de radiofrecuencia, y produce electrones de 30 GeV de energía. En la Fig. I.2,7 ( Livingston, 1962 ) se muestra el diseño original de Ising-Wideroe en el cual los electrodos están formados por cilindros metálicos cada vez más largos, para compensar el incremento de velocidad, ya que el tiempo de recorrido debe ser el mismo en todos los electrodos.



Acclerador lineal con incremento en la longitud de los electrodos. Fig. I.2,7

Este diseño no produjo resultados adecuados y en 1939 sólo se había alcanzado una energía de 350 KeV; sin embargo con el desarrollo del radar y después de la segunda guerra mundial, se construyeron aceleradores del tipo como el de la Fig. I.2,8 ( Wilson, 1980 ), en los que se aplica el principio de guías de ondas y de cavidades resonantes, dán-

dole de esta manera un mayor potencial al acelerador.



Aceleración de partículas utilizando el principio de guías de onda y cavidades resonantes. Fig. 1.2,8

#### ii) Ciclotrón.

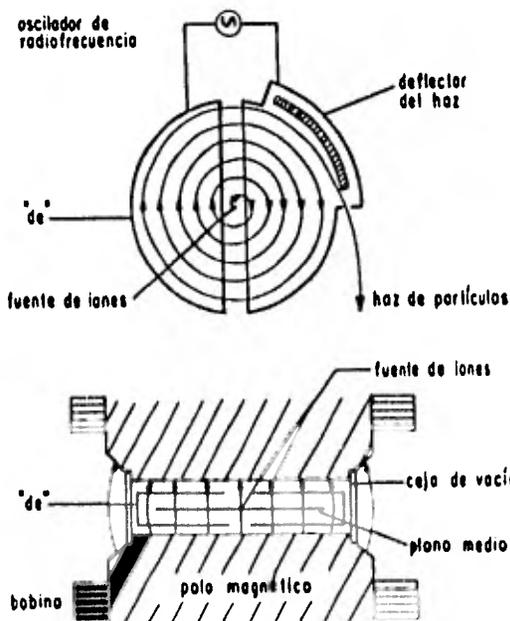
Su principio de aceleración se basa en el movimiento cíclico de las partículas cargadas dentro de un campo magnético uniforme, siendo obligadas a pasar y repasar durante mucho tiempo a través de un potencial en resonancia y por lo tanto en un campo eléctrico oscilante, hasta que la energía cinética adquirida por la misma, sea la suficiente como para escapar de la acción del campo magnético.

Lo anterior fué propuesto en 1930 por Ernest D. Lawrence de la Universidad de California, siendo verificado por primera vez la validez de este principio, el 14 de abril de 1931 por Livingston en la misma Universidad, al producir un haz de iones de  $H_2$  con una energía de 80 KeV usando un potencial de radiofrecuencia de 2000 volts. A partir de este momento varios laboratorios se unieron en su desarrollo.

En 1934 Lawrence y Livingston describieron un ciclotrón de deuterones de 5 MeV. En 1936 Lawrence y Cooksey reportaron uno de 8 MeV y en 1939 Lawrence, Alvarez y colaboradores desarrollaron uno de 16 MeV.

Sin embargo fué probado como límite práctico para el ciclotrón de frecuencia fija, un intervalo de energía de 20 a 25 MeV.

Principio de Operación: El ciclotrón está compuesto de un electroimán circular de radio muy grande, que es usado para generar un campo magnético uniforme y muy estable entre los planos de las caras de los polos cilíndricos. Una cámara al vacío es colocada entre las caras de los polos, conteniendo en su parte interior dos electrodos semicirculares huecos en forma de D, con una separación entre ellos muy pequeña, tal como se muestra en la Fig. 1.2,9 (Alba, 1971) los cuales son alimentados por una fuente de radiofrecuencia, un transmisor de onda corta, el cual proporciona un campo eléctrico alternativo entre las dos caras diametrales de las dos D.



Elementos principales de un ciclotrón. Fig. 1.2,9

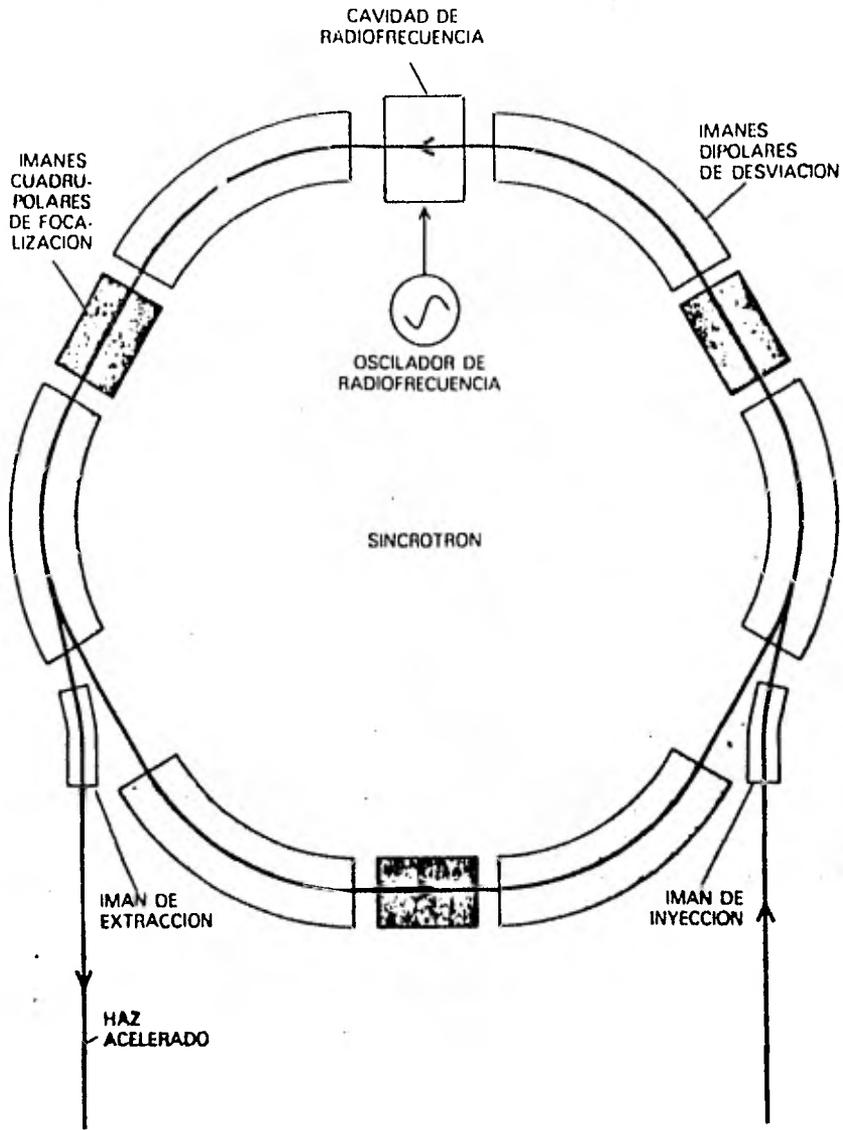
Las partículas son aceleradas sucesivamente en el espacio entre las D, tardando el mismo tiempo en recorrer el semicírculo libre de campo eléctrico, independientemente de su energía. En la parte central de la cámara se encuentra colocado una fuente de iones que produce las partículas cargadas por acelerar.

### iii) El Sincrotrón

Esta máquina utiliza el mismo principio de aceleración del acelerador lineal ( Linac ) y el principio de estabilidad de fase, con la única diferencia de que aquí, sólo son empleadas unas cuantas cavidades de radiofrecuencia por las que se hace pasar muchas veces a cada partícula. Lo anterior se logra haciendo que las partículas cargadas eléctricamente sigan una trayectoria curva, usando para tal fin campos magnéticos. El arreglo más común es un anillo, alrededor del cual se dispone de un sin número de imanes, entre los cuales se encuentran repartidas las cavidades de radiofrecuencia, que es donde se lleva a cabo la aceleración, ver Fig. I.2,10 ( Wilson, 1980 ).

Los imanes que forman el anillo son de dos clases: Dipolares y Cuadrupolares.

Los imanes dipolares ( Un solo norte y un solo sur ), generan un campo magnético uniforme y son los que dan lugar a la curvatura de las trayectorias de las partículas, mientras que los imanes cuadrupolares ( dos polos nortes y dos sur ) no desvían a las partículas, sino que las focalizan en un haz más estrecho, actuando como si fuesen lentes.



Acelerador Síncrotrón. Fig. 1.2,10

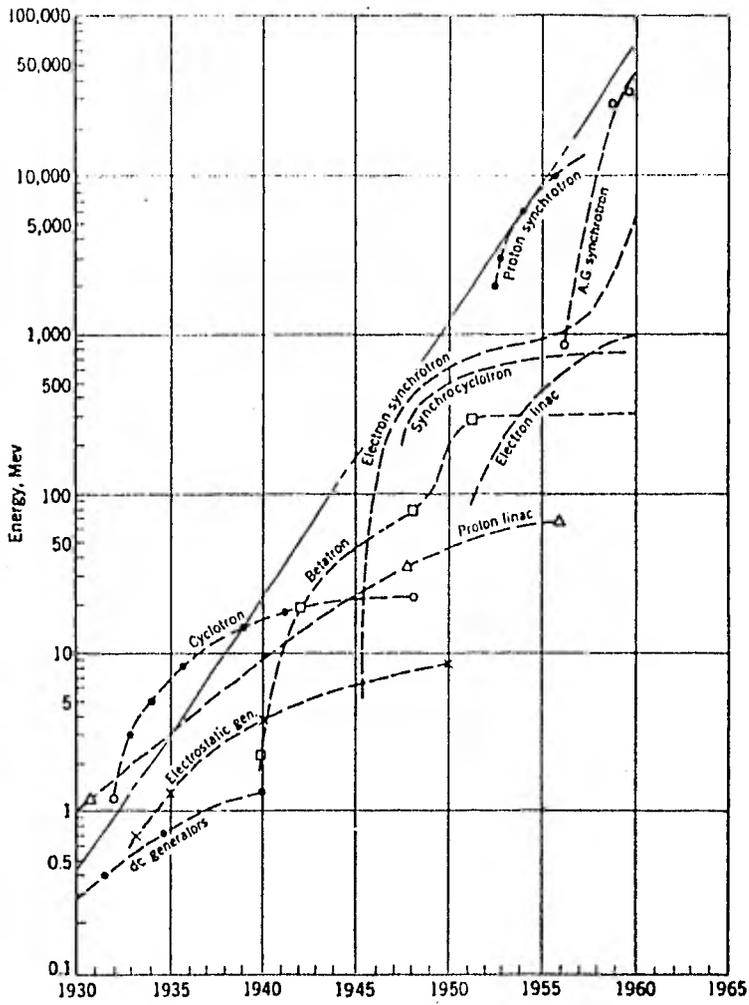
El sincrotrón funciona por ciclos inyectándose en un comienzo un paquete de partículas, que dependiendo de la energía que tengan es ajustado el campo magnético de los imanes de desviación, de tal manera que las partículas sigan con toda precisión la curvatura del tubo de vacío. Esta intensidad del campo magnético de los imanes de desviación debe ir en aumento en cada revolución.

Después de miles de revoluciones dadas por las partículas, éstas alcanzan su máxima energía, siendo extraídas del anillo, para luego dejar que el campo magnético vuelva a su valor original, preparándose de esta manera, para el próximo paquete de partículas.

Una limitante de estos aceleradores es la radiación sincrotrónica, que consiste en la emisión de la energía perdida por las partículas aceleradas al obligárseles a describir una trayectoria circular.

Para terminar esta parte, se resume en la Fig. I.2,11 ( Livingston, 1962 ), el desarrollo alcanzado a través de los años por una serie de aceleradores

Cabe mencionar por último que existe en México la idea de construir un acelerador de partículas de altas energías ( Dacal, 1982 ), lo cual abre el campo en el diseño y construcción de diferentes tipos de máquinas de aceleración, las cuales se acoplarían, para producir una aceleración por etapas a las partículas. La idea es interesante como motivadora en el desarrollo tecnológico de este y de varios campos asociados en nuestro país.



Energías alcanzadas por aceleradores desde 1930 a 1960.

Fig. 1.2,11

### I.3. DEFLECTOR MAGNETICO

Al inicio de este trabajo se mencionó que una de las ventajas de la técnica de la I de I es la de conocerse el elemento que se implanta y la predeterminación de su localización ( profundidad<sup>(1)</sup> ). El decir que se conoce el elemento que se implanta, va más allá del simple hecho de saber que gas se inyectó a la fuente para ser ionizado y efectuar la implantación. En la naturaleza, los elementos se encuentran ya sea en forma de sólidos, líquidos o gases, pero siempre con cierto grado de impureza o en distintas formas moleculares y nucleares; por sus propiedades algunos de ellos pueden ser más fácilmente purificados y utilizados que otros. Muchos procesos de tecnología especial requieren de una gran pureza de los elementos empleados, siendo éste un factor que afecta directamente la eficiencia y respuesta de comportamiento de muchos dispositivos usados en la tecnología moderna, como por ejemplo las celdas solares para la generación de energía eléctrica y lo relacionado con la fabricación de semiconductores.

---

(1) Dentro del campo de la física teórica se han hecho estudios relacionados con la profundidad o penetración y concentración de los distintos tipos de ión, en función de la energía e intensidad de los elementos. ( Townsend, 1976)

Un haz de iones extraído desde una fuente de iones está compuesto de un gran número de diferentes especies de moléculas, isótopos e impurezas. Las moléculas de un elemento poliisotópico pueden además estar presentes al mismo tiempo en diferentes formas moleculares. En principio, por ejemplo, iones positivos de isótopos del hidrógeno, pueden presentarse en las siguientes formas:

MASA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	H	H <sup>2</sup>	H <sup>3</sup>	H <sup>2</sup> D	HD <sup>2</sup>	HDT			
		D	DH	D <sup>2</sup>	DT	D <sup>3</sup>	D <sup>2</sup> T		
			T	HT	H <sup>2</sup> T	T <sup>2</sup>	HT <sup>2</sup>	DT <sup>2</sup>	T <sup>3</sup>

siendo: H= Hidrógeno D= Deuterio T= Tritio

Ciertos elementos tienen la posibilidad de ser ionizados varias veces, pudiéndose producir un plasma de iones de un mismo elemento con diferentes cargas o también, otra serie de partículas de los diferentes elementos que forman parte de la fuente de iones, pueden pasar a formar parte del plasma en forma de impurezas indeseables. Un hecho importante de los conceptos anteriores, radica en que a cada especie molecular le corresponde una masa y carga diferentes.

En el recorrido de las partículas de la fuente de iones al blanco, se requiere de un haz acelerado, colimado, enfocado y estable. Es por eso que un deflector magnético capaz de seleccionar partículas, forma parte esencial en un sistema de I de I, dado que una partícula cargada, moviéndose con una energía E constante, de masa M y carga q, en presencia de un campo magnético uniforme B, describirá en el sector una trayectoria circular de radio  $\rho$ .

Con precisiones de uno por ciento, suficiente para el diseño ingenieril de deflectores magnéticos, es útil la sigui-

ente fórmula

$$\rho = \frac{144}{B} \frac{(M E)^{1/2}}{q} \dots\dots ( I.3,1 )$$

donde: M= masa del ión en u.a.m.

B= campo magnético en Kgauss

q= carga del ión ( 1,2,3,... )

E= energía del ión en MeV

$\rho$ = radio de curvatura en cm

De tal manera que para una masa mayor, las partículas serán menos deflectadas, describiendo una trayectoria más abierta; lo contrario ocurre para una masa menor.

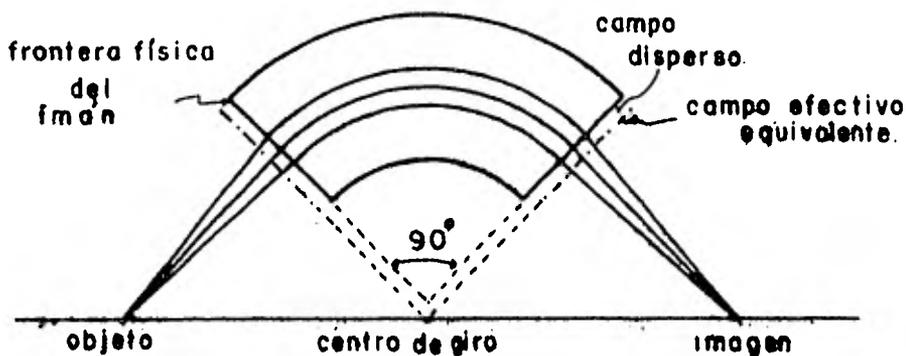
Algunos deflectores magnéticos son construidos con imanes permanentes. Son convenientes sin embargo deflectores electromagnéticos de campo variable a voluntad con el fin de elegir un amplio intervalo en el cual puedan seleccionarse distintas masas y cargas de iones, teniéndose así una mayor versatilidad.

Para una incidencia y salida normal a la trayectoria de un haz de iones en las caras de un sector magnético, los puntos objeto e imagen serán colineales con el centro de giro  $\rho$  en la proyección horizontal según la regla de Barber mostrada en la Fig. I.3,1 .

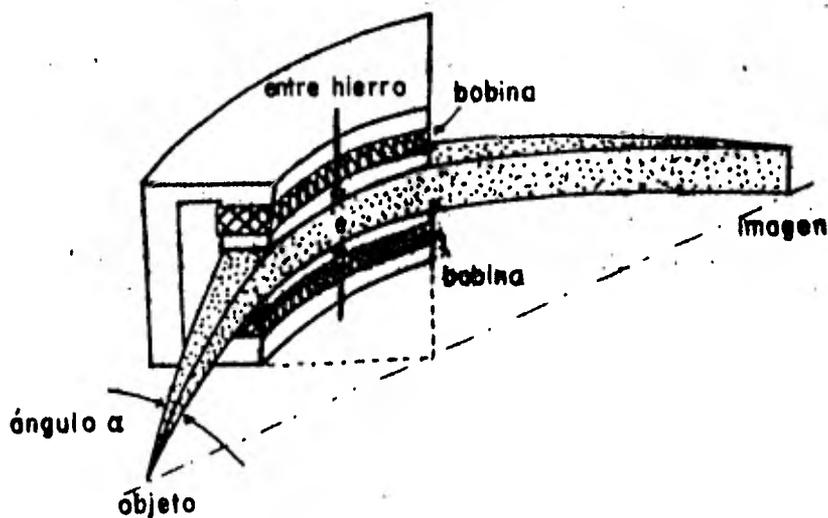
Esta regla se aplica sólo en campos magnéticos uniformes, obteniéndose un enfoque en el plano normal al campo magnético, es decir se tiene un enfoque horizontal y formándose una línea en el plano vertical como se ve en la Fig. I.3,2 .

Hay diversas maneras de obtener el enfoque vertical; cuando se tiene un entrehierro "e" con fronteras rectangulares el campo magnético disperso se extiende como campo efec-

tivo equivalente a  $0.7e$  . Bajo cierto ángulo de incidencia  $\beta$  del haz con respecto a la cara del sector, el campo disperso funcionará como una lente de enfoque para el plano vertical.

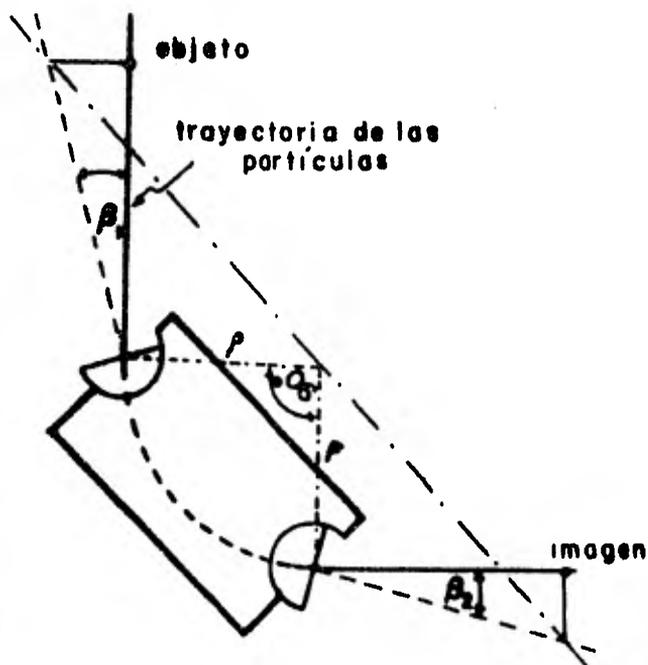


Deflector magnético de  $90^\circ$ . Fig. 1.3,1



Enfoque en el plano horizontal. Fig. 1.3,2

Un sector magnético, con fronteras inclinadas, puede analizar y enfocar haces iónicos en ambos planos con suficiente resolución, sin necesidad de recurrir a sistemas de lentes adicionales; moviendo apropiadamente las posiciones del objeto e imagen simultáneamente con el cambio de los ángulos de incidencia  $\alpha$  y  $\beta$  en las caras del sector, como se muestra en la Fig. I.3,3 ( Buechner, 1956 ) .

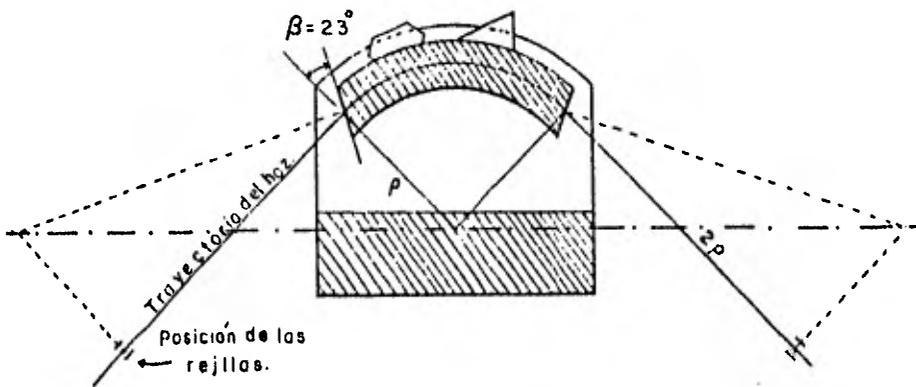


Sector magnético con fronteras de inclinación variables. Fig. I.3,3

Otra forma de obtener un enfoque vertical es haciendo que el campo disminuya al alejarse del centro de la trayectoria. Las líneas magnéticas del campo se curvarán. Una partícula cargada que se mueva en el plano central del imán, únicamente experimentará fuerzas radiales. Si la partícula se mueve afuera del plano central, la fuerza magnética ejercida

sobre ella tendrá una gran componente horizontal ( radial ) y una pequeña componente vertical dirigida hacia el plano central contribuyendo al enfoque vertical. Producir un enfoque en el plano vertical, origina un desenfoque en el plano horizontal; objeto e imagen no serán colineales con el centro de giro  $\rho$ , no siendo así aplicable la regla para campos magnéticos uniformes ( regla de Barber ). Para conseguir un enfoque también en el plano vertical ( eje z ), además del enfoque en el plano horizontal ( ejes x,y ), donde la inclinación de las fronteras de entrada y salida son diferentes de cero, se sigue la regla de Cartán, como se mostró en la Fig . I.3,3 .

Para el laboratorio de I de I se cuenta con un deflector magnético de  $90^\circ$ ; particularmente útil para iones pesados, con campo magnético B variable entre cero y 14 KGauss y  $\rho = 33.9$  cm Se diseñó simétrico con  $\beta = 23^\circ$  a la entrada y salida, con el objeto de lograr un doble enfoque del haz, es decir tanto en el plano horizontal como en el vertical. Se consigue esta geometría localizando las rejillas correspondientes teóricamente a una distancia  $2\rho$  como se muestra en la Fig. I.3,4 .



Deflector magnético para el laboratorio de I de I . Fig. I.3,4

La siguiente tabla, estimada con la fórmula I.3,1 muestra para distintos valores de campo B, cuales masas atómicas y a que diferentes energías, podrán ser seleccionadas por el deflector magnético disponible.

TABLA I.3,1 Valores de campo B en KGauss del deflector magnético.

Elemento	Masa (u.a.m)	Energías de bombardeo en MeV					
		0.01	0.02	0.04	0.08	0.16	0.2
Li	6	1.04	1.47	2.08	2.94	4.16	4.6
Li	7	1.12	1.58	2.24	3.18	4.5	5.0
N	14	1.58	2.24	3.18	4.5	6.35	7.1
Al	27	2.2	3.12	4.4	6.2	8.8	9.8
Ni	58	3.23	4.57	6.4	9.15	12.9	
Sn	118	4.61	6.52	9.22	13.0		
Hg	200	6.0	8.5	12.0			
U	238	6.55	9.26	13.1			

Nota: Valores para un radio de curvatura  $\rho = 33.9$  cm y carga  $q = 1$ .

Para el nitrógeno, que en este trabajo es de particular interés, se podrán deflectar iones con energías hasta de 0.77 MeV, 3.1 MeV y 6.9 MeV para  $q = 1$ ,  $q = 2$ ,  $q = 3$ , respectivamente. Dependiendo de la masa del ión que se maneje, se establece el campo magnético apropiado siendo necesario medir dicho campo con precisión.

Se conocen varios procedimientos para medir campos magnéticos uniformes. Uno de ellos es usar un embobinado entre los polos del deflector, sujeto al brazo de una balanza con una sensibilidad del orden de 0.1 mg.

Una vez calibrado el sistema, el embobinado requerirá del orden de 20 a 50 miliamperes para producir un campo contrario al campo entre polos, originándose una fuerza que determinará la balanza, y es proporcional al campo magnético entre los polos.

Otro procedimiento, más moderno y preciso es usar un flúxmetro de resonancia magnética nuclear, donde el campo estará dado por la siguiente relación:

$$B = \frac{\nu}{K} \dots\dots ( I.3,2 )$$

en donde K incluye la constante de Larmor ( Gerthsen, 1979 ) que involucra el movimiento de precesión nuclear  $\omega_l$  estudiado por especialistas, alrededor de la dirección del campo B que se desea medir. Mediante una bobina de barrido con una pequeña corriente alterna sobre el campo B ( KGauss ) se provoca el cambio cuántico en los giros de los núcleos midiendo la frecuencia  $\nu$  en MHz a la que ocurren, por medio de un osciloscopio.

Otra forma de medir el flujo magnético con menor precisión es aprovechando el efecto Hall, consistente en hacer pasar una corriente I a través de una cinta de material conductor de anchura b y espesor d y se encuentra en un campo magnético homogéneo B, cuyas líneas de fuerza atraviesan perpendicularmente como aparece en la Fig. I.3,5 ( Gerthsen, 1979 ). Sin la existencia del campo los puntos a y a', situados en posición contraria, se encuentran al mismo potencial. Un voltmetro conectado entre ellos no muestra desviación (  $U_H = 0$  ). Después de someterlo a un campo magnético se mide la tensión de Hall entre a y a' :

$$U_H = R_H \frac{I B}{d}$$

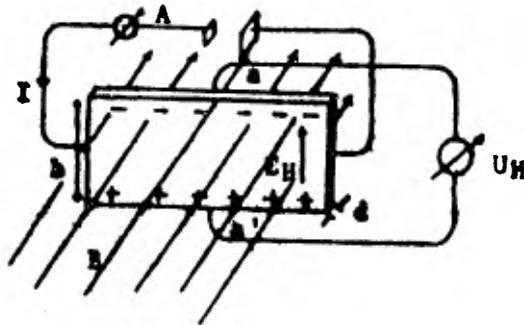
donde:  $R$  = constante de Hall

$$R_H = \frac{1}{ne}$$

$n$  = densidad numérica de los electrones

$e$  = carga del electrón

En el campo magnético los portadores de carga móviles experimentan una fuerza de Lorentz  $K = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , que desplazan los electrones hacia arriba y los posibles portadores positivos hacia abajo. Esta fuerza actúa hasta que la separación de cargas crea un campo transversal  $E_H$  suficientemente grande para que se alcance el equilibrio.



Principio del Efecto Hall. Fig. 1.3,5

Un campo magnético mayor producirá un potencial mayor de tal manera que calibrando la proporcionalidad entre campo magnético y potencial eléctrico, se tendrá un flúxmetro de regular precisión. Este método es comúnmente usado con semiconductores ( bismuto ), ya que en éstos el efecto Hall

se presenta especialmente con mayor intensidad .

Este tipo de flúxmetro es la alternativa adoptada para el laboratorio de I de I por su fácil uso ( no requiere de equipo especial ) y es de suficiente precisión.

#### I. 4. CAMARA DE BLANCOS

Es el sitio en el que se lleva a cabo el paso final del proceso de I de I.

Dentro de ésta, se coloca el elemento al cual se le implantaron los iones de un cierto gas previamente seleccionado, de acuerdo con las características que se desean obtener.

La función principal de la cámara de blancos es la de proveer el espacio y los mecanismos para exponer las muestras, unida a una línea de acceso evacuada por donde viaja el haz de proyectiles. El diseño de la cámara depende del tamaño de los mecanismos y de los materiales disponibles para su construcción, ya que éstos influirán en el posible nivel de vacío, el cual debe ser alto. Otros puntos importantes de considerar para el diseño en casos especiales son: lograr una adecuada orientación de la muestra; control de la temperatura de la misma; medir correctamente la dosis implantada, etc.

