





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA EVAPORADORA DE
RECUBRIMIENTOS METÁLICOS O ALEACIONES SOBRE PLÁSTICOS”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS**

PRESENTA

NOÉ LOZANO VEGA.

ASESORA

DRA. ADRIANA GAONA COUTO.



San Luis Potosí, S.L.P.

Diciembre 2005



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA EVAPORADORA DE RECUBRIMIENTOS METÁLICOS O ALEACIONES SOBRE PLÁSTICOS"

Ing. Mecánico Noé Lozano Vega

Sinodales:

Dr. Adriana Gaona Couto.

Dr. Miguel Ángel Vidal Borbolla

M.I. Oscar Núñez Olvera.

Agradecimientos

Quiero dar gracias a Dios por ayudarme a llegar a este momento de mi vida que parecía que nunca iba a llegar.

Al amor de mi vida a mi Esperanza por todo su amor, su apoyo, su sonrisa la cual hace que aunque me sienta en el peor momento de mi vida ella siempre lo arregla y ahora gracias al inmenso amor que nos tenemos ha rendido fruto y es una extensión hermosa de los dos, esta hermosa persona se llama Miriam y aunque en este momento no va a saber lo que su padre esta haciendo quiero decirle que ha sido un gran estímulo para seguir adelante, que su hermosa sonrisa y los sonidos que hace me despiertan en las mañanas y me hacen sentir el hombre más feliz gracias a mis hermosas mujeres.

A mi madre que siempre me ha apoyado incondicionalmente, tú me lo has dado todo y espero no defraudarte. Gracias por tus desmañadas, por tu comida que siempre ha sido la mejor del mundo, por preocuparte tanto por mi, por esa fuerza interna que no se de donde sacas y que me hace sentirme como un viejo a tu lado espero regresarte un poco de lo que me has dado.

A mi padre y mis hermanos por los momentos juntos y su apoyo.

A mis compañeros Mario y Paco, al igual que todos los maestros que me dieron clase gracias por su compañía y apoyo.

A mi amiga Elba y mi amigo Octavio, gracias por todo lo que me han dado son las mejores personas que he conocido y gracias por su cariño, su apoyo y los hermosos momentos que hemos compartido juntos.

A mi amigo Jorge usted sabe que es el mejor amigo que he tenido, ya son más de 8 años de amistad y espero que siempre este ahí tal como lo ha hecho, gracias por compartir los juegos, los pasatiempos, su forma de pensar y sus conocimientos, mis respetos y mi gratitud para usted.

A mi asesora la Dra. Adriana Gaona Couto por dirigirme en este trabajo de tesis y trabajar conmigo todo este tiempo y que a pesar de todos los obstáculos siempre me ha apoyado y animado cuando parecía que todo se venia para abajo, mis respetos para usted.

A mis sinodales el M.I. Oscar Núñez Olvera y al Dr. Miguel Ángel Vidal Borbolla por su revisión de esta tesis y por sus comentarios en los avances de la misma. Al Dr. Alfonso Lastras Martínez por su apoyo y sus atenciones.

Al señor Ezequiel Ontiveros Hernández del taller mecánico por sus conocimientos, por su apoyo y por su amistad.

Al CONACYT por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Resumen

En el presente trabajo se diseñó un sistema de evaporación resistiva de recubrimientos metálicos sobre polímeros. También, se llevó a cabo la cotización y adquisición de componentes para la construcción de dicho sistema. Primeramente, se investigó como influyen los recubrimientos en la vida cotidiana y como ha aumentado su importancia a través del tiempo. Actualmente, el recubrimiento se busca que además de ser estético, también sea protector y que mediante la optimización de los procesos de su obtención, se mejoren por mucho sus propiedades mecánicas, térmicas, etc., de tal manera que el recubrimiento tenga utilidad además de su apariencia.

Para lograr la construcción de una evaporadora, se utilizó una herramienta básica en todo trabajo la cual es la investigación, en este sentido mediante la investigación se pudo conocer las diferentes técnicas que hay para evaporar materiales o compuestos, así como sus limitaciones y ventajas. Posteriormente se utilizó otra herramienta para llegar a un diseño ordenado y correcto, que además tiene una confiabilidad alta y que a su vez es un proceso iterativo que si no se llega a un resultado deseado, se puede analizar de una manera muy sencilla donde estuvo el error, esta herramienta es la Ingeniería de diseño, que consta de etapas ordenadas mediante las cuales se puede llegar a un proceso de diseño eficiente. Es importante tomar en cuenta que lo que se está haciendo básicamente es la construcción de una máquina y para lograr esto se requiere de Ingeniería de diseño que es una disciplina que emplea principios científicos para solucionar problemas prácticos. Es importante tener un claro entendimiento del problema y de los principios científicos involucrados. Al aplicar este método lo que estamos haciendo es una manera ordenada y eficiente de diseñar un dispositivo, podemos decir que este es el corazón de este trabajo por lo que daremos énfasis durante el desarrollo de esta tesis.

Mediante la ayuda del programa de dibujo Autocad 2000 se desarrolló todo lo que respecta a la comunicación gráfica en esta tesis, esto es, se plasmaron las ideas que fueron surgiendo al paso del tiempo, de tal manera que se planteó en primera instancia el desarrollo de 2 modelos: uno analítico y otro experimental y el uso de este programa hizo más rápida la forma de llegar específicamente al término del modelo analítico, que a su vez es la base sobre la que se desarrolla el modelo experimental, de ahí la importancia de la comunicación gráfica en el presente trabajo.

Entre los pasos en que se basa la Ingeniería de diseño podemos decir que la parte más importante del mismo es el Análisis de Ingeniería, el cual consta de varias partes de tal manera que el objetivo de este paso es llegar a la elaboración de un modelo analítico en el cual se plasma conceptos científicos y de ingeniería, de tal manera que este es el modelo que hace en papel y que sirve de base para la elaboración del modelo experimental que es tener el modelo físicamente.

Después de terminar el modelo analítico sigue la construcción del modelo físico para posteriormente poner en funcionamiento el dispositivo y terminar con un proceso de verificación y chequeo el cual concluye después de haber retroalimentado esta última parte hasta que el diseño se optimice. Este proyecto por diversas razones que se especifican en la tesis misma, solo llegó hasta el modelo analítico y está comenzando el modelo experimental, pero las bases están dadas para que se termine el proyecto siguiendo los pasos del marco teórico en el cual está basado el diseño de la evaporadora.

El presente trabajo puede utilizarlo todo aquel estudiante o profesional que no tenga nociones de lo que es un diseño de un dispositivo, sistema, máquina etc., y lo requiera de una manera secuenciada y con una metodología para detectar algún problema. Es importante, hacer notar que no solo aquellas personas a quien les interese la evaporación de metales o aleaciones les serviría este trabajo, si no a cualquier persona que necesite un diseño en cualquier tema de ciencia y tecnología, de ahí la importancia y utilidad de esta tesis.

INDICE

RESUMEN	i
CAPITULO 1. ANTECEDENTES.	
1.1 El Mercado	1
1.2 Introducción	2
1.2.1 La Tecnología de Vacío	3
1.2.2 Clasificación de los Procesos de Recubrimientos	4
1.2.3 Características Únicas de los Materiales Depositados	7
1.3 Selección de Criterio.....	7
CAPITULO 2. PROYECTO.	
2.1 Justificación del Proyecto	10
2.2 Objetivo general	11
2.2.1 Objetivo específico	12
2.3 Marco Teórico	12
2.3.1 El Proceso de Diseño	12
CAPITULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO.	
3.1 Problemas a resolver	15
3.2 Alcances y limitaciones	15
3.3 Elección del proceso para la Deposición de Recubrimientos.....	16
3.3.1 Evaporación	17
3.3.2 Galvanoplastia Iónica	18
3.3.3 Erosión Catódica o Espurreo	18
3.4 Descripción de un Sistema de Evaporación	19
3.4.1 Cámara de Vacío	19
3.4.2 Bombeo del Vacío	19
3.4.2.1 Bomba Difusora	19
3.4.2.2 Bomba Mecánica	22
3.4.3 Medición de Vacío	25
3.4.3.1 Medidor Pirani	25
3.4.3.2 Medidor de Cátodo Frío	29
3.4.4 Calentador del Substrato	32
3.4.5 Fuentes de Evaporación	34
3.4.6 Accesorios	35
3.5 Fuentes de financiamiento del proyecto y proceso de cotización	36
CAPITULO 4. RESULTADOS.	
4.1 El Sistema de Evaporación NE-150505.....	39
4.1.1 Cámara de Vacío	40
4.1.2 Accesorios	43
4.2 Trabajo a futuro.....	44
4.3 Discusión	44
CONCLUSIONES	47
REFERENCIAS	48
APENDICE A	50

CAPITULO I ANTECEDENTES

1.1 El Mercado

Históricamente desde finales de los 50's, los recubrimientos decorativos obtenidos con aluminio, inicialmente se usaron solo para productos con las superficies maquinadas para juguetes, textiles, etc. Desde entonces, el uso de las técnicas de deposición en prácticamente todas las áreas de la ingeniería y muchas de las áreas de la ciencia han tenido un dramático crecimiento en cuanto a la venta de equipos y productos, producidos, particularmente en las últimas décadas. De acuerdo a una inspección, en donde el equipo utilizado fue valuado en 6 billones de dólares se reportó que a nivel mundial la tecnología de películas superficiales, componentes y dispositivos manufacturados era de un monto de 60 billones de dólares y el valor de los productos finales los cuales contienen componentes hechos con estas superficies maquinadas se estimó en 600 billones de dólares. Justo por esto la industria de semiconductores cambia totalmente sus líneas de producción cada 5 o 6 años. En otra estimación tenemos que solamente el 10% de todos los artículos producidos mundialmente son susceptibles a modificaciones superficiales actualmente. [1]

La ingeniería de superficie es una industria que está creciendo actualmente, debido a que los productos de superficies maquinadas incrementan su desempeño, se reducen costos y se tiene mayor control de las propiedades de la superficie independiente de la del sustrato, así ofrece un potencial enorme en la:

- a) Creación total de productos nuevos.
- b) Solución de problemas de ingeniería previamente no resueltos.
- c) Mejoras funcionales de productos ya existentes.
- d) Mejora de propiedades de tipo mecánico, térmico y eléctricos, tales como resistencia a la corrosión, a altas temperaturas, etc.
- e) Conservación de materiales escasos.
- f) Consideraciones ecológicas – reducción de afluentes de salida y consumo de potencia.

El gasto en investigación y desarrollo en ingeniería de superficies es sustancial. Es reportado que Japón gasta de 100 a 150 millones de dólares para R/D [Investigación y desarrollo] en diamante y recubrimiento de carbono como diamante. El gasto es estimado en 16 billones de dólares para el fin de la década. Los revestimientos en barreras térmicas avanzadas por el método PVD [Proceso de deposición por vapores físicos], para cuchillas de turbina de alta operación, es estimada en más de 10 millones de dólares tan solo en Estados Unidos.

Revestimientos resistentes al deterioro para discos y cabezas atraen más de 10 millones de dólares en R/D de gastos a nivel mundial y la lista continúa creciendo. Actualmente en México la industria de los recubrimientos es escasa y muchas de las veces las industrias que están en México importan tanto tecnología como los mismos productos ya recubiertos, de tal manera que estos productos incrementan considerablemente su costo. Tal es el caso, del recubrimiento metálicos sobre polímeros donde el metalizado se realiza en el extranjero (TiN/ABS) o por técnicas muy contaminantes en México (Cr. Ni/ABS). [23]

1.2 Introducción.

En la actualidad los recubrimientos encuentran numerosas aplicaciones en distintas áreas de la producción industrial. Quizá las aplicaciones más cercanas a la vida cotidiana sean las estéticas, en las que la principal utilidad del recubrimiento es dar un aspecto agradable a la vista y al tacto. Como ejemplos de aplicaciones estéticas podemos mencionar el chapeado de artículos de joyería, el recubrimiento de vidrios arquitectónicos y el metalizado de partes automotrices. Ahora se le está buscando al recubrimiento no solo una aplicación estética, se requiere que este sirva como una protección de tipo mecánico, térmico, eléctrico, etc. Así se hacen recubrimientos de espejos para mejorar sus propiedades como la reflexión indeseable, para elementos de estufas como perillas y jaladeras para mejorar sus propiedades térmicas, para elementos de la industria automotriz aumenta su resistencia al impacto entre otras aplicaciones.

La mayoría de los materiales usados en aplicaciones de alta tecnología son compuestos, esto es, ellos tienen una región cercana a la superficie con propiedades diferentes del resto del material. En algunos casos se da por los requerimientos que el material exhibe al combinarse con varios, y algunas veces por propiedades contradictorias. Por ejemplo, un componente particular de ingeniería que tal vez requiere alta dureza y rugosidad (esto es resistencia a la deformación plástica de un material). Esta combinación de propiedades puede ser obtenida teniendo un material compuesto como una superficie altamente dura y rugosa. Alternativamente, puede ser que para elevadas temperaturas se necesite un material resistente a la corrosión y a esfuerzos de alta temperatura como en el caso de las etapas de calentamiento de las cuchillas y alabes de una turbina de gas. La solución nuevamente es proveer de una resistencia necesaria para el material en bulto y el requerimiento de la corrosión para la superficie.

En general, los recubrimientos son deseables, o son necesarios por una variedad de razones incluyendo las económicas, conservación de materiales, propiedades únicas o la ingeniería y la flexibilidad del diseño con el cual se obtienen por separado las propiedades de la superficie de las del bulto.

Esta región cercana a la superficie es producida al depositar revestimientos sobre esta (esto es extender el recubrimiento) por procesos tales como la deposición de vapores químicos o físicos, electrodeposición y rociado térmico o por alteración de la superficie del material por la infusión de materiales (esto es, recubrimiento por difusión o por un proceso químico) o por implantación del ión de un material nuevo tal que la capa de la superficie tiene un nuevo origen en el que se suman ambos materiales.

Los "Recubrimientos" puede también ser formado por otros procesos tales como fundición / solidificación (por ejemplo, técnica del láser razante), por enlaces mecánicos de la capa superficial (por ejemplo, rolado de superficie), por deformación mecánica (por ejemplo, martilleo débil) u otros procesos los cuales cambian las propiedades sin cambios en la composición química.

Como se mencionó anteriormente la combinación de recubrimiento / substrato es un sistema de materiales compuestos. El comportamiento de este sistema compuesto depende no solamente de las propiedades de los 2 componentes (esto es, el material del recubrimiento y el substrato), si no también de la interacción entre los dos (por ejemplo, la estructura y las propiedades de la interfase recubrimiento / substrato), la cuál es primordial ya que es un factor muy importante para la adhesión de los recubrimientos.

Históricamente, más sólidos metálicos y algunos materiales cerámicos fueron producidos por tecnología de solidificación / fundición. Desde el advenimiento de la tecnología de deposición, la diversidad de materiales que pueden ser producidos ha aumentado considerablemente y en consecuencia las propiedades de los materiales producidos. Tal es el caso, de la técnica de fundición para producir materiales con propiedades en el equilibrio termodinámico. Mientras que las condiciones de deposición pueden ser escogidas para producir materiales desde la fase de vapor con propiedades en dicho equilibrio que fuera de él. Además, una variación en la microestructura es posible cuando se origina el vapor en los materiales. Por ejemplo, la aleación de cobre - níquel producida por solidificación desde la fundición siempre consistía de una solución sólida de fase simple, mientras que la misma aleación producida por una deposición alternativa de dos fuentes consistía en capas alternativas de níquel y cobre, esto es una lamina compuesta o una solución sólida dependiendo de la temperatura de deposición.