Desde luego que estas condiciones deben de ser versátiles dentro de los requerimientos para la investigación de diferentes procesos, mientras que para aplicaciones industriales definidas, el proceso se vuelve más repetitivo, ya que en este caso se busca procesar un alto número de muestras en el tiempo, pudiendo haber simplificaciones sin descuidar las características críticas de exposición.

El control de estos factores se logra mediante la intervención de elementos externos a la cámara de blancos, que ayudarán al proceso de la implantación. Estos elementos adicionales

les son: ( Singer, 1980 ).

Un integrador de corriente del haz de iones con el que debe medirse el número de iones por  $\text{cm}^2$  implantados ( dosis ).

Un supresor de electrones secundarios para evitar errores en la medida de la corriente del haz de iones.

Un bombeo continuo para mantener un alto vacío en la cámara, evitando así la contaminación del blanco y lograr una mayor limpieza en el proceso.

Un sistema de rejillas, para colimar el haz, previo a la implantación.

Un manipulador del blanco para exponer uniformemente las partes importantes ante el haz, o bien un mecanismo de barrido del haz que proporcione una implantación uniforme en todo el blanco.

Un deflector magnético descrito antes, para seleccionar la energía y masa del ión pesado.

Un condensador de vapores contaminantes cercanos al blanco por medio de una trampa fría. Estos vapores pueden producirse por la desgasificación de los materiales en la cámara o por el desprendimiento de otros elementos por colisiones o arrastre iónico.

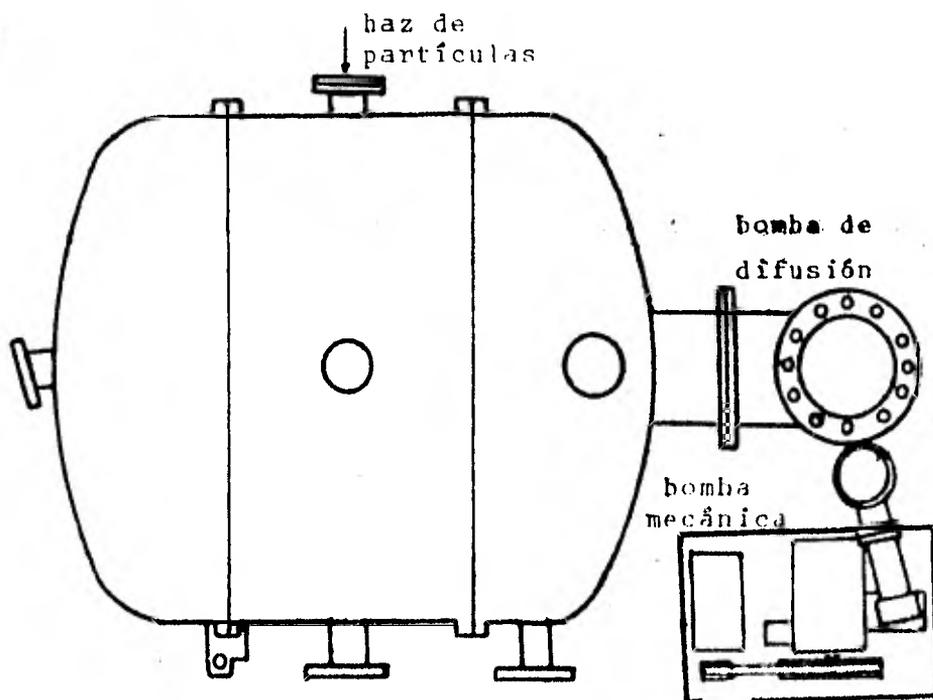
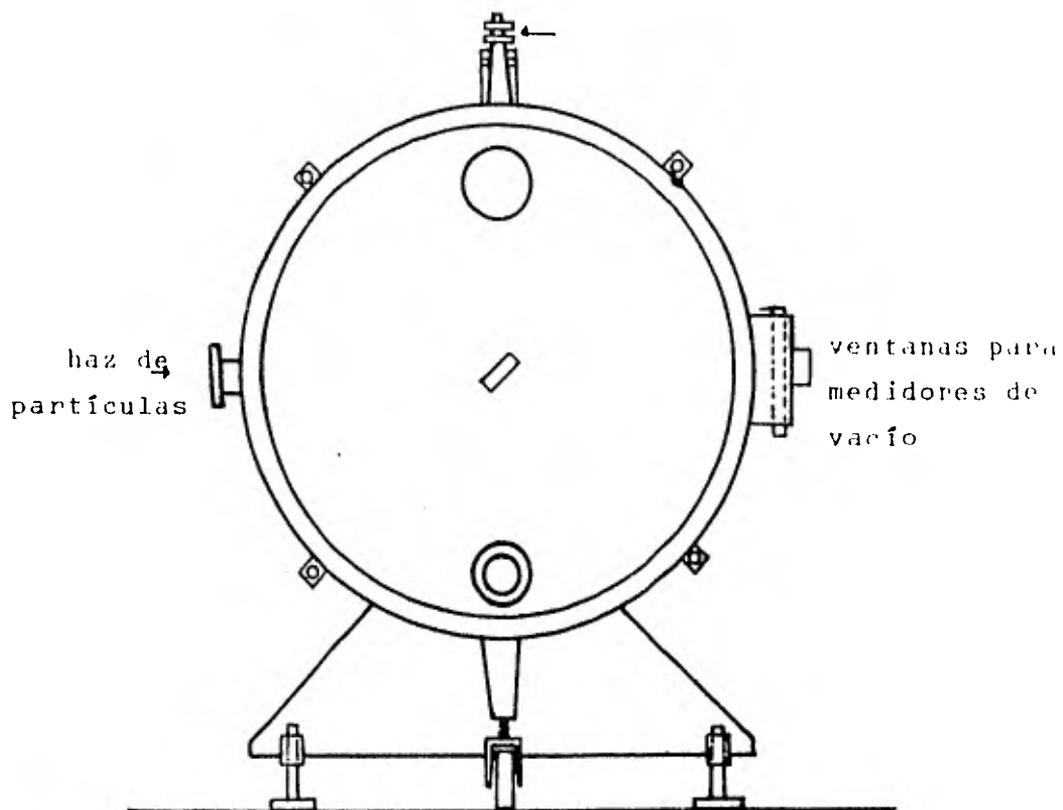
En ocasiones se requiere refrigerar al blanco; este puede ser un sistema de transferencia de calor para disipar la potencia depositada del haz de iones. Un punto importante es que la cámara debe de funcionar como una caja de Faraday, que aisle al sistema y que además esté a un potencial próximo de tierra para evitar alguna descarga considerable.

Lo más importante en el proceso de implantación, es el mantener el blanco libre de contaminación en su superficie, para obtener así los mejores resultados del mecanismo. Un caso de

contaminación es el ocasionado por la erosión iónica ( sputtering ), producido en las paredes de la cámara. Esto se debe a que partículas ionizadas llegan a golpear las paredes produciendo la emisión de partículas contaminantes secundarias las cuales llegan a alcanzar al blanco aunque con menor energía que la de los iones. Estos iones dispersos se deben a la reflectancia que sufren los proyectiles y otros elementos en el blanco, o también, al proyectarse un haz muy amplio sobre la muestra, emite iones que consecuentemente llegan a las paredes de la cámara.

La temperatura del blanco no puede medirse fácilmente debido al pobre contacto térmico entre las componentes, sobre todo en vacío. Freeman ha hecho cálculos de la temperatura del blanco como función de la potencia del haz disipado en el material.

En la Fig. I.4,1 se muestra la cámara de blancos que se ha elegido para el sistema de implantación; incluye el sistema de vacío de difusión y mecánico, así como ventanas para medidas de vacío, introducción de altos potenciales a la misma, conductores de corriente para hornos, etc.



Cámara de blancos mayor. 1.4,1

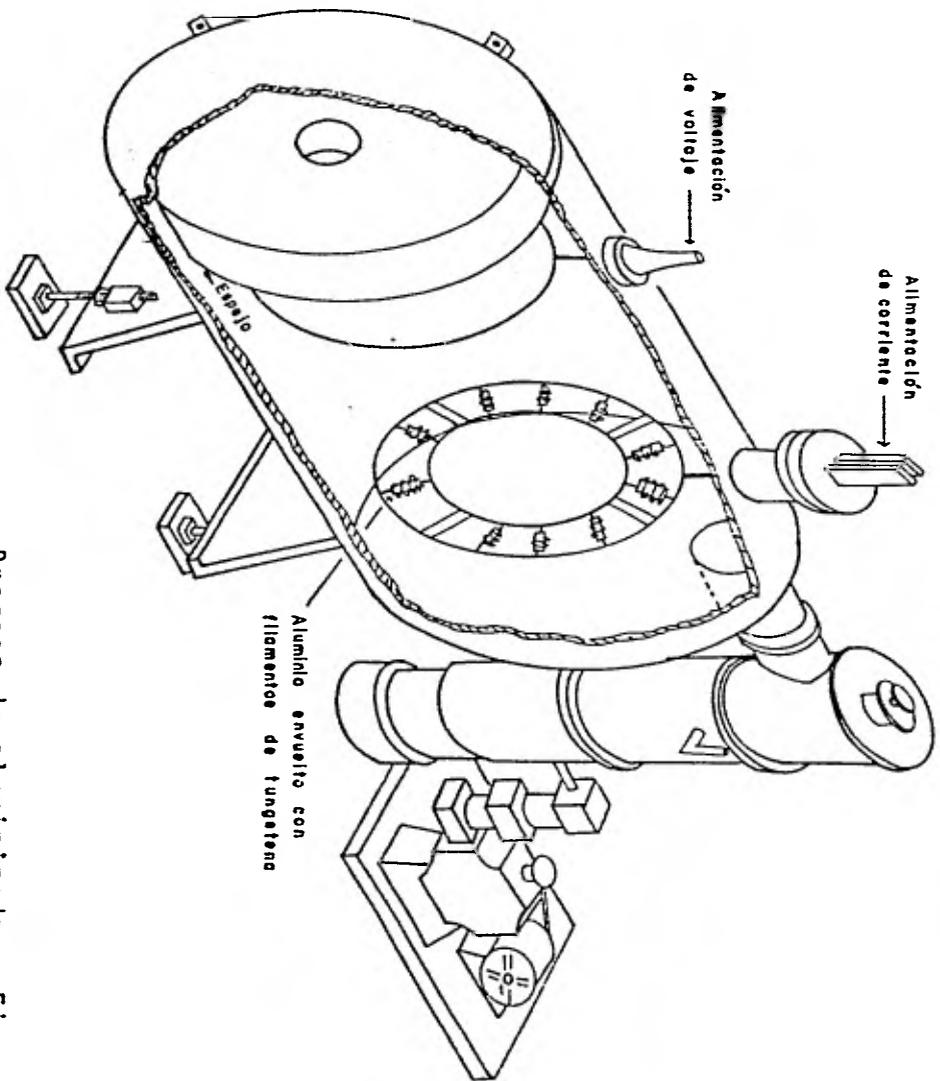
Una de las aplicaciones de esta cámara, fué la aluminización de los espejos telescópicos del Instituto de Astronomía de Tonantzintla y de la sociedad Astrónomica Mexicana, logrando obtener en estos muy buenos resultados de adherencia.

El proceso de aluminizado se inicia estableciendo dentro de la cámara de vacío la cual contiene los espejos a una presión de  $1 \times 10^{-2}$  mm Hg, una diferencia de potencial ( en este caso de 1000 a 3000 V y 400mA) a través de una fuente de voltaje, provocando de esta manera la ionización de las moléculas de aire que aún existen en el tanque. Los iones ( + ) producidos se dirigen a los espejos que están a potencial negativo realizando la erosión iónica en su superficie con la cual se logra hacer una limpieza y pulido superficial. El vacío se mejora paulatinamente a niveles de  $10^{-5}$  mm Hg llegando el momento en que el plasma se apaga.

Una vez hecho esto se desconecta la fuente de voltaje y mediante un transformador se comienza a aplicar corriente ( próxima a 300A), a unos filamentos de tungsteno, en los que previamente se colocan pedazos de aluminio por evaporar, ver Fig. I.4,2.

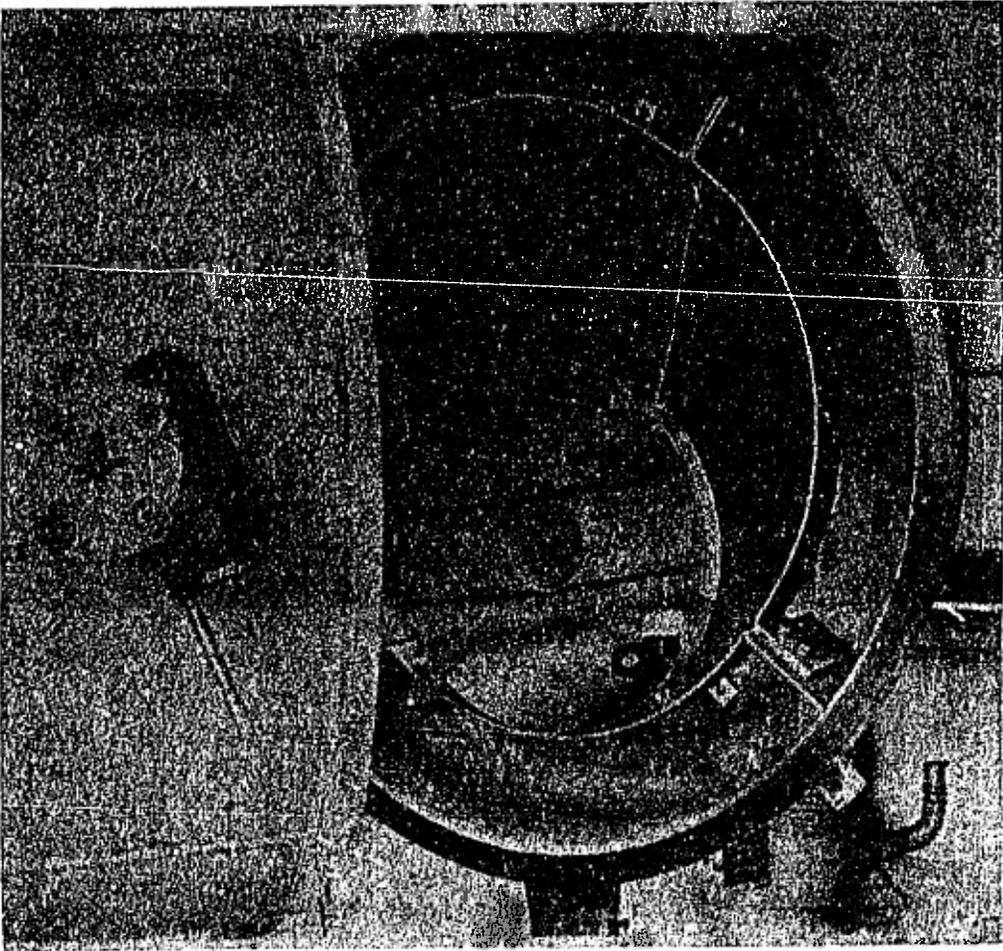
El tiempo de operación desde que se aplica la corriente hasta que se evapora el aluminio es de unos 5 minutos y el tiempo total de trabajo desde establecer el vacío inicial, efectuar la limpieza iónica, la evaporación y la extracción de los espejos es de unas 6 horas, dependiendo claro del tipo y tamaño de muestras. La Fig. I.4,3 muestra un ejemplo de un espejo ya aluminizado.

Otra de las aplicaciones de la cámara grande será la de realizar pruebas de tratamiento superficial por medio de otras técnicas diferentes a la implantación, tales como el recubrimiento iónico y la nitrogenación iónica, cuya descripción se



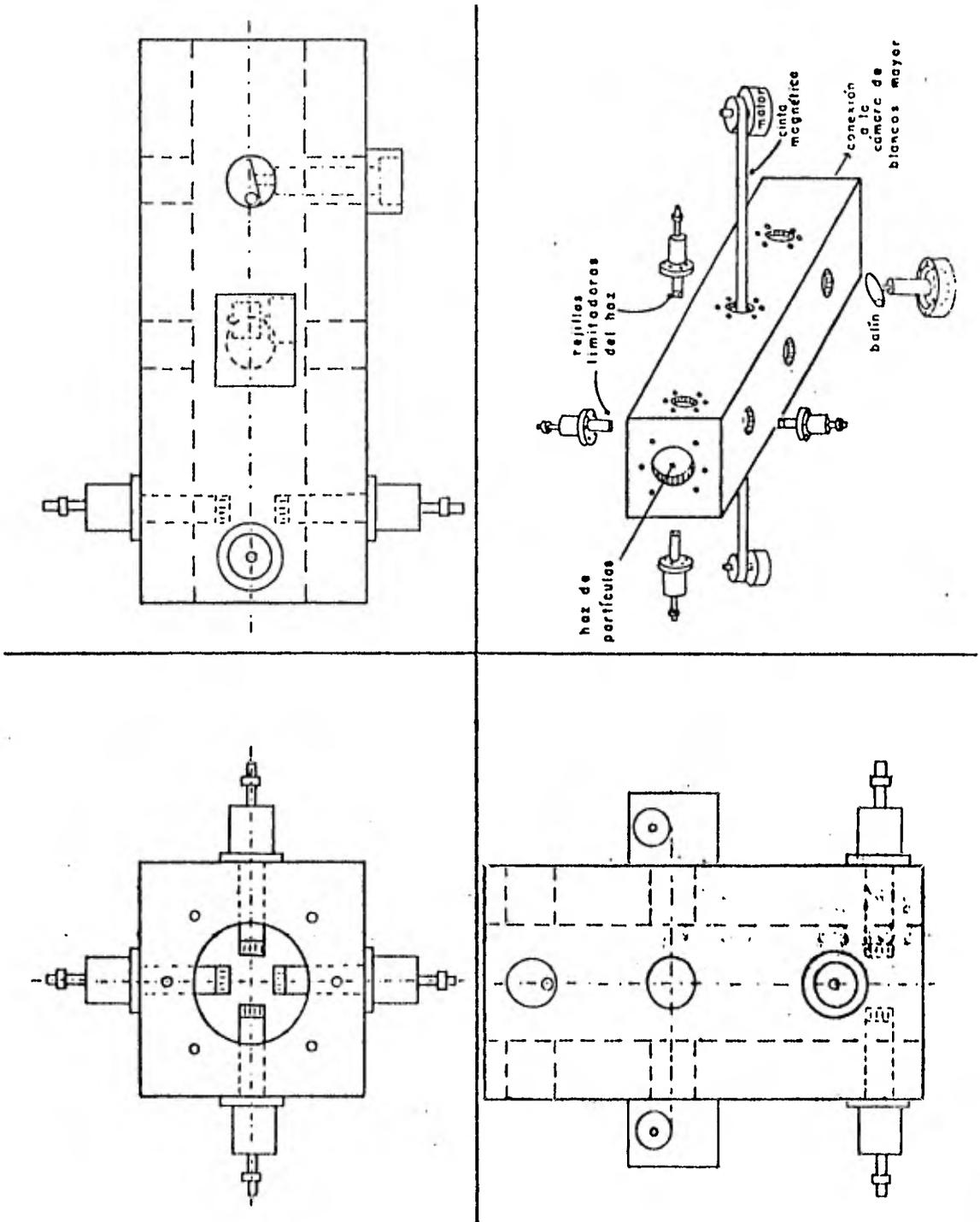
Proceso de aluminizado. Fig. 1.4,2

hará más tarde.



Espejo aluminizado. Fig. 1.4,3

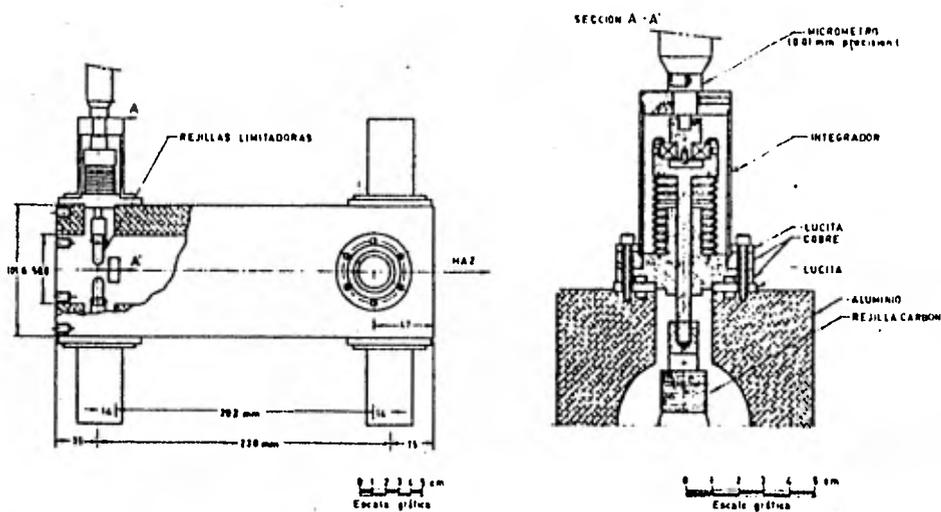
En este proyecto, antes de la cámara amplia necesaria para la aluminización de espejos de gran tamaño o piezas mayores, se ha pensado en desarrollar una cámara pequeña, con posibilidades de exponer varios tipos de muestras para la implantación como cintas magnéticas, cristales de silicio, etc., además de ventanas por las que se podrán realizar otros experimentos; esto se observa en la Fig. 1.4,4 en la que aparece un di-



Cámara de blancos pequeña. Fig. 1.4,4

seño esquemático de la misma.

Al inicio de ésta se aprecia un sistema de rejillas limitadoras del haz de proyectiles, mismas que se muestran en la Fig. 1.4,5 ( Mazari, 1973 ). Con respecto al sistema, éste es empleado con la finalidad de colimar el haz de proyectiles a un tamaño que sea compatible con la geometría del blanco ó con la zona en la cual se quiere hacer la implantación.



Sistema de rejillas limitadoras del haz de proyectiles. Fig. 1.4,5

Para el análisis de las superficies mismas y de la cantidad y profundidad de iones implantados en los materiales, se cuenta en el Instituto de Física con la ayuda del grupo de colisiones, dirigido por el Dr. Federico García Santibáñez. Dicho grupo recientemente a puesto en marcha un programa para el análisis de superficies por varias técnicas físicas, empleando el acelerador Van de Graaff de 0.7 MeV y la cámara multi-analítica.

## I.5 TECNICAS DEL ALTO VACIO

Para poder llevar a cabo algunos procesos, es necesario que éstos sean realizados a una presión menor que la atmosférica, como por ejemplo la fabricación de cinescópios y otros elementos.

De igual manera, procesos en los que el fenómeno de ionización es necesario, se requerirá del uso de presiones del orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-7}$  mm Hg. Tal es el caso de las técnicas de I de I, recubrimiento iónico y también de la evaporación al vacío, como el aluminizado.

Es por lo tanto importante describir aunque brevemente, el equipo usual para producir estos vacíos, así como la instrumentación para medirlos.

Antes de definir lo que es el vacío, se darán algunos conceptos relacionados con éste.

í) Presión de un gas: La presión de un gas es una característica de la acción de sus moléculas sobre las paredes del recipiente que lo contiene ó sobre cualquier cuerpo que se encuentre dentro del gas.

Esta se define como la fuerza que experimentan las paredes, dividido entre la unidad de área de la pared.

$$P = F/A \dots\dots ( 1 )$$

Dependiendo por lo tanto del número de moléculas que rebotan contra la pared, así como de la velocidad promedio con que chocan. Teniendo en cuenta estos conceptos:

$$P = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 \dots\dots ( 2 )$$

donde n- es el número de moléculas por unidad de volumen

m- es la masa de la molécula

$\bar{v}$ - velocidad promedio de la misma

Pero la presión al depender de su energía cinética, también depende de su temperatura, por lo que:

$$P = nKT \dots\dots ( 3 )$$

K- constante de Boltzmann

T- temperatura absoluta

A continuación se presentan las unidades de presión generalmente utilizadas.

En el sistema internacional se tiene el pascal ( Pa )

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Para presiones más grandes se usa el bar

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

Otra unidad muy empleada es la atmósfera física ( atm )

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm de Hg} = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 = 101.325 \text{ Pa} = 14.71 \text{ lb/cm}^2$$

Cuando se usan presiones bajas se tiene el Torr o mm de Hg

$$1 \text{ Torr} = 1/760 \text{ atm} = 133.332 \text{ Pa}$$

**Definición de Vacío:** Se dice que un recipiente se encuentra en vacío, cuando la presión en el mismo es inferior a la presión atmosférica exterior.

De la ecuación 2 se observa que si el número de moléculas en el recipiente disminuye, la presión en éste será menor, dando por resultado que la distancia de separación entre una y otra molécula sea mayor, permitiendo que una molécula recorra mayor distancia antes de chocar con otra. A la distancia recorrida se le conoce con el nombre de trayectoria libre media,

la cual es inversamente proporcional a la presión.

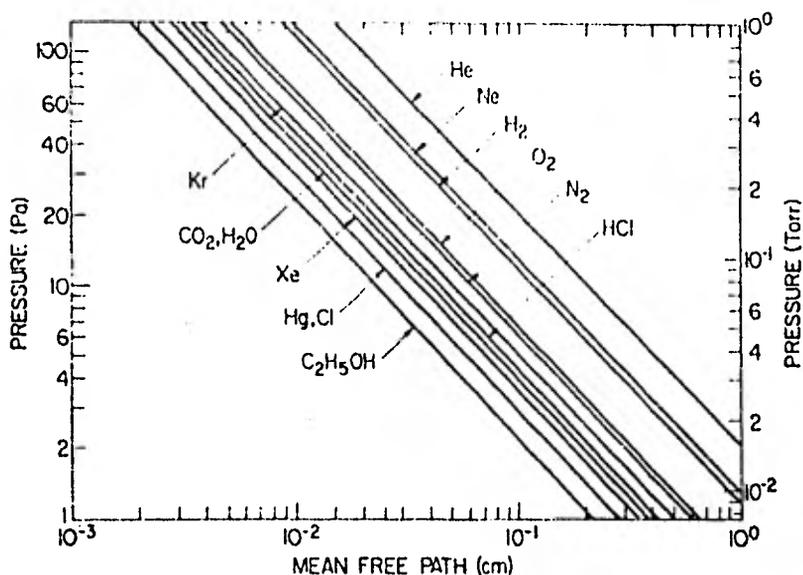
$$\alpha = 1/P$$

Por lo tanto, en un volumen se tendrá alto vacío, si la trayectoria libre media de sus moléculas es mayor que las dimensiones del recipiente. Entonces el vacío se logra al extraer las moléculas que contenga un recipiente y esto se hace con un equipo especial.

Se presenta en seguida una gráfica y tabla sobre las propiedades de gases en función de la presión ( O'Hanlon, 1980 ).

TABLA I.5,1 Propiedades de Gases.

Gas	Symbol	MW <sup>a</sup>	Molecular Diameter <sup>b</sup> (nm)	Average Velocity <sup>c</sup> (m·s <sup>-1</sup> )	Thermal Cond. <sup>d</sup> (mJ·s <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Dynamic Viscosity <sup>e</sup> (μPa·s)	Diffusion in Air <sup>f</sup> (μm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
Helium	He	4.003	0.218	1197.0	142.0	18.6	58.12
Neon	Ne	20.183	0.259	533.0	45.5	29.73	27.63
Argon	Ar	39.948	0.364	379.0	16.6	20.96	17.09
Krypton	Kr	83.8	0.416	262.0	6.81 <sup>g</sup>	23.27	13.17
Xenon	Xe	131.3	0.485	209.0	4.50 <sup>h</sup>	21.9	10.60
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.016	0.274	1687.0	173.0	8.35	63.4 <sup>g</sup>
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0134	0.375	453.0	24.0	16.58	18.02
Air		28.966	0.372	445.0	24.0	17.08	18.01
Oxygen	O <sub>2</sub>	31.998	0.361	424.0	24.5	18.9	17.8 <sup>g</sup>
Hydrogen chloride	HCl	36.46	0.446	397.0	12.76	14.25 <sup>f</sup>	14.11
Water vapor	H <sub>2</sub> O	18.0153	0.46	564.0	24.1 <sup>h</sup>	12.55 <sup>h</sup>	23.9 <sup>g</sup>
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	34.08	0.47 <sup>i</sup>	412.0	12.9	11.66	14.62 <sup>j</sup>
Nitric oxide	NO	30.01	0.372 <sup>j</sup>	437.0	23.8	17.8	19.3 <sup>j</sup>
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	44.01	0.47 <sup>i</sup>	361.0	15.2	13.5	13.84 <sup>j</sup>
Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.03	0.443	581.0	21.9	9.18	17.44
Carbon monoxide	CO	28.01	0.312 <sup>g</sup>	453.0	23.0	16.6	21.49
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.01	0.459	361.0	14.58	13.9	13.9 <sup>g</sup>
Methane	CH <sub>4</sub>	16.4	0.414	592.0	30.6	10.26	18.98
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.05	0.495	452.0	17.7	9.07	13.37
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.07	0.53	437.0	16.8	8.48	12.14



Camino libre medio de gases en función de la presión. Fig. 1.5,1

ii) Velocidad de bombeo ( S )

La velocidad de bombeo es la velocidad con que se eva - cúa un cierto recipiente, sin tomar en cuenta las pérdidas. Su cálculo se puede realizar de dos formas:

a) Si se supone  $P = \text{cte}$ , se define como el cálculo de volumen en la unidad de tiempo.

$$S = dV/dt$$

b) Si se supone  $V = \text{cte}$

$$S = V \text{Ln} ( P_1/P_2 ) / t_2 - t_1$$

Ahora la velocidad de bombeo real, es igual a la velo - cidad de bombeo S, menos las pérdidas. Estas generalmente son ocasionadas por:

- La resistencia que presentan los conductos por los que se hace la evacuación, la cual es directamente proporcional

al radio del tubo.