1.2.1 La Tecnología de Vacío.

En general las películas delgadas encuentran aplicaciones en lugares donde se requiere un recubrimiento protector, ya sea éste térmico, mecánico, óptico o eléctrico entre otros. Pero aún más, las películas delgadas son una parte fundamental de la industria electrónica donde se emplean en la fabricación de circuitos integrados, sistema de almacenamiento de datos, recubrimientos sensibles para pantallas de computadora, etcétera. En respuesta a la importancia que han tenido las películas delgadas en el desarrollo de tecnología de frontera se ha realizado un gran esfuerzo por estudiar los mecanismos que intervienen en su formación, así como en mejorar las propiedades de las películas obtenidas. En este sentido son cada vez mayores las demandas que debe satisfacer un material con aplicaciones tecnológicas potenciales.

La tecnología de alto vacío ha permitido desarrollar la técnica de evaporación de metales en una atmósfera de muy baja presión. Las películas delgadas obtenidas mediante esta técnica, se pueden usar como materiales de recubrimiento y tienen múltiples usos en la industria y la investigación.

Un largo número de materiales son usados para recubrimientos hoy día. Puede en este rango de manera natural que exista una capa de óxido, la cuál protege las superficies de muchos metales tales como el aluminio, titanio y acero inoxidable, a esto de manera deliberada y controlada se les adicionan impurezas a la superficie lo que produce propiedades específicas, como ejemplo de tales técnicas tenemos la epitaxia por haz molecular o la implantación iónica. Otros ejemplos son incrementos graduales de rangos críticos para recubrimientos de pintura aplicado a madera y metales, electroestáticamente se pintan pelotas de golf, se imprime diariamente el periódico, recubrimientos ópticos sobre lentes y otros elementos, se deposita vapor en elementos en microcircuitos tales como resistores, difusión o recubrimientos extensos sobre superaleaciones usadas en turbinas de gas para protección a la corrosión a altas temperaturas, recubrimientos extensos duros para componentes de ingeniería y herramientas para máquina.

Algunos ejemplos del uso de la técnica de evaporación de metales al alto vacío, se encuentran en el aluminado de vidrios para espejos de telescopios, en recubrimientos para reducir la reflexión indeseable, filtros para radiación UV, películas conductoras, transductores piezoeléctricos y superficies plásticas con terminado reflejante para la industria automotriz. Evaporaciones de metales al alto vacío, son realizadas en la industria de la joyería de fantasía y la producción de esferas navideñas, entre otras aplicaciones [2].

1.2.2 Clasificación de los Procesos de Recubrimiento.

Numerosos esquemas pueden ser usados como recurso para clasificar o categorizar los procesos de recubrimiento, de los cuales ninguna es totalmente satisfactoria ya que algunos procesos pueden coincidir en diferentes categorías. Autores como Chapman y Anderson [1] los clasifican en Procesos de Conducción y Difusión, Procesos Químicos, Procesos de Mojado y Procesos de Rociado. Aquí los procesos de Deposición por Vapores Químicos caen bajo los Procesos Químicos y los Procesos de Deposición por Vapores Físicos (Evaporación, Galvanoplastia iónica y Espurreo o Sputtering) caen bajo los procesos de rociado. La situación puede fácilmente llegar a confundirse como, por ejemplo, cuando la evaporación reactiva – activa o la evaporación reactiva y la galvanoplastia reactiva iónica puede ser clasificada como un proceso de Deposición por Vapores Químicos según Yee [3], quién considera a estos de esta manera porque esto implica una reacción química y no le importa si los átomos evaporados del metal o líquido estable o compuestos gaseosos son los reactantes.

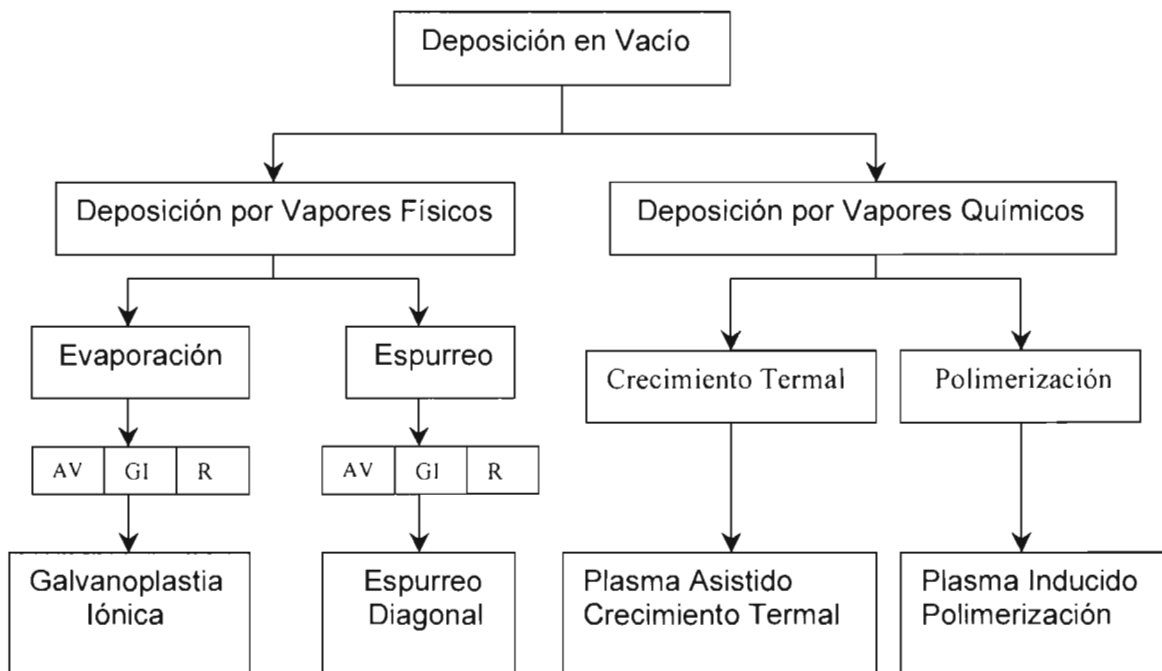
Otra clasificación de los métodos de deposición de películas delgadas esta dada por Campbell [4]. El considera la superposición entre los métodos físicos y químicos, por ejemplo, galvanoplastia iónica y evaporación, reacciones de espurreo y plasma, espurreo reactivo y anodización gaseosa [5]. El clasificó los Métodos Químicos de Preparación de Películas Delgadas como en la tabla 1.1.

Además, el considera los siguientes como métodos químicos de preparación de películas gruesas: esmaltado, electroforesis, rociado de llama y pintado.

En contraste a los químicos y aprovechando lo dado arriba, los físicos aprovechan los procesos de deposición que son mostrados en la figura 1.1 en donde se da la clasificación de la técnica de deposición en vacío por Schiller, Heisig y Goedicke [6] y por Weimantel [7]. Una diferente clasificación viene desde el fondo de los materiales donde la preocupación está en la estructura y las propiedades de los depósitos y como estos influyen en los parámetros del proceso. De esta manera, Bunshah y Mattox [8] dan una clasificación basada en los métodos de deposición según las dimensiones de la especie que se deposita, por ejemplo, si esto es átomos / moléculas, gotitas líquidas o cantidades a granel como es mostrado en la tabla 1.2.

Tabla 1.1. Métodos Químicos para la Preparación de Películas Delgadas [4].

Clases Básicas	Método
Formación desde el medio	Electrochapado Galvanoplastia iónica Reducción Química Fase de Vapor Reacción de Plasma
Formación desde el sustrato	Anodización Gaseosa Termal Reducción del Plasma



Nota: [AV]: Alto vacío; [GI]: Gas Inerte; [R]: Reactiva

Figura 1.1. Clasificación de las técnicas de deposición en vacío (Schiller [6]).

Tabla 1.2. Métodos de Fabricación de Recubrimientos [8].

Deposición Atomística	Deposición de Partículas	Recubrimientos de Bulto	Modificaciones de la superficie
<p><i>Ambiente electrolítico</i></p> Electrochapado Galvanoplastia por Pérdida Eléctrica Electrolisis por sales fundidas Desplazamiento Químico	<p><i>Rociado Termal</i></p> Rociado de plasma Detonación de arma Rociado por Flama	<p><i>Procesos de Mojado</i></p> Pintura Recubrimiento por inmersión	<p><i>Conversión Química Electrolítica</i></p> Anodización (Óxido) de Sales fundidas <p><i>Líquido - Químico</i></p> Vapor - Químico Termal Plasma Deformación Mecánica Martilleo Débil <p><i>Termal</i></p> Enriquecimiento de la superficie Difusión desde bulto Espurreo Implantación Iónica
<p><i>Ambiente al vacío</i></p> Evaporación al vacío Deposición por haz iónico Epitaxia por haz molecular	<p><i>Recubrimientos por Fusión</i></p> Entintado de película gruesa Esmaltar Electroforesis	<p><i>Rociado Electrostático</i></p> Impreso Recubrimiento por vueltas	
<p><i>Ambiente del plasma</i></p> Deposición por espurreo Evaporación Activa - Reactiva Polimerización por Plasma Galvanoplastia iónica	<p><i>Galvanoplastia por impacto</i></p>	<p><i>Revestimientos</i></p> Explosivos Enlace rolado	
<p><i>Ambiente de Vapores Químicos</i></p> Deposición de Vapores Químicos Reducción Descomposición Aumento por plasma		<p><i>Sobreposición</i></p> Recubrimiento Autógeno	
<p><i>Rociado por Pirolysis</i></p> Epitaxia por Fase Líquida			

En el proceso de deposición atomística, los átomos forman una película por condensación sobre el sustrato y migración a los sitios, donde la nucleación y crecimiento ocurre. Más adelante, átomos adsorbidos no alcanzan sus configuraciones de baja energía y resulta que la estructura contiene una alta concentración de imperfecciones en su estructura. A menudo los átomos que se depositan reaccionan con el material del sustrato y forman una región interfacial compleja.

Las fuentes de átomos por este proceso de deposición puede ser por vaporización termal (deposición en vacío) o espurreo (deposición por espurreo en vacío), especies de vapores químicos en corriente de gas (deposición de vapor químico), o especies iónicas en un electrolito (electrodeposición). En procesos de deposición de baja energía atomística, las especies depositadas chocan en la superficie, migran sobre la superficie al sitio de nucleación donde ellos se condensan y hacen crecer el recubrimiento. Los modos de nucleación y crecimiento de las especies que se condensan determinan la cristalografía y microestructura del recubrimiento. Para procesos de deposición de alta energía, las partículas depositadas reaccionan con o penetran en la superficie del sustrato. Particularmente los procesos de deposición que involucran partículas fundidas y sólidas, y la microestructura que resulta del depósito dependen de la solidificación o sinterización de las partículas. Los recubrimientos en bulto implican la aplicación de grandes cantidades de material para recubrir la superficie, tal y como se hace con el pintado. Las modificaciones de las superficies que implican tratamientos iónicos, térmicos, mecánicos o químicos, alteran la composición o propiedades de la superficie. Todas estas técnicas son ampliamente usadas para formar recubrimientos.

1.2.3 Características Únicas de los Materiales Depositados.

Es útil indicar las características únicas de los materiales producidos por las tecnologías de deposición, las cuales son:

- 1 Gran versatilidad de rangos y variedades del depósito de materiales
- 2 Recubrimientos con propiedades independientes de las restricciones composicionales termodinámicas.
- 3 Capacidad de variar la concentración de defectos en límites muy amplios, de esta manera da como resultado un rango de propiedades comparable a, o más lejos a la fabricación convencional de materiales.
- 4 Alta velocidad de termofluencia disponible para los depósitos de materiales amorfos.
- 5 Generación de diferentes microestructuras para procesamiento convencional de materiales, por ejemplo, una gama amplia de microestructuras ultrafinas (grano submicronico o tamaño laminar) para películas de monocristales.
- 6 Fabricación de formas delgadas iguales incluso para materiales brillantes.
- 7 Beneficios ecológicos con técnicas seguras.

Estas son algunas de las áreas que representan áreas de oportunidad para la investigación básica y aplicada:

- 1 Microestructuras y propiedades en el rango de 500 a 10,000 Å importante particularmente para aplicaciones microelectrónicas, superficies reflectivas y corrosión.
- 2 (a) Efecto de la energía de las especies depositadas sobre la interacción interfacial, la nucleación y el crecimiento en el depósito.
(b) Efecto de " condición de la superficie del sustrato " esto es contaminación de capas (óxidos), adsorción de gases, topografía superficial.
- 3 Esfuerzos residuales- influencia en los parámetros del proceso
- 4 Desarrollo de tecnología de alto vacío y optimización.

1.3 Selección de Criterio.

La selección de un proceso particular de deposición depende de los factores críticos. Ellos son:

1. El material a ser depositado.
2. Velocidad de deposición.
3. Limitaciones impuestas por el sustrato, por ejemplo, la máxima temperatura de deposición.

4. Adhesión del depósito al sustrato.
5. Energía emitida
6. Pureza del material fuente, esto influirá en las impurezas contenidas en la película.
7. Aparatos requeridos y disponibilidad de los mismos.
8. Costos.
9. Consideraciones ecológicas.
10. Abundancia del material de deposición en el mundo.

Por otro lado más de una técnica puede ser usada para depósitos de una película dada como es mostrado en la Figura 1.3. [1], para los métodos de fabricación de microelectrónicos.

La tabla 1.4 [1], lista varios criterios para cada uno de los procesos. Es obvio que hay muy pocas técnicas que pueden depositar todo tipo de materiales. Como también es imposible dar a detalle las ventajas y limitaciones para cada una de las técnicas. Sin embargo, en la evaluación para cada aplicación sobre algunos factores conducirá a una elección racional de la técnica de deposición que se va a usar.

	Electro-enchapado	Reducción Química	Fase Vapor	Anodización	Térmico	Evaporación	Espurreo
Conductores, resistores							
Aislantes, Capacitores							
Dispositivos activos							
Materiales magnéticos							
Súper – conductores							

Figura 1.3 Aplicabilidad de los métodos de preparación para microelectrónicos. El sombreado claro indica que el componente puede ser preparado por el método; el sombreado oscuro indica que el método es el más ampliamente usado [1].

Tabla 1.4. Algunas características de los Procesos de Deposición [1].

	Evaporación	Galvanoplastia Iónica	Espurreo	Deposición de Vapores Químicos	Electrodeposición	Rociado Térmico
Mecanismo de depósito de las especies	Energía Termal	Energía Termal	Transferencia de Momentum	Reacción Química	Deposición de la solución	Desde plasmas
Velocidad de Deposición	Puede ser muy alta (Arriba de 750,000 / min.)	Puede ser muy alta (Arriba de 250,000 / min.)	Baja excepto para metales puros (por ejemplo, Cu 10,000 / min.)	Moderada (200 – 2500 / min.)	De Baja a Alta	Muy Alta
Deposición de las especies	Átomos e iones	Átomos e iones	Átomos e iones	Átomos	Iones	Por goteo
Potencia de cobertura para:						
a. Objeto de forma compleja	Línea pobre de alto fondo excepto por dispersión de gas	Buena, pero no uniforme para distribuciones de espesores	Buena, pero no uniforme para distribuciones de espesores	Buena	Buena	No
b. En pequeños agujeros no visibles	Pobre	Pobre	Pobre	Limitado	Limitado	Muy Limitado
Deposición de Metal	Si	Si	Si	Si	Si, limitado	Si
Deposición de Aleaciones	Si	Si	Si	Si	Salida limitada	Si
Deposición de compuestos refractarios	Si	Si	Si	Si	Limitada	Si
Energía de deposición de especies	Baja ≈ 0.1 a $.5$ eV	Pueden ser alta (1 – 100 eV)	Pueden ser alta (1 – 100 eV)	Puede ser alta con CVD asistido por plasma	Puede ser alta	Puede ser alta
Bombardeo de sustrato / depósito por iones de gas inerte	Normalmente no	Si	Si o no depende de la geometría	Posible	No	Si
Perturbación de la Interfase de Crecimiento	Normalmente no	Si	Si	Si (por pulido)	No	No
Calentamiento del Sustrato (por medios externos)	Si, normalmente	Si o No	No, generalmente	Si	No	No, normalmente

CAPITULO II PROYECTO

2.1 Justificación del Proyecto.

La Tecnología de alto vacío tiene una gran importancia tanto a nivel de laboratorio en el desarrollo de la investigación, como en aplicaciones en la industria. El primer punto a tratar, es que se nos da un problema práctico que necesita de una solución confiable en el menor tiempo posible, lo cual implica una aplicación confiable de conocimientos y vincular lo que está en la teoría con la práctica. Actualmente para aplicaciones industriales se obtienen piezas recubiertas de países como China, Japón, Alemania, Argentina, Italia o los Estados Unidos, en los cuales se desarrollan sistemas químicos y electroquímicos para realizar dichos recubrimientos tales como el cromado, el aluminado, etc. A fin de cuentas en otros países ya se hacen recubrimientos por métodos como la evaporación o la erosión catódica y ya hay algunos sistemas a nivel industrial tales como las plantas metalizadoras Telstar con plantas en España, Estados Unidos y China, además de Bosch en Alemania con un futuro muy prometedor. En México hay una buena producción de recubrimientos por métodos electroquímicos; en cuanto a otros tipos de preparación se han desarrollado sistemas de recubrimientos basados en deposición de vapores físicos a nivel laboratorio como en el IIM-UNAM, CINVESTAV, IICO-UASLP así como el desarrollado en la Universidad Autónoma de Puebla [22] y a nivel industrial una limitada parte de su producción sobre todo en empresas transnacionales como Cummins, Vitro y Arkema. Generalmente, se opta por importar tecnología en el país y solo se arman los equipos, esto sucede tanto a nivel industrial como a nivel laboratorio [25]. Es por eso el interés de nuestra parte por desarrollar tecnología propia en México con las que definitivamente se abatirían los costos.

Por otro lado los recubrimientos obtenidos a nivel industrial por medios electroquímicos presentan como principales desventajas:

- Utilización de grandes espacios para colocar los elementos del proceso.
- Condiciones insalubres para los trabajadores.
- Desperdicio de una gran cantidad de material.
- Cuando se realiza el mantenimiento a los elementos se desechan altas cantidades de cromo al drenaje provocando un problema ecológico.
- Se utiliza Cr +6 el cual es altamente tóxico.

Cuando se presenta un problema tecnológico como recubrir una pieza de forma compleja con metales o aleaciones siendo la pieza de plástico se tiene que pensar varias alternativas que den una solución al problema en cuestión. Técnicas específicas como deposición de vapores físicos, deposición de vapores químicos, deposición de vapores químicos asistidos, electrodeposición y deposición por electropérdida, rociado de plasma

entre otras fueron las técnicas que se estudiaron buscando la mejor opción para dar la mejor solución posible, que sea confiable y que además sea redituable.

En cuanto a la elección del proceso para recubrir polímeros, el método electroquímico se deshecho por las desventajas mencionadas a pesar de no ser muy costosa su implementación. Sobre los otros métodos mencionados, uno de sus principales inconvenientes es el costo de los sistemas requeridos y mayor complejidad, así se determino irnos por el camino de los procesos por Vapores Físicos [Ver 3.3]. Las principales ventajas de los procesos de Deposición por Vapores Físicos son:

- Extrema versatilidad en la composición del depósito. Virtualmente cualquier material (metal, aleación, polímero, compuesto refractario, etc.) puede ser fácilmente depositado. En este aspecto, estos procesos son superiores a cualquier otro proceso de deposición.
- La habilidad de producir microestructuras inusuales y nuevas modificaciones cristalográficas, por ejemplo, depósitos amorfos.
- La temperatura del sustrato puede ser variada dentro de límites grandes desde temperaturas bajo cero hasta temperaturas altas.
- Habilidad para producir recubrimientos o formas auto soportadas a altas velocidades de deposición [Ver la tabla 3.1, página 19, referente a las velocidades de deposición]
- Los Depósitos pueden tener una muy alta pureza.
- Excelentes depósitos en el sustrato.
- Excelente terminado de superficie el cuál puede ser igual al del sustrato.
- Eliminación de agentes contaminadores y de afluentes del proceso, lo cuál es un factor ecológico muy importante.

La principal desventaja es la sofisticación del equipo de proceso comparada con la obtención de recubrimientos por medios electroquímicos y por tanto un costo inicial más alto.

2.2 Objetivo General.

El objetivo general del presente proyecto es:

“Desarrollar la tecnología necesaria para poner en funcionamiento una evaporadora de recubrimientos metálicos y aleaciones sobre plásticos”

La importancia de la tecnología del alto vacío y la posibilidad de contar con un sistema de laboratorio para conocer a fondo los procesos por lo que se llegan a obtener bajas presiones en ambientes controlados y con posibilidades de desarrollos en la investigación, en la enseñanza y con aplicaciones en la industria, es por ello el interés de nosotros para el desarrollo de un sistema de evaporación. El objetivo general plantea la posibilidad de que se genere la tecnología a nivel local, es decir, que aquí en la ciudad de

San Luis Potosí se haga todo lo relacionado con la construcción, el diseño y puesta en marcha de un sistema de alto vacío que alcanza presiones del orden de 10^{-6} Torr, para evaporar desde metales hasta aleaciones sobre plásticos, vidrios y cerámicas, entre otros.

2.2.1 Objetivos Específicos.

Para lograr el desarrollo en forma del objetivo general nos hemos planteado objetivos específicos para tener un mejor entendimiento del problema que se nos ha presentado. Por lo tanto los objetivos específicos son:

- ❖ Elección de los 6 componentes de que consta una evaporadora.
- ❖ Cotización de los diversas partes que tiene una evaporadora.
- ❖ Formación de un modelo analítico.
- ❖ Formación de un modelo experimental.

Con estos puntos se crearon los planes de trabajo y a su vez la programación del tiempo para desarrollar actividades relacionadas con el cumplimiento de dichos objetivos.

2.3 Marco teórico.

La ingeniería de diseño es una disciplina de alto nivel intelectual, que por su naturaleza se presta a la investigación, al análisis y el razonamiento. Todos estos son elementos necesarios para la adecuada solución de los problemas.

La aplicación de los conocimientos requiere de objetivos donde lo más importante es tener un claro entendimiento tanto del problema como de los principios científicos involucrados en ello, los cuales son aplicados para solucionar el problema.

En la búsqueda de ese entendimiento con frecuencia se recurre a la investigación, esta es una herramienta indispensable en la solución de problemas en la ingeniería del diseño aunque está claro que el objetivo no es la búsqueda del conocimiento por sí mismo, sino para su aplicación a problemas específicos.

Lo más importante es que se logre entender las condiciones técnicas y humanas del problema antes de abocarse a una solución y que además desarrolle las habilidades para aplicar objetivamente sus conocimientos.

El proceso para la solución de problemas requiere que se posea y se apliquen exitosamente 3 tipos fundamentales de actividades que son:

1. La inventiva
2. El análisis
3. Toma de decisiones

2.3.1 El Proceso del Diseño [9].

Después de estar de acuerdo en el entendimiento inicial y a fondo del problema, se realiza un estudio exhaustivo, esto es, el diseño creativo y el proceso de análisis correspondiente, esto se realiza para producir mejores resultados, en la figura 2.1 se define el proceso de diseño.

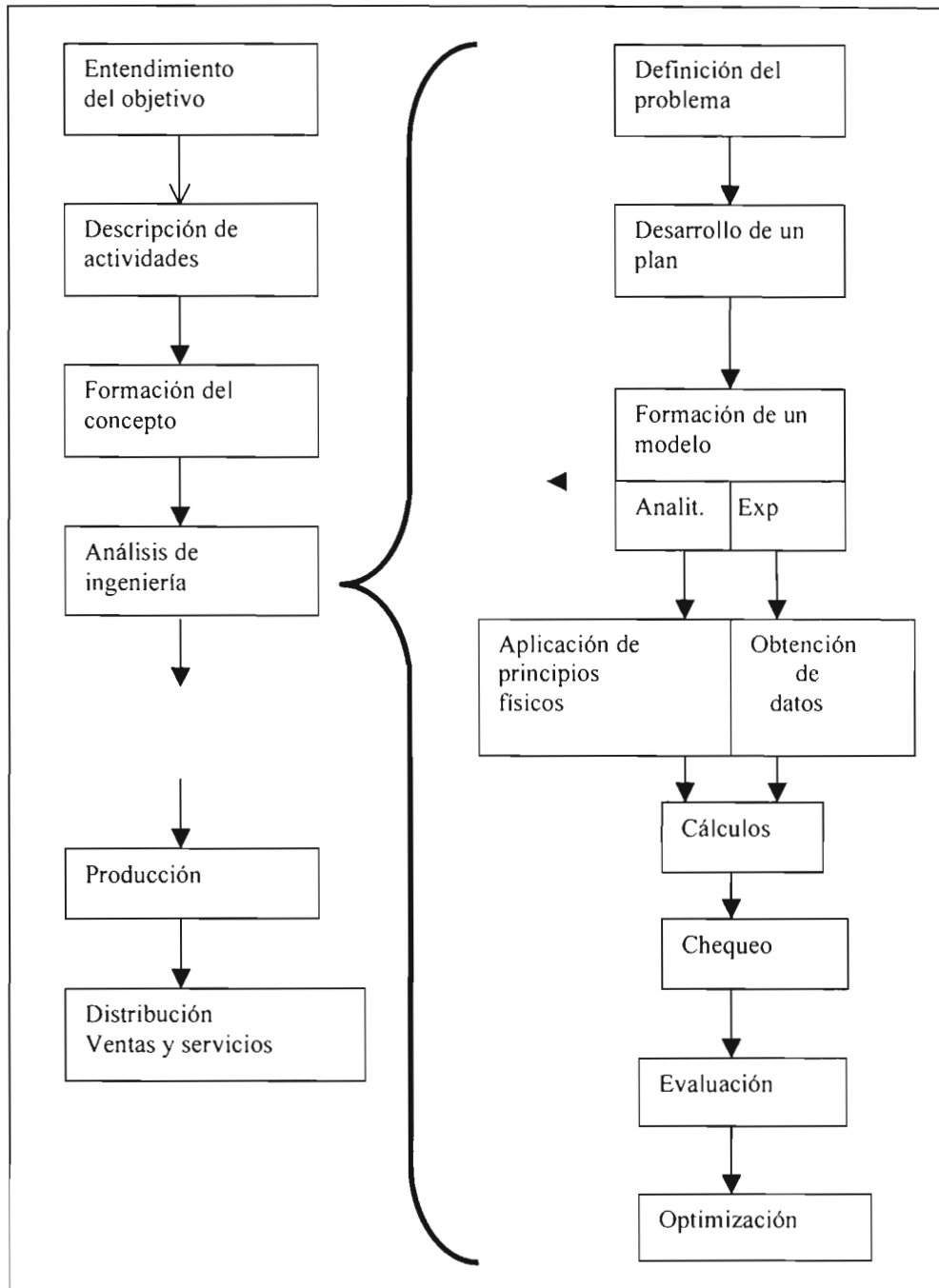


Figura 2.2 Esquema del proceso de diseño, el proceso es sumamente iterativo [9].

1) El 1^{er} paso es un claro entendimiento del objetivo y las metas. Pueden ser dadas desde un principio o dependiendo del problema, deben ser identificadas por el diseñador. Esto fue lo que se realizó en la primera presentación del proyecto y es ahí donde se especifico los objetivos así como algunas ideas de cómo se habría de solucionar el problema

2) El 2^{do} paso es hacer una descripción más específica de la forma vía con la cual debe alcanzarse el objetivo. Este paso indica la toma de decisiones entre varias alternativas.

3) El 3^{er} paso consiste en la formación del concepto de la solución, el cual requiere que el ingeniero genere una idea aplicada para el problema en cuestión. También, requiere formular un método o un concepto sobre como se alcanzará el objetivo. Este paso es el corazón mismo del diseño, siendo altamente creativo. Hay dos maneras de formar el concepto de la solución, una es inventar algún dispositivo, máquina, etc, para dar solución al problema y otra es mejorar algo que ya este hecho o tomar alguna idea para aplicarla de otra manera muy distinta a la que en un principio tenía. En ese sentido podemos decir que este proyecto no es algo nuevo, esto es, no se invento una cámara de vacío, pero también hay que mencionar que no se copió ni un diseño de lo que podría ser una cámara comercial ya que en el IICO no hay ninguna cámara de este tipo y todas las ideas plasmadas en todo el diseño son aportaciones personales, este diseño sabremos si es lo suficientemente eficiente una vez que se hagan las primeras pruebas.

4) Cuando se ha tomado una decisión por una idea se procede al análisis, el cual requiere de una clara definición del problema y también la formación de un modelo ya sea en el papel, en el laboratorio o en ambos. El modelo debe ser lo suficientemente simple para resolver el problema en un tiempo razonable y lo suficientemente complejo para darle confiabilidad al resultado. Requiere de la aplicación de principios científicos, implica verificar, evaluar, generalizar y optimizar los resultados. Hasta este punto se llegó en esta tesis ya que el diseño completo de la cámara de vacío forma parte del modelo en papel y de ahí se ha iniciado la construcción del modelo en el laboratorio para después llegar a los primeros resultados.

5) Con el análisis completo (si los resultados son favorables) el ingeniero traduce la solución en términos de producción, a esto se le llama especificación de la solución. En este paso se presentan otras preguntas que deben contestarse.

- a) ¿Cómo debe ser construido?
- b) ¿Cómo se podrá construir?
- c) ¿Cómo funcionara?

Finalmente, el objeto del proyecto en cuestión debe ser fabricado y aplicado al propósito establecido. Por lo general este proceso no se desarrolla en forma lineal, sino que es intensamente iterativo pues raramente se encuentra un proceso tan sencillo que en el intento se tenga un producto que reúna los siguientes requisitos:

- 1) Que funcione.
- 2) Que trabaje bien.
- 3) Que su comportamiento sea óptimo.
- 4) Que pueda producirse a bajo costo.
- 5) Que se venda fácilmente.
- 6) Que sea fácil su mantenimiento.
- 7) Que requiera muy poco servicio, etc.

Los puntos aquí mencionados fueron los que se siguieron para el diseño de la cámara de vacío y van implícitos en todo el desarrollo de la tesis, especialmente en el capítulo IV donde se hace un resumen del diseño.

CAPITULO III DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Problemas a resolver.