- La desgasificación de los materiales tanto de los que se encuentran dentro de la cámara de vacío como los de esta misma, entendiéndose por desgasificación a la emanación gaseosa de las superficies de los cuerpos. Esto puede hacer que tenga que incrementarse la velocidad de bombeo de 10 a 100 veces.
- Otro factor, es la vaporización de los materiales la cual consiste en la transferencia neta de moléculas del sólido al vapor dependiendo esto de las características físicas de los materiales arriba mencionados.

Otra observación importante, es el que la velocidad de bombeo es función de la presión existente dentro del recipiente por evacuar. En efecto a mayor presión ( 760 mm Hg ) será mayor la cantidad de moléculas por extraer, que cuando se tenga una presión mucho menor (  $10^{-6}$  mm Hg ) .

Por lo tanto la velocidad de bombeo de una bomba de vacío no se caracteriza por ser un número fijo.

Bombas de Vacío ( Guthrie , 1963 ) .

Los elementos capaces de extraer las moléculas de gas de un recipiente, se clasifican en:

- i) Bombas de Pre-vacío: Son las de enrarecimiento preventivo. las cuales pueden evacuar el gas desde la presión atmosférica, hasta una presión de  $10^{-3}$  mm Hg.
- ii) Bombas de vacío elevado: Son las que requieren de una presión menor que la atmosférica para poder comenzar a trabajar, y alcanzar presiones comprendidas entre  $10^{-3}$  y  $10^{-10}$  mm Hg.

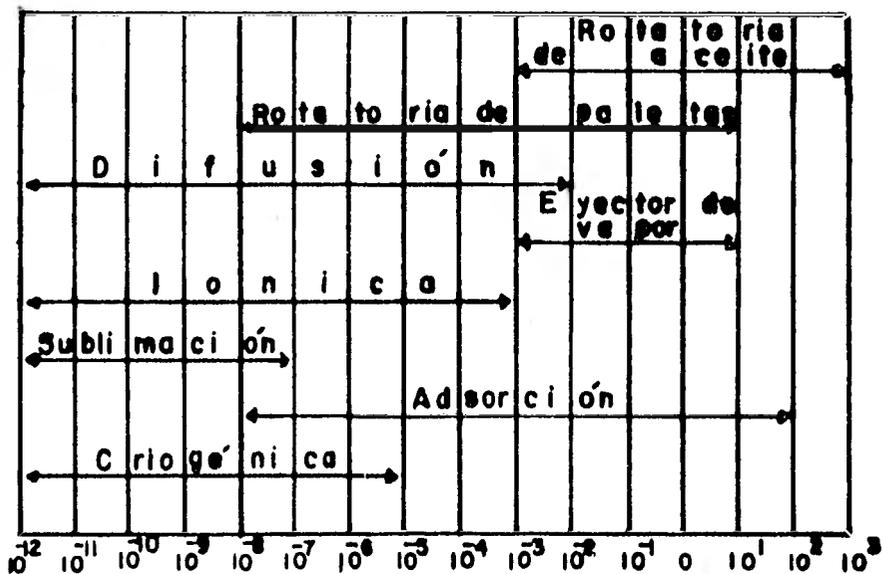
En el primer grupo pueden mencionarse a las bombas mecánicas y de absorción.

Las bombas de difusión, iónica, sublimación y criogénicas son bombas que no tienen manera de expulsar los gases directamente a la atmósfera, por lo que requieren vacíos de respaldo del orden de  $10^{-2}$  mm Hg, logrando de esta manera intervalos de presiones que corresponden al inciso ii .

Existe otra clasificación en función de los diferentes grados de vacío que pueden alcanzarse, estos son los siguientes.

Bajo Vacío	de 760 a $10^{-3}$ mm Hg
Vacío Medio	de $10^{-3}$ a $10^{-5}$ "
Alto Vacío	de $10^{-5}$ a $10^{-8}$ "
Ultra Alto Vacío	de $10^{-8}$ a $10^{-12}$ "
Extra Ultra Alto Vacío	de $10^{-12}$ en adelante

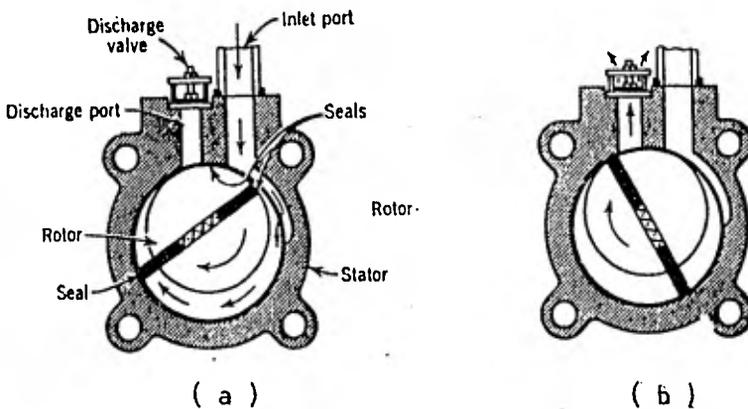
En la siguiente figura se muestran los intervalos de operación de las bombas más usuales.



Intervalos de presión de diferentes bombas de vacío. Fig. 1.5,2

i) Bombas de Pre-Vacío: Aquí sólo se describirán los tipos de bombas más usuales para generar los vacíos que se requieren en un determinado sistema. Para mayor información sobre las técnicas de vacío, puede consultarse por ejemplo en las referencias ( Guthrie, 1963; O' Hanlon, 1980 ).

Existen muchos tipos de estas bombas, pero la más común es la mecánica rotatoria de paletas en aceite, la cual se muestra esquemáticamente en la Fig. 1.5,3 .

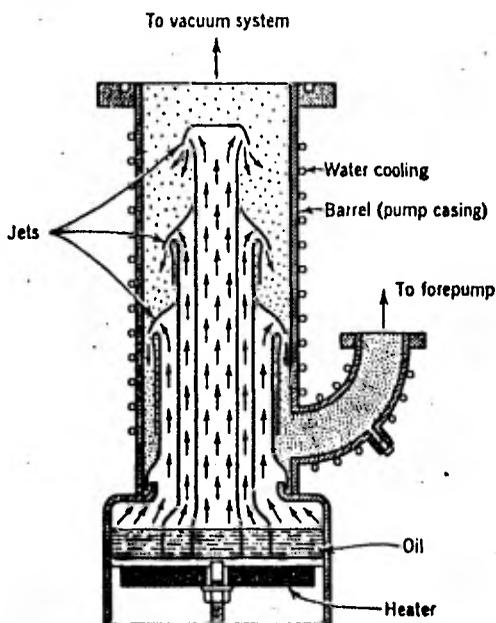


Bomba mecánica rotatoria de paletas en aceite. Fig. 1.5,3

Funcionamiento: En esta bomba, la porción del volumen de ai re extraído del sistema a evacuar, pasa a través de una tubuladura de entrada la cual conduce al interior de una camisa cilíndrica. Aquí se encuentra girando un rotor excéntrico de tal modo que siempre se ajusta compactamente a la parte superior del interior de la camisa, ver Fig. 1.5,3a . 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 una válvula de descarga correspondiente al tubo de salida, ver Fig. 1.5,3b .

ii) Bombas de vacío elevado: En este tipo de bombas, normalmente no se tienen partes mecánicas móviles. De éstas, la más usada es la de difusión y cuyo funcionamiento se da a continuación.

Bomba de Difusión: Su funcionamiento se basa en que las moléculas del gas que se evacúan son arrastradas por un chorro de vapor, corrientemente mercurio o aceite. En la Fig. I.5,4 se muestra un esquema de este tipo de bomba.



Bomba de Difusión. Fig. I.5,4

En el fondo de la vasija corrientemente metálico, se encuentra el líquido por evaporar ( Oil ), la evaporación se asegura con un calentador eléctrico ( Heater ). El volumen a evacuar se une en el extremo superior de la bomba, y su tubu ladura de escape, se une con el tubo de entrada de la bomba de vacío preliminar ( To forepump ) .

Después de que la bomba de vacío ha creado la presión

de prevacío necesaria en la bomba difusora y en el volumen por evacuar, se conecta el calentador y el líquido comienza a evaporarse intensamente.

El vapor se eleva por los conductos colocados sobre el líquido, expulsándose a gran velocidad por la tobera ( Jets ) hacia la pared refrigerada, donde se condensan las moléculas de vapor escurriendo nuevamente hacia abajo, al fondo de la vasija. Las paredes de la vasija están rodeadas por una camisa, en cuyo interior circula un enfriador, generalmente agua o aire en sistemas que cuentan con aletas. El calentador y el refrigerador de la bomba, están dispuestos de tal forma que aseguran la circulación continua de vapor.

Las moléculas de gas de la región por evacuar que vienen de la zona superior, son arrastradas por el chorro que expulsa la tobera y trasladadas a la parte inferior de la bomba, donde se acercan a la tubuladura para ser expulsadas a la atmósfera por la bomba de vacío preliminar.

La función fundamental del chorro de vapor, se reduce a entregar parte de su impulso ( cantidad de movimiento ) a las moléculas del gas que se evacúa, para dirigir las hacia el tubo de escape.

La presión del gas a la salida de la bomba de vacío elevado es aproximadamente de  $10^{-2}$  mm Hg, así mismo la presión mínima que puede alcanzarse en un recipiente que es evacuado por una bomba difusora, queda totalmente determinado por la tensión de vapor del líquido empleado, de los materiales y de la limpieza del sistema.

Por esto, como líquido de trabajo para las bombas de vacío elevado, se elige un aceite que tenga una muy baja tensión de vapor.

Las bombas de difusión de mercurio o de aceite difieren en el tipo de material de construcción, esto es porque el mercurio tiende a amalgamarse con varios metales no-ferrosos y aleaciones tales como cobre y latón, mientras que las bombas de difusión de aceite no presenta este problema ya que resulta inerte a estos materiales.

A continuación se presentan las principales ventajas y desventajas tanto del aceite como del mercurio:

**Aceites especiales:** Es un elemento que es muy útil para trabajar a bajas presiones de vapor (  $10^{-7}$  mm Hg ), no son tóxicos y presenta un buen comportamiento al estar en contacto con diversos materiales usados en sistemas en contacto con diversos materiales usados en sistemas de vacío.

La desventaja que presenta es que, debido a los componentes químicos que lo construyen, puede romperse molecularmente al estar sujetos a altas temperaturas, descargas eléctricas y al ser expuestos al aire cuando está caliente.

**Mercurio:** Este al contrario del aceite, no se descompone al estar a altas temperaturas ni al sufrir alguna descarga eléctrica y puede ser enfriado rápidamente.

Pero sus desventajas son que presenta una alta presión de vapor a temperatura ambiente, es tóxico y puede oxidarse si se expone al aire cuando está caliente, además de que puede contaminarse fácilmente.

Por último los factores principales que afectan el funcionamiento de cualquier bomba de vapor, son el tipo de fluido a bombear y el calor interior en el calentador.

Dentro de un sistema de vacío además de las bombas utilizadas para remover gases, existen otros elementos, los cuales pueden realizar la misma función, sólo que por absorción;

esto es debido a que reaccionan químicamente con ellos formando uniones sólidas, las que posteriormente serán extraídas por las bombas. Este elemento recibe el nombre de absorbedor ( getters ), en donde un ejemplo de ellos es el titanio. Los absorbedores se usan principalmente en sistemas de vacío estático; tal es el caso de los tubos electrónicos.

Para realizar altos vacíos dentro de un sistema, existen además de las bombas de difusión de aceite o de mercurio otros tipos que emplean otros métodos, alcanzan presiones de hasta  $10^{-12}$  mm Hg. Estas bombas son: bomba por ionización y absorción; bombas que usan ionización o erosión iónica; bombas criogénicas; bombas turbo-moleculares de muy alta velocidad.

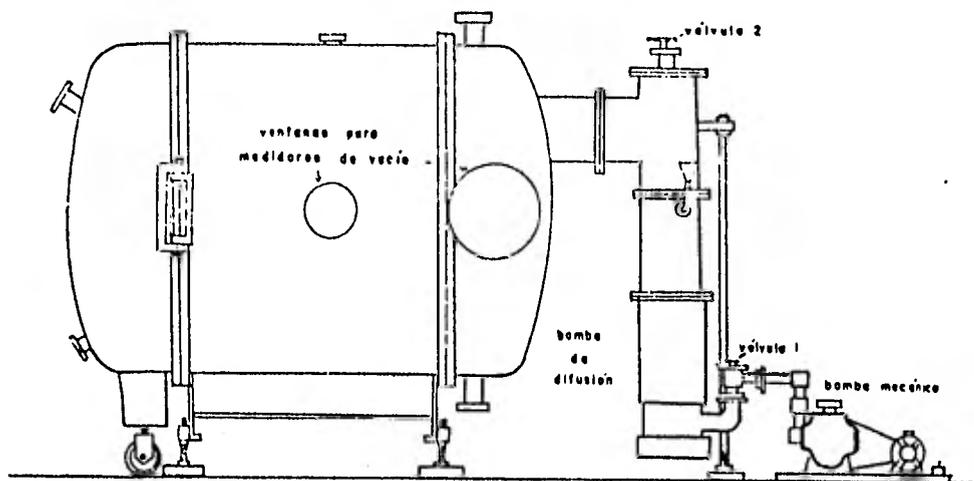
Un sistema de vacío no solo cuenta con bombas para extraer el aire o gas contenido en un recipiente, sino que requiere de otros elementos que permitan el control de la operación y el conocimiento de las presiones alcanzadas, como son, válvulas, medidores de presión etc.

#### Sistemas de Vacío.

Existen diferentes tipos de sistemas de vacío, aunque éstos pueden tener varios arreglos, dependiendo del tipo de bombas que empleen y de otros elementos que intervienen en el sistema.

Aquí sólo se mostrará, el sistema empleado en el laboratorio que nos ocupa, el cual se ve en la Fig. I.5,5 .

Los componentes más importantes en un sistema de vacío, son el recipiente por evacuar, ( en este caso se trata de un tanque de  $1.7 \text{ m}^3$  de capacidad ) y las bombas por utilizar , una bomba rotatoria y una bomba difusora de aceite, contándose además con una trampa de nitrógeno líquido.



Sistema de Vacío empleado en el laboratorio de I de I. Fig. 1.5,5

Este sistema cuenta con dos válvulas correspondientes, una a la bomba rotatoria y otra a la de difusión.

Al iniciar el proceso de evacuación del tanque, la válvula 1 es abierta; al llegar a una presión aproximada de  $10^{-2}$  mm Hg, se abre la válvula 2 con la que se procede a realizar un mejor vacío en el tanque.

Se cuenta además con ventanas para colocar medidores de vacío, como son los termopares, medidores de ionización y otros.

Un sistema de vacío puede ser usado para diferentes aplicaciones, por lo que la exacta naturaleza del mismo, dependerá de éstas.

El sistema mostrado ha sido utilizado para la realización del aluminizado de espejos, pruebas de plateado iónico sobre balines y también servirá para realizar la implantación de iones.

Otro elemento importante para cualquier sistema de vacío, son los medidores de presión, ya que con éstos se tiene un conocimiento de la presión existente en el sistema.

Existen varios tipos de indicadores de presión y vacío comerciales muy útiles, para los distintos intervalos de presión: En técnicas de vacío debe poderse cubrir desde la presión atmosférica hasta  $10^{-12}$  mm Hg .

A bajas presiones algunas propiedades específicas de gases y vapores, como es la conductividad térmica, son usadas como base para variar los tipos de indicadores. De la misma manera, presiones mucho menores son medidas por ionización de gases.

Los indicadores de vacío son calibrados generalmente en unidades de micras o milímetros de mercurio. De los diferentes tipos existentes se pueden resumir los siguientes:

- Indicador Hidrostático: Este depende de la fuerza proyectada por el gas; ejemplo. manómetros de aceite y mercurio, indicador McLeod, Bourdon e indicador diafragma.
- Indicador de conductividad térmica: Depende del cambio eléctrico de una unión bimetalica. La cantidad de calor de la unión térmica, depende de la propiedad del gas, un ejemplo de estos son los Pirani y Termopar.
- Indicador de Viscosidad: Depende del factor de la viscosidad del gas, el cual cambia con la presión. Un ejemplo es el indicador de Langmuir.
- Indicador Radiomedidor: Depende del factor que es el movimiento rápido de las moléculas lentas. Un ejemplo es el medidor Knudsen.
- Indicador de Ionización: Este depende de la medición de la corriente eléctrica resultante de la ionización del gas. Los tipos más comunes son: a- Indicador de ionización

termoiónico.

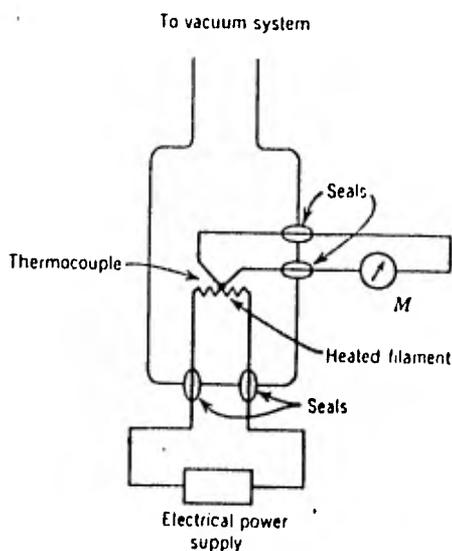
b- Indicador de cátodo frío ( Penning o Philips ).

c- Indicador usando una fuente radioactiva ( alfatrón ).

Existen todavía muchos tipos más de indicadores de vacío, los cuales se desarrollan en base a extender su intervalo de bajas presiones. A continuación se presenta una breve descripción de los medidores con los que se cuenta en el sistema de vacío de la figura anterior.

i) Indicador termopar:

Su funcionamiento se basa en medir la corriente generada en la soldadura de dos metales calientes. El proceso consiste en calentar un alambre y medir la corriente o el voltaje producido en el termopar, el cual depende de la temperatura. En la Fig. I.5,6 se puede ver este tipo de indicador.



Indicador Termopar. Fig. I.5,6

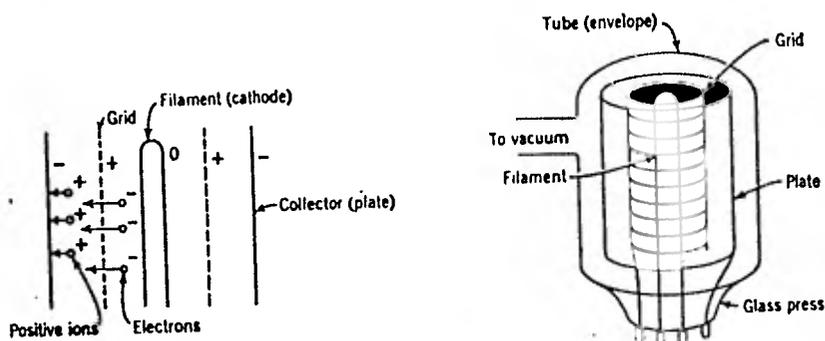
Como la temperatura del alambre caliente cambia con la presión, la temperatura del termopar cambiará también. La variación de la corriente resultante es medida en un micro-am

perímetro de baja resistencia térmica, calibrado contra un medidor absoluto McLeod en unidades de presión.

Unos cuantos volts serán necesarios para que opere el indicador; la corriente indicada será de sólo unos micro - amperes.

ii) Indicador de ionización termoiónica.

Su principio de operación se basa en la ionización de los átomos o moléculas del gas residual, cuya presión está sometida a medición por medio de electrones acelerados en un cierto campo eléctrico. En la Fig. I.5,7 se ilustra este tipo de medidor.



Medidor de ionización termoiónica. Fig. I.5,7

En éste aparecen tres electrodos; filamento, rejilla y colector, colocados en un tubo que se conecta al sistema de vacío.

El filamento se calienta por medio de una corriente eléctrica, lo que hará que éste emita electrones; 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 de gas en el tubo y pro-

duciendo una corriente proporcional a su número o a la presión. Esto ocurre sólo cuando la presión es baja, de tal manera que los electrones no tengan muchas colisiones en la región entre el filamento y la rejilla, bajo una estructura de alambre abierto. Los iones formados son recolectados por el elemento colector y la corriente registrada en un medidor apropiado.

Este indicador es muy delicado pero bueno a bajas presiones; presenta algunos problemas como es el tiempo de vida corto del filamento, por la presencia de oxígeno en el aire, puede sufrir alguna avería eléctrica en un descuido y es necesario desgasificarlo en ocasiones.

## CAPITULO II

### DESARROLLO DEL LABORATORIO DE IMPLANTACION DE IONES

A finales de 1980 fué inaugurado en el Instituto de Física un nuevo edificio, el cual debía albergar al grupo experimental de colisiones. Un salón ubicado en la planta baja del mismo que tiene dimensiones: 11.19 m. de largo por 5.15 m. de ancho y 3.13 m. de altura, fué destinado para iniciar un nuevo proyecto denominado: Implantación de Iones pesados. El primer paso que se debía dar era el diseño y la construcción del equipo necesario para llevar a cabo los experimentos, tratándose de aprovechar al máximo los recursos materiales, humanos y experiencia existentes en el Instituto.

Uno de los objetivos de esta tesis fué precisamente el diseño de este laboratorio, con la idea de diseñar y tratar de construir en México el mayor número de sus componentes.

## II.1 DISTRIBUCIÓN DEL LABORATORIO

En la Fig. II.1,1, se muestra una vista en planta del laboratorio de I de I, en la cual se puede observar cada una de las componentes del equipo de implantación. En primer lugar se tiene una fuente de iones tipo Dawton, seguidas de un sistema de lentes Einzel, encargadas de enfocar al haz de partículas, momentos antes de ser alimentadas a un acelerador de corriente continua, que se encuentra colocado en seguida. Una línea de bombardeo al vacío es empleada después para transportar al haz de partículas hacia un imán deflector de  $90^\circ$  que se encuentra colocado a 1.7m. de distancia de la unidad aceleradora.

Un segundo tramo de línea de bombardeo en seguida del deflector es empleado para transportar el haz de partículas ya seleccionadas hacia la cámara de blancos donde se llevará a cabo el proceso de implantación.

El haz de proyectiles se hará incidir en alto vacío en la cámara de blancos 1 de uso versátil ó en la cámara de blancos 2 que es usada para cuerpos a implantar de regular tamaño. Además de este equipo, existen componentes auxiliares como son las fuentes de alimentación de voltaje y corriente empleadas en la fuente de iones y para el imán deflector, respectivamente, así como los sistemas auxiliares de alto vacío.

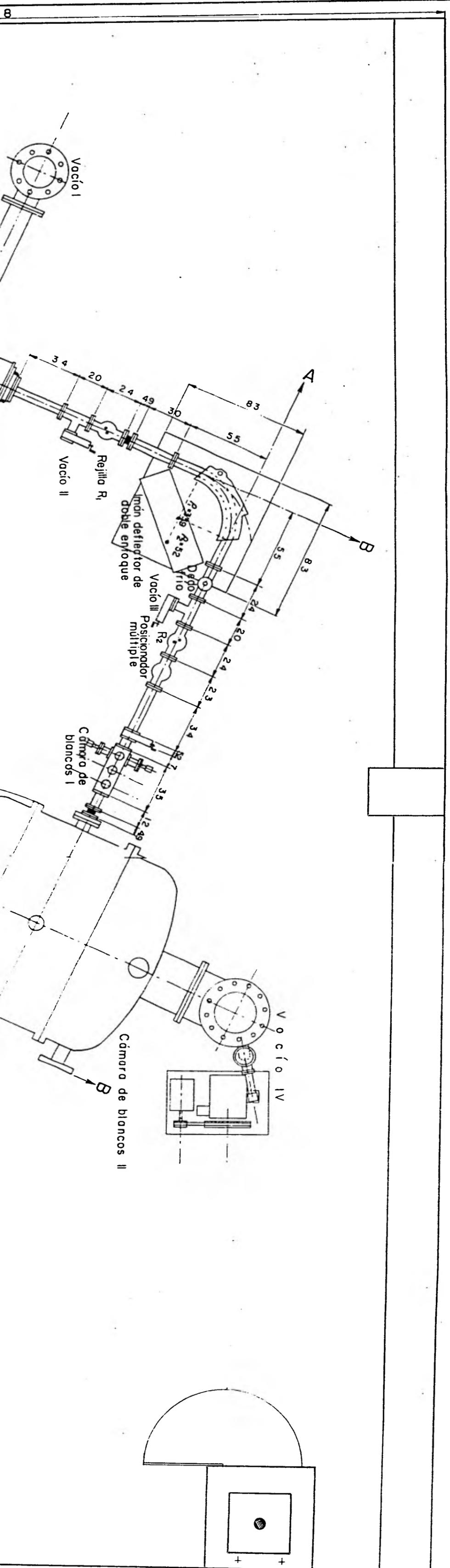
En la Fig. II.1,2 aparece un alzado del equipo, que ofrece las alturas reales, a la que va a estar colocada la línea de bombardeo, las cuales han servido para diseñar las mesas de soporte, así como los soportes de la línea y los sistemas de vacío.

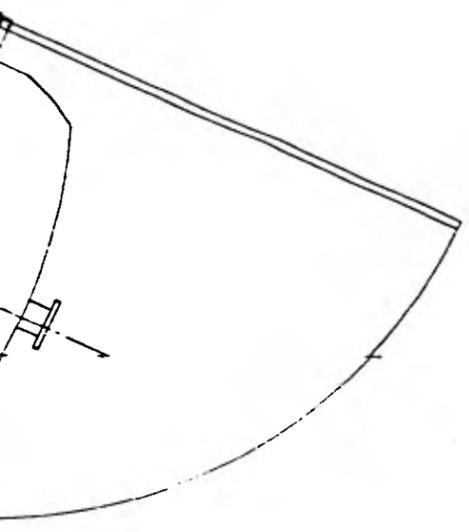
Algo muy importante, es la instalación de agua de enfriamiento que se necesita para las bombas de difusión y el imán,

así como la alimentación de corriente para las diferentes fuentes y equipo auxiliar, cuyo diseño detallado puede referirse a los planos que se encuentran en el laboratorio mismo.

# LABORATORIO DE IMPLANTACION DE IONES PESADOS

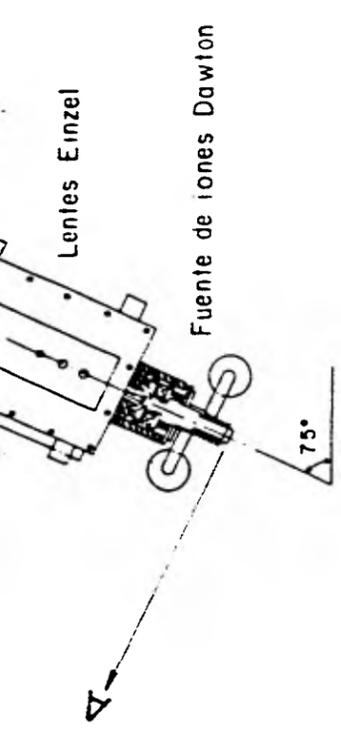
I.F.U.N.A.M.





tablero de fuerza

Acot: cm



Lentes Einzel

Fuente de iones Dawton

75°

1060

Esc: 1:10  
Acot: cm.