La presente tesis se puede dividir en 3 partes. En la primera parte, por un periodo de 4 meses, se llevo a cabo la revisión bibliográfica sobre el tema, esto es, la recopilación de información para estar enterados de las maneras posibles de construir un sistema de evaporación térmica, después se inició un proceso de depuración de información para tener bien definido los objetivos y la manera de llegar a ellos. Hecho esto, comenzó la segunda parte aproximadamente a los 6 meses de iniciado el trabajo de tesis el proceso de elección de los 6 sistemas de una evaporadora que se identificaron en la primera parte de la tesis y es aquí donde se desarrolla el problema principal del proyecto, este es el del diseño de toda la cámara de vacío, para poder resolver se tuvo que recurrir a la ingeniería de diseño, a dispositivos físicos que se encuentran en el Instituto y en otros lugares, a visitas a industrias, a información en Internet, entre otros. Después de la elección de los elementos hubo que esperar el tiempo para que llegara todo lo que se solicitó, con esto se inicia la tercera parte del proyecto que es la construcción y la puesta en marcha del sistema. Esta última parte fue muy complicada porque había que llevar lo que estaba en el papel a una realidad y que cumpliera los requisitos que se especifican en el proceso de diseño (Ver 4.1 El proceso de diseño), que se fundamenta en la aplicación de principios científicos, esto implica verificar, evaluar, generalizar y optimizar los resultados. Por último, hay que decir que el proceso no se desarrolló en forma lineal si no que fue muy iterativo, esto es, se convirtió en un ciclo que todavía no se cierra, ya que todos los sistemas se pueden mejorar.

3.2 Alcances y Limitaciones.

Los alcances del presente proyecto y todas las características que de el surjan abarcan todo lo relacionado con un sistema de alto vacío que alcanza presiones del orden de 1×10^{-6} Torr en una cámara de acero inoxidable, con capacidad de 65 litros. Se ha diseñado y construido una evaporadora de metales con puntos de fusión menor al del tungsteno ya que este sistema utilizara un filamento de este material. Podemos utilizar este sistema para evaporar metales como oro, plata, aluminio, cobre, cromo, etc, en esta evaporadora térmica la evaporación se logra al hacer pasar corriente eléctrica intensa a través del filamento, donde se coloca la muestra que se desea evaporar.

Este proyecto tiene como limitaciones cuestiones relacionadas en primera instancia con factores indirectos, esto es para la realización de este sistema se tuvo que investigar, cotizar y comprar muchos elementos que no se fabrican en México, tales como la bomba mecánica, la bomba difusora, los medidores de presión tanto el de alto como el de bajo vacío, entre otros, estos elementos dependieron de su disponibilidad en el mercado, de la distancia en la que se encontraban sus fabricantes (En este caso todos fueron traídos de los Estados Unidos de América), de los tramites burocráticos los cuales para algunos casos se demoraron hasta 12 meses para dar luz verde, todo esto fue factor para la rapidez con la que se desarrolló el proyecto. Por otro lado esta evaporadora será un sistema base, un sistema primario, que en un principio solo se abarcara el diseño y construcción, esto es que quedará muchos elementos por desarrollar en el futuro, por ejemplo, poner en marcha el sistema, realizar pruebas de recubrimientos, hacer un primer criterio de caracterización de películas crecidas, así como tener una serie de parámetros óptimos para que se logre tener un sistema en condiciones adecuadas, esto se lograra en la medida de que se hagan una cantidad aceptable de pruebas y se vaya siguiendo lo que en esta tesis se le llamo el proceso de diseño para que al seguir ese ciclo se llegue al último paso esto es la optimización, después de esto se puede llegar a pensar en aplicaciones a nivel laboratorio y a nivel industrial.

3.3 Elección del Proceso para la Deposición de Recubrimientos.

Para comenzar a desarrollar este proyecto lo primero que se realizó fue la documentación de las posibles técnicas que nos ayudarán a resolver nuestro problema. Básicamente se estudiaron 2 procesos que a su vez incluyen varias técnicas, estos fueron los procesos de Deposición por Vapores Físicos (PVD) y los procesos de Deposición por Vapores Químicos (CVD). En general, los procesos de deposición pueden ser divididos en dos tipos:

- I. Esos que implican transferencia de gotas tales como rociado de plasma, rociado de arco, rociado de explosión- alambre, recubrimiento de arma detonada, y
- II. Esos que implican transferencia de átomo por átomo tal que el proceso de deposición de vapor físico, implantación iónica y espurreo, deposición por vapores químicos y electrodeposición. La principal desventaja de los procesos por transferencia de gotas es la porosidad lo cuál tiene características en el depósito final.

Por otro lado, hay tres pasos en la formación de cualquier depósito:

1. Síntesis del material a ser depositado:
 - A. Transición desde la fase condensada (sólido o líquido) a la fase de vapor
 - B. Para la deposición de compuestos, la reacción entre los componentes del compuesto, algunos de las cuales puede ser introducidos en la cámara como gas o vapor.
2. Transporte de vapores entre la fuente y el sustrato.
3. Condensación de vapores (y gases) seguido por la nucleación de las películas y su crecimiento.

Hay diferencias significativas entre varios procesos de transferencia de átomos. En la deposición de vapores químicos y los procesos de electrodeposición, todos los tres pasos mencionados anteriormente ocurren simultáneamente en el sustrato y no pueden ser independientemente controladas.

Así, si se hace la elección para un parámetro del proceso tal como la temperatura del sustrato (la cual gobierna la velocidad de deposición en CVD), uno se apega a la resultante con la microestructura y propiedades. Por otra parte, en los procesos de PVD, estos pasos, particularmente el 1 y 3 pueden ser controlados independientemente y uno puede por lo tanto tener un grado mucho mayor de flexibilidad en el control de la estructura y propiedades, y en la velocidad de deposición. Esta es una consideración muy importante y por la cual se desechó la opción del CVD ya que en principio la temperatura del sustrato no va a variar y los sistemas son mucho más complicados. Entonces después se buscaron opciones dentro de los procesos PVD que se dividen en evaporación, galvanoplastia iónica y erosión catódica. A continuación se describen brevemente estas técnicas haciendo énfasis en sus principales características que deben tomarse en cuenta al momento de seleccionar un sistema determinado.

3.3.1 Evaporación.

En el proceso de evaporación, los vapores son producidos de un material localizado en la fuente el cuál es calentado por resistencia directa, radiación, corrientes de remolino, haz de electrones, haz láser o una descarga de arco. Generalmente el proceso es realizado en vacío (normalmente 10^{-5} a 10^{-6} Torr) tal que los átomos evaporados experimenten esencialmente colisiones en la línea de transporte antes de la condensación en el sustrato. El sustrato está generalmente puesto a tierra. La figura 3.1 es un esquema de la ilustración de un sistema de evaporación en vacío por calentamiento de haz de electrones. Puede ser notado que el espesor del depósito es el más grande directamente cerca de la línea central de la fuente y decrece lejos de ella. Este problema es superado impartiendo un movimiento complejo a los sustratos (por ejemplo, en un sostenedor planetario o que rota al sustrato) para igualar el flujo de vapor en todas las partes del sustrato, o introduciendo gas a una presión de 5 a 200 mTorr en la cámara tal que las especies de vapor experimenten múltiples colisiones durante el transporte de la fuente al sustrato, esto produce un espesor uniformemente razonable ($\pm 10\%$) de recubrimiento en el sustrato. La última técnica es llamada evaporación del gas dispersado o galvanoplastia a presión [10], [11].

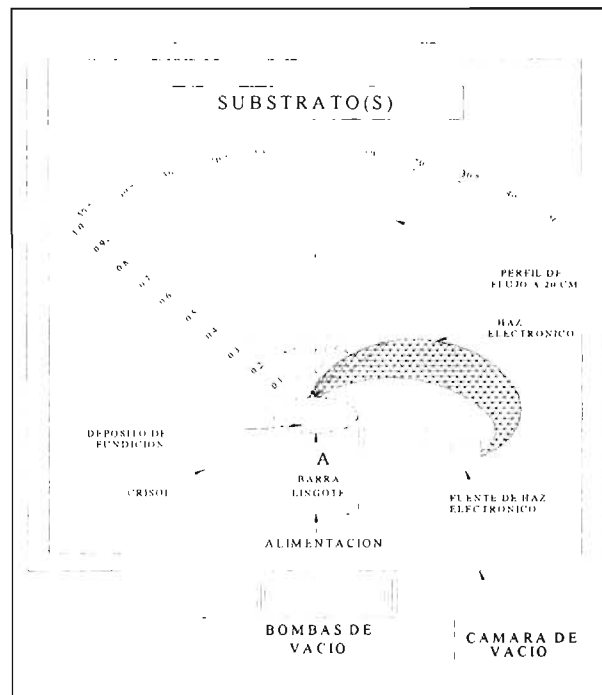


Fig.3.1. Sistema de evaporación en vacío por calentamiento de haz de electrón [10].

3.3.2 Galvanoplastia Iónica [1].

En el proceso de galvanoplastia iónica, el material es vaporizado de manera similar que en el de evaporación pero pasa a través de una descarga gaseosa caliente en su camino al sustrato, así ionizando algunos de los átomos vaporizados. La descarga caliente es producida sometiendo al sustrato a un potencial negativo alto (-2 a -5 kV) y admitiendo un gas, usualmente argón, a una presión de 5 a 200 mTorr en la cámara. En este modo, el sustrato es bombardeado por los iones de gas de alta-energía el cual es espurreado al material presente en la superficie. Es cierto, que esto da lugar a una limpieza constante del sustrato (esto es, un retiro de impurezas en la superficie por espurreo) la cual es deseable para producir una mejor adhesión y un contenido bajo de impurezas. Sin embargo, este bombardeo de iones causa una modificación en la microestructura y esfuerzos residuales en el depósito. Además, esto produce efectos indeseables como una disminución en las velocidades de deposición, así como un considerable (indeseado para recubrimiento de polímeros) calentamiento del sustrato por el intenso bombardeo del gas de iones [1].

3.3.3 Erosión Catódica o Espurreo (Sputtering).

En procesos de espurreo, un gas de iones positivos (usualmente iones de argón) producidos en una descarga caliente (gas a presión: 20 a 150 mTorr) bombardeando el material (también llamado el cátodo) desalojando grupos de átomos los cuáles entonces pasan a la fase de vapor y se depositan en el sustrato. El espurreo es un camino ineficiente para inducir la transición de sólido a vapor. Así el costo energético del cambio de la fase es a partir de 3 a 10 veces más grande que la evaporación [12].

La velocidad de deposición para varios procesos es indicada en la tabla 3.1 [1]. Las velocidades de deposición de los procesos de la evaporación y de la galvanoplastia iónica son mucho más altas que los de los procesos de espurreo. Recientemente, Schiller y Jasch [13], reportaron sobre una larga escala de aplicaciones industriales de deposición de Aluminio en el acero en tiras continuamente a una velocidad de deposición de 20 μ /min., lo que da una idea de que está trabajando para mejorar ese parámetro. Todo lo mencionado en el punto 3.3 es solo una pequeña parte de todo lo que se investigó, después de todo este análisis, primero se desechó la opción de los procesos de vapores químicos, después de entre los 3 métodos mencionados dentro de los procesos de vapores físicos, se desecharon el proceso de galvanoplastia iónica y espurreo que tienen un principio similar y que involucra un daño a la microestructura del sustrato y un calentamiento que no requerimos para el sustrato de plástico, además estos procesos son más complejos que la evaporación, por lo que finalmente se tomó la decisión de elegir el proceso de evaporación.

Tabla 3.1 Velocidades de Deposición para varios Procesos PVD [1].

Evaporación, Å/min.	100 - 250,000*
Galvanoplastia Iónica, Å/min.	100 - 250,000
Espurreo, Å/min.	25 - 10,000
*En casos especiales hasta 500,000 Å/seg.	

3.4 Descripción de un Sistema de Evaporación.

Un sistema de evaporación consiste en los siguientes componentes: cámara, bombas de vacío, medidores de vacío, incluyendo medidores de presión total y parcial en sistemas sofisticados, fuentes de evaporación, sujetadores de sustratos, controladores de proceso, en este apartado se muestran 4 de los 6 componentes del sistema de evaporación, los 2 componentes restantes están descritos en el capítulo de resultados.

3.4.1 Cámara de Vacío: Va desde una campana de cristal o una caja rectangular para la producción experimental o de una combinación de ellos a equipos complejos para aplicaciones de producción. Lo último puede consistir en una cámara de deposición con cámaras de carga y descarga unidas a la cámara de deposición por conexiones con las válvulas de vacío. Estos son llamados recubrimientos de ciclo rápido. Alternativamente se aprovechan en sistemas en línea que son semi-continuos donde sustrato en tira almacenado en la cámara de vacío puede ser alimentado continuamente sobre la fuente o un sistema continuo donde un sustrato en tira o en hoja es insertado y removido desde la cámara de deposición a través de los sellos [13], [14], estos básicamente son arreglos donde se busca un proceso de evaporación que involucre una producción mayor y que no es el propósito de esta tesis llevarlos a cabo, pero se deja el precedente de que existen y a mediano plazo es uno de los objetivos que queremos alcanzar, de tal forma que cuando este proyecto piloto funcione adecuadamente, se pueda extender su aplicación con miras a una producción industrial, este componente está descrito en el capítulo 4.

3.4.2 Bombeo del Vacío: El sistema de bombeo está basado en una bomba de difusión enfriada con agua, esta bomba necesita un vacío previo, el cual se logra mediante una bomba mecánica.

3.4.2.1 Bomba Difusora: Cuando se busca hacer vacío para alguna aplicación se debe saber primeramente en que tipo de vacío se quiere trabajar, esto es, que valor numérico debe de tener dicho vacío, de ahí surge una clasificación que nos da: bajo vacío, medio vacío, alto vacío y ultra-alto vacío, en este caso el valor deseado como óptimo es de alrededor de 10^{-6} Torr y que se ubica en el rango de alto vacío. En la figura 3.2 [2] se pueden ver los diferentes tipos de bombas y el rango en que se desenvuelven cada una de ellas.

De la figura 3.2 nos ubicamos en la zona de alrededor de 10^{-6} Torr y encontramos que las bombas que trabajan bien en alto vacío son la bomba difusora, la molecular, la criogénica y la iónica. Por otro lado la bomba criogénica y la iónica están sobradas para el vacío que necesitamos y su costo es muy alto por lo que esas opciones se eliminaron quedando solamente la bomba difusora y la molecular, después de que quedaron estas dos opciones para elegir la bomba más adecuada, se vieron dos puntos principales: el costo y el uso que se le puede dar, en ese sentido el principal fue el costo ya que para características parecidas la turbomolecular es más de 5 veces el costo que la difusora, también hay que tomar en cuenta que no necesitamos de una alta pureza, aparte el uso de la difusora es más rudo que el de la otra, viendo que a mediano plazo el hecho de que esto pueda ser un proyecto industrial entonces la mejor elección es una bomba difusora.

Una bomba difusora consta de una cámara donde se calienta aceite, en un principio se utilizaba mercurio pero se dejó de utilizar principalmente por su toxicidad, el aceite a baja presión se evapora y el vapor sale por el difusor.

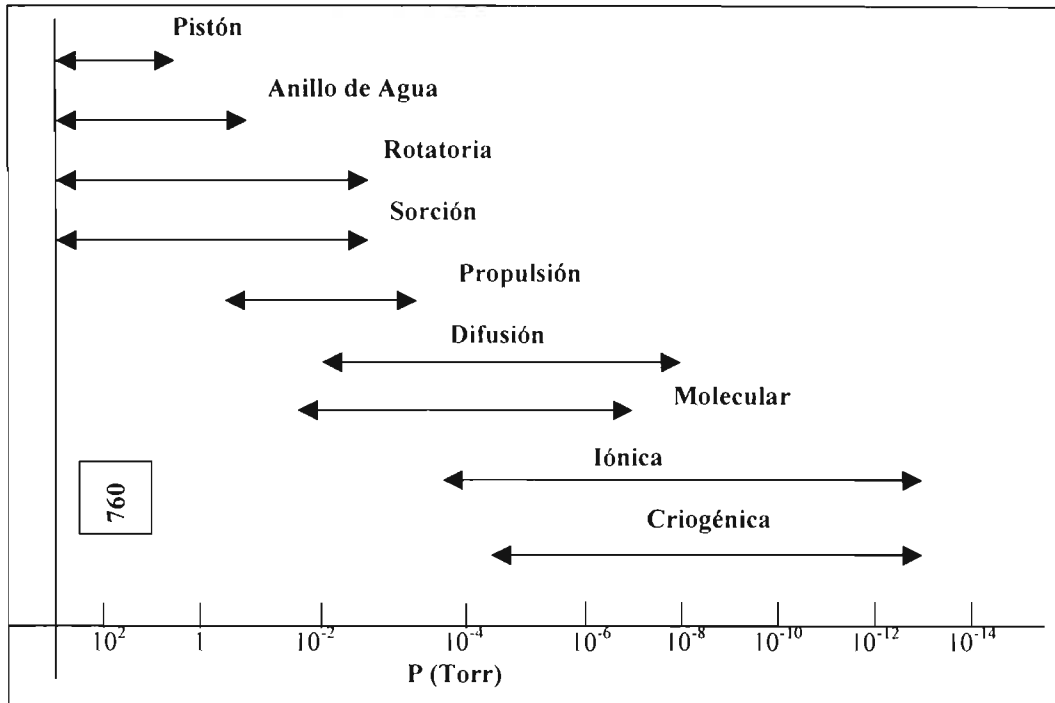


Fig.3.2 Rango de presiones para diversos tipos de bombas [2]

Los vapores del aceite arrastran las moléculas del gas a extraer hacia el área de bajo vacío, en esta área es donde va conectada la bomba mecánica. Mientras tanto los gases del aceite al chocar con las paredes de la cámara, que están refrigeradas por agua se enfrían y se condensan en gotas líquidas. El aceite ya en su estado líquido y frío pasa de nuevo a la cámara de evaporación a través del sifón. El sifón además de permitir el retorno del aceite a la cámara sirve para mantener la diferencia de presión entre la cámara de evaporación y la de condensación. Hay que resaltar que para que funcione una bomba difusora es necesario que haya un vacío previo. El vacío previo necesario depende de la construcción de la bomba y del líquido a emplear. En lo que respecta al aceite a evaporar existen muchos líquidos orgánicos, entre los que se emplean en las bombas difusoras están las siliconas con las que se consiguen vacíos del orden de 10^{-7} Torr, hasta con Santovac 5 con el que se puede llegar hasta 10^{-9} Torr, sin necesidad de emplear trampas de nitrógeno líquido. El consumo de aceite es prácticamente insignificante. Y solo después de bastantes horas de trabajo es necesario cambiarlo.

La bomba difusora elegida es una KJLC modelo DPD 1200, en la tabla 3.2 [17] se muestran las especificaciones que tiene esta bomba, algunas cotas y los materiales de los que esta hecha. En la figura 3.3 [17] se muestra las curvas de velocidad y rendimiento de la bomba difusora. En la figura 3.4 [17] se muestra un dibujo de la bomba difusora donde se muestran algunas cotas que se especifican en la tabla 4.1.

Tabla 3.2... Especificaciones de la Bomba [17]	
Potencia	1450 watts
Rango de Operación Optima	1×10^{-3} a 5×10^{-9} Torr (.133 Pa) < (.000000665 Pa)
Máxima Velocidad de Bombeo (L/s) - Aire	1200 con cap frío estándar; 950 con cap frío extendido

- Helio	1500 con cap frio estándar; 1200 con cap frio extendido
Máximo Rendimiento (L / s) a .001 Torr (13.3 Pa)	2.5
Máxima Forepressure	No cargada - 0.65 Torr (86.45 Pa) Carga Completa - 0.55 Torr (73.15 Pa)
Velocidad de Backstreaming a la entrada de la Bomba	2×10^{-3} mg / cm ² / minuto (con cap frio estándar)
Requerimientos eléctricos (aproximados)	120, 240, 208, 50 / 60 Hz., fase simple
Tiempo de Calentamiento	8 min.
Tiempo de enfriamiento usando la espira de enfriamiento rápido	10 min.
Carga de fluido	300 cc.
Requerimientos de agua por tiempo	Máxima temperatura del inlet - 60 / 80°F Máxima temperatura del outlet al forline - 120°F Velocidad general del flujo - .015 gpm.
Presión del agua a través de la espira	4 psi
Medida recomendada de la bomba de apoyo	10 cfm para máximo rendimiento
Ensamble del motor	4 etapas autoalineadas de acero inoxidable
Baffle del foreline	Apilado de media luna
Cap frio	Cobre - plateado - niquelado
Conexiones de agua	1 1/48 FPT
Interruptores térmicos	Reseteo manual a 300 °F
Resistencia del circuito calentador (ohms)	120 V 10Ω 208 V 31Ω 240 V 41Ω
Separación para remoción del calentador	6 pulgadas mínimo
Materiales	
Cuerpo, entradas, baffle del foreline,	Acero Inoxidable
Montaje del jet	Acero Inoxidable
Cuerpo de las espiras de enfriamiento	Cobre
Espira de enfriamiento rápido	Acero inoxidable
Cap frio	Cobre niquelado-plateado
Peso del envío	50 libras

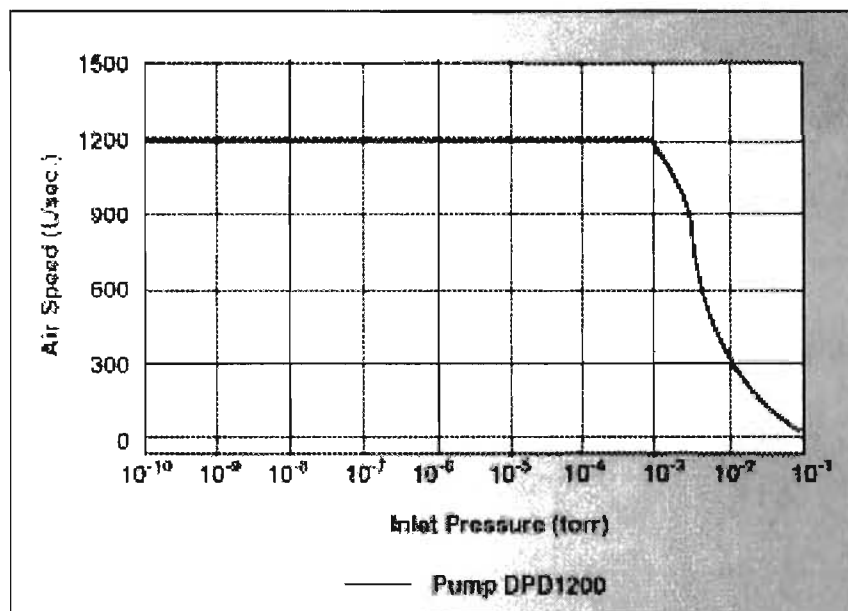


Fig.3.3 Curvas de Velocidad de la DPD1200 [17]

En la tabla 3.3. [17] se muestran todas las características físicas de la bomba, las medidas están dadas tanto en pulgadas (in.) como en milímetros (mm.). Dichas características están plasmadas en la figura 3.4.

3.4.2.2 Bomba Mecánica: Las bombas mecánicas son bombas de desplazamiento positivo que toman un gran volumen de gas a baja presión y lo comprimen a un pequeño volumen a alta presión. Las primeras bombas de vacío fueron mecánicas. Las bombas mecánicas son usadas para hacer un vacío primario desde la presión atmosférica, a través del régimen de flujo viscoso, hasta una baja presión, donde el sistema de bombeo se cambia de las bombas mecánicas a las bombas de alto vacío, en este caso la bomba difusora.

Las bombas mecánicas son usadas en una infinidad de aplicaciones, en este caso se quería tener una bomba que fuera la base de la difusora, esto es, que generara el vacío primario para que la difusora entre en funciones, este vacío primario es de alrededor de 10^{-3} Torr. Para este propósito se eligió una bomba mecánica rotatoria Alcatel modelo 2021 de la serie SD, esta serie es la denominada estándar y esta diseñada para diversos propósitos.

	VHS-4	
	ASA	ASA
	In	mm
Altura	18.05	458
Línea de centro a línea de centro	10.62	270
Cara de flange a cara de flange	5.03	128
Altura de la caja eléctrica	8.63	219
Grados de la vista de cristal al foreline	90° (giro del reloj)	90° (giro del reloj)
Grados de la caja eléctrica al foreline	30° (contra reloj)	30° (contra reloj)
Flange Inlet, Medida nominal	4" ASA	4" ASA
Flange Inlet, OD	9.00	229
Inlet Flange, ID	5.91	150
Inlet Flange, Espesor	0.50	13
Inlet Flange, Circulo de agujeros	7.50	191
Inlet Flange, Número de agujeros	8	8
Inlet Flange, Medida del agujero	0.69	18
Ranura del O-ring ID	6.06	154
Ancho de la Ranura del O-ring	0.18	4
Flange del Foreline, Medida Nominal	KF-40	KF-40
OD	2.16	55
ID	1.38	35
Espesor	0.20	5
Circulo de agujeros; Numero de agujeros	N/A	N/A
Medida del Agujero; Ranura del O-ring ID	N/A	N/A
Ancho de la Ranura del O-ring	N/A	N/A

Tabla 3.3 Características físicas de la bomba difusora KJLC 1200 [17]

Para poder definir que tipo de bomba mecánica necesitamos, se tenía que tener la selección de la bomba de alto vacío, o sea, la difusora, es importante decir que para hacer la elección de la bomba mecánica tenemos que ver que sucede con la difusora y viceversa. En la tabla 4.1 se puede ver algunas características de la bomba difusora, lo importante de la tabla es el dato relacionado con la bomba base recomendada, el valor dado es de 10 cfm, por lo que para la elección de la mecánica se busco una que cumpliera este requisito.

En la tabla 3.4. [18] se muestran las características de la bomba mecánica modelo SD 2021, hay que notar que la velocidad de bombeo es mayor de 10 cfm con lo que se cumple el requisito que se requiere para que la bomba difusora funcione correctamente. En la figura 3.5 se muestra la bomba mecánica con números que señalan algunos componentes y en la tabla 3.5. se da la referencia esos componentes.

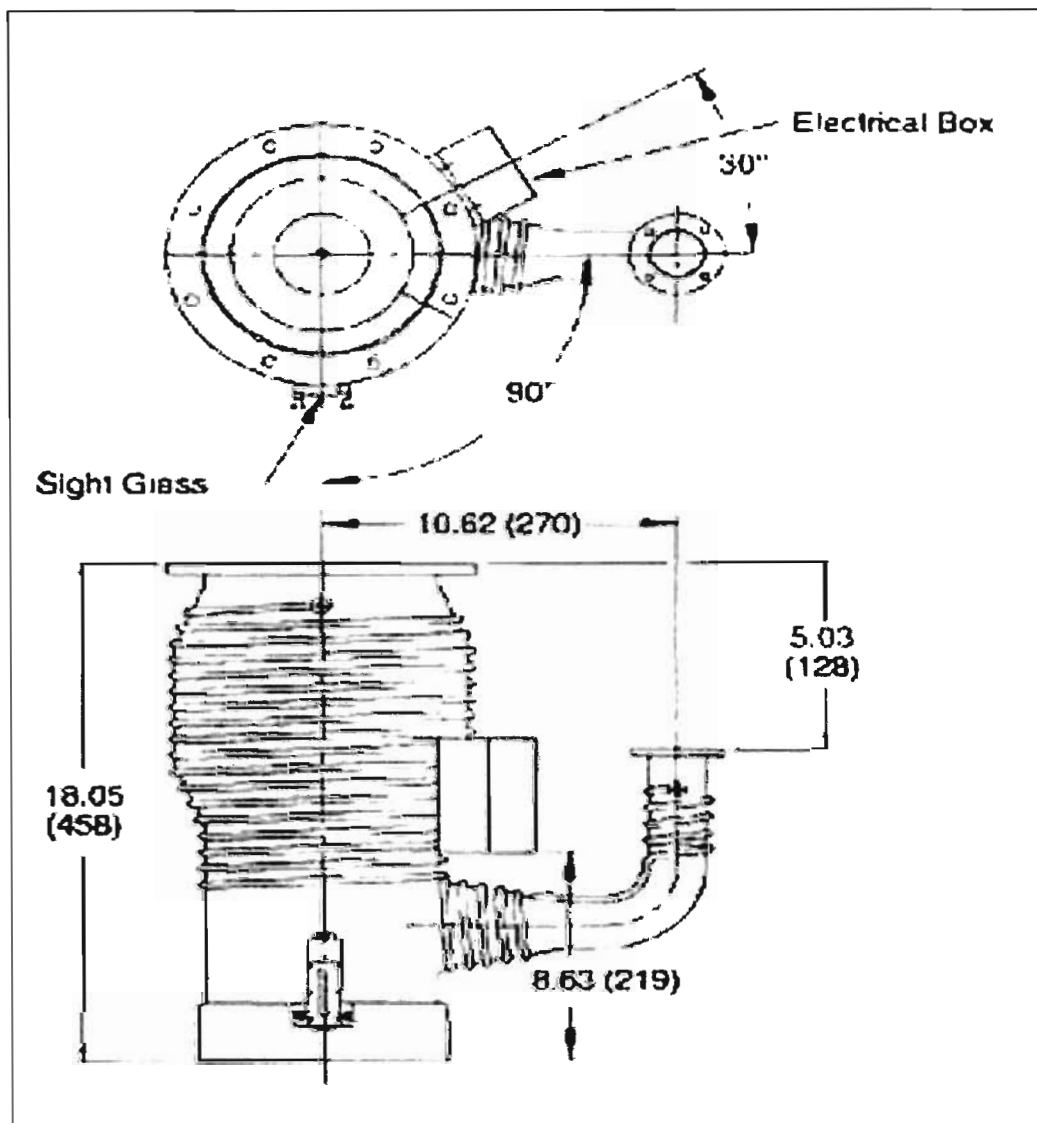


Fig.3.4. Bomba Difusora [17]

Bomba Mecánica Mod.2021 ; Serie : SD		
Características	Unidad	2021-SD
Frecuencia	Hz	60
Número de etapas		2
Velocidad de rotación	rpm	1800
Velocidad de bombeo	m ³ /h	24.8
	cfm	14.6
Presión ultima parcial con aceite Alcatel 120	Torr/mbar	$7.5 \cdot 10^{-5} / 1.10^{-4}$
	/Pa	1.10^{-2}
Capacidad de aceite	l	0.98
Peso [Bomba + Motor]	Kg. [lbs.]	28 [62]
Capacidad máxima de bombeo del vapor de agua	Mbar	7
	Pa	$7 \cdot 10^2$
Capacidad de bombeo de vapor de agua	G/h	90
Empaques del inlet y el exhaust	ISO-KF	DN 25

Tabla 3.4. Características de la bomba mecánica SD-2021 [18].