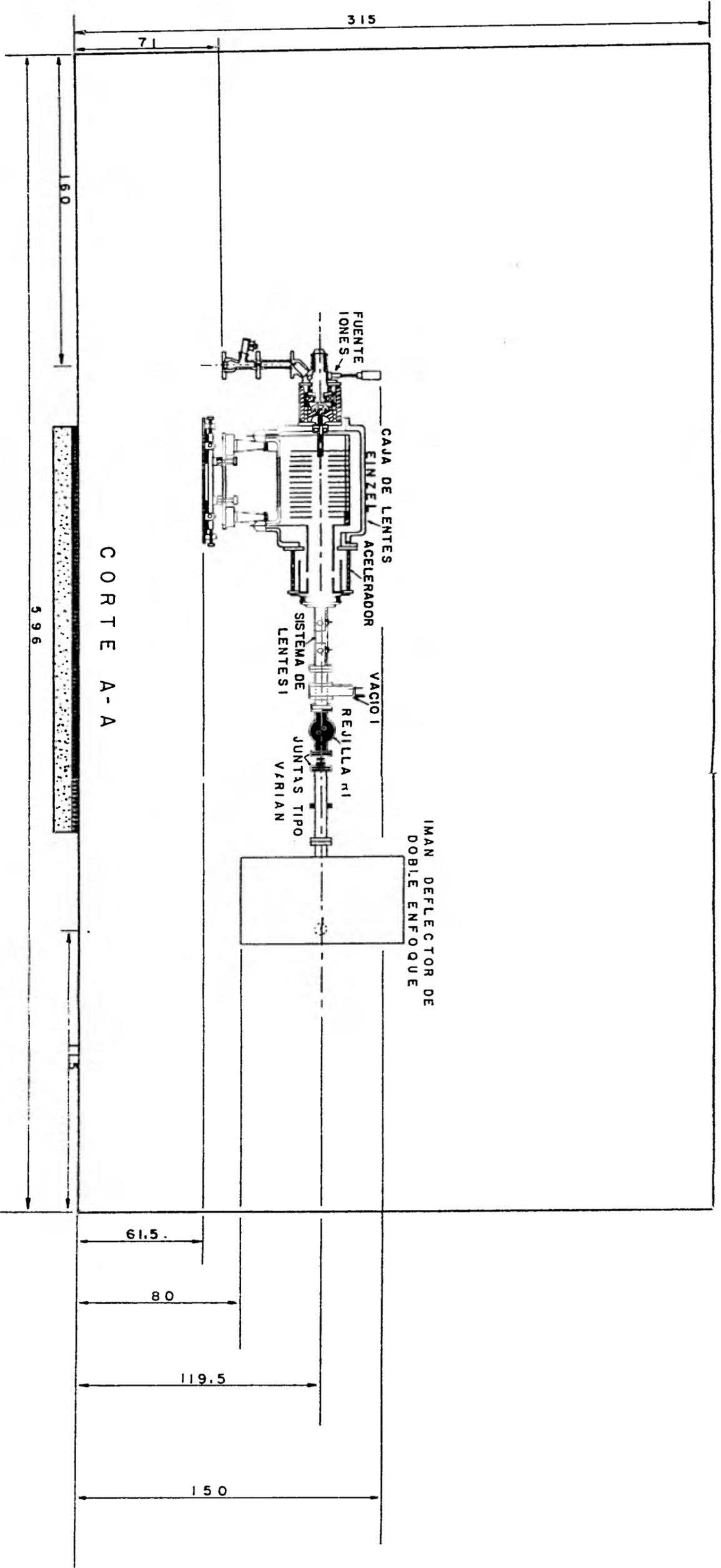


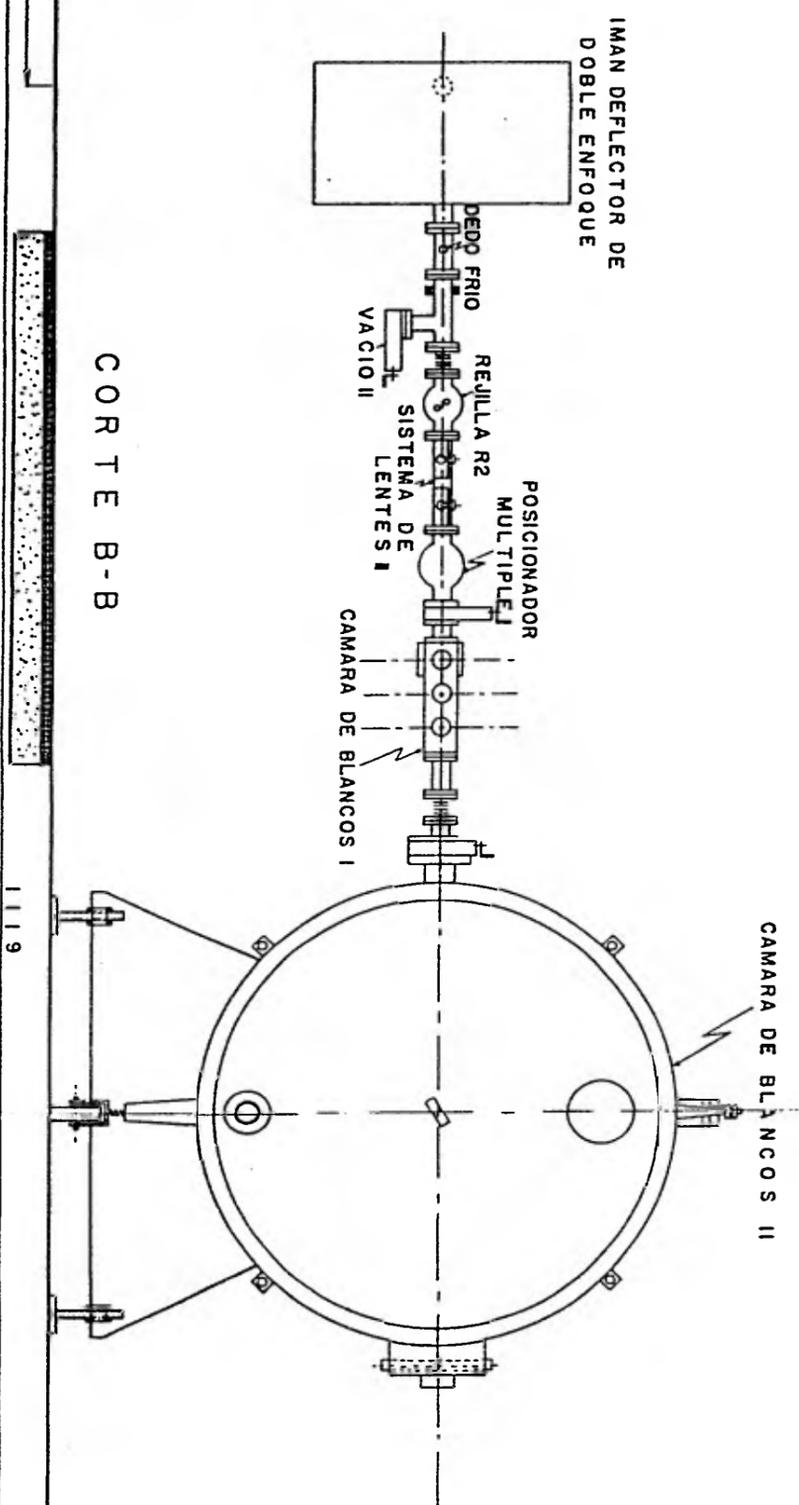
	SOLICITO:	FABRICO:	ORDEN:
PLANO PROYECTO DISEÑO DIBUJO FECHA Sept 28 - 1963			

Vista de planta del laboratorio  
de I. de I. Fig. II, I, I

# LABORATORIO DE IMPLEMENTACION DE IONES PESADOS

I. F. U. N. A. M.





Acot: cm.  
Escala: 1:10

Corte transversal del lab.  
de I. de I. Fig. II, 1, 2

	SOLICITO: _____	FABRICAR: _____	PLANO: _____
	ORDEN: _____	PROYECTO: _____	DISEÑO: _____
		FECHA: 12-X-1981	

## II.2 DISEÑO DE COMPONENTES PRINCIPALES

Uno de los componentes principales del sistema es el equipo formado por la fuente de iones Dawton, la caja de lentes Einzel y el tubo acelerador, los cuales fuerpn donados por el departamento de física nuclear de la Universidad de Oxford, Inglaterra, al IFUNAM. El diseño de este equipo aparece en la Fig. II.2,1 , cuyos principios de funcionamiento fueron descritos anteriormente. Cabe recalcar que este equipo era usado en la Universidad de Oxford como alimetador de un ciclotrón ( Menchaca, 1980 ).

Para el tubo acelerador, es necesario desarrollar una fuente de voltaje variable entre 10 y 200 KV con una variación de  $\pm 0.5\%$ , trabajo que ha sido propuesto al centro de Instrumentos de la U.N.A.M. , con la mira de desarrollar en su totalidad una tecnología propia en el país en este campo.

Otra componente principal del sistema es el imán deflector de  $90^\circ$  el cual era empleado a la salida del acelerador Dinamitrón cuando en él aceleraban partículas positivas. Para la alimentación de esta unidad hubo necesidad de adquirir una fuente de gran corriente ( 500 A ), y muy alta estabilidad, como consecuencia de los requerimientos de un campo magnético muy estable, dado que las variaciones del mismo influyen grandemente en la trayectoria de las partículas, tal como se explicó en el punto I.3 .

Se trata de una fuente ALPHA, cuyas características son las siguientes:

Entrada:	240/480	V.A.C	3 fases
	50/60	Hz	21 KVA
Salida:	500 A	, 20 V.D.C	
Carga:	0.02 a 0.04	OHMS	

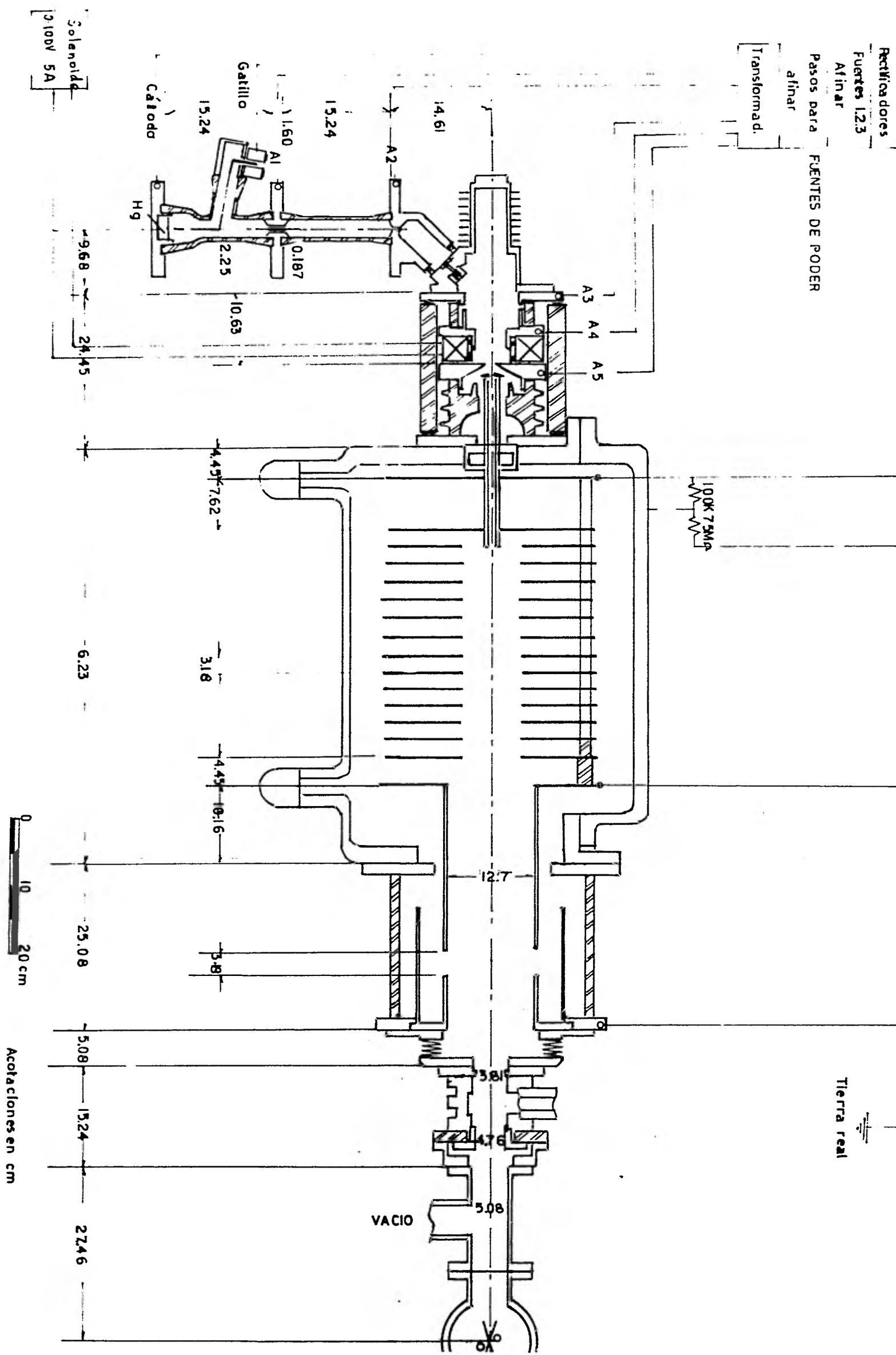
agua de enfriamiento: 4 G.P.M

Dentro de la línea se encuentran otras componentes, que son las rejillas, cuya función principal es la de colimar el haz. Estas se instalan en los puntos focales antes y después del imán, que por razones de óptica de iones se colocan a una distancia igual a  $2\rho$  de la frontera magnética.

El diseño de este equipo se encuentra en la pag. S-80 del reporte de trabajo del grupo del acelerador Van de Graaff tandem del centro nuclear C.N.E.N en su primera etapa ( Mazari 1969 ) .

La última componente principal del equipo, lo forman dos cámaras de blancos; una pequeña de usos múltiples y una segunda cámara ubicada en la parte final del conjunto, empleada para la implantación de piezas de mayor tamaño, útil además en el desarrollo de técnicas alternativas. Hay que recalcar que esta segunda cámara es un tanque de hierro con un volumen de  $1.7 \text{ m}^3$ , el cual fue construido hace aproximadamente 15 años en la ciudad de Guadalajara por la compañía Swecomex.

Llevó unos meses de trabajo poner este primer equipo en funcionamiento.



FUENTE DE IONES TIPO DAWTON DONADA  
AL IFUNAM POR LA UNIVERSIDAD DE OXFORD

Fig. II, 2, 1

IMPLANTADOR DE IONES  
PESADOS

### II.3 LINEAS DE BOMBARDEO

Es el acoplamiento de una serie de elementos por los cuales se transportará el haz de partículas en un alto vacío, hacia la zona de bombardeo. La base de esta línea de bombardeo, la forman tramos de acero inoxidable 304 de 2 3/8 " y 1/16 " de espesor, los cuales se mantienen a una presión del orden de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  mm Hg, por medio de cinco sistemas de bombeo distribuidos a lo largo de todo el equipo.

El primer sistema está conectado a la caja de lentes Einzel por medio de un tubo de vidrio Pyrex de 6"  $\Phi$ , con el cual se pretende evacuar los gases residuales existentes en la fuente de iones, la caja de lentes Einzel y el acelerador.

El segundo sistema de vacío es colocado en el primer tramo de línea, muy cerca del tubo acelerador con el propósito de alcanzar un muy buen vacío tanto en la zona de aceleración como en ese tramo de línea; mientras que el tercer sistema se ha colocado en el segundo tramo de línea después del deflector magnético.

Los otros dos sistemas de vacío corresponden a las cámaras de blancos, para producir vacíos con independencia en las mismas, cada vez que se tenga que sacar ó meter nuevas muestras. Respecto a los sistemas de vacío, por el momento se cuenta con dos sistemas gemelos, compuestos de los siguientes elementos: Bomba mecánica, válvula, bomba de difusión con una velocidad de bombeo de 3,600 lts/seg, trampa de nitrógeno y válvulas de compuerta de 18 cm de diámetro.

Se tiene un tercer sistema de vacío, perteneciente a la segunda cámara de blancos, consistente de: una bomba mecánica, válvula de paso, bomba difusora de 4000 lts/seg y trampa de nitrógeno líquido.

Para conectar los sistemas de vacío con las líneas, se diseñaron uniones en forma de T, las cuales se muestran en la Fig. II.3,1.

A lo largo de toda la línea de bombardeo, se encuentran distribuidas válvulas tipo compuerta de 5 cm de abertura ( ver plano E-26-1 del espectrógrafo IV C.N.E.N, 1970 ); éstas están con la finalidad de separar por tramos el vacío obtenido en todo el equipo. Para compensar las dilataciones ó contracciones sufridas por el equipo debido a los cambios de temperatura que puedan existir, es necesario colocar fuelles a lo largo de cada tramo de línea, mostrándose ésta en la Fig. II.3,2 del diseño general.

Un posicionador múltiple cuya función es la de analizar, medir y observar al haz de partículas, es colocado antes de la cámara de blancos y su diseño aparece en el plano L-4-D de la línea imán, rayos-x ( Mercado, 1976 ). Otra componente de la línea es el dedo frío que se encuentra colocado después del imán deflector y que tiene por función la de condensar los vapores residuales, pudiéndose ver su diseño en el plano de la última referencia.

Dentro del diseño de la línea se han previsto dos tramos de 34 cm, con la finalidad de que en cualquier momento se puedan agregar en ellos algún sistema de lentes, esto dependiendo de las necesidades que se tengan durante la operación en el control de la geometría o sección del haz de proyectiles.

Ya se habló de varias componentes de la línea, la forma de unir las, de tal manera que el vacío existente se conserve al máximo posible, esto se logra con el uso de juntas especiales denominadas bridas ( flange ). En primer lugar se adoptan las bridas de sello metálico tipo varian, cuyo diseño apa

rece en la Fig. II.3,3; en estas se realiza el sello de vacío al insertarse los filos sobresalientes de acero sobre un anillo de material blando. Otro tipo de junta son las que se muestran en la Fig. II.3,4, lográndose el sello de vacío en este caso con arosellos ( "O"rings ) de vitón ó neopreno.

Este último tipo de juntas no tan limpio sólo será empleado en las uniones con las válvulas y dentro de las mismas en sus partes móviles.

Para terminar puede decirse que los diferentes elementos que se van a acoplar con los diferentes elementos de un diseño sea útil en el laboratorio, con una junta giratoria para corregir alineamiento según sea el caso.

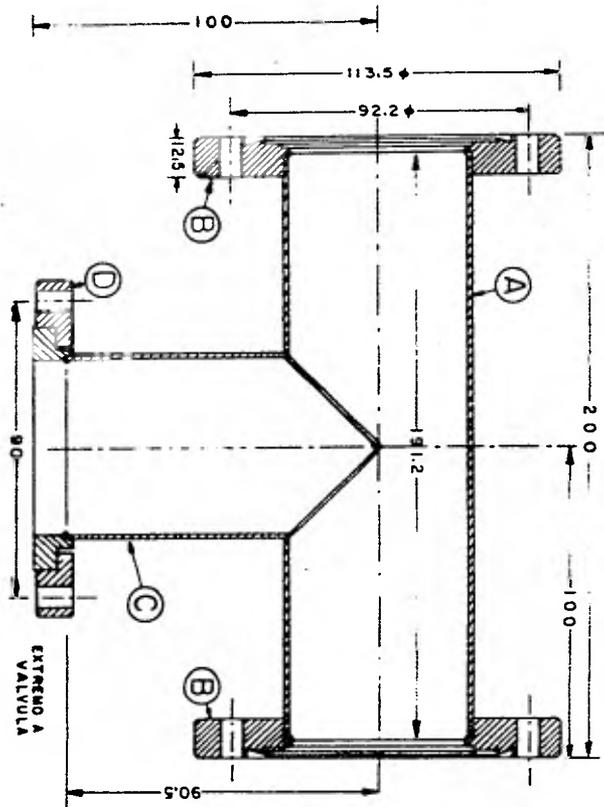
El conducto que pasa por la pista del imán será de tubo rectangular, cuyo diseño detallado se puede consultar en el laboratorio de I de I .

rece en la Fig. II.3,3; en estas se realiza el sello de vacío al insertarse los filos sobresalientes de acero sobre un anillo de material blando. Otro tipo de junta son las que se muestran en la Fig. II.3,4, lográndose el sello de vacío en este caso con arosellos ( "O"rings ) de vitón ó neopreno.

Este último tipo de juntas no tan limpio sólo será empleado en las uniones con las válvulas y dentro de las mismas en sus partes móviles.

Para terminar puede decirse que los tubos de la línea que se van a acoplar con los diferentes elementos, llevan un diseño sea útil en el laboratorio, con una junta giratoria para corregir alineamiento según sea el caso.

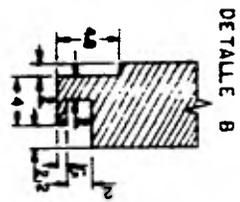
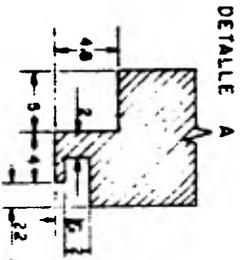
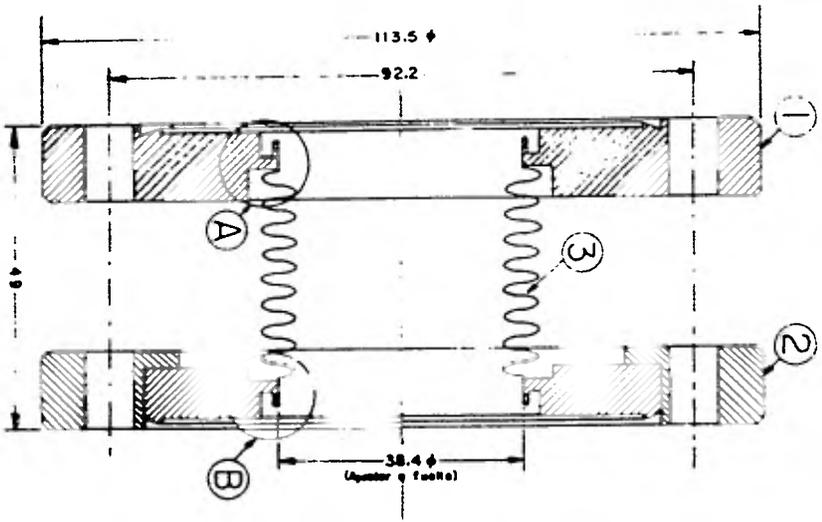
El conducto que pasa por la pista del imán será de tubo rectangular, cuyo diseño detallado se puede consultar en el laboratorio de I de I .



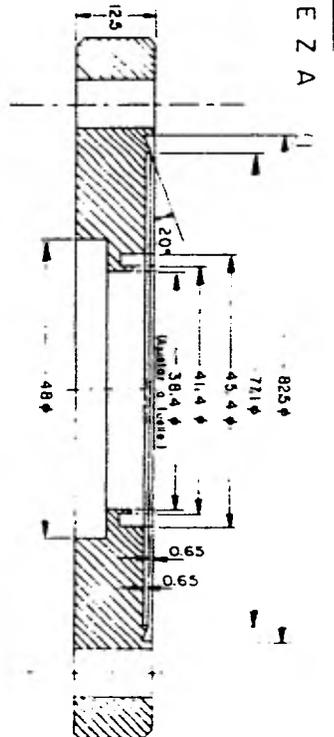
ACOT : mm  
 ESC : 1:1

PIEZA	DESCRIPCION	MATERIAL	DIMEN	NSIONES	CANTIDAD
0	FLANGE	ACERO INOX	VER PLANO		1
C	TUBO	ACERO INOX 304	2 1/2" φ, 1/8" e, 902mm		1
B	FLANGE FIBO	ACERO INOX	VER PLANO		2
A	TUBO	ACERO INOX	2 1/2" φ, 1/8" e, 182mm		1

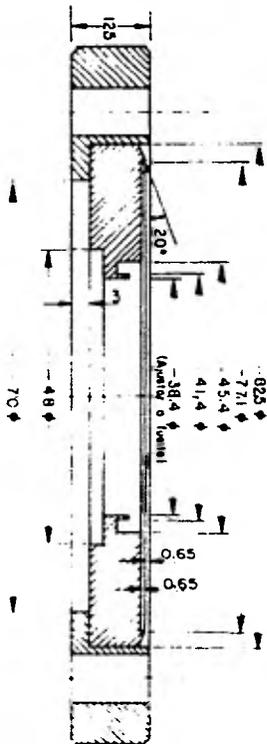
	PROYECTO:	PLANO:
	DISEÑO:	PROYECTO:
REVISADO:	REVISADO:	FECHA: 8 JUNIO 1983



PIEZA A



PIEZA A (2)



ESC: 2:1  
ACOT: mm

PIEZA	DESCRIPCION	MATERIAL	DIMENSIONES	CANTIDAD
3	FUELLE	ACERO INOX	384mm φ x 44mm	1
2	FLANGE MOVIL	ACERO INOX 304 VER PLANO		1
1	FLANGE FIJO	ACERO INOX 304 VER PLANO		1



**SOLUCIO**

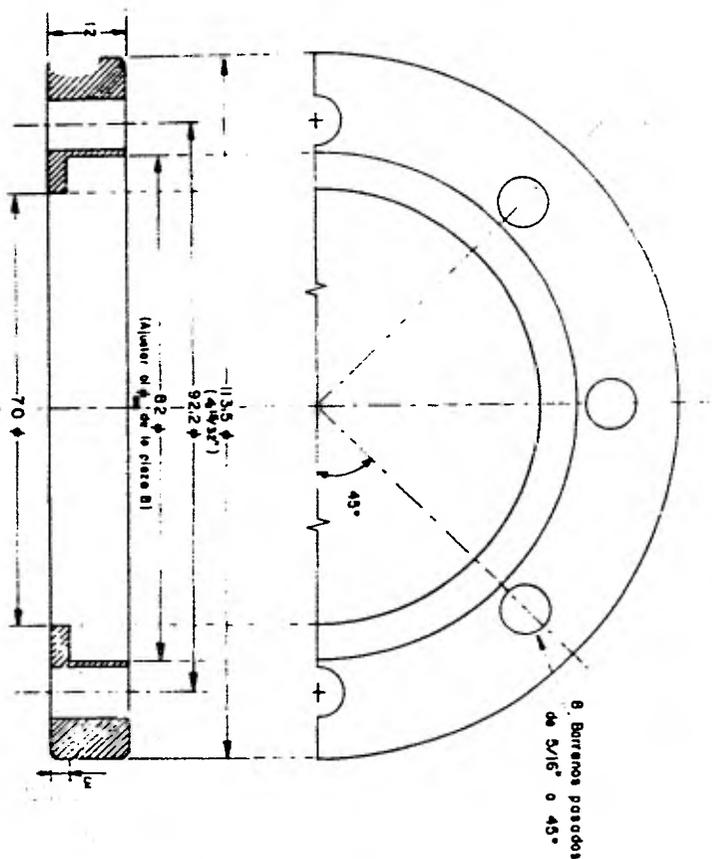
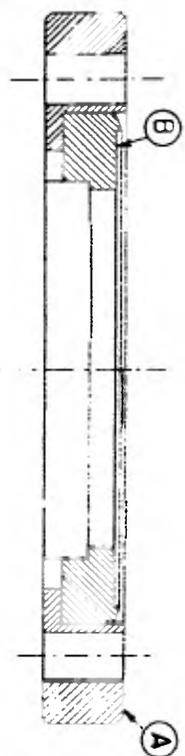
ESQUEMA PARA TUBERIA DE A.A.

LINEA DE MANTENIMIENTO

FABRICA

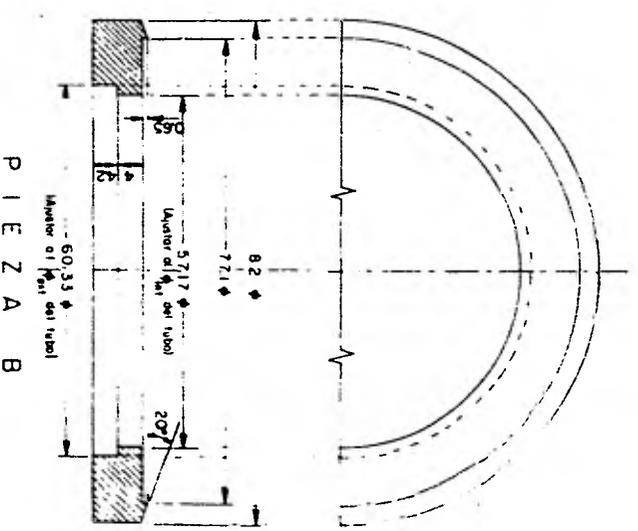
ORDEN

FECHA

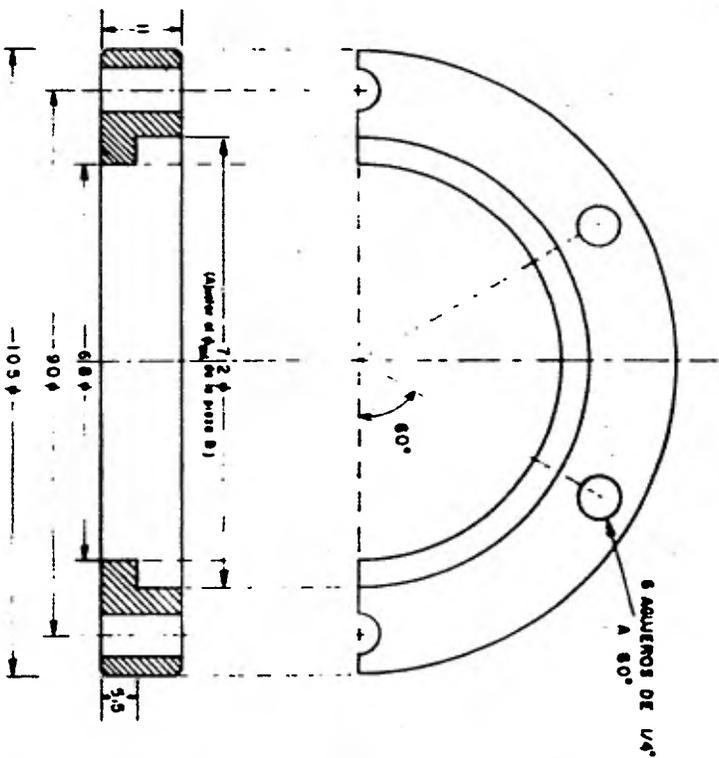


ESC: 2:1  
ACOT: mm

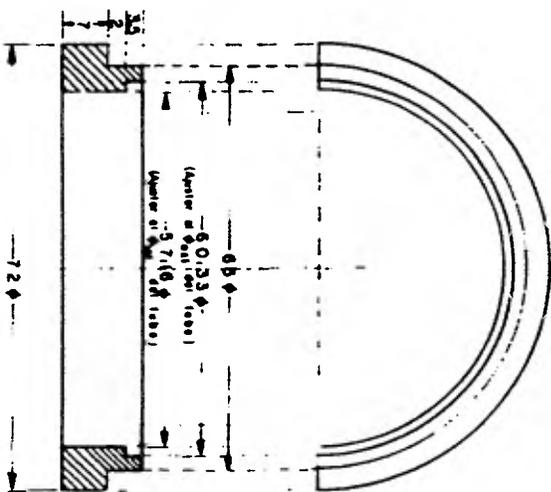
MATERIAL: Acero inox 304



	SOLIDITO	CLANGE MOVIL TIPO VARIANTE DE 2" $\phi$ PARA LA LINEA DE 2" $\phi$	FABRICO	GREEN	P. ANT. ... MONTECITO ... DISTRIC. ... URB. ... TEL. ...