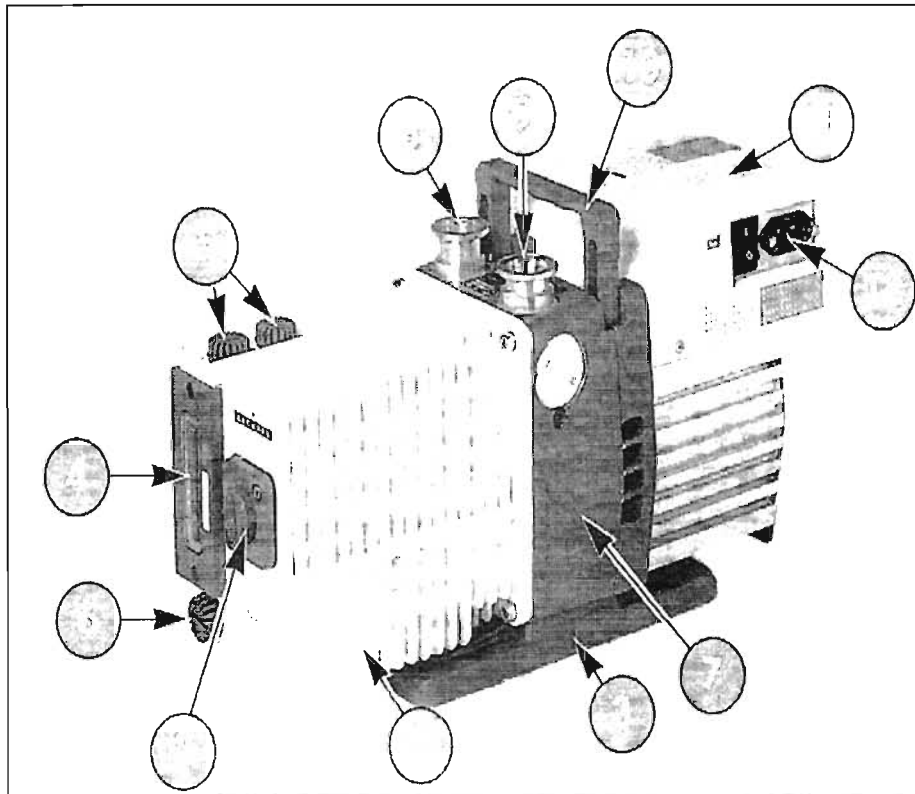


Fig.3.5. La bomba mecánica [18].

No. de Componente	Nombre	No. de Componente	Nombre
1	Deposito de aceite	2	Control Gas ballast
3	Base	4	Mirilla del nivel de aceite
5	Tapones de llenado	6	Tapón de drenado
7	Armadura	8	Conexión del Inlet
9	Conexión del Exhaust	10	Asa
11	Motor	12	Conexión eléctrico

Tabla 3.5. Componentes de la bomba mecánica [18].

3.4.3 Medición de Vacío: En la selección de un medidor de presión es importante considerar de antemano el tipo de sistema con el cual se cuenta, el trabajo a realizarse, y las condiciones necesarias para medir la presión. Una manera sencilla de elegir el medidor adecuado a nuestros propósitos es tomar en cuenta los siguientes cinco puntos:

- 1) El intervalo de presión para el cual es requerido el medidor.
- 2) ¿Qué es importante saber?, la presión parcial de cada componente del gas o la presión total.
- 3) Considerar si la lectura del medidor depende del tipo de gas existente en la cámara.
- 4) La exactitud necesaria al medir.
- 5) El tipo de montadura del medidor.

A través del tiempo se ha sentido la necesidad de medir y clasificar todo cuanto le rodea. Era de esperarse que después de encontrar el "vacío" y poder producirlo, el siguiente paso fuera medirlo, con lo cual podría calcularse la cantidad de partículas que se manejarían en el contenedor, y de esta manera controlar la atmósfera adecuada para los propósitos del caso. Como se va a trabajar desde vacío bajo hasta vacío alto y para lograr esto necesitamos 2 bombas se necesita medir el vacío en esos rangos. Dentro de la gama de aparatos que miden vacío no hay uno solo que mida todos los rangos, a excepción de que sea uno que venga incluido con dos aparatos, para este proyecto se decidió que fueran dos aparatos por separado para tener un mejor control, y poder prevenir si es que hay una descompostura, no tener que comprar otra vez el sistema de los aparatos, de tal manera que el sistema de medición de vacío sea más flexible. Para tal caso se eligieron dos medidores: el medidor Pirani para aplicaciones de bajo vacío y el medidor de Cátodo Frío para aplicaciones de alto vacío.

3.4.3.1 Medidor Pirani: El elemento físico aprovechado para este medidor es la conductividad térmica, fue diseñado por Pirani en 1906, nos da la medida de la presión a través de la variación de la conductividad térmica del gas. Este dispositivo consta de un filamento metálico suspendido en un tubo en el sistema de vacío y conectado a una fuente de voltaje o corriente constante. El alambre puede ser de tungsteno u otro material cuya resistencia varíe mucho con la temperatura. Al aumentar el vacío, se reduce la pérdida de calor por conducción a través del gas y aumenta la temperatura y la resistencia del conductor, que se mide con un aparato adecuado.

El medidor Pirani que se adquirió es un HPS de la Serie 945, las aplicaciones típicas de este medidor son:

- ◆ Medición de presiones de foreline y roughing generadas por bombas mecánicas de vacío.
- ◆ Control de válvulas y bombas para automatizar el sistema de bajo bombeo usando el relevador con puntos de ajuste.
- ◆ Detección de presión anormal para tomar medidas de seguridad apropiadas usando el relevador con puntos de ajuste.
- ◆ Controlar presiones del sistema usando tanto salidas como entradas analógicas en un controlador automático de presión.
- ◆ Inicio o parada de procesos de sistemas usando el relevador con puntos de ajuste.
- ◆ Medición de presiones de gases de relleno en el rango de 10^{-4} a 10^{+2} Torr.
- ◆ Los sensores de alto vacío se activan a un rango alto final de presión de funcionamiento.

En la tabla 3.6. se muestran las especificaciones del medidor Pirani HPS de la serie 945, estas especificaciones nos dan una mayor idea de las combinaciones que podemos tener para realizar la medición del vacío.

Tabla 3.6 Especificaciones del Medidor Pirani HPS de la Serie 943 [18]

Rango de mediciones	1.0×10^{-4} a $1.0 \times 10^{+2}$ Torr 1.3×10^{-1} a $1.3 \times 10^{+5}$ microns 1.3×10^{-4} a $1.3 \times 10^{+2}$ mbar 1.3×10^{-2} a $1.3 \times 10^{+4}$ Pa
Rango del punto de ajuste	2.0×10^{-3} a $9.0 \times 10^{+1}$ Torr 2.0 a $9.9 \times 10^{+4}$ microns 2.7×10^{-3} a $1.3 \times 10^{+2}$ mbar 2.0×10^{-1} a $9.0 \times 10^{+4}$ Pa
Resolución	1% de cada 10, 10% de cada 10 para presiones menores que 10^{-3} Torr
Rango de temperaturas de funcionamiento	5° a 40°C (41° a 104°F)
Rango de temperaturas de almacenamiento	-10° a 55°C (14° a 131°F)
Humedad de Funcionamiento	80% como máximo (no condensado)
Controles del panel delantero	2 permanentes, puntos de ajuste del relevador independiente; Interruptor de energía on-off; ajuste a cero; ajuste atmosférico.
Requerimientos de la Alimentación	90 a 130 VAC, 50/60 Hz o 210 a 250 VAC, 50/60 Hz
Características de relevador contacto	SPDT, carga resistiva 1ª @ 24 VAC o 24 VDC
Respuesta del relevador	150 mseg máximo
Pantalla	LED con 2 dígitos significativos (1 normal) y un exponente; rojo, 3/5"-altura, 7 dígitos-segmentos; indicadores LED del punto de ajuste; unidades mostradas en Torr, mbar, Pascal, Pascal, o microns.
Cubierta Electrónica	Aluminio anodizado

Dimensiones (Ancho x Profundidad x Altura)	3¾ x 7" x 3¾ (96 mm x 178 mm x 96mm)
Medida	¼ DIN
Peso	2.2 lb. (1.0 Kg.)
Tubo del Sensor Gas de calibración	Aire / nitrógeno
Orientación de la instalación	Cualquiera
Reproducibilidad	5% de presión indicada a temperatura constante
Materiales expuestos al vacío	SS 304, platino, alúmina cerámica, aleación cobre plata, níquel 200.
Volumen Interno	0.5 in ³ (8.0 cm ³) máximo
Rango de temperatura de operación	0° a 50°C (32° a 122°F)
Temperatura máxima de recocido	50°C (122°F)
Diámetro	1.3 in. (34 mm)
Longitud	4.4 in (112 mm)
Peso típico (Con flange KF)	0.5 lb. (0.2 Kg.)
Conexión de Vacío	KF 16 1/8 " NPT-M con un sello opcional compresible de ½" 8 VCR – F (½") 1 1/3" CF (no-rotable) 2¾" CF (no-rotable) tubería de Ø 15.0 mm x 30.0 mm tubería de Ø 18.0 mm x 30.0 mm

En la tabla 3.7 [19] se muestra las características principales del medidor Pirani y en la figura 3.6 y 3.7 [19] se muestran los dibujos del sensor y del controlador tanto en un vista frontal, una vista trasera y una vista lateral. Es importante decir que la conexión seleccionada para el medidor Pirani es una CF-2.75" para que ensamble con los puertos que va a tener el servidor [Ver el punto].

Tabla 3.7 Tabla de las características principales del medidor Pirani HPS serie 945 [19]

1	Pantalla digital LED
2	Interruptor tipo mecedora de alimentación Encendido / apagado
3	Botones del punto de ajuste
4	Potenciómetros de ajuste del punto de ajuste
5	Indicadores LED de punto de ajuste
6	Potenciómetro de ajuste atmosférico
7	Potenciómetro de ajuste a cero
8	Entrada del cable de alimentación con receptáculo del fusible
9	Agujeros del sujetador del montaje del panel
10	Puerto el medidor, hembra de 9-pin
11	Puerto accesorio, macho 9-pin
12	Ranuras (para los soportes de montaje opcionales)
13	Entrada octal, macho
14	Puerto del sensor de vacío

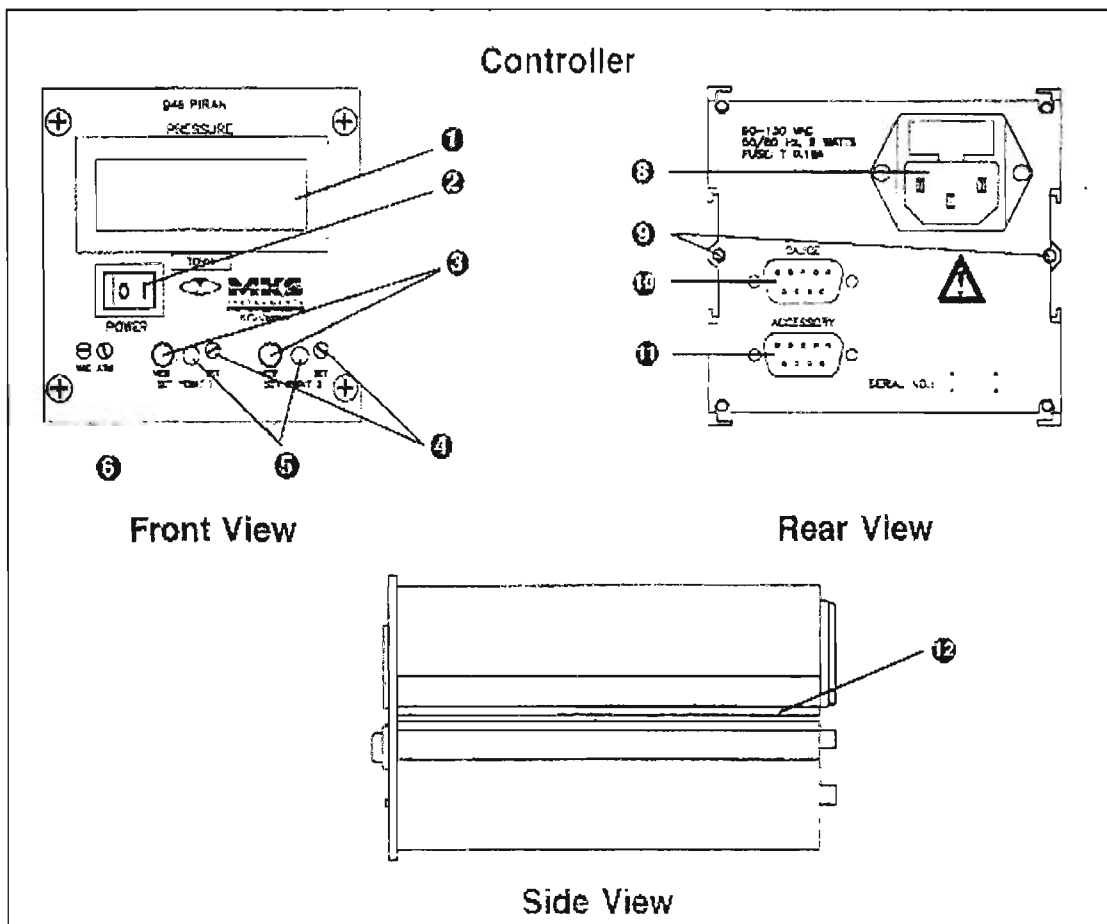


Fig.3.6 El medidor Pirani [19]

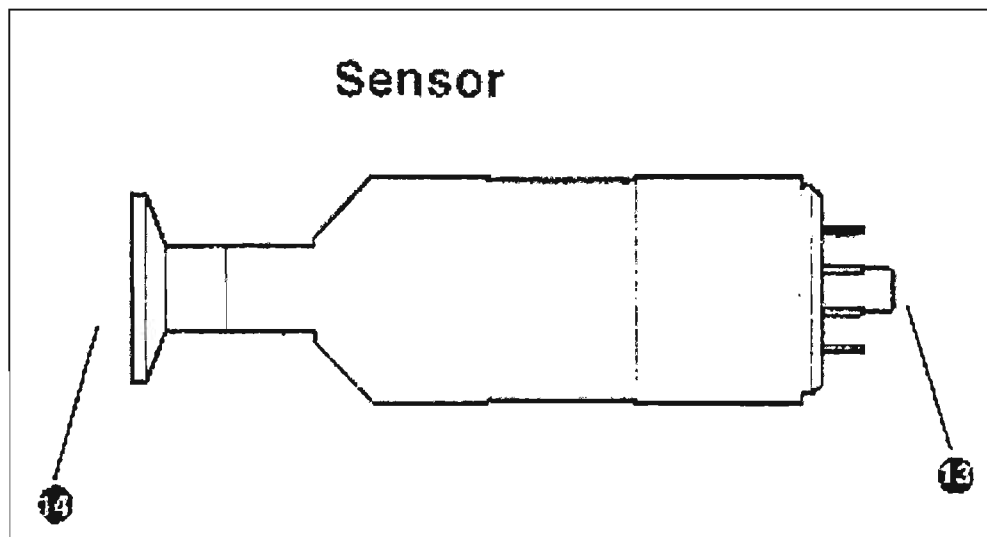


Figura 3.7 El sensor del medir Pirani [19].

3.4.3.2 Medidor de Cátodo Frío: En un sensor de cátodo frío, las moléculas de gas son ionizadas por una descarga de alto voltaje de electrones. La sensibilidad es realizada por un campo magnético. En este caso se eligió un medidor de cátodo frío HPS de la serie 943.

Los sensores de cátodo frío del grupo de productos HPS no son sensores estándares de encierro. El diseño de magnetrón invertido incluye un colector aislado, haciendo que el sensor sea poco susceptible a la contaminación y permite un rango amplio de medición de presión. Los productos IgniTorr de HPS, un cátodo frío opcional inicializó dispositivos en el proceso de ionización en sensores de cátodo frío, empezando con presiones de UHV [Ultra alto vacío] que se leen en segundos.

Un sensor de cátodo frío tiene un número de ventajas por encima de un sensor de cátodo caliente. Estas incluyen:

- ◆ No filamentos que se rompan o se quemen, lo cual lo hace inmune a problemas con el aire, y esto es relativamente insensible a daños por vibración.
- ◆ No limitantes para rayos-X para mediciones de baja presión.
- ◆ No hay ajuste para la corriente de la emisión o el voltaje del filamento necesario.
- ◆ El desgaseado no es necesario.
- ◆ Los tubos correctamente diseñados del sensor se pueden limpiar y reutilizar casi indefinidamente.
- ◆ El circuito de control es simple y absolutamente confiable, como oposición del sensor de cátodo caliente, el cual tiene tres.

El sensor de cátodo frío consiste de un cátodo y un ánodo con una diferencia de potencial de varios kilovolts. Los electrodos están rodeados por un imán, arreglado de modo que el campo magnético sea esencialmente perpendicular al campo eléctrico. Los campos eléctricos y magnéticos cruzados causan que los electrones sigan trayectorias de grandes espirales que incrementan la oportunidad de colisiones con moléculas de gas, de tal modo se abastece de un aumento significativo en eficacia de la ionización comparado a un sensor caliente del cátodo.

En operación, una corriente constante cercana del electrón que circula es atrapada por los campos cruzados. Colisiones de electrones con moléculas de gas residuales produce iones los cuales son colectados por el cátodo. La corriente del sensor i como una función de la presión P obedece la relación,

$$i = kP^n$$

donde,

i está en amperes

k es una constante

P esta en Torr

n es una constante, usualmente en el rango de 1.00 a 1.15

Esta ecuación es válida para un rango de presión desde menos de 10^{-3} Torr hasta 10^{-8} Torr dependiendo de la serie del resistor. A presiones de alrededor de 10^{-6} Torr, sensibilidades de 1 a 10 A/Torr no son usuales.

Las aplicaciones típicas del medidor de cátodo frío HPS de la serie 943 son:

- ◆ Medición en cámaras de presiones de alto vacío.
- ◆ Control de sistema de alto vacío y orden de proceso usando el relevador con puntos de ajuste.
- ◆ Detección de presión anormal para tomar medidas de seguridad apropiadas usando el relevador con puntos de ajuste.
- ◆ Control de presiones del sistema usando tanto salidas como entradas analógicas con un controlador automático de presión.
- ◆ Inicio o parada de procesos de sistemas usando el relevador con puntos de ajuste.
- ◆ Medición de presiones de gases de relleno.

En la tabla 3.8 se muestran las especificaciones del medidor de Cátodo frío HPS de la serie 945, estas especificaciones nos dan una mayor idea de las combinaciones que podemos tener para realizar la medición del vacío.

En la tabla 3.9 [20] se muestra las características principales del medidor de cátodo frío y en la figura 3.8 [20] se muestran los dibujos del controlador tanto en una vista frontal como en una vista trasera. Es importante decir que la conexión seleccionada para el medidor Pirani y el de Cátodo frío es una CF-2.75" para que ensamble con los puertos que va a tener el servidor [Ver el punto 4.1.1].

Tabla 3.8 Especificaciones del Medidor de cátodo frío HPS de la Serie 943 [20]

Rango de mediciones	1.0 x 10 ⁻¹⁰ a 1.0 x 10 ⁻² Torr 1.3 x 10 ⁻¹⁰ a 1.3 x 10 ⁻² mbar 1.3 x 10 ⁻⁸ a 1.3 Pa
Rango de mediciones	1.0 x 10 ⁻⁴ a 1.0 x 10 ⁺² Torr 1.3 x 10 ⁻¹ a 1.3 x 10 ⁺⁵ microns 1.3 x 10 ⁻⁴ a 1.3 x 10 ⁺² mbar 1.3 x 10 ⁻² a 1.3 x 10 ⁺⁴ Pa
Rango del punto de ajuste	2.0 x 10 ⁻⁹ a 9.0 x 10 ⁻³ Torr 2.7 x 10 ⁻⁹ a 1.2 x 10 ⁻² mbar 2.7 x 10 ⁻⁷ a 1.2 Pa
Rango de temperaturas de funcionamiento	5° a 40°C (41° a 104°F)
Rango de temperaturas de almacenamiento	-10° a 55°C (14° a 131°F)
Humedad Relativa	80% como máximo (no condensado)
Altitud	2000 m (6561 ft) como máxima
Requerimientos de la Alimentación	100 a 120 VAC, 50/60 Hz o 230 VAC, 50/60 Hz
Grado del fusible, Medida	T 0.16 A para 100 a 120 VAC T 0.063 A para 220 a 240 VAC φ 5 mm x 20 mm para todos
Control del proceso	Relevador con 2 puntos de ajuste independiente ajustable
Características de relevador contacto	SPDT, carga resistiva 1ª @ 24 VAC o 24 VDC
Controles del panel delantero	Interruptor de energía de eje de balancín, 2 botones-pulsadores y los potenciómetros para

Controles del panel delantero	una visión independiente y el ajuste del punto de ajuste del relevador, 1 botón-pulsador y potenciómetro para protección de la revisión punto de ajuste y su ajuste, interruptor de palanca para alto voltaje (Encendido/Apagado/Remoto)
Respuesta del relevador	50 mseg para presiones > 10 ⁸
Pantalla	LED rojo, 7 dígitos-segmentos con 14 mm de altura, ±60 ° de ángulo de visión
Resolución	2 dígitos (1 principal) con 1½ - dígito de exponente
Cubierta Electrónica	Aluminio anodizado
Dimensiones (Ancho x Profundidad x Altura)	3¾ x 7" x 3¾ (96 mm x 178 mm x 96mm)
Medida	¼ DIN
Peso	2.2 lb. (1.0 Kg.)
Características del Sensor I-Mag-423	
Tiempo de respuesta	40 mseg
Reproducibilidad	5% de presión indicada a temperatura constante
Gas de calibración	Aire / nitrógeno
Orientación de la instalación	Cualquiera
Materiales expuestos al vacío	SS-302, SS304, vidrio, Al, Inconel X-750, alumina cerámica
Volumen Interno	0.9 in ³ (15 cm ³)
Rango de temperatura de operación	0° a 70°C (32° a 158°F)
Temperatura máxima de recocido	500°C (932°F)
Diámetro	2.6 in. (66 mm)
Longitud	3.4 in (86 mm)
Peso típico (Con flange KF)	1.8 lb. (0.8 Kg.)
Conexión de Vacío	2¾" CF (no-rotable)

Tabla 3.9 Tabla de las características principales del medidor de cátodo frío HPS de serie 945 [20]

1	Pantalla digital LED
2	Interruptor tipo mecedora de alimentación Encendido / apagado
3	Botones del punto de ajuste
4	Indicadores LED de punto de ajuste
5	Potenciómetros de ajuste del punto de ajuste
6	Protección del botón-pulsador del punto de ajuste
7	Protección del potenciómetro de ajuste del punto de ajuste
8	Interruptor de palanca de alto voltaje (H.V. On/H.V Off/ Remote)
9	Conector SHV de alto voltaje
10	Conector SMA corriente iónica
11	Macho, Conector-accesorio "D" de 15-pin
12	Entrada de energía AC, receptáculo del fusible IEC 320 w

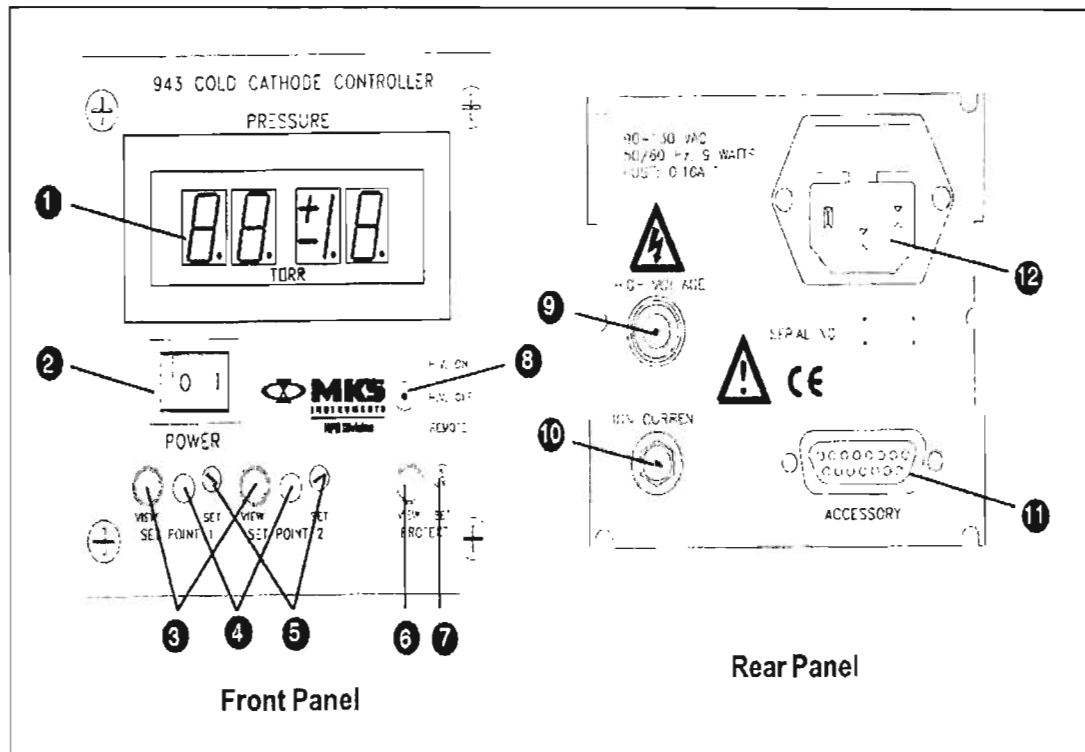


Fig.3.8 El medidor de Cátodo Frío [20]

3.4.4 Calentador del Substrato. Estos se utilizan para el calentamiento del sustrato cuando se requieren ciertas propiedades o que se requieren ciertas temperaturas según el proceso que se esté utilizando. Un punto importante es que el calentador del sustrato que se tiene para este sistema ya estaba en el laboratorio cuando se estaba planeando esta tesis y es por eso que se incorpora a este diseño, se pensó en incorporar este calentador de sustratos para darle muchas más opciones al sistema, lo que hace que este sea más funcional.

Este es un calentador de alta temperatura marca US de 2". El cañón II US es un calentador de sustrato resistivo de alta temperatura fue específicamente diseñado para proveer estabilidad, calentamiento uniforme de sustratos en un área de alrededor de 12 centímetros cuadrados durante la deposición de películas delgadas. El corazón del calentador es un alambre resistivo empotrado en un bloque de súper aleación. Cuando la corriente es aplicada, el bloque puede alcanzar temperaturas arriba de 950 °C. Este diseño simple hace al calentador bastante eficaz y durable. Los materiales usados fueron cuidadosamente escogidos para un desempeño termal, estabilidad química, durabilidad y compatibilidad UHV. El calentador se puede usar con éxito en procesos tales como espurreo, deposición por láser pulsado y deposición por vapores químicos. En la figura 3.9 [21] se muestra un diagrama de una instalación típica, hay que decir que este calentador se puede instalar de maneras diferentes ya sea horizontal o vertical por lo que este elemento tendrá algunas variantes.

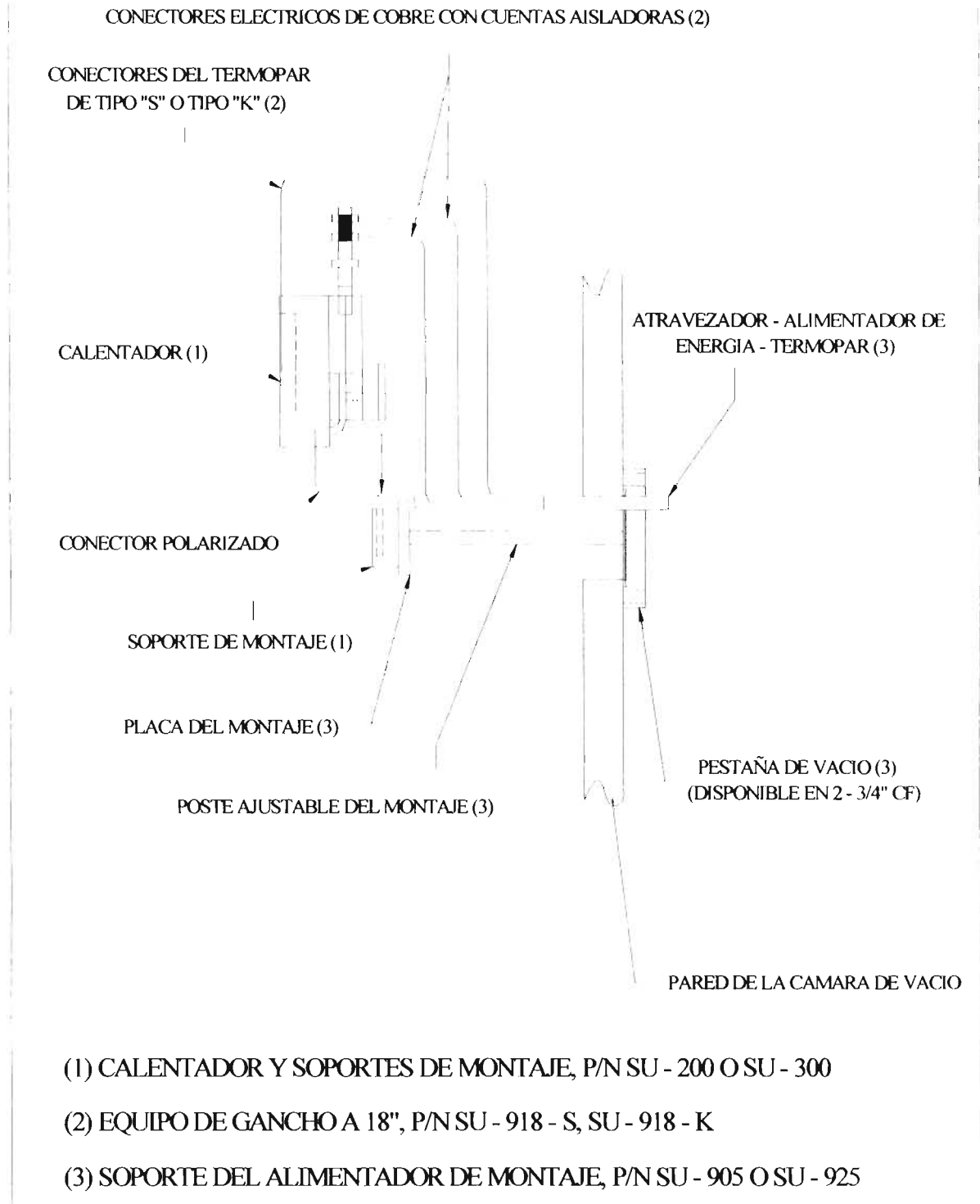


Figura 3.9. Diagrama de una instalación típica de un calentador resistivo US [Lozano@2004]

3.4.5 Fuentes de Evaporación: Las fuentes de Evaporación son clasificadas por el modo de calentamiento usado para convertir el sólido o líquido evaporante a la fase de vapor. Así uno habla de fuentes como de resistencia, arco, inducción, haz de electrones, proyección de imagen del arco, láseres, y del tipo de alambre. Un factor muy importante a ser notado es que no podemos evaporar cada material desde cualquiera de los tipos de fuentes listadas anteriormente por las siguientes razones:

1. La interacción química entre el material fuente y el evaporante el cual conduciría a impurezas en el depósito. Por ejemplo, la evaporación de titanio desde una fuente de MgO puede causar contaminación de oxígeno y magnesio; el titanio se reduciría a MgO. Por lo tanto, para la evaporación de metales reactivos como el titanio, circonio, etc., podemos usar agua para enfriar crisoles de cobre.
2. La reacción entre fuentes metálicas (tales como W o Ta) y el evaporante (Ti) podría ocurrir. En muchos casos a altas temperaturas los dos metales pueden mutuamente disolverse en uno conduciendo esto a la destrucción de la fuente.
3. La densidad de potencia (esto es, watts por cm^2) varía mucho entre las diversas fuentes de calor.