PIEZA A



PIEZA B

ES C: 2.1  
ACOT: mm

MATERIAL: Acero inox 304

	ELABORADO	PROYECTO
	FABRICO	DISEÑO
	FECHA	FECHA
	PLANO MOVIL	PROYECTO DISEÑO FECHA
	FABRICO FECHA	PROYECTO DISEÑO FECHA

## II.4 DISEÑO DE UNA GRUA PARA EL MONTAJE DE EQUIPO

Elementos existentes pesados, útiles para la integración del laboratorio, se encontraban dispersos en varios lugares del Instituto. Para la transportación de estos elementos y su montaje dentro del laboratorio, se diseñó una grúa que cumpliera con las condiciones requeridas, siendo principalmente las de soportar 2 1/2 ton, ser movible, de un tamaño adecuado para transportar piezas grandes y de dimensiones tales que permitiera ser introducida al laboratorio por la puerta (60 x 190 cm).

Considerando la utilidad que tiene la grúa dentro del laboratorio de I de I se ha incluido un plano (Fig. II.4.1) y los cálculos de la grúa, ya que es un elemento importante para éste y otros laboratorios.

Los cálculos están basados en el concepto de un marco de estructura reticular de momento de inercia constante en cada uno de sus miembros. Este marco abc es simétrico tanto en geometría como en cargas (Fig. II.4.2); con el objeto de resolver la mitad de éste, los resultados obtenidos se aplicarán a la otra mitad. Considerando la intersección de las barras a y b como nudo "n", se siguen los siguientes pasos:

- i) Momento desequilibrante ( $M_D$ ):

Analizando las barras a y b por separado, para obtener sus momentos de nudo empotrado ( $M_{(n,e)}$ ).

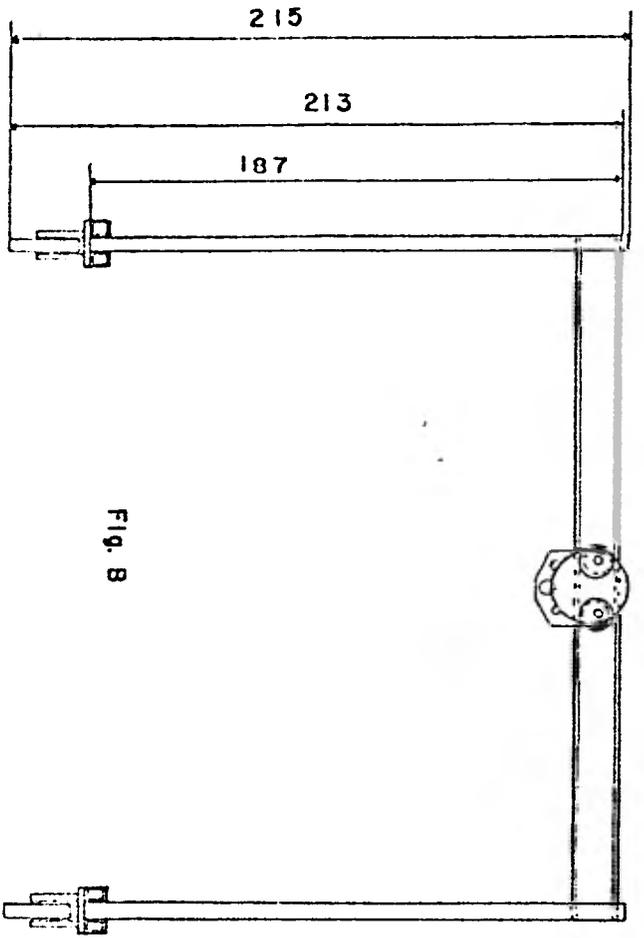


Fig. B

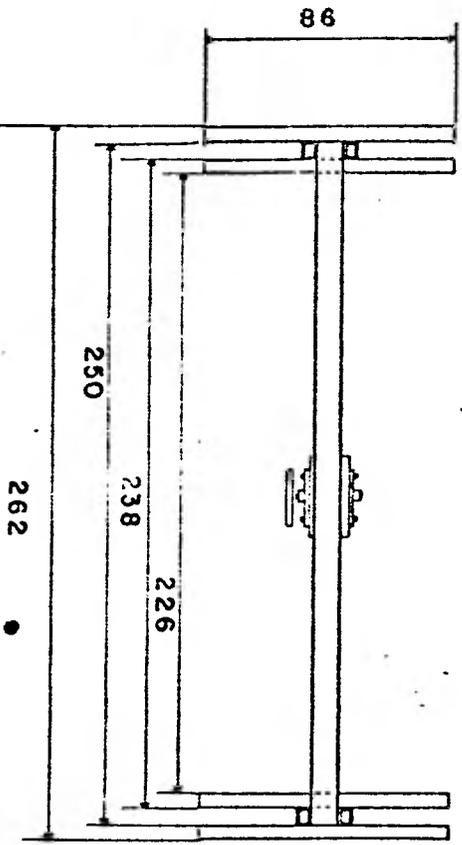


Fig. A

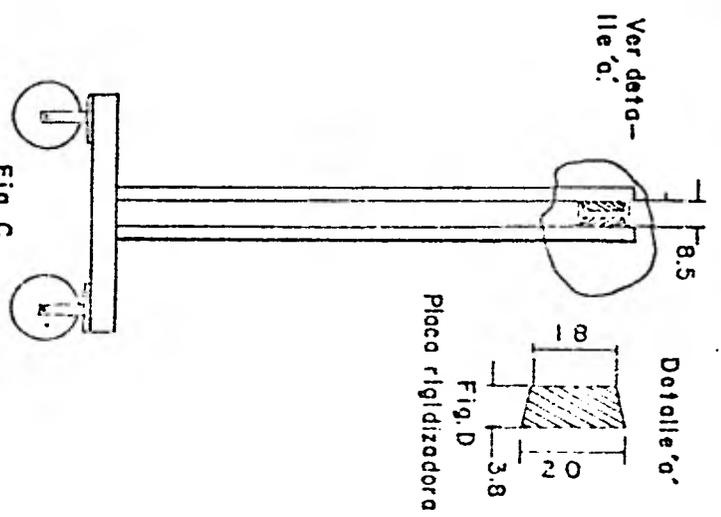


Fig. C

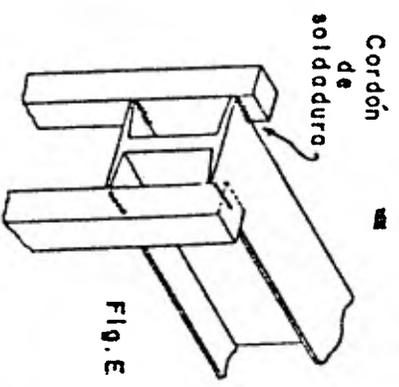


Fig. E

Figura II.4.1  
 Grúa 2 1/2 Ton. (Acot. en cm.)  
 Lab. de Implantación de Iones pesados.  
 IFUNAM.

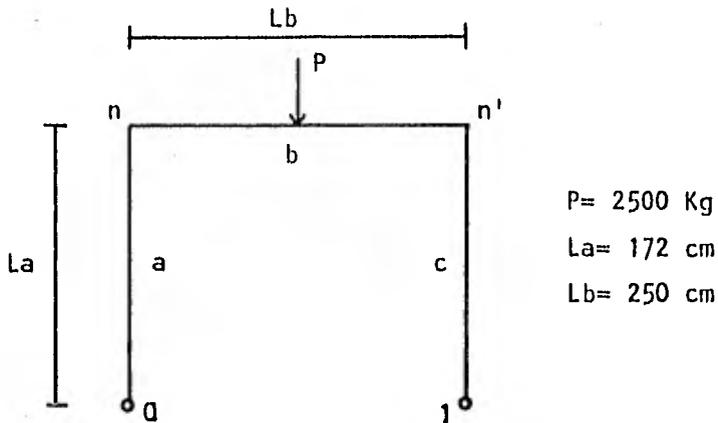
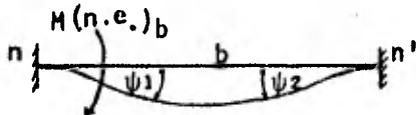


Fig. 11.4,2

$$(1) M_{(n.e.)_b} = \frac{Pab^2}{L^2} = \frac{P \frac{L}{2} \left(\frac{L}{2}\right)^2}{L^2} = \frac{PL}{8} = \frac{2500 \times 250}{8} = 78\ 125 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$



$M_{(n.e.)_a} = 0$ ; dado que la única fuerza exterior es la debida a la carga cuando ésta se encuentra en el extremo y por lo mismo pasa por el nudo, anulándose el momento.

$$M_D = \sum_i^n M_{(n.e.)} = 78\ 125 + 0 = 78\ 125 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

Es de hacer notar que el peso propio de las barras no está tomado en cuenta por considerarse despreciable.

(1) Cap. IV pag. 33 a 37; Estructuras de concreto por Alberto J. Flores

ii) Cálculo de las rigideces angulares  $r'_a$  :

En el caso más desfavorable la barra b puede trabajar como libremente apoyada, además de servir para dimensionarla y para el cálculo como marco rígido.

Como las rigideces dependen del momento de inercia (I), se estimará  $I_b$  por flexión máxima como primera aproximación. Para la barra b simplemente apoyada y carga concentrada al centro, se tiene;

$$M_{\max_b} = \frac{PL}{4} = \frac{2500 \times 250}{4} = 156\ 250 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

$$S_{xb} = \frac{M_{\max}}{\sigma_t} = \frac{156\ 250}{1250} = 125 \text{ cm}^3$$

Donde:  $S_{xb}$  es el módulo de sección de la barra b,  $\sigma_t$  es el esfuerzo de trabajo; buscando en tablas<sup>(2)</sup> de propiedades para viguetas de producción estándar, se tiene una vigueta en sección I con  $S_x = 119 \text{ cm}^3$  y  $I = 906.8 \text{ cm}^4$ .

Al liberar el nudo, el momento desequilibrante se repartirá entre las barras a y b. Haciendo la suposición de que cada barra toma el 50% de  $M_D$  se estimará el momento de inercia para la barra a.

$$m_{xa} = \frac{M_D}{2} = \frac{PL}{16} = \frac{2500 \times 250}{16} = 39062.5 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

luego

$$S_{xa} = \frac{m_{xa}}{qt} = \frac{39062.5}{1250} = 31.25 \text{ cm}^3$$

Como se puede ver en la Fig. II.4.1 las columnas (barras

(2) Manual "Acero Monterrey", 1965

a y c según Fig. II.4,2), están formadas por 2 PTR para cada una de las columnas, por lo que repartiendo  $S_x$  entre los 2 PTR se tiene para cada uno  $S_x$

$$S_x = 15.6 \text{ cm}^3$$

Con este valor de  $S_x$  y del catálogo Hylsa se obtiene un PTR con un momento de inercia  $I_{x_a} = 63.3 \text{ cm}^4$ .

Por lo tanto las rigideces valdrán:

$$r'_{aa} = \frac{3}{L} EI = \frac{3 \times 126.6E}{172.3} = 2.2E$$

$$r'_{ab} = \frac{2}{L} EI = \frac{2 \times 906.8E}{250} = 7.25E$$

Factores de proporcionalidad:

$$\frac{r'_{aa}}{\Sigma r'} = \frac{r'_{aa}}{r'_{aa} + r'_{ab}} = \frac{2.2E}{(7.25 + 2.2)E} = 0.233$$

$$\frac{r'_{ab}}{\Sigma r'} = \frac{7.25E}{9.45E} = 0.765$$

Momentos que la rotación  $\psi_n$  produce en cada barra.

$$M_{\psi_n} = - \frac{r_a}{\Sigma r_a} \cdot M_D$$

$$M_{\psi_{na}} = -0.233 \times 78125 = 018125 \text{ kg.cm}; \text{ para la barra a}$$

$$M_{\psi_{nb}} = -0.765 \times 78125 = -59765 \text{ kg.cm}; \text{ para la barra b}$$

Equilibrio del nudo n. La superposición de las dos etapas; es decir  $M(\text{ne.}) + M_{\psi_n}$ , permite obtener el equilibrio del nudo.

$$M_{na} = 0 - 18125 = 018125 \text{ kg.cm}$$

$$M_{nb} = 78125 - 59765 = 18360 \text{ kg.cm}$$

Transmisión de los efectos de  $\psi_n$  a los extremos contrarios de las barras que concurren al nudo  $n^{(3)}$ .

Para la barra a el factor de transporte vale cero;  $t_{an} = 0$ ,

Para la barra b el factor de transporte es unitario;

$$t_{an} = -1$$

Por lo tanto  $M_l = 0$  y  $M_n' = -18360 \text{ kg.cm}$

Diagrama de momentos flexionantes hiperestáticos

Este diagrama permite disponer de los valores de las correcciones al diagrama de momentos flexionantes isostáticos, como se indica en la Fig. II.4,3.

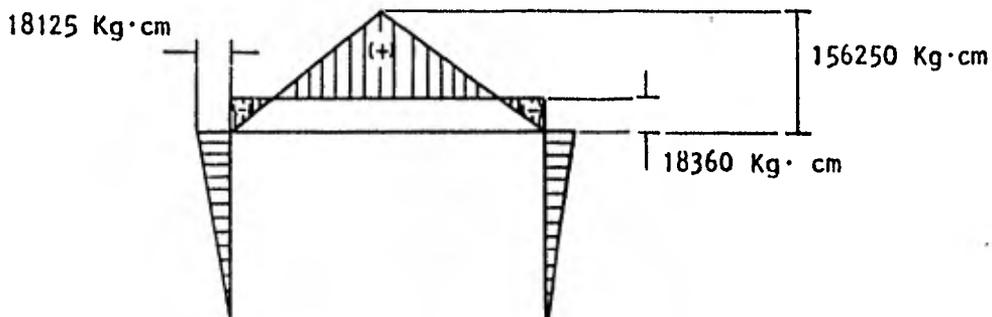


Fig. II.4,3

Así el momento corregido para las barras será:

$$\text{barra a; } M_{\max} = 18125 \text{ kg.cm}$$

$$\text{barra b; } M_{\max} = 156250 - 18360 = 137890 \text{ kg.cm}$$

buscando los nuevos módulos de sección y repitiendo los pasos anteriores;

(3) Cap. V de la pag 81 a la 105; Estructuras de Concreto por Alberto Flores.

$$S_{xa} = \frac{18125}{1250} = 14.5 \text{ cm}^3; S_{xa} = 7.25 \text{ cm}^3$$

$$S_{xb} = \frac{137890}{1250} = 110.3 \text{ cm}^3$$

de tablas antes mencionadas:

$$I_{xa} = 19 \text{ cm}^4 \quad \text{y} \quad I_{xb} = 906 \text{ cm}^4$$

Como se puede observar el valor del módulo de sección de la barra b disminuyó ligeramente. Por efectos de producción estándar la alternativa es usar la misma vigueta que corresponde a  $906.8 \text{ cm}^4$ . También se puede observar (según el factor de proporcionalidad de la barra b) que absorbe cerca del 80% del momento desequilibrante. Por otro lado la sección de la barra a disminuyó en un 40% en su módulo de sección en relación al valor anterior.

Sustituyendo estos últimos valores en las rigideces tenemos;

$$r'_{da} = \frac{3E(38)}{172.3} = 0.66E \quad \text{y} \quad r'_{db} = \frac{2E(906)}{250} = 7.25E$$

$$M_{\psi na} = -0.0834 \times 78125 = -6515.62 \text{ kg.cm}$$

$$M_{\psi nb} = -0.916 \times 78125 = -71562.5 \text{ kg.cm}$$

$$M_{na} = 0 - 6515.62 = -6515.62 \text{ kg.cm}$$

$$M_{nb} = 78125 - 71562.5 = -71562.2 \text{ kg.cm.}$$

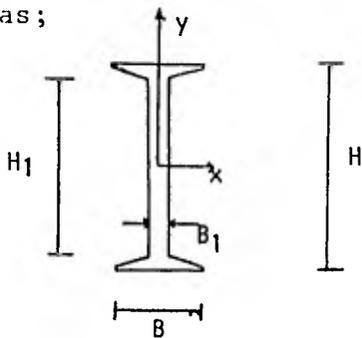
Los valores corregidos según su diagrama hiperestático son:

$$\text{barra a; } M_{\max a} = 6515 \text{ kg.cm}$$

$$\text{barra b; } M_{\max b} = 149688 \text{ kg.cm}$$

$$\therefore S_{xa} = 5.2 \text{ cm}^3 \quad \text{y} \quad S_{xb} = 119.7 \text{ cm}^3$$

Resulta nuevamente el mismo orden de módulo de sección para la barra b. Dado que en el comportamiento real de la grúa, las columnas de ésta pueden comportarse como libremente apoyadas, tanto por las ruedas que lleva en la base, como por carecer de un tensor que una los extremos 0 y 1 (ver Fig. II.4,2), se tomará como módulo de sección el correspondiente a la barra simplemente apoyada en los extremos ( $S_{xb} = 125 \text{ cm}^3$ ) que corresponde a una vigueta con las siguientes características;



$$\begin{aligned}
 B &= 8.5 \text{ cm} & I_x &= 907 \text{ cm}^4 \\
 B_1 &= 0.58 \text{ cm} & I_y &= 77 \text{ cm}^4 \\
 H &= 15.2 \text{ cm} & S_y &= 18.23 \text{ cm}^3 \\
 \text{Peso} &= 18.6 \text{ kg/m}
 \end{aligned}$$

Fig. II.4,2

Según la distribución de esfuerzos en una sección I (Fig. II.4,4), el alma absorbe casi todo el esfuerzo cortante; en base a esto el esfuerzo máximo al cual estará sometida la vigueta será:

$$\tau_t = \frac{V}{A_a} = \frac{2500}{0.58 \times 15.2} = 283.9 \text{ kg/cm}^2$$

donde;  $A_a$  = área del alma ( $B_1 \times H$ )  
 $V$  = esfuerzo cortante vertical

De tablas se tiene que para acero de bajo carbono; el esfuerzo permisible a cortante es de  $\tau_p = 1470 \text{ kg/cm}^2$ , lo que permite tener un factor de seguridad del orden de 5<sup>(4)</sup>.

(4) Sin embargo al soldar los PTR (ver Fig. II.4,1), en los extremos, los patines absorberán casi todo el esfuerzo cortante, mas no el alma, por lo que se agregará una placa para que el alma trabaje adecuadamente (ver Fig. II.4.1-D).

Esta misma vigueta resistirá una carga correspondiente a la componente horizontal, en el caso de que la carga P sea halada en sentido del eje x'x, de un valor máximo de:

$$M_{y \text{ max}} = S_y \sigma_t \quad \text{y} \quad M_{y \text{ max}} = \frac{HL}{4}$$

donde; H = fuerza horizontal

L = longitud de la vigueta

$\sigma_t$  = esfuerzo de trabajo

sustituyendo y despejando H, tenemos; H = 364 kg

Para la barra a, si se toma el módulo de sección debido al  $M_{(n.e)}$ , se podrá asegurar que no ocurra una falla por flexión. En una columna larga las fuerzas a compresión son muy importantes y en este caso seguramente conducirán a un módulo de sección mayor que el debido a la flexión, dado que la barra b es muy rígida. Se hará un cálculo por pandeo de la barra a para determinar la sección.

donde; E = módulo de elasticidad

I = momento de inercia

K = constante que depende de la geometría de apoyo

L = longitud de la barra

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_x}{(KL)^2}$$

Tomando un factor de seguridad de 3; serán 3 x 2500 = 7500 kg de carga que debe soportar la columna asegurándola contra pandeo por lo que se requiere una estructura con un momento de inercia de:

$$I_x = \frac{P_{cr}(KL)^2}{\pi^2 E} = \frac{7500(2 \times 172.3)^2}{\pi^2 (2.1 \times 10^6)} = 42.97 \text{ cm}^4$$

Con el momento de inercia para la columna a y del catálogo de perfiles PTR de Hylsa, corresponde a dos secciones tu

bulares con las siguientes características:

$$\begin{array}{ll} D = 5.1 \text{ cm} & I_x = I_y = 21.4 \text{ cm}^4 \\ B = 5.1 \text{ cm} & S_x = 8.42 \text{ cm}^3 \\ \text{Espesor} = 0.32 \text{ cm} & P = 4.54 \text{ kg/m} \\ A = 5.79 \text{ cm}^2 & \text{Tipo; color verde} \end{array}$$

La unión de los PTR a la vigueta será por medio de cuatro cordones de soldadura (ver Fig. II.4,1-E). Si la resistencia de la soldadura, según las tablas AGA de México, S.A. bajo normas de la AWS, es de  $4218 \text{ kg/cm}^2$ , para un electrodo E-6013 y  $t = \frac{1}{8} \text{ " } \phi$  se tiene:

a) Por esfuerzo cortante vertical  $\tau = \frac{V}{A_s}$

donde,  $\tau$  = esfuerzo cortante vertical máximo al que están expuestas áreas de apoyo (soldadura) de la columna con la vigueta.

$V$  = fuerza cortante vertical

$A_s$  = Area de la soldadura

$A_s = 0.707 \text{ tc}$ ; para la soldadura de filete

$c$  = longitud del cordón

$$\tau = \frac{2500}{0.707 \times 0.3175 \times 4 \times 5.1} = 543.5 \text{ kg/cm}^2;$$

obteniéndose así un factor de seguridad de 7.

b) Por esfuerzo cortante horizontal

$$H = \frac{M_{(n.e)}}{2H} = 2570 \text{ kg}$$

donde;  $H$  = fuerza horizontal en cada uno de los extremos de la columna que van unidos al alma por el cordón de soldadura.

$M_{(n.e)}$  = momento de nudo empotrado

$H$  = altura de la vigueta

$\tau_{xy}$  = esfuerzo cortante horizontal.

$$\tau_{xy} = \frac{2570}{5.1 \times 0.707} = 712.8 \text{ kg/cm}^2; \text{ teniéndose por este mecanismo un factor de 5.9.}$$

El módulo de sección de los soportes se obtendrá considerando a la viga como simplemente apoyada.

$$M_{\max} = \frac{PL}{4} = \frac{2500 \times 86}{4} = 52500 \text{ kg.cm}$$

$$S_x = \frac{52500}{1250} = 42 \text{ cm}^3$$

módulo de sección que se ajusta a las mismas medidas de los PTR de las columnas, usándose en la forma que se indica en la Fig. II.4,1.

Revisando la estabilidad de la grúa se tiene que:

para una carga de 2500 kg levantada a una altura de 150 cm del suelo, en donde la componente de la carga pasará por uno de los puntos de apoyo y debido a una fuerza horizontal que al rebasar el siguiente valor provocará la volcadura;

$$\tan \theta = \frac{40}{150} = 0.266 \quad \theta = 15^\circ$$

$$2500 \cos 15^\circ = 2414 \text{ kg} \quad H = 2500 - 2414 = 86 \text{ kg}$$

En estas condiciones se observa que la fuerza de volteo es más crítica que la de resistencia.

Especificaciones para el uso de la grúa

- Carga máxima vertical ..... 2000 kg
- " " " con tensor inferior ..... 2500 kg
- Carga máxima horizontal con seguridad contra volteo;
  - a 150 cm de altura ..... 86 kg
  - a 100 cm de altura ..... 178 kg
  - a 50 cm de altura ..... (547 kg)
- Carga máxima horizontal por flexión ..... 364 kg

### CAPITULO III

#### APLICACIONES DE LA IMPLANTACION DE IONES.

La implantación de iones tuvo su auge durante el desarrollo de los materiales semiconductores ( ver introducción ). Estudios posteriores han originado nuevas aplicaciones con importantes ventajas en diversos campos. Sin duda alguna el campo de los semiconductores es el que más beneficios y progreso ha obtenido, entre otras cosas por la estabilidad que ofrecen los dispositivos semiconductores fabricados bajo esta técnica, utilizados en circuitos electrónicos ( CA, CD, lineales, no lineales, baja o alta frecuencia, como elementos discretos o distribuidos y otros tipos ).

Hay una gran variedad de diferentes tipos de dispositivos semiconductores que son útiles en estos circuitos electrónicos, siendo los más comunes y representativos los diodos y los transistores. De éstos últimos se puede hablar de varios tipos; bipolar ( npn y pnp ), unipolar, aislador-compuerta, tipo MOSFET, depleción, n o p canal, todos construidos por medio del agregado de impurezas en cristales de silicio que es el más comunmente usado. Estas impurezas son agregadas a cierta profundidad ( del orden de décimas de micra ) en un área de dimensiones minúsculas y perfectamente delimitadas, tanto así que en un área de 6 x 6 mm pueden alojarse más de 10 000 componentes electrónicas, lo que da una idea de la precisión y control que se requiere del agregado de impurezas ( doping ) para asegurar el buen funcionamiento ( estabilidad ) de dichos dispositivos. Una aplicación de un diodo como elemento discreto se tiene en la detección de radiación, litio implantado en silicio a baja temperatura, ha mostrado ventajas en

resolución y también sobre sus homólogos de gas. o ioduro de sodio para registrar electrones energizados y rayos-x o gamma.

En el campo de la energía solar-eléctrica, estudios recientes ( Edward ) demuestran experimentalmente que el silicio implantado con  $^{31}\text{P}$  ( unión tipo p ) y  $^{11}\text{B}$  ( unión tipo n ) con un recocido de 800 a 1 000°C y dosis de 2 a 4 x 10<sup>15</sup> iones/cm<sup>2</sup> dieron por resultado celdas solares con una eficiencia del 14 a 15 %, superando no sólo a otras técnicas para la fabricación de esta misma celda solar, sino también otros tipos de celdas solares como las de silicio amorfo hidrogenado ( a-Si:H ). El recocido es un tratamiento térmico que sirve para reducir los daños que produce la implantación en el sustrato; por ejemplo en este caso no todos los átomos de  $^{31}\text{P}$  y  $^{11}\text{B}$  ocupan un lugar sustitucional, no siendo así eléctricamente activos. Con los efectos del recocido logran activarse los átomos y reducir o eliminar esas imperfecciones.. Es posible que éste tipo de detector se desarrolle para dosimetría de rayos-x de baja energía.

Otra gran aplicación se tiene en el campo de la óptica y refiriéndose directamente a las fibras ópticas que son barras de vidrio de diámetros pequeños, que por medio de la implantación de impurezas como el Ge, P y otros elementos que modifican su índice refractor, vienen a jugar un papel muy importante en las comunicaciones por las siguientes características:

Son de peso y tamaño pequeños, tienen insensibilidad a la interferencia electromagnética, resistencia a las altas temperaturas, y posibilidad de trabajo en medios particularmente húmedos, por su capacidad ( cantidad de información transmitida y distancia de transmisión ). El costo efectivo ( Pineda,1980)

de estas fibras compite fuertemente con el número de canales y longitud de la línea, así por ejemplo a distancias muy cortas donde el costo es más alto, tiene justificación en la comunicación de datos entre máquinas en un mismo lugar, transmisiones de mediciones y datos bajo condiciones de alta interferencia electromagnética. A corta distancia se justifica en la transmisión de datos de mediciones de señales en barcos o aviones, lugares de alta interferencia y diferenciales de voltaje a tierra peligrosos; lugares de alta temperatura o alta corrosión. Para largas distancias su uso no requiere condiciones muy especiales para su justificación ya que la fibra óptica compite con el cable, coaxial según el número de canales, es decir a mayor número de canales mayor justificación. Al hablar de fibras ópticas, también cabe mencionar las fuentes ópticas ( transmisión de luz ) de mucha aplicación en la medicina, de diodos PIN que se utilizan como fotodiodos.

En el campo de la metalurgia la implantación de iones ha encontrado una creciente aplicación. Aunque muchos fenómenos aún están sujetos a investigación, las pruebas realizadas en el tratamiento de superficies para modificar las propiedades mecánicas de los materiales, han mostrado excelentes resultados que seguramente repercutirán con un gran impacto económico, cuando esta técnica de I de I madure , así como sucedió en el área de semiconductores. En el campo de la metalurgia, la tribología es el tema que ha tomado mayor importancia porque comprende fenómenos como la fricción y el desgaste, factores que influyen mucho en el uso de todo tipo de materiales metálicos en movimiento e inclusive no metálicos.

Normalmente la fricción entre metales, se trataba de mi-

limpiar mediante el uso de lubricantes, pero en ocasiones el uso de éstos resultaba inadecuado, dado que los lubricantes pueden llegar a causar cambios químicos sobre la superficie, además de que el coeficiente de fricción puede depender del esfuerzo entre las uniones metálicas. Si se presentan situaciones de alta presión, el fluido lubricante puede ser expulsado de las superficies en contacto y tener de ésta manera un aumento en la fricción, con elevado calentamiento de éstas, mayor adhesión y consecuentemente un desgaste.

En condiciones de alto vacío o alta temperatura, los lubricantes líquidos son inadecuados y en este caso lubricantes sólidos o secos son preferidos debido a su baja presión de vaporización. En ambos casos los problemas más comunes son la formación de microsoldaduras entre uniones de los materiales, además de las microfracturas presentes, la alteración del tamaño de grano del metal por esfuerzos que actúan en ese momento.

Todo esto se puede deber en ocasiones al desalojamiento de los lubricantes y por acumulación de impurezas.

La implantación y el recubrimiento iónico ofrece una solución a estos problemas mediante la elección de iones diferentes al material en cuestión, que introducidos a cierta profundidad disminuyen los efectos de la fricción y mejoran la resistencia a la corrosión y al desgaste.

La corrosión y la oxidación son fenómenos que se presentan principalmente en los materiales metálicos al reaccionar con su medio ambiente, bajo mecanismos complicados que terminan deteriorando el material. La I de I también se ha presentado como una posible solución a este tipo de problemas.

La resistencia de los materiales a la corrosión obtenida bajo la I de I se pueden deber a;

- 1.- La modificación del sustrato por el daño debido a la radiación.
- 2.- Los efectos químicos, los cuales alteran la electroquímica de las reacciones superficiales, creándose un estado de pasividad en la superficie del material.

La aplicación práctica de estos últimos fenómenos ( fricción, desgaste, corrosión y oxidación e inclusive dureza ) pueden resultar obvias, al hablar de las partes móviles de un motor. Se podría citar una inmensa lista de partes móviles o en reposo expuestas a grandes esfuerzos y a los fenómenos atmosféricos antes ya mencionados, requiriendo del reemplazo periódico de piezas con sus consecuentes altos costos de operación.

Existen otras aplicaciones menos divulgadas bajo la técnica de I de I como es en materiales magnéticos ( Dearnaley, 1973 ), en la electroquímica ( catalizadores ), en la superconductividad ( Townsed, 1976 ).

### III.1 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TECNICA DE IMPLANTACION

Se puede decir en general que la principal característica y ventaja de la I de I, es la modificación física que se produce en las propiedades de los materiales sujetos al bombardeo intenso de partículas ionizadas. Tal modificación hará que la aplicación de algunos de estos materiales sea de mayor utilidad en diversos campos.

Se ha establecido que el cambio en las propiedades, se debe a la presencia de una cierta cantidad de impurezas ceránicas a la superficie del elemento.

Este método presenta numerosas ventajas en su operación, las cuales pueden clasificarse de la siguiente manera ( Singer, 1980 ).

- En principio, cualquier tipo de ión puede ser implantado, desde hidrógeno hasta uranio.
- Es posible mantener un control exacto sobre la cantidad de iones por implantar.
- La determinación previa del tipo de ión por utilizar, así como también la combinación de diferentes elementos.
- Se establece una precisa localización del área implantada.
- Es controlable la profundidad de implantación. Esta varía de acuerdo con la energía iónica, especie del ión y el material utilizado como blanco. La profundidad normalmente se limita entre 100 y 10,000 Angstroms .
- Se predetermina además la energía necesaria para la implantación que usualmente varía entre 10 y 200 KeV.

- La distribución de partículas con la profundidad, se asemeja a una curva gaussiana.

Desde el punto de vista de su aplicación en diversas áreas se tienen las siguientes ventajas.

- Cualquier material sólido puede ser implantado, incluyendo materiales semiconductores y aisladores.
- Son ya conocidas las densidades de corriente iónica necesarias para diversos elementos, como por ejemplo en la fabricación de semiconductores se requiere de  $10^{12}$  a  $10^{16}$  iones/cm<sup>2</sup>.
- No cambian las dimensiones de la muestra implantada, al no ser afectadas las características volumétricas del material por tratarse de un proceso a baja temperatura.
- La composición del blanco puede ser cambiada sin afectar el tamaño del grano.
- Es posible la creación de una aleación cercana a la superficie del material.
- Como al implantar se forma una capa heterogénea en íntimo contacto, no existirá el problema de pérdida de adherencia, el cual se presenta con frecuencia en otras técnicas de revestimiento.
- De acuerdo al material y buscando una característica deseada, se puede elegir el tipo de ión por implantar.
- Con respecto a otras técnicas, ésta resulta ser más económica en su proceso en algunos casos.
- Mediante otras técnicas, como son la retrodispersión de iones, selección de masas, rayos-x, etc, puede analizarse lo que ocurrió durante la implantación.

Como toda técnica que presenta numerosas ventajas, también tiene ciertas limitaciones en su aplicación, como pueden ser las siguientes:

- Es una técnica costosa debido al equipo y la especialización con el que se lleva a cabo el proceso.
- No es aplicable a elementos de gran tamaño.
- Debido al uso de las altas energías de los iones, se produce por ionización un daño por radiación sobre la muestra implantada, el cual se puede corregir muchas veces mediante un recocido térmico.
- Es un método que requiere de algún tiempo de procesamiento. Este depende fuertemente de las intensidades de los iones disponibles.

En conclusión, respecto a las numerosas ventajas que presenta en contra de las limitaciones antes mencionadas, la I de I es una técnica recomendable de desarrollar que puede ser muy eficaz en la solución de interesantes problemas competitivos en muchos casos, en comparación con otras técnicas convencionales.

### III.2 FRICCIÓN

Lo siguiente ha sido tomado de "POSIBLE INTERPRETACION DEL FENOMENO DE EXFOLIACION EN ENSAYOS DE FRICCIÓN USANDO CONCEPTOS DE ELASTICIDAD, PLASTICIDAD Y MECANICA DE SUELOS" ( Mazari, 1982 ).

Al revisar la literatura en el tema de la fricción, aún tratándose de un problema antiguo, todavía es un fenómeno poco entendido que es recomendable reestudiar empleando técnicas analíticas modernas. En esta plática se tratará de destacar, con base en los estudios realizados, los factores esenciales que intervienen en el fenómeno de fricción y sugerir ideas que orienten la investigación detallada de este tema.

#### Etapa Clásica ( macroscópica ).

En libros de mecánica para ingenieros no especializados en fricción se dice que cada material tiene un coeficiente de fricción  $\mu$  expresado por la relación de fuerzas tangencial  $T$  a normal  $N$  ( fuerza perpendicular a la superficie de deslizamiento, independiente de su área de contacto ), tal que se produzca el movimiento relativo entre dos cuerpos,  $\mu = \frac{T}{N}$ . Se menciona que el coeficiente de fricción estático tiene un valor determinado que depende de su rugosidad, que algo decrece y se mantiene constante e independiente de la velocidad, una vez iniciado su movimiento. De hecho este concepto conocido como la ley de Amontons, se debe a los cuidadosos experimentos iniciales de Leonardo da Vinci ( 1508 ), de G. Amontons ( 1699 ) y expresado así por L. Euler ( 1750 ), ( referencias

tomadas de Palmer, 1949 ).

Etapa Intermedia ( adherencia entre asperezas ).

Un examen más cuidadoso del carácter de las superficies en contacto ( asperezas ) que por presión llegan a plastificarse y romperse durante el desplazamiento relativo entre cuerpos, llevó en 1765 a C.A. Coulomb, ( Coulomb, 1785 ) a pensar que otros factores además del friccionante  $\psi$ , que llamó "cohesión c", contribuían al fenómeno de la fricción  $\tau = c + \sigma \tan \psi$ . Sin embargo, se consideró que este factor cohesivo era poco significativo.

La importancia del tema llevó a varios autores, pero principalmente a F.P. Bowden y D. Tabor, buscando el significado de la trabazón entre asperezas, la transferencia de un material a otro, el área real de contacto, etc., al estudio de la fricción con base en efectos de adherencia, culminando con su ya libro clásico "Fricción y Lubricación en Sólidos" ( Bowden, 1956 ).

Cuando en un material dúctil el esfuerzo de compresión  $\sigma = \frac{N}{A}$  alcanza su límite elástico o umbral de fluencia  $Y$  ( algunos le llaman dureza ), todo incremento de carga posterior se equilibra por el aumento proporcional del área real de apoyo  $A$ . Una fuerza tangencial  $T$  producirá entonces un esfuerzo cortante  $s = \frac{T}{A}$ . Sustituyendo en la misma definición anterior del coeficiente de fricción,

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{TA}{AN} = \frac{s}{Y}$$

expresada ahora en términos del esfuerzo cortante  $s$  y la fluencia del material  $Y$ . La fuerza para producir el corte del

área de contacto ya no resulta así independiente de la superficie aparente de apoyo.

Un análisis más detallado del trabajo y el estado de esfuerzos normales  $\sigma$  y cortantes  $s$ , suponiendo que la falla ocurre a través del material más blando, llevó a Von Mises ( Bowden, 1956 ) a establecer la siguiente relación de comportamiento,

$$\sigma^2 + 3s^2 = Y^2 .$$

Si existe compatibilidad entre los dos efectos de  $\sigma$  y de  $s$  hasta extremos en que uno u otro sean nulos, se concluye: Cuando  $\sigma$  es nula,  $s = Y/\sqrt{3}$ , y para  $s=0$ ,  $\sigma=Y$ .

Dependiendo del grado de avance del fenómeno de fricción, en donde las contribuciones relativas de los esfuerzos y de las deformaciones internas varían, von Mises propone la expresión más general  $\alpha \sigma^2 + \beta s^2 = \gamma Y^2$ , sin mencionar por donde ocurre la falla.

### Estudios Recientes.

a) Materiales rocosos anisótropos del tipo frágil ( planos débiles de falla ) ( B. Cambou, 1974 ) y materiales rugosos ( cobre contra cobre ) ( E. Rabinowicz, 1953 ). En ambas referencias se identifican tres regiones de comportamiento de  $\mu$ . Describen que el coeficiente de fricción en la región de deformaciones elásticas decrece al ir aumentando la fuerza normal hasta un valor  $N_p$ , en que ocurre la plastificación del contacto. Entre esta carga y otra más alta  $N_r$  que produce la ruptura entre asperezas, se mantiene constante. A partir del valor  $N_r$ ,  $\mu$  crece nuevamente con el incremento de carga, en

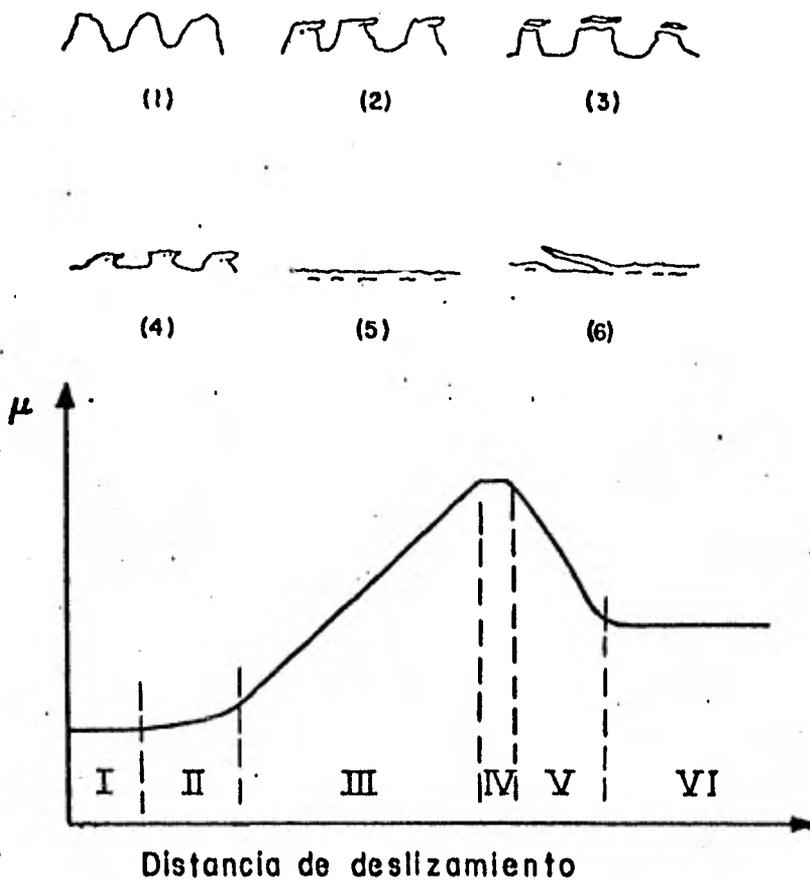
presencia de partículas producidas durante la rotura de las asperezas, las que actúan principalmente como elementos abrasivos; sin embargo, pueden constituir elementos de rodamiento en cuyo caso  $\mu$  disminuye.

b) Materiales ferrosos ( homogéneos, austeníticos ) ( Suh, 1981 ). Existe evidencia de que la región afectada por la fricción no es solamente superficial. Los esfuerzos que se generan en los contactos se transmiten al interior de los cuerpos, produciendo algunos efectos hasta llegar a la canalización y fractura. Nam Suh describe el fenómeno de fricción pasando por seis distintas fases del siguiente modo ( Fig. III.2,1 ).

Fases: I, la fuerza de fricción de debe a la fractura y deformación de asperezas; II, se incrementa ligeramente por adherencia, excepto cuando existe lubricación; III, intervienen los tres componentes que contribuyen a la fricción que son: el aumento del número de partículas atrapadas, debido a la componente de ranuración y al aumento de adherencia y rotura de partículas por nuevas superficies en contacto; IV, se mantiene constante cuando el número de partículas desalojadas equilibra al de atrapadas; V, la aparición de las partículas libres sobre todo del material más blando entre ambas superficies, disminuye el coeficiente de fricción con una menor transferencia de material y, VI, las superficies se alizan, reduciéndose la producción de partículas por exfoliación a un minimo, estabilizándose el coeficiente  $\mu$  en un nivel superior al de las dos primeras fases.

Menciona Suh ( véase Fig. III.2,1 ) que se producen fracturas a una profundidad igual al ancho de la superficie en contacto, que se separan y levantan en forma de escamas, denominando a éste mecanismo exfoliación ( "delamination" ). Sobre la transferencia de partículas metálicas, incluso de las

duras hacia la zona blanda, así como estimaciones del trabajo de ranuración por efecto de cuña cortante, también fueron estudiados por Bowden, Moore y Tabor ( Bowden, 1942 ). Así planteado, el fenómeno deja de producirse solamente en la superficie para explicarse sólo con la hipótesis de adherencia; el estado de esfuerzos que afecta el interior de los medios en contacto interviene también en el fenómeno.



Descripción de las fases del fenómeno de fricción ( Suh, 1981).

Fig. III.2,1

Conceptos de elasticidad, plasticidad y mecánica de suelos.

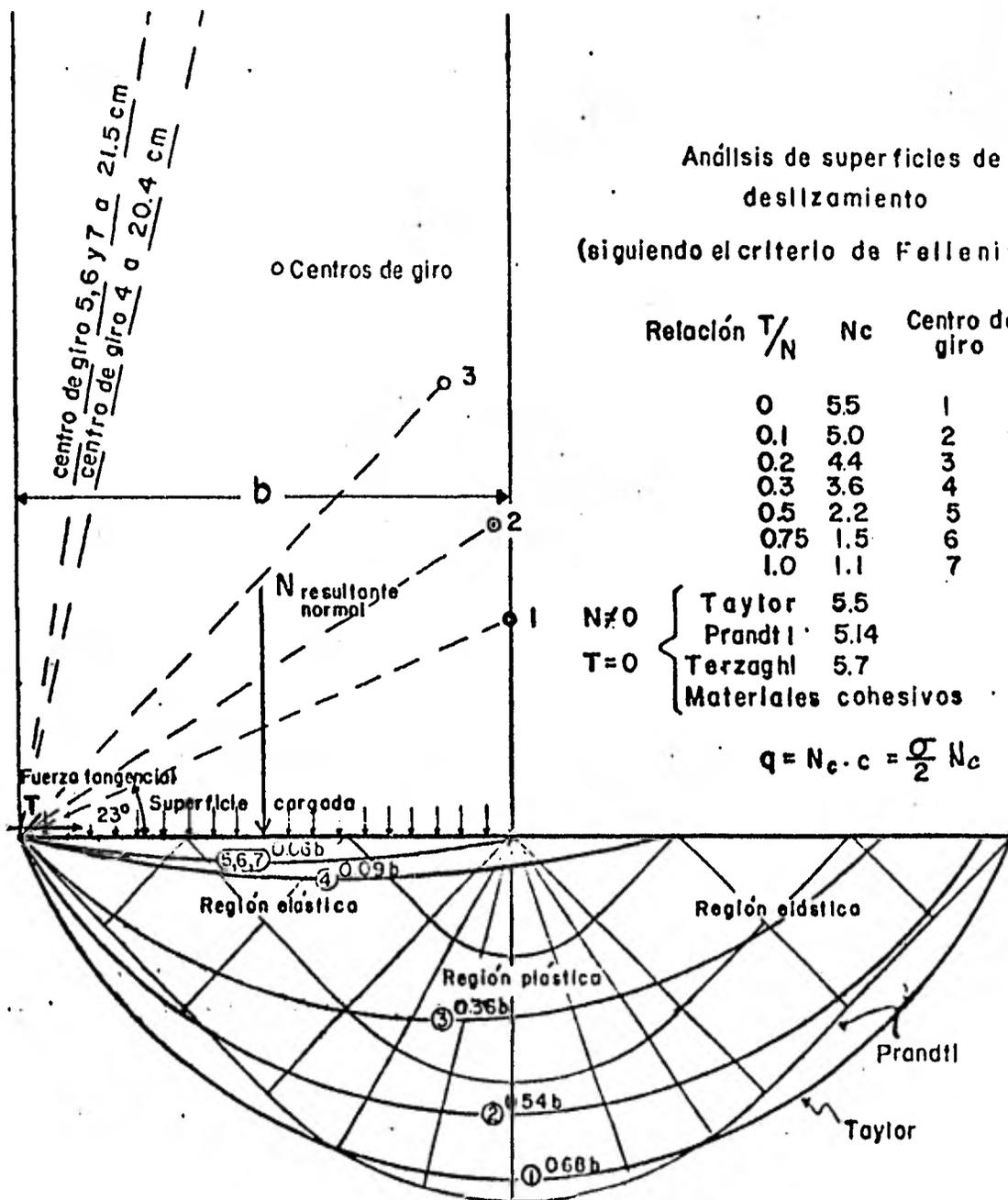
a) Cálculos elásticos de esfuerzo y área de contacto.

En su texto "Elasticity and Plasticity" H. Westergaard ( Westergaard, 1952 ), a partir de los resultados de J. Boussinesq ( estado de esfuerzos en un medio semiinfinito inducido por una fuerza normal a la superficie, 1878 ) y de Cerruti ( fuerza tangencial en la frontera de un medio semiinfinito, 1882 ), primero con el círculo diádico y más adelante con el de O. Mohr ( círculo de Mohr en el plano  $\sigma$  vs  $\tau$ , 1882 ), desarrolla entre otros temas, la ca racterización y la teoría de esfuerzos de cuerpos en contacto. Según las propiedades intrínsecas de los cuerpos, como el módulo de elasticidad E, coeficiente de Poisson  $\nu$ , etc., y de la rigidez relativa entre ellos, podrán presentarse diferentes estados de reacción en el contacto ( Fig. III.2.2 ).



Fig. III.2,2

Primero h. Hertz ( 1881 ) y luego S.P. Timoshenko ( Timoshenko, 1934 ), alumno de Westergaard, con las mismas ideas obtuvo las fórmulas para calcular el nivel de esfuerzo y el radio de área de contacto entre dos cuerpos esféricos en contacto ( Figs. III.2,3 y III.2,4 ).



superficies probables de deslizamiento.  
( Análisis bidimensional )

Fig. III.2,6

### ESFUERZOS EN ESFERAS EN CONTACTO DEL MISMO MATERIAL

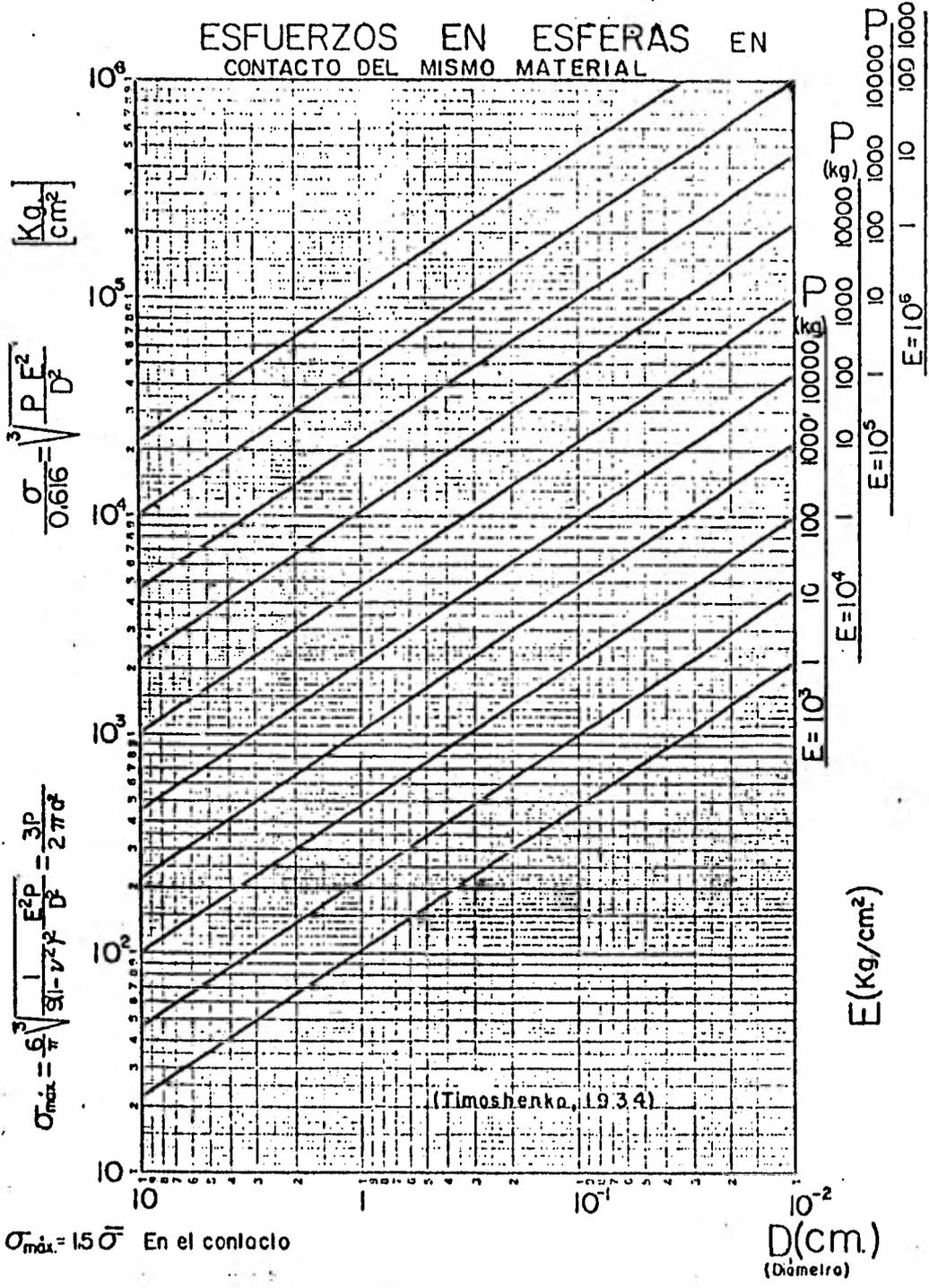


Fig. 11.2,3

# RADIO DE CONTACTO EN ESFERAS

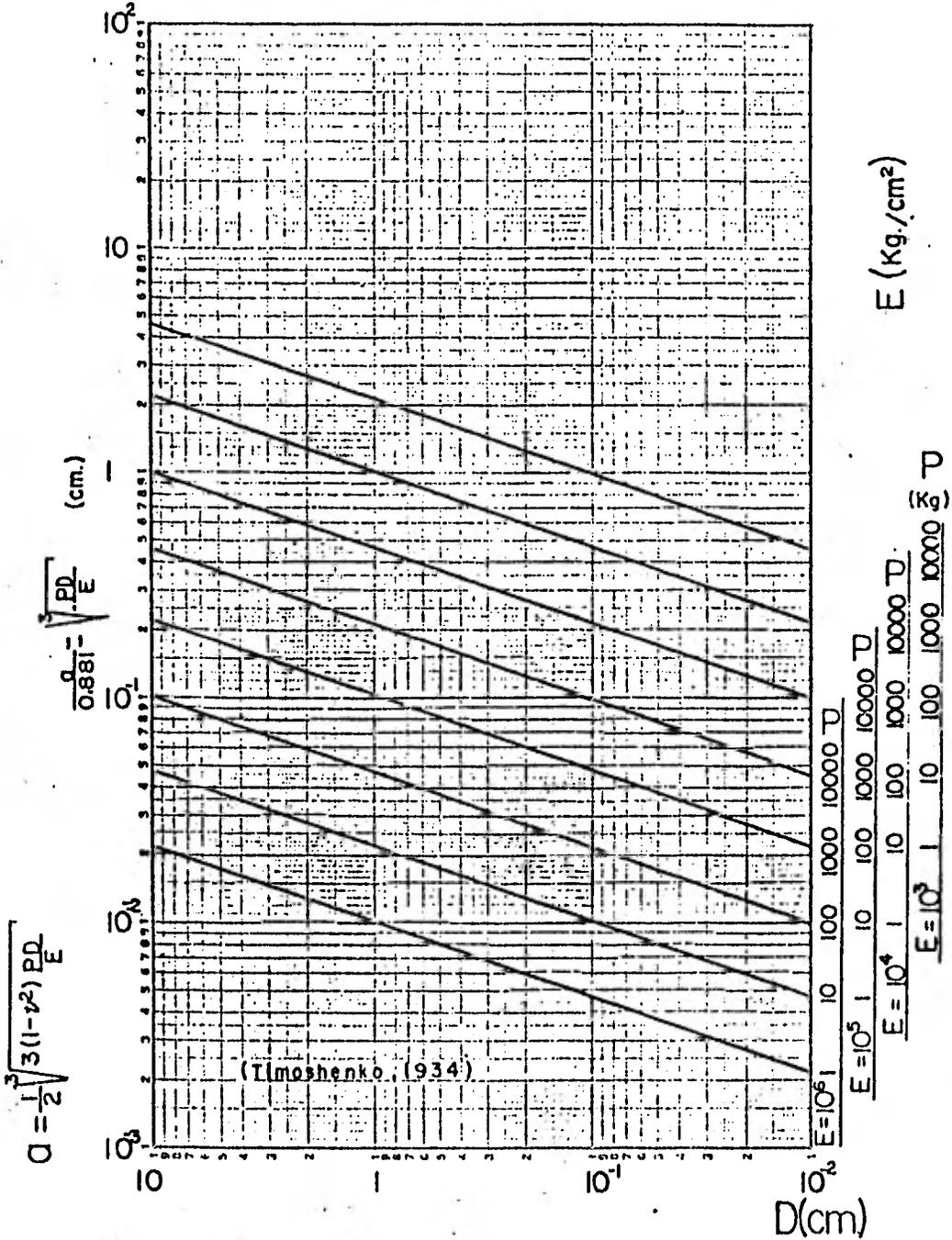


Fig. 111.2,4

Si bien ésta no representa el área real de contacto, permite estimar el orden de magnitud del problema, pero sin consideraciones de plasticidad. Fué N. Carrillo ( Carrillo, 1942 ), también alumno de Westergaard, quien obtuvo el valor de la carga límite elástica sobre un medio semiin finito bidimensional  $q = \pi c$ , para el que se inicia la plastificación del medio por esfuerzo cortante en puntos a lo largo del semicírculo inferior de la franja cargada, sin llegar a formar una superficie continua de falla ( Fig. III.2,5a ).

b) Modelos Plásticos. En el texto de plasticidad de A. Nadai ( Nadai, 1950 ) pag. 468, se muestra como L. Prandtl ( 1920 ) propone su modelo de falla, después de avanzar la plastificación del medio hasta llegar a formar una superficie de deslizamiento con resistencia límite  $q = (\pi + 2)c$  ( Fig. III.2,5b ). En éste caso la profundidad de la falla ocurre a  $0.7b$ , siendo  $b$  el ancho de la franja cargada.

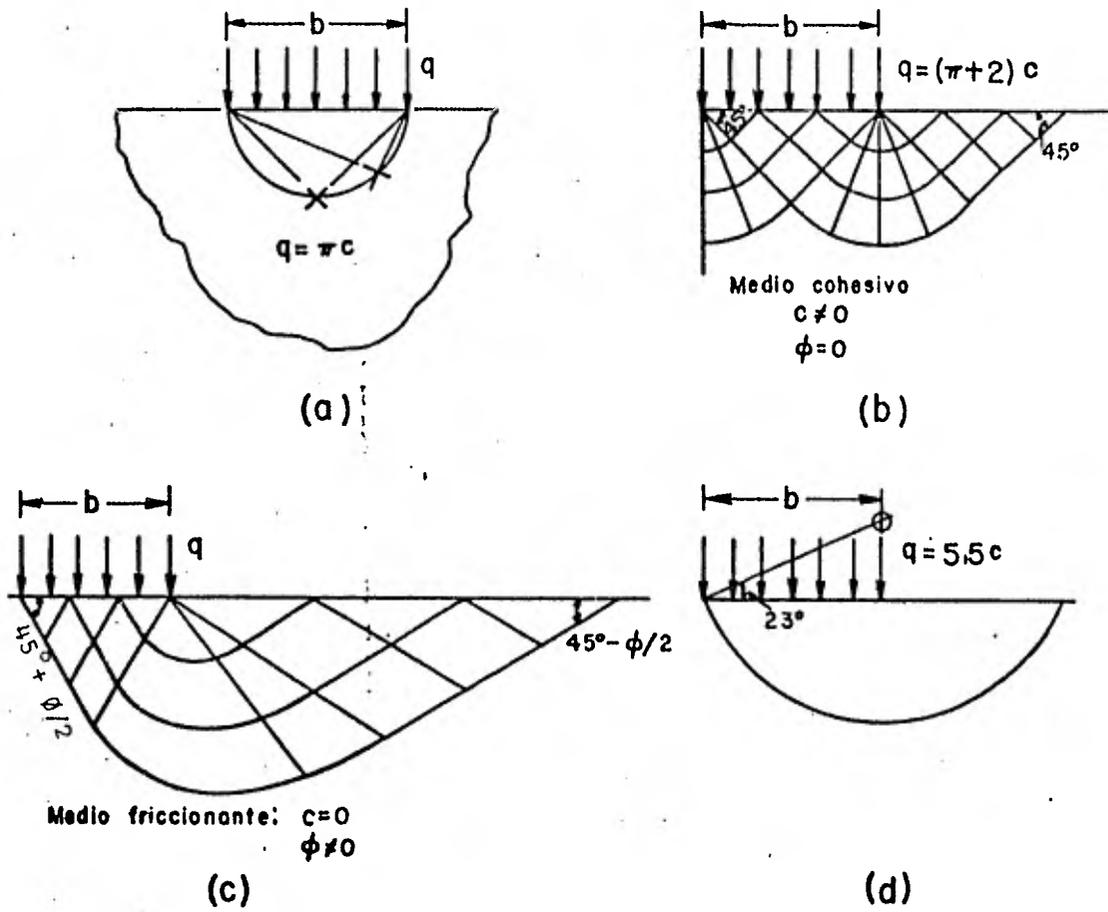
En su libro sobre teoría de la plasticidad, R. Hill ( Hill, 1950 ), muestra como el modelo de Prandtl constituye la base teórica del problema de indentación, que explica la dureza de los materiales ( Westbrook, 1973 ). Hill también expone la teoría con la que se establecen las líneas de fluencia ( líneas de Lüders ). Siguiendo el modelo de Prandtl, K. Terzaghi ( Terzaghi, 1948 ), en su conocido libro "Theoretical Soil Mechanics", sugiere el modo de falla en un medio friccionante ( Fig. III.2,5c ).

Fué W. Fellenius ( Fellenius, 1930 ), quien suponiendo que las superficies de falla en medios cohesivos ocurre a lo largo de superficies cilíndricas circulares, emplea el llamado "Método Sueco" para el análisis de estabilidad de taludes, presas, etc.

Bajo la misma suposición D.W. Taylor ( Taylor, 1948 ), encuentra para un medio cohesivo el centro de giro de la superficie cilíndrica más probable con un coeficiente de capacidad de carga  $N_c$  de 5.5 (  $q = 5.5c$ , Fig.III.2,5d ). En otra parte de su libro propone que la carga límite puede estar gobernada por dos efectos  $Q = nA + mP$ , el de esfuerzo unitario de compresión  $n$  en el área  $A$  y el de esfuerzo cortante unitario  $m$  en el perímetro  $P$ . Terzaghi, en otro capítulo de su libro al tratar el tema de capacidad de carga ( Terzaghi, 1948 ) indica para zapatas bidimensionales un valor de  $q = 5.7c$ ; agrega que en el caso de una zapata circular o cuadrada y de acuerdo a evidencia experimental, ésta debe ser aumentada en 30% (  $q = 1.3 \times 5.7c$  ).

Haciendo ahora el análisis de la falla de una franja bidimensional con la misma hipótesis de superficies de deslizamiento cilíndricas, bajo la acción simultánea de una fuerza normal y una tangencial, con la idea de simular un estado friccionante  $\mu = T/N$ , en la Fig. III.2,6 se indica el corrimiento que ocurriría al rededor de los centros de giro más probables para distintas relaciones de  $T/N$ . Estos resultados sugieren lo siguiente: a medida que la relación  $T/N$  se incrementa entre 0 y 1, la profundidad de la superficie de falla disminuye para  $T$  cercana a cero, como Taylor había indicado, la profundidad de exfoliación esperada se encontraría a 0.68 del ancho de (  $b$  ) de la superficie en contacto; para  $T/N = 0.1$  el corte sería del orden de la mitad de la superficie cargada y de la tercera parte del ancho  $b$  para  $T/N = 0.2$ ; con relaciones  $0.3 < T/N < 1$ , la falla circular varía entre profundidades comprendidas apenas entre el 9% y el 6% de  $b$ .

Modelos de plasticidad de una franja cargada en un medio semiinfinito bidimensional



Resumen:

Se inicia la plastificación	$q = \pi c$	Carrillo
Capacidad de carga de una franja bidimensional	$q = (\pi + 2)c$	Prandtl
	$q = 5.5c$	Taylor
	$q = 5.7c$	Terzaghi
Capacidad de carga de una superficie cuadrada	$q = 13 \times 5.7 \times c$	Terzaghi

Fig. III.2,5

Si el coeficiente de fricción de materiales dúctiles se toma como una propiedad de los sólidos en contacto, una vez determinado su valor, podría anticiparse la profundidad de exfoliación esperada. Para esto hace falta verificar experimentalmente si el mecanismo de falla ocurre de la manera que aquí se propone. Nótese que en todo lo expuesto no se ha tomado en cuenta el factor tiempo o la velocidad a la que ocurren las deformaciones bajo esfuerzo ( creep, fatiga ), por ejemplo de suma importancia al tratar movimientos de macisos o materiales sometidos a acciones pequeñas pero frecuentes.

Evidencia de efectos a nivel molecular en el mecanismo de fricción.

Se pueden resumir en cuatro puntos: 1.- Plastificación del área real de contacto, medidos en experimentos de conductividad eléctrica . 2.- Fricción fluctuante ( Stick-Slip ) entre superficies de roca ( Cambou, 1974 ), particularmente al agregar agua durante el experimento. También durante ensayos de compresión en aceros a distintas velocidades de carga. 3.- Corte fricción-eléctrico producido por fricción a velocidades arriba de los 60 m/seg. 4.- Fricción en vacío; La ausencia de gases como el oxígeno principalmente ( actúa como lubricante ) provocando una mayor adherencia entre superficies, incrementándose el coeficiente de fricción hasta en un factor de 9 para el diamante.

Equipo.

Sorprendentemente no se encontró en la literatura un procedimiento estándar para medir fricción. No obstante ser una determinación de interés cotidiano, tampoco parece existir en el comercio algún aparato para su medida; aparentemente cada

interesado fabrica su equipo, acorde con el problema que de-  
sea tratar. En el Instituto de Física se diseñaron dos fricción  
metros, que se describirán en el siguiente tema.

### III.3 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE FRICCIOMETROS.

En la etapa de la experimentación, investigación y optimización de los procesos relacionados con las propiedades tribológicas de muestras sometidas a algún tratamiento, éstas deben ser cuantificadas antes y después del proceso para observar los posibles cambios. Se sabe que un aumento de la dureza y disminución del coeficiente de fricción aminoran el desgaste de los materiales, sin embargo aún no se conoce con claridad el mecanismo y la relación que guardan entre sí las propiedades tribológicas capaces de producir dicha disminución al desgaste.

La tribología a pesar de ser un tema antiguo, aún sigue siendo un campo abierto a la investigación. Con la ayuda de otros laboratorios de la U.N.A.M. se tiene forma de medir por ejemplo la dureza, no siendo así para la fricción, por lo que en este capítulo se incluyó el diseño de dos fricciómetros. Por la información consultada en la literatura conviene tener opciones de medir coeficientes de fricción  $\mu$  para pequeñas cargas ( 10 a 400 gr ) y para cargas mayores ( 1 a 25 Kg ).

Uno de ellos, el de baja carga, se diseñó para medir coeficientes de fricción entre superficies preferentemente duras en las que actúan fuerzas normales entre los 10 y 400 gr. Su operación consiste en determinar la relación de fuerzas tangencial a normal  $T/N = \mu$ . La fuerza tangencial se determinará por flexión de una lámina de acero ( 1 mm de espesor ), con cuatro pequeñas resistencias eléctricas adheridas a la lámina ( ver Fig. III.3,1 ), alimentadas con una pequeña fuente de 10V y un voltímetro digital, formando un puente de Wheatstone.

La fuerza de fricción deformará a la lana, provocando un desbalanceo en el arreglo ( cambio de resistividad ) que se reflejará en el vóltmetro; a mayor deformación mayor cambio de voltaje.

Una de las superficies friccionantes es un disco acoplado a la flecha de un motor de 4 rpm, el cual puede desplazarse sobre la mesa con el objeto de variar la velocidad lineal del punto en contacto.

La otra superficie es una esfera de acero, la cual generalmente es la que recibirá el tratamiento, está sujeta a un portamuestras capaz de recibir esferas de 9.4 a 12.4 mm de diámetro. Este portamuestras puede ser cargado con pesas para proporcionar la fuerza normal; además puede desplazarse a lo largo del cantilever si se quiere modificar el brazo de palanca. La construcción ha sido terminada y para su uso se requiere equipo complementario ( un preamplificador, un amplificador, un vóltmetro y un registrador ). Una vez calibrado el sistema, el coeficiente de fricción se determinará midiendo la siguiente relación  $\mu = T/N$ .

El otro fricciómetro fué diseñado con el propósito de disponer de un instrumento que fuese capaz de generar y registrar coeficientes de fricción para cargas grandes entre dos cuerpos en movimiento relativo. Para lograr tal propósito se dispone de un volante impulsado por un motor eléctrico de bajas revoluciones ( 5 rpm ), el cual se encuentra en contacto en su parte superior con una determinada muestra, sobre la que se aplica una fuerza normal y cuyo valor puede ser variado en un intervalo de 1 a 25 Kg. La fuerza normal se mide utilizando un micrómetro en la parte superior de un resorte colocado por encima del portamuestras; La carga puede irse incrementando por un simple giro de la pieza F ( Fig. III. 3,2 ). Con una buena calibración efectuada con anticipación

se logra establecer la relación que existe entre el desplazamiento y el valor de la fuerza.

La combinación de la fuerza normal y el giro del volante originan que la muestra comprima a un fuelle, saturado, con aceite colocado en un costado del portamuestra, generándose de esta manera un gradiente de presión el cual es convertido en una señal eléctrica por medio de un transductor de presión.

Conociendo el valor de la fuerza normal aplicada (  $N$  ) y el de la fuerza tangencial (  $T$  ) resultante, automáticamente puede valuarse el coeficiente de fricción (  $\mu$  ) existente entre las superficies en contacto. Se planea comparar el coeficiente  $\mu$  de la muestra implantada, con la muestra no tratada, para determinar de esta manera el grado de modificación que ha sufrido el coeficiente de fricción.

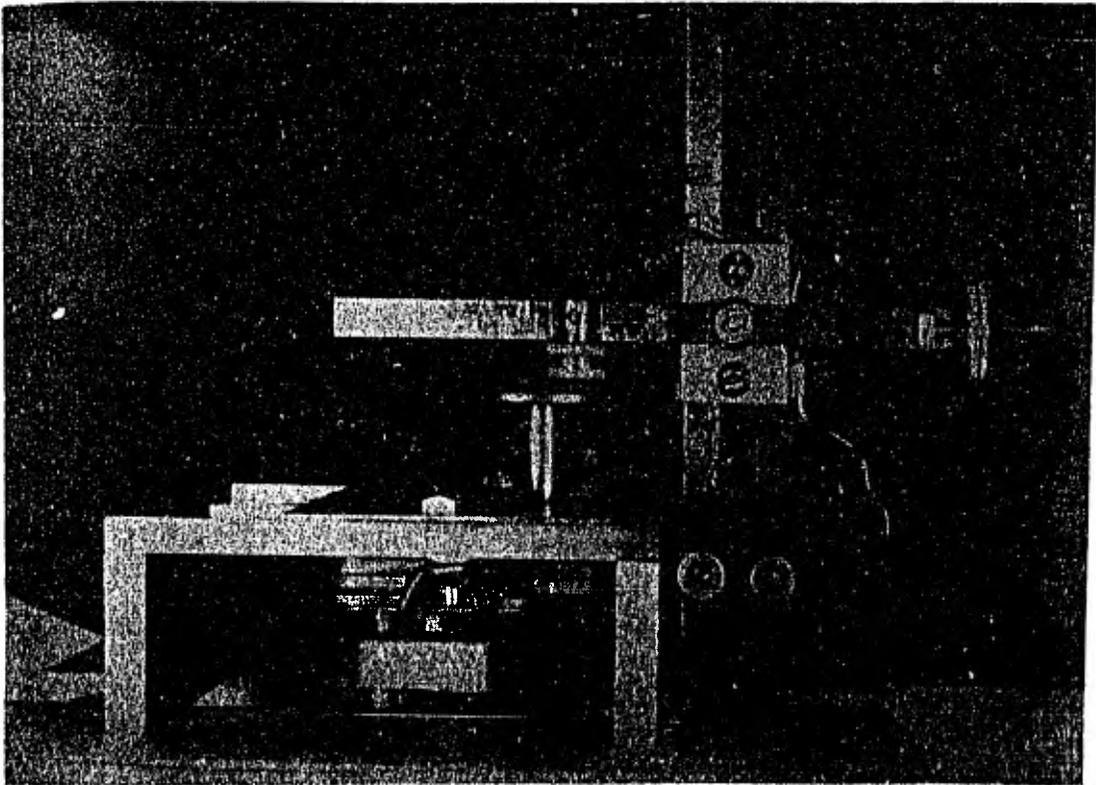
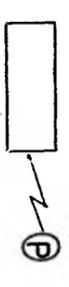


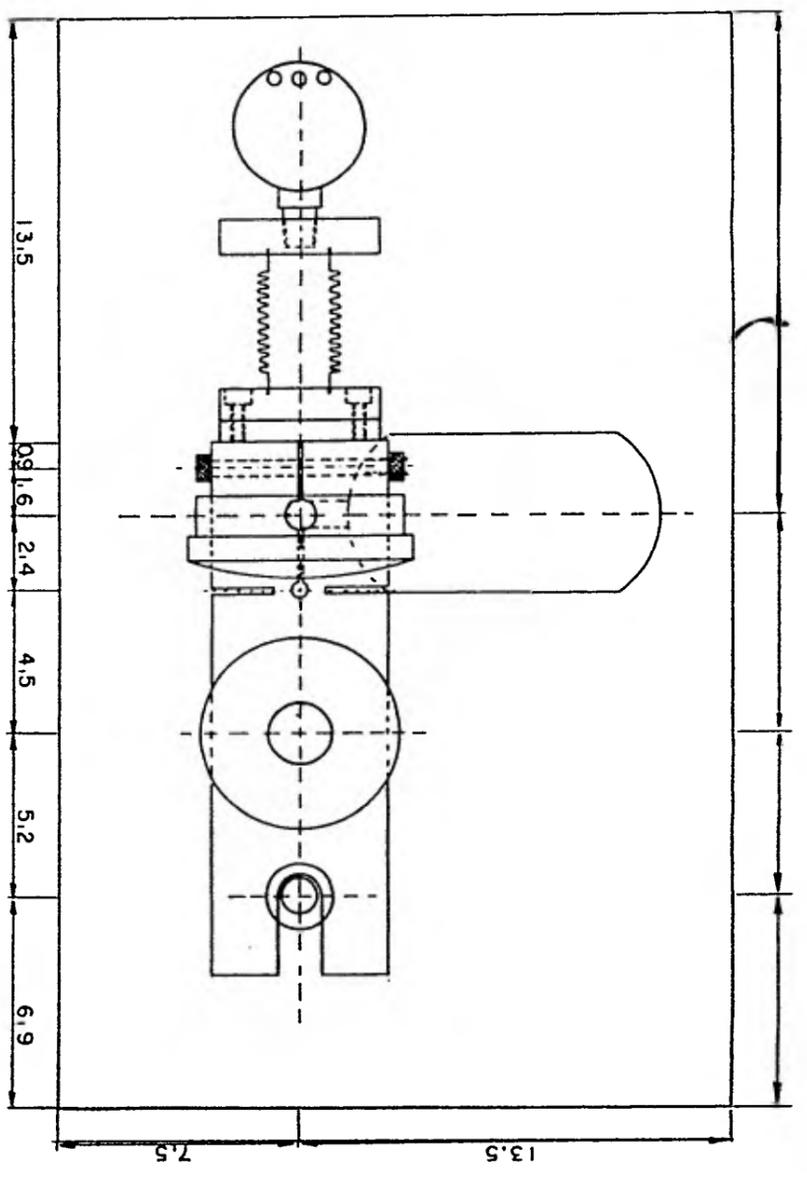
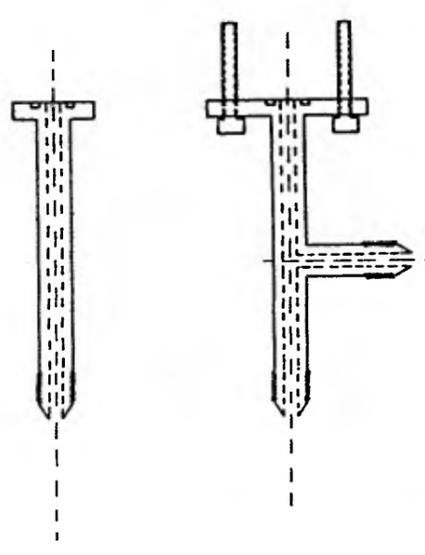
Fig. III.3,1

PIEZAS ADICIONALES

A) SOPORTE PARA EVITAR LA CONTRACCION DEL FUELLE

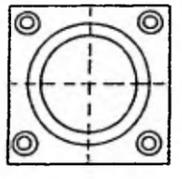


B) ACOPLAMIENTO PARA REALIZAR EL LLENADO DEL ACEITE

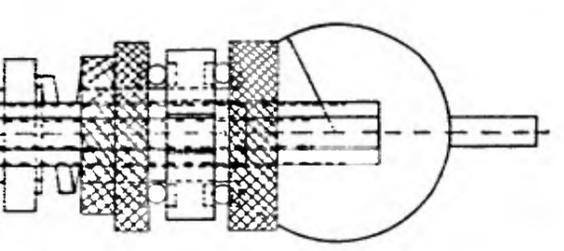
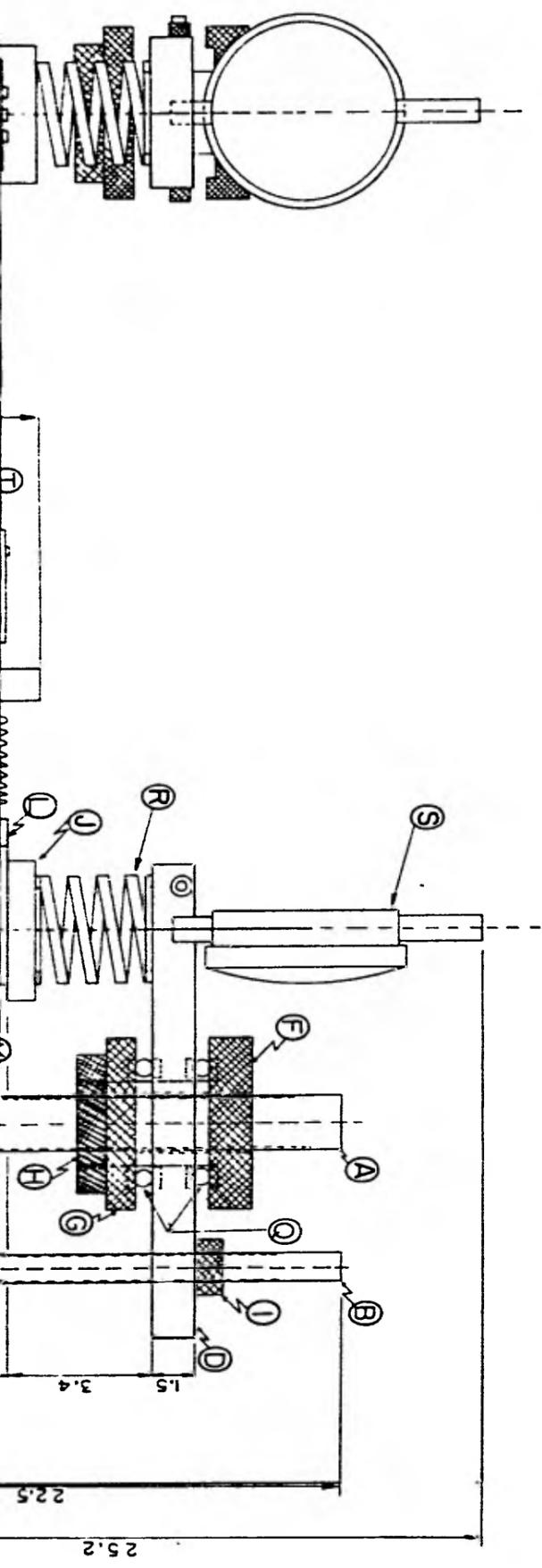
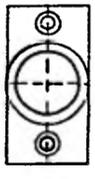


ACOPLAMIENTOS A LA CAJA DE LA MUESTRA

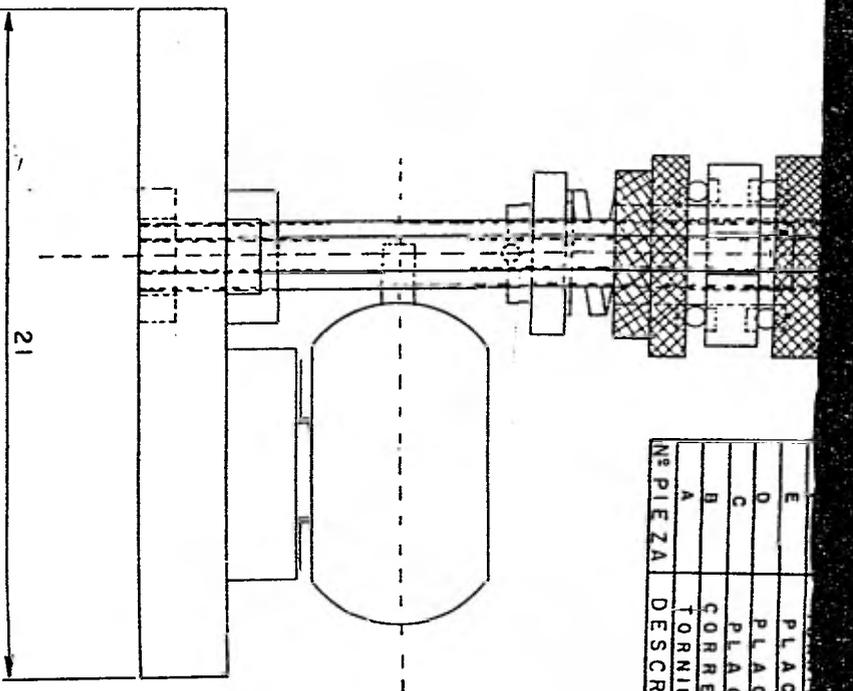
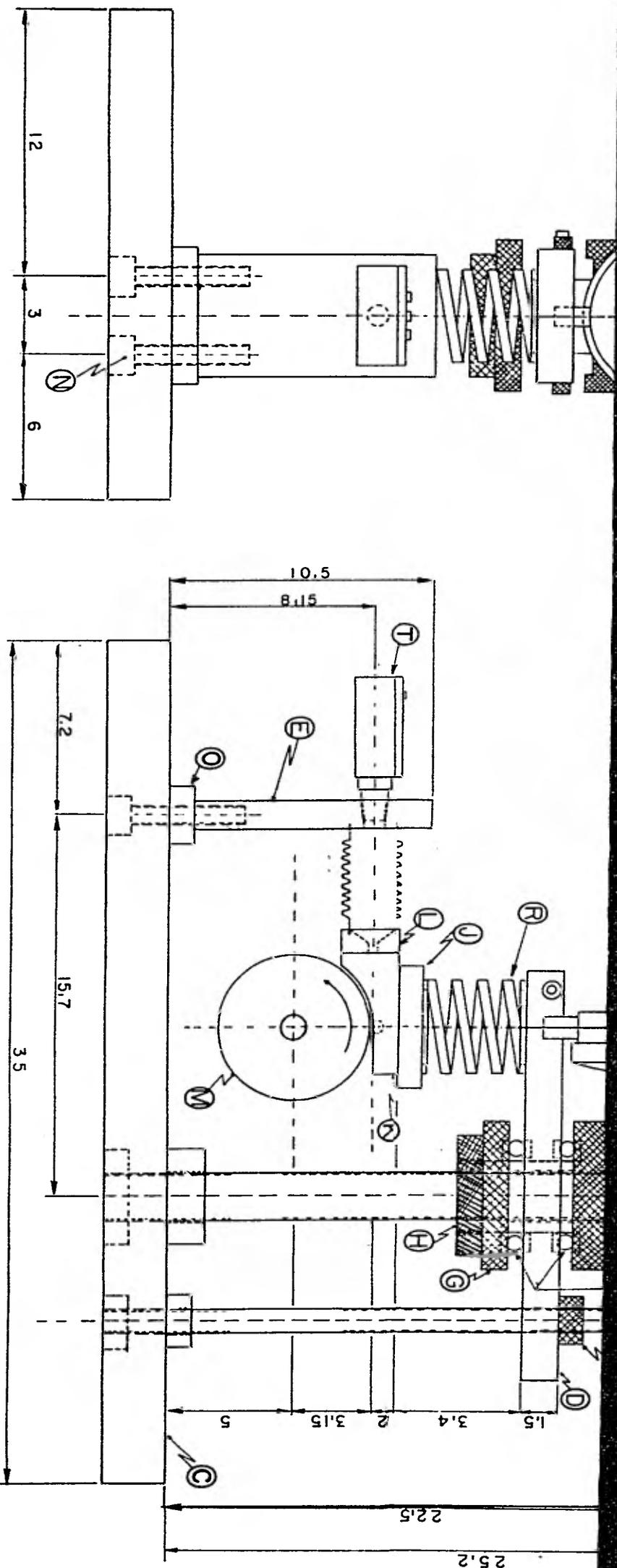
A) DEL RESORTE



B) DEL FUELLE



Nº PIEZA	DESCRIPCION	MATERIAL	DIMENSIONES	CANTIDAD
T	POTENCIOMETRO			1
S	MICROMETRO			1
R	RESORTE	FIERRO	CARRERA = 2,5 Dim=3cm Dim1=3,8cm m=3,4	1
Q	BALEEROS	F.A.G.	5/108	2
P	PLACA	LATON	4,1 X 2,8 X 0,3	2
O	SOLERA	LATON	2,5 X 1,5 cm ø=1,5cm	1
N	TORNILLOS ALLEN	FIERRO	5/16"	8
M	DISCO	ACERO	2-3/8" ø X 0,8	1
L	PLACA	LATON	2,5 X 2,0 X 1	1
K	CAJA	LATON	9 X 9 X 2,5	1
J	PLACA	LATON	5 X 5 X 1	1
I	TUERGA	LATON	3/8" ø	3
H	TUERGA	LATON	5/8" ø	1
G	FLANGE	LATON	6,2 ø X 1	1
F	TORNILLO	LATON	6,2 ø X 6,1	1
E	PLACA	LATON	9,8 X 8 X 1	1
D	PLACA	ALUMINIO	17 X 9,8 X 1,5	1
C	PLACA	MADERA	29 X 21 X 2,5	1
B	CORREDEERA	FIERRO	2,8 X 3,8 ø	1
A	TORNILLO	FIERRO	2,8 X 3,8 ø	1



Nº PIEZA	DESCRIPCION	MATERIAL	DIMENSIONES	CANTIDAD
E	PLACA	LATON	9,5 X 8 X 1	
D	PLACA	ALUMINIO	17 X 8,5 X 1,5	
C	PLACA	MADERA	35 X 21 X 2,5	
B	CORREDERA	FIERRO	2,5 X 3/8"	
A	TORNILLO	FIERRO	2,5 X 3/4"	

ESC: 1:1  
 ACOT: cm.

Fig. III, 3,2

	FABRICA 0-25 KA	PROYECTO DISEÑO FECHA 10-9-81
	FABRICO KRODEM	PLANO PROYECTO DISEÑO FECHA 10-9-81

SEPTIEMBRE 1981.

#### III.4 TECNICA ALTERNATIVA A LA DE IMPLANTACION DE IONES

Mientras que por I de I se entiende en general el fenómeno de la inyección de átomos más bien pesados, con energías comprendidas entre los 10 y 200 KeV en sólidos, existe otra técnica que bajo energías menores de los 20 KeV, se depositan elementos sobre superficies sólidas formando así un tratamiento superficial, el cual recibe el nombre de "Recubrimiento Iónico" ( Ion-Plating ).

Sobre estas dos técnicas aún no se comprenden con claridad los efectos físicos como el de difusión termo-iónica o de reacciones químicas de las sustancias, en los procesos que ocurren en la superficie de los sólidos.

Como todavía se llevará algún tiempo la construcción de los elementos diseñados en este trabajo, se han iniciado los estudios experimentales en el laboratorio referentes al recubrimiento iónico en aceros, usando la cámara de blancos ya puesta en marcha con el aluminizado de espejos telescópicos.

Dentro del recubrimiento iónico existe por ejemplo la nitrogenación iónica, que puede ser aplicada para modificar características en los aceros tales como son las propiedades de resistencia al desgaste, dureza, mayor resistencia a los ataques corrosivos y disminución de la fricción.

Se considera por lo tanto que es importante explicar en que consiste el procedimiento de recubrimiento iónico, para compararlo con el método de la I de I. La sugerencia de comparar los resultados o coeficientes de fricción de metales

tratados bajo los dos procedimientos mencionados, aparece en la página 133 de la referencia ( Suh, 1981 ).

i) Recubrimiento Iónico.

Esta técnica fue desarrollada por D. M. Mattox en el año de 1963, la cual consiste en depositar un metal limpio bajo la acción de un plasma algún otro elemento, proporcionando de esta manera las propiedades antes mencionadas.

Una forma de realizar el depósito de sustancias es por el método llamado evaporación al vacío, el cual consiste en evaporar el elemento a depositar en el vacío, por una fuente de calor haciéndolo de preferencia con los elementos de bajo punto de fusión. No siendo tan fácil la evaporación de sustancias de alto punto de fusión, debido a los materiales disponibles de la fuente o con los componentes químicos como carburo de tungsteno y carburo de boro, debido al difícil control de la disociación molecular que presentan éstos durante su evaporación.

El elemento por evaporar se introduce en una cámara a una presión aproximadamente de  $1$  a  $3 \times 10^{-3}$  y conteniendo el material por recubrirse en una atmósfera de gas inerte ( usualmente argón ). Una vez hecho esto se aplica un potencial de  $500$  a  $5000$  V, creando así una descarga eléctrica a través del gas, lo que provoca su ionización y la limpieza de las superficies expuestas al bombardeo de los iones.

De esta manera, al mismo tiempo que los mismos iones del gas penetran y limpian las superficies, los átomos neutros se depositan sobre éstas proporcionando una cubierta en todo el material, logrando así una gran adherencia superficial.

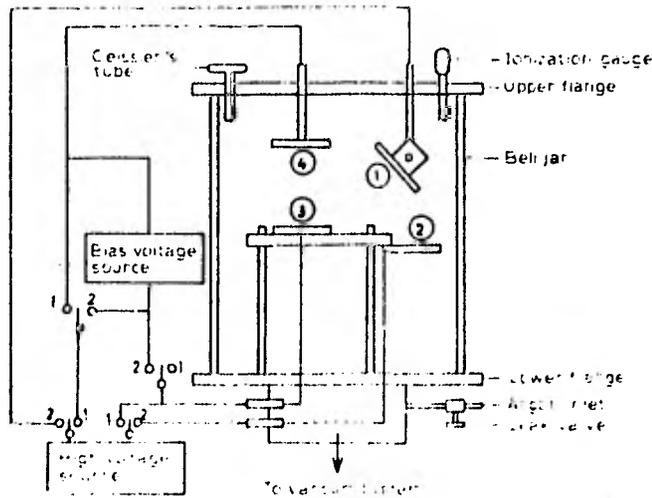
Un método mediante el cual se logra tener una mayor efectividad de recubrimiento es con el uso de la técnica de erosión iónica, logrando así el tratamiento de materiales con

elementos de alto punto de fusión y de componentes químicos ( Ohmae,1974 ).Una manera de realizar la erosión iónica en estos elementos, es mediante el uso de un cañón de electrones.

El departamento de ingeniería de precisión, de la facultad de ingeniería de Osaka en Japón y con los trabajos realizados por Ohmae, et.al. han mostrado que la aplicación de la erosión iónica para realizar el recubrimiento de superficies con los elementos antes mencionados es de gran utilidad.

Se realizaron pruebas en amateriales para depositar plata, oro y carburo de boro, observándose la microestructura de las capas mediante un microscopio de transmisión de electrones, el cual mostró una completa diferencia entre el método de evaporación en vacío y el de erosión iónica.

El proceso de depósito se llevó a cabo en el siguiente aparato ( Fig. III.4,1 ) del que se explica a continuación su principio de operación.



Aparato para realizar el recubrimiento iónico. Fig. III.4,1

Este aparato consta de los siguientes componentes principales:

Un blanco ( a ) o elemento por depositar; un electrodo de alto voltaje ( b ); el sustrato ( c ) o elemento por recubrirse; un electrodo polarizador ( d ); una fuente de alto voltaje; una fuente polarizadora y una cámara conectada a un sistema de vacío y a la válvula alimentadora de gas inerte.

Primeramente se lleva la cámara a una presión de  $10^{-5}$  mm Hg y enseguida se inyecta el gas inerte ( argón ) hasta llegar a una presión de  $1 \text{ a } 3 \times 10^{-3}$  mm Hg . Entre ( c ) y ( d ) se aplica un voltaje de 17 KV para realizar la limpieza del primero por erosión. Hecho esto se aplica ahora un voltaje de 20 KV entre ( a ) y ( b ), siendo ( a ) el ánodo lo cual hará que los electrones emitidos desde el cátodo arranquen moléculas ó átomos de ( a ) realizando una erosión iónica sobre éste.

Al mismo tiempo con la fuente polarizadora se establece un voltaje polarizador entre ( c ) y ( d ) teniendo un voltaje en ( c ) desde 200 a 100 V con respecto a ( d ) . Los átomos o moléculas arrancadas serán ionizadas al ocurrir una descarga eléctrica brillante del argón entre ( c ) y ( d ) . Los iones formados se dirigirán al sustrato ( cátodo ) llegando éstos con una energía cinética alta a diferencia de los creados por el método de evaporación en vacío que llegan con una energía cinética más baja.

La cantidad de iones depositados dependerá del ángulo de inclinación de ( a ) y de la distancia de este y el sustrato. Los blancos utilizados fueron oro, plata y carburo de boro y el sustrato fue acero con un .25% de carbono.

La penetración de los iones de oro y plata fue de aproximadamente entre 3000 y 4000 Å y la de carburo de boro fue me-

nor que 1  $\mu\text{m}$ .

Con las muestras obtenidas se realizaron pruebas de resistencia al rayado por fricción y al frotamiento vibracional, en un aparato diseñado para tales pruebas; de éstas se obtuvieron las siguientes conclusiones.

- De la capa de oro depositada se logró tener un tiempo grande de vida en pruebas de frotamiento, mayor que el de la capa producida por la simple evaporación al vacío.
- La capa de carburo de boro (  $\text{B}_4\text{C}$  ) mostró las propiedades más favorables contra el frotamiento vibracional.
- La capa de plata contribuyó a libricar la superficie contra cargas pesadas y ésta resulta ser superior a la producida por la evaporación en vacío.

A continuación se mencionan algunas ventajas que presentan el recubrimiento iónico y la de I de I, así como también sus diferencias.

Ventajas que presentan ambas técnicas.

- Ambas técnicas permiten en ciertos casos formar una aleación de recubrimiento a profundidades no mayores de 1  $\mu\text{m}$  dentro del material, la cual no presenta problemas de desprendimiento.
- Estas dos técnicas son aplicadas para mejorar en algunos casos funciones mecánicas como son: aumentar la resistencia al desgaste, disminución de la fricción entre sólidos y mejorar la resistencia a la corrosión.
- Otra característica de las dos, es que puede no involucrar una alta temperatura de operación durante el tratamiento de la pieza.
- Es posible lograr un contacto íntimo de los elementos depositados en el sustrato, sin importar la composición de éstos y lograr un buen depósito. Por ejemplo algunos metales

pueden ser plateados sobre plásticos o también ciertas cerámicas pueden ser depositadas sobre metales. Además es posible tener un control de la composición y espesor de la capa por depositar. La implantación de iones logra también composiciones poco usuales; la profundidad afectada es en general un poco mayor en este último caso.

- Cada una bien se podrá aplicar dependiendo de la energía del ión y de cuanto se aprenda del proceso en cuestión. Posiblemente el de mayor energía tenga mayor amplitud de aplicación, por ejemplo en la microelectrónica.

Las diferencias observadas en el recubrimiento iónico y en la I de I son:

- El equipo empleado para el recubrimiento iónico resulta ser más económico que el del proceso de implantación. Es también un proceso apropiado para trabajar piezas grandes; en estos casos es más rápido y eficiente.
- La I de I requiere de una línea de acceso del haz de iones acelerados sobre el blanco. En cambio el recubrimiento iónico tiene lo que se llama un buen poder activo, lo cual quiere decir que los átomos ionizados producidos en la descarga de gas son dispersados por este mismo y finalmente se depositan simultáneamente sobre materiales aunque presenten una estructura irregular.

El recubrimiento iónico puede realizarse dentro de un gas reactivo que al combinarse con el gas evaporado, reaccione con éste y forme revestimientos especiales; por ejemplo nitrato de titanio se ha depositado en esta forma.

#### ii) Nitrogenación Iónica.

El desarrollo de este proceso se inició en 1964 cuando en los laboratorios de la General Electric, se produjo a través de una descarga luminiscente la nitrogenación iónica de elementos metálicos, la cual a lo largo de 10 años de aplicación ha

mostrado todas las ventajas y aún más, que las que proporcionan los métodos de nitrogenación convencionales ( Jones, 1973 ).

Una manera de llevar a cabo el proceso de nitrogenación, es dentro de una cámara en la que se trata de lograr primero un alto vacío para inyectar después nitrógeno gaseoso hasta alcanzar una presión aproximada de  $4 \times 10^{-2}$  mm Hg. En la cámara se coloca el material o blanco, el cual se polariza negativamente ( cátodo ), estableciendo una diferencia de potencial entre un ánodo y éste, por ejemplo con un aro rodeando al blanco.

Al aplicarse la diferencia de potencial suficientemente alta (  $E > 1000 \text{ V}$  ) se emiten electrones de las últimas capas periféricas de los átomos de nitrógeno. Esto ocasiona que se produzca una descarga luminiscente en todo el gas lo que provoca la formación de un plasma de color azul-violeta en toda la cámara. Los iones producidos en la descarga viajarán ( ocurriendo choques sucesivos, con un camino libre medio función de la presión ) hacia el material o blanco, el cual estará sometido al bombardeo intenso de las partículas cargadas, las que al llegar a éste penetran una cierta profundidad, ya sea depositándose o difundiéndose en el medio.

En algunas aleaciones nitruradas tales como AISI 4140 y 4340 se han registrado por difusión profundidades cercanas a .53 mm en un tiempo menor de 20 horas, incluyendo el tiempo para realizar el vacío y establecer un equilibrio de la temperatura en el proceso de unos 500 °C.

Debido a las altas temperaturas que requiere el proceso, la cámara de vacío deberá operar dentro de un intervalo de temperatura entre 330 °C y 580 °C para las diferentes condiciones de trabajo, permitiendo además poder operar más abajo

del intervalo normal de nitruración, que es de 500 a 580 °C ( Jones, 1973 ).

El uso de temperaturas de operación más bajas incrementará lógicamente el tiempo del proceso, pero ayudará a reducir la distorsión que puedan sufrir las piezas.

Dado que el proceso se mantiene a una cierta temperatura debido a la descarga luminiscente y a la baja presión de operación existen pérdidas de calor por radiación, aunque éstas son relativamente pequeñas.

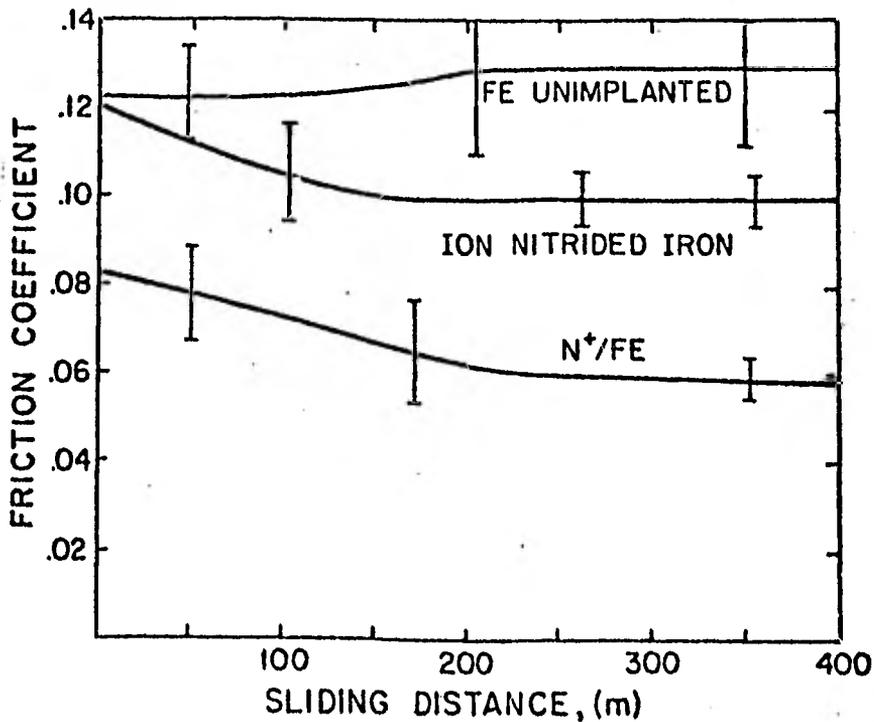
Dichas pérdidas pueden ser reducidas por escudos de radiación, los que incrementarán la eficiencia de calentamiento sin deteriorar la acción de la nitruración. Un inconveniente en el desarrollo del proceso es el tiempo en el que este se lleva a cabo, ya que requiere desde 25 a 30 horas en promedio para la obtención de la completa nitrogenación de los materiales en proceso.

Resulta importante comparar esta técnica con la de I de I para tener de esta manera un mejor conocimiento de cada una; para esto se comparan resultados obtenidos de materiales preparados por la I de I de nitrógeno y el nitrogenado iónico ( Suh, 1981 ).

- La capa formada por ambos es de varios órdenes de magnitud más grande para la nitrogenación que para la implantación de iones. El mayor espesor de la capa es más resistente al esfuerzo de soportar cargas grandes.
- La dureza obtenida de una superficie de acero nitrogenada es 3 veces mayor que la dureza de una superficie sometida a la implantación de nitrógeno, sin embargo el coeficiente de fricción del primero resulta ser más grande que el de implantación, no mostrando con esto un desgaste elevado en la muestra nitrogenada.

- El proceso de I de I es un proceso que se realiza a bajas temperaturas, mientras como ya se mencionó, la nitrogenación se realiza a temperaturas arriba de los 500°C .

En la siguiente gráfica ( Fig. III.4,2 ) se muestra el cambio en el coeficiente de fricción contra la distancia de deslizamiento de aceros no-implantados, aceros nitrogenados y de aceros implantados con iones nitrógeno. Las pruebas fueron realizadas al medio ambiente y con una carga normal de 400 gramos.



Cambio en el coeficiente de fricción  
contra distancia de deslizamiento. Fig. III.4,2

!

Finalmente, todo lo anteriormente expuesto no significa que la I de I elimine las aplicaciones del recubrimiento iónico, ni viceversa, sino que al contrario ambas son útiles tratamientos superficiales dependiendo de la aplicación que éstas tengan.

## CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

- 1) Debido a la importancia que las tecnologías asociadas con la Implantación de Iones ( I de I ) han demostrado en el desarrollo científico y tecnológico en países avanzados, se decidió en el IFUNAM la implementación de uno de estos laboratorios.
- 2) La implantación de iones se presenta como una nueva técnica para lograr en muchos campos, el cambio de propiedades físicas de los materiales. Aplicaciones importantes aparecen en la literatura electrónica moderna, óptica y mecánica.
- 3) Las técnicas de altos vacíos, producción de iones pesados, aceleración de partículas cargadas, selección magnética su masa y energía, implantación de iones y diseño de equipo forman parte importante de una tecnología avanzada actualmente.
- 4) La aplicación de estas técnicas en la industria creará un desarrollo tecnológico independiente en el país. El avance de esta misma dependerá del interés y el apoyo que le asignen diferentes áreas de investigación y aplicaciones, como la física, química e ingenierías.
- 5) Claramente estas técnicas bien empleadas provocan una repercusión económica importante en el desarrollo del país.
- 6) Como tema de interés de estudio durante el desarrollo de

este trabajo se escogió al tema de la fricción para tratar de entender el fenómeno y de comparar los efectos de la implantación de nitrógeno y su comportamiento mecánico.

- 7) El diseño integral del laboratorio cumple con uno de los propósitos planeados. La construcción de las partes se en encuentran en proceso.
- 8) Ante la necesidad creciente en el país, de tecnologías propias, además de seguir estudiando las propias fuentes de iones para la implantación, el desarrollo de la instrumentación asociada como serían: fuentes de poder ( alto voltaje, alta corriente ), medidores de campo magnético, medidores de vacío, medidores de fricción, medidores de dureza etc.
- 9) Las tecnologías discutidas se prestan para fomentar estudios interdisciplinarios de varias ramas de la actividad profesional, como son: metalurgia-mecánica, química-metallurgia, estado-sólido-electrónica, óptica-electrónica y otras.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente al Dr. Jorge Flores, Director del IFUNAM y al Ing. Javier Jiménez Espriú Director de la Facultad de Ingeniería en coordinación con el Ing. Alberto Camacho que hicieron posible nuestra participación en el desarrollo del proyecto de Implantación de iones.

Se agradece ampliamente al programa de Becas CONACyT-UNAM , cuya valiosa ayuda fué de vital importancia en el desarrollo del programa.

Siguientemente:

Al Ing. R. Huacuja, M. Mazari, F. Mercado y M. Veytia por su asesoría durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Federico García Santibáñez y a Araceli Angeles por el apoyo recibido.

Al Dr. Singer, por la información proporcionada.

A F. Calderón, por sus consejos y ayuda durante el desarrollo del laboratorio.

REFERENCIAS.

- F. Alba Andrade. "Aceleradores de Partículas". Serie de Física. Monografía No. 7. Secretaria General de la O.E.A. ( 1971 ).
- G.D. Alton. IEE Trans. Nucl. Instr. Sei NS-26 No. 3. ( 1979 ).
- G.D. Alton. "High Intensity Heavy Ion Sources". Proceedings of the Third International Conference on Ion Implantation Equipment and Techniques 25 ( 1980 ).
- L. Artsimovich y S. Lukianov. "Movimiento de partículas cargadas en los campos eléctricos y magnéticos". ed. Mir-Moscu ( 1974 ).
- Boletín No. 4 de la Sociedad Mexicana de Física. ( 1977 ).
- F.P. Bowden, A.I.W. Moore y D. Tabor. "The Ploughing and Adhesion of Sliding Metals". Jour. Appl. Phys. 14, 80 ( 1942 ).
- F.P. Bowden y D. Tabor. "Friction and Lubrication". John Wiley and Sons ( 1956 ).
- W.W. Buechner. "The Determination of Nuclear Reaction Energies by Deflection Measurements". Progress in Nuclear Physics ( 1956 ).
- W. Bygrave, P. Treado and J. Lambert. "Fundamental Experiments with a Van de Graaff Accelerator High Voltage Engineering Corporation ( 1970 ).
- B. Cambou. "Ettude du Frottement entre Materiaux Rocheux". Publicación E 11, Instituto de Ingeniería. UNAM. ( 1974 ).
- N. Carrillo. Tesis Doctoral. Univ. de Harvard ( 1942 ).

- J.D. Cockcroft and E.T.S. Walton. Proc. Roy. Soc. London A136 A137 ( 1932 ).
- C.A. Coulomb. "Theorie des Machines Simples. En ayant Egard au Frottement de Leur Particles, et a la Roideur des Cordages". Men. de l'Acad.Roy. Sci. 10, 161 ( 1785 ).
- A. Dacal. Comunicaci3n Personal ( 1982 ).
- H.L. Daley, J. Perel. Rev. Sci. Instr. 42. 1324 ( 1971 ).
- G. Dearnaley, J.H. Freeman, R.S. Nelson and Stephen. "Ion Im - plantation. Vol 8. Series Defects in Crystallin Solids" ( 1973 ).
- G. Dearnaley, A. Harwell, Didcot, England. "Site Characteriza - tion and Agregation of Implanted Atoms in Materials". ( 1978 ).
- Enge, Wehr, Richards. "Introduction to Atomic Physics". Addison Wesley (1972 ).
- W. Fellenius. "Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion Adhäsion, und unter Annahme Kreiszyllindrischer Gleichflächen". Rev. ed. Berlín. Ernst ( 1939 ).
- Feynman, Leighton, Sands. "Electromagnetismo y Materia. Física. Vol.II". Fondo Educativo Interamericano. S.A ( 1964 ).
- A.T. Finkelstein. Rev Sci. Instr. 11.94 ( 1940 ).
- Gausz. "Tablas Logarítmicas". ed. Konrad Wittwer ( 1939 ).
- Gerthsen-Kneser, H. Vogel. "Física 13a edición". ( 1979 ).
- A. Guthrie. "Vacuum Technology". John Wiley and Sons ( 1963 ).
- G,W. Hamilton. "Symp. on Ion Sources". Brookhaven BNL 50 310.

171 ( 1971 ).

R. Hill. "The Mathematical Theory of Plasticity. Univ. of Nottingham. Oxford ( 1950 ).

Instrumentación y desarrollo ( 1981 ).

C. K. Jones, D.J. Sturges and S.W. Martin. "Glow discharge Nitriding in Production". Metal Progress 1314 ( 1973 ).

J.H. Keller. "Beam optics design for Ion Implantation Equipment and Techniques". Proceeding of the Third International Conference on Ion Implantation Equipment and Techniques. Queen's University, Kingston Ontario 8-11 Julio ( 1980 ).

Livingston and Blewett. "Particle Accelerator". McGraw Hill, Book Company 26 ( 1962 ).

A. Marcus. "Electrónica para Técnicos". ed. Diana ( 1979 ).

M. Mazari. Rev. Mex. Fis. 18 supl. ( 1969 ).

M. Mazari, R. Roos, F. Aldape, D. Olmos, N. Palacios y E. Godínez. "Notas sobre el montaje, enfoque calibración y operación de un espectrógrafo Mattauch-Elbek". Revista Mexicana de Física ( 1973 ).

F. Mercado. "Diseño de la línea de rayos-x para el acelerador Van de Graaff de 0.7 MeV". ( 1976 ).

A. Nadai. "Theory of Flow and Fracture of solids I y II". MacGraw Hill ( 1950 y 1963 ).

National Reserach Council de los E.U. ( 1980 )

J.F. O'Hanlon. "A User's Guide to Vacuum Technology". Wiley-Interscience ( 1980 ).

- N. Ohmae, T. Nakai and T. Tsukizoe. "On the application of Ion Plating Technique to tribology". P. 6th Internal. Vacuum Congr. 451 ( 1974 ).
- P. Palmer. "What about Friction?". Am. Jour. Phys. 17, 181 ( 1949 ).
- P. Palmer. "What about Friction? Part II. Friction Saw. Electrical Theory. Lubrication". Am. Jour. Phys. 17, 336 ( 1949 ).
- E. Pérez. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. ( 1975 ).
- D. Pineda C. "Evaluación de alternativas en sistemas de comunicación por fibra óptica". IEEE, México, ( 1980 ).
- E. Rabinowicz. "A Quantitative Study of the Wear Process". Proc. Phys. Soc. ( London ) 66, 929 ( 1953 ).
- E. Sandoval. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias UNAM. ( 1970 ).
- E. Singer. "The use of Ion Implantation for Material". Processing Semiannual Progress Report for the Period 10 Oct - 31 Mar 1980 Naval Research Laboratory ( 1980 ).
- E. Singer, J. Hirvonen, H. Rovens. "The effects of Ion Implantation on Friction and Wear of Metals. New Opportunities in tribology". Naval Research Laboratory ( 1981 ).
- D. W. Taylor. "Fundamentals of Soil Mechanics". John Wiley and Sons ( 1948 ).
- E. Terzaghi. "Theoretical Soil Mechanics". John Wiley and Sons. Quinta edición ( 1948 ).
- S. Timoshenko. "Theory of Elasticity". McGraw Hill ( 1934 ).

- N. Ohmae, T. Nakai and T. Tsukizoe. "On the application of Ion Plating Technique to tribology". P. 6th Internal. Vacuum Congr. 451 ( 1974 ).
- F. Palmer. "What about Friction?". Am. Jour. Phys. 17, 181 ( 1949 ).
- F. Palmer. "What about Friction? Part II. Friction Saw. Electrical Theory. Lubrication". Am. Jour. Phys. 17, 336 ( 1949 ).
- E. Pérez. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. ( 1975 ).
- D. Pineda C. "Evaluación de alternativas en sistemas de comunicación por fibra óptica". IEEE, Mexico, ( 1980 ).
- E. Rabinowicz. "A Quantitative Study of the Wear Process". Proc. Phys. Soc. ( London ) 66, 929 ( 1953 ).
- A. Sandoval. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias UNAM. ( 1970 ).
- I. Singer. "The use of Ion Implantation for Material". Processing Semiannual Progress Report for the Period 10 Oct - 31 Mar 1980 Naval Research Laboratory ( 1980 ).
- I. Singer, J. Hirvonen, H. Rovens. "The effects of Ion Implantation on Friction and Wear of Metals. New Opportunities in tribology". Naval Research Laboratory ( 1981 ).
- D.W. Taylor. "Fundamentals of Soil Mechanics". John Wiley and Sons ( 1948 ).
- K. Terzaghi. "Theoretical Soil Mechanics". John Wiley and Sons. Quinta edición ( 1948 ).
- S. Timoshenko. "Theory of Elasticity". McGraw Hill ( 1934 ).

P.D. Townsend, J.C. Kelly y N.E. Hartley. "Ion Implantation, Sputtering and their Applications". Academic Press ( 1976 ).

Trump. Comunicación Personal ( 1982 ).

V. Vlack. "Material Science for Engineers". Addison Wesley Publishing Company ( 1973 ).

J.M. Westbrook y H. Conrad. "The Fundamental Basis of Hardness Test". The Science of Hardness Testing and its research. Amer. Soc. Metals ( 1973 ).

H. Westergaard. "Theory of Elasticity". Public. ( 1952 ).

R.R. Wilson. "La próxima generación de aceleradores de partículas". Investigación y Ciencia 42 ( 1980 )

- P.D. Townsend, J.C. Kelly y N.E. Hartley. "Ion Implantation, Sputtering and their Applications". Academic Press ( 1976 ).
- Trump. Comunicación Personal ( 1982 ).
- V. Vlack. "Material Science for Engineers". Addison Wesley Publishing Company ( 1973 ).
- J.M. Westbrook y H. Conrad. "The Fundamental Basis of Hardness Test". The Science of Hardness Testing and its research. Amer. Soc. Metals ( 1973 ).
- H. Westergaard. "Theory of Elasticity and Plasticity". Dover. Public. ( 1952 ).
- R.R. Wilson. "La próxima generación de aceleradores de partículas". Investigación y Ciencia 42 ( 1980 )