La tabla 3.10 está tomada de un artículo de Glang [15] en la que da la temperatura y materiales de soporte usados en la evaporación del cromo.

Las más simples fuentes de vapor son resistencias de alambre calentadas y hojas de metal de varios tipos. Están disponibles en una variedad de tamaños y formas y en una gran variedad de precio, se pueden desechar después de un experimento en caso necesario. Están usualmente hechos de metales refractarios, tungsteno, molibdeno y tantalio los cuales tienen un alto punto de fusión y presión baja del vapor para que no contamine el depósito. Estas propiedades son dadas en la tabla 3.11 [15]. Platino, acero o níquel son algunas veces utilizados para los materiales que se evaporan debajo de $1000\text{ }^\circ\text{C}$. La capacidad (cantidad total de evaporante) de tales fuentes es baja. Las fuentes de la hélice y de alambre son usadas uniendo el evaporante a la fuente en forma de pequeños segmentos de alambre o laminas muy pequeñas. Sobre el punto de fusión, el evaporante debe mojar el filamento y ser sostenido allí por la tensión de superficie. Esto es deseable al incrementarse el área de la superficie de evaporación y el contacto térmico. Filamentos múltiples son preferidos porque estos incrementan el área de la superficie. La cantidad máxima llevada a cabo es de cerca de 1 gramo. Fuentes con algunas formas como los de canasta entre otros pueden soportar algunos gramos.

Puesto que la resistencia eléctrica de la fuente es pequeña, fuentes de baja tensión, 1 a 3 Kw., son recomendadas. La corriente en la fuente puede extenderse a partir del 20 a los 500 amperios. La fuente que se cotizó y que por el precio es la mejor opción es marca Sedil, esta es una fuente de alimentación de 2 Kw, tiene un voltaje de salida de 40 V y una corriente de salida de 50 A, el voltaje de entrada es de 220 V a 60 Hz con un interruptor térmico de 10 A. La regulación de la potencia es digital.

3.4.6 Accesorios: Este sexto componente se agregó por la necesidad de incluir elementos que no se podían clasificar dentro de los cinco primeros, en este componente se han englobado todas las conexiones que necesita el sistema, como las válvulas de ángulo, las válvulas de venteo, la válvula de emergencia, las mangueras que conectan las bombas, también en este componente se clasificó todo lo relacionado con la base del sistemas, esto es, la mesa, el contrapeso y el brazo que va a sostener a la campana construida en el taller mecánico de IICO, esta parte de los accesorios se describe en el capítulo IV referente a los resultados [Instituto de Investigación en Comunicación Óptica]. De tal forma que la división de los seis componentes del sistema de evaporación que se ha construido clasifique en forma ordenada todos los elementos que integran este proyecto, de esta manera el sistema esta completo.

Tabla 3.10 Temperaturas y Materiales de soporte usados en la evaporación del cromo [15].

Elementos y especies predominantes del vapor	Temperatura, °C		Materiales de ayuda		Observaciones
	mp	$p^*=10^{-3}$ Torr	Alambre, hoja	Crisol	
Cromo (Cr)	~1900	1400	W, Ta	Alta velocidad de evaporación sin disolverse. Sublimación del cromo da una radiación que calienta barras de cromo preferentemente. Es probable que los electrodepositos de Cr descarguen hidrógeno.

Tabla 3.11 Propiedades de Metales Refractarios [15].

Propiedad	Tungsteno	Molibdenu	Tantalio
Punto de Fusión, °C	3380	2610	3000
T, °C, para $p^* = 10^{-6}$ Torr	2410	1820	2240
Resistividad eléctrica, 10^{-6} Ohm-cm			
A 20 °C	5.5	5.7	13.5
A 1000 °C	33	32	54
A 2000 °C	66	62	87
Expansión Termal, %			
De 0 – 1000 °C	0.5	0.5	0.7
De 0 – 2000 °C	1.1	1.2	1.5

Finalmente todo lo referente a conexiones forman parte de los accesorios del sistema de evaporación están en la tabla 3.12, en esta tabla podemos ver las mangueras necesarias para la conexión de las bombas, las válvulas que nos van a permitir cerrar o abrir conexiones, válvulas de emergencia o de seguridad y en la figura 11 del anexo A se muestra el diagrama de cómo se va a realizar el armado de las conexiones del sistema de evaporación para que este funcione como tal.

Item	Cantidad	Descripción
1	1	Válvula de ángulo Sentry. Válvula de seguridad que previene el flujo hacia atrás que mezcle los aceites de las bombas difusora y mecánica
2	2	Válvula manual de ángulo ISO-KF NW 25
3	1	Adaptador de NW25 a CF 2.75"
4	1	Adaptador de NW 25 a NW 40
5	1	Manguera SS, pared delgada NW 16, longitud 305 mm
6	2	Manguera SS, pared delgada NW 25, longitud 500 mm
7	1	Manguera SS, pared delgada NW 25, longitud 610 mm
8	1	Manguera SS, pared delgada NW 25, longitud 305 mm
9	1	T reductora de NW 25 – NW 25 – NW 16 de acero inoxidable
10	1	Cruz en NW 25, acero inoxidable
11	1	Reductor de NW 25 a NW 16, acero inoxidable
12	1	Válvula de Venteo NW 16
13	1	Válvula manual estándar de compuerta ASA 4" (Diámetro Interior)
14	10	O-ring central, aluminio viton, NW 25
15	1	O-ring central, aluminio viton, NW 40
16	2	O-ring central, aluminio viton, NW 16
17	1	Paquete de 10 sellos de cobre para CF 2.75"
18	1	Aceite DC 705 Dow C, frasco con 500 cc
19	2	Empaques L-Gasket de 18"

Tabla 3.12 Elementos que son las conexiones del sistema de evaporación.

3.5 Fuentes de financiamiento del proyecto y proceso de cotización.

El proyecto que se está presentando en esta tesis es un proyecto muy ambicioso ya que se va a construir la cámara de vacío es decir se va a desarrollar tecnología propia lo que hace que el proyecto sea de gran alcance y que por ser de esta naturaleza requiere de muchos recursos para poder terminarlo, estos van desde recursos humanos hasta recursos materiales y económicos. Hay que tomar en cuenta que estos sistemas son muy caros y de avanzada tecnología, normalmente la mayor parte de los componentes de estos sistemas no se construyen en el país, de la misma forma que en otros ámbitos de la tecnología nacional nos hemos vuelto armadores de equipos en muchos campos tanto de la ciencia como de la industria.

En este caso en particular la idea va más allá de esta realidad buscando construir una parte de nuestro sistema junto con la compra de otros, esto es, se ha tenido que hacer cotización de elemento por elemento, lo que también ha contribuido a alargar el proceso de armado del sistema.

Este sistema consta de varios componentes [Ver 3.4], de los 6 componentes que tiene este sistema de evaporación el componente referente a la cámara de vacío y algunos de los accesorios se construyeron aquí, esto es, el diseño de los componentes de la cámara, así como su construcción y armado, que son la parte más importante de este proyecto se realizó en la ciudad de San Luis Potosí en dos partes, tanto en el taller mecánico del IICO Universidad Autónoma de San Luis Potosí como en Talleres Guemes, S. A. de C. V.

Pero los otros componentes del sistema son elementos que se necesitan adquirir ya que son de muy difícil construcción e incluso en México no se pueden conseguir fácilmente, tal es el caso, de la bomba difusora de alto vacío, la bomba mecánica de apoyo, los instrumentos de medición tanto del vacío primario (Medidor Pirani), como el de alto vacío (Medidor de Cátodo Frío), del calentador del sustrato, la fuente de evaporación de las conexiones y válvulas, entre otros elementos tiene que comprarse.

En México hay muy pocos lugares que se dediquen al suministro de componentes de alta tecnología, en este caso se contactaron algunos distribuidores y se eligió a Intercovamex ya que es el primer integrador de sistemas de alto vacío en México y manejan los componentes más críticos los cuales son importados de compañías líderes mundial en su campo: Alcatel, Mks, K.Lesker, Advanced Energy, entre otras y maneja un amplio rango de aplicación, por ejemplo de K.Lesker se compraron las bombas de vacío, tanto la difusora como la mecánica, de Mks se compraron los medidores de presión, etc. Intercovamex anteriormente ha armado sistemas de deposición al IICO tales como el MBE modelo MBE 32 RD en 1994, un Sputtering modelo A 450 de Alcatel en 1993 y un sistema de Evaporación térmica modelo ET 18P Intercovamex [16], por lo que ya se tiene un contacto cercano con estas personas y se eligió a este distribuidor. Ya con un distribuidor localizado se tuvo que hacer una planeación cuidadosa de los elementos que se necesitaban e iniciar un largo proceso de cotización, este proceso ha durado más de un año y hay que decir que todavía no se ha terminado, la primera parte fue cotizar el bombeo de vacío, posteriormente la medición del vacío, la cotización de la construcción de la cámara de vacío, la de la fuente de evaporación y la de los accesorios. Este proceso de cotización ha sido uno de los principales problemas a resolver, ya que para llegar a la compra de alguno de los elementos por ejemplo la bomba difusora se cotizó en diciembre del 2003 y llegó al IICO en julio del 2004, lo que nos puede dar una idea de cómo este punto que al principio parecía no tener la mayor importancia llegó a ser un factor limitante para este proyecto.

En la tabla 3.13 se muestra los elementos que forman parte del sistema sus fechas de cotización, su financiamiento y su llegada al IICO. Hasta este momento solo hemos tratado en este punto lo referente a los componentes que se tenían que comprar, solo queda mencionar dos elementos de gran importancia: la cámara de vacío y algunos de los accesorios.

La cámara de vacío se mandó construir al Taller Güemes, se hizo la cotización en varios talleres y se escogió la opción que dio mayor confiabilidad, y la construcción de la cámara esta por terminarse.

Para terminar se menciona lo referente a parte de los accesorios, ya que en ellos se incluyeron las conexiones, las válvulas, entre otros elementos que se compraron, pero también se incluyeron elementos como la estructura donde irá montado el sistema, el brazo para manipular la campana con todo lo que ello implica, esta parte del sistema se esta construyendo y está por terminarse.

Tabla 3.13 Relación de componentes adquiridos.

No. de Componente	Componente	Financiamiento	Cotización	Orden de Compra	Llegada
1	Cámara de Vacío	Proyecto Promep NPTC-21 (Ext.)	22/03/04	-	-
2	Bombeo del Vacío	Proyecto CA-Promep-2002	21/01/04	27/04/04	6/07/04
3	Medidores de Presión	Apoyo FAI-2004/IICO	15/03/04	28/06/04	18/08/04
4	Fuente de Evaporación	Proyecto – Promep NPTC 21 (Ext.)	19/07/04	-	-
5	Calentador de Substrato	Proyecto – Promep NPTC-21	01/04/03	08/12/03	Marzo 2004
6	Accesorios	Promep – CA (Optoelectrónicos)	02/08/04	-	-

CAPITULO IV RESULTADOS

4.1 El Sistema NE-150505

El sistema NE-150505 es un sistema de alto vacío que está diseñado para alcanzar presiones del orden de 10^{-6} Torr, este valor en sí está definido solamente por la medida nominal de la bomba difusora que es de alrededor de 10^{-9} Torr. Este sistema podrá evaporar metales como oro, plata, aluminio, cobre, aunque está diseñado en primera instancia para la evaporación de cromo con el objetivo de realizar un recubrimiento de este material sobre plásticos, se ha diseñado y construido una evaporadora térmica en la que se hará pasar corriente eléctrica intensa a través de un filamento de tungsteno, donde se coloca la muestra que se desea evaporar. El sistema está esquematizado en la figura 4.1.

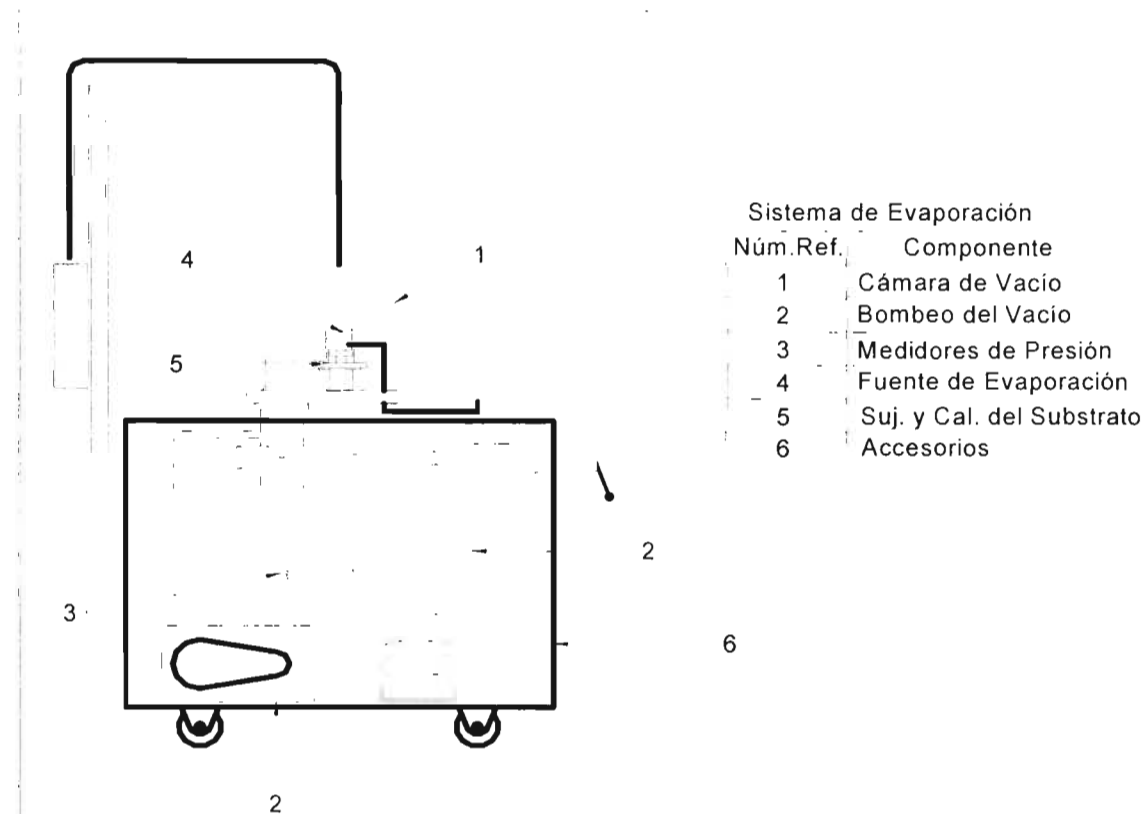


Fig.4.1 Esquema que muestra los componentes que forman parte del Sistema de Evaporación NE-150505 [Lozano-2004].

El objetivo del trabajo es diseñar un sistema de evaporación térmica resistiva de recubrimientos metálicos sobre sustratos poliméricos con las siguientes características: económico, sencillo, con posibilidad de ser llevado a mayor escala y tener una aplicación en la industria de los recubrimientos protectores de plásticos. Así como, implementar un sistema de preparación de recubrimientos metal-polímero que permita por un lado la investigación del material compuesto resultante (adherencia, tipo de enlazamiento, propiedades físicas y químicas y estabilidad ambiental) y que pueda ser posteriormente crecido para obtener un sistema donde no solo se deposite uno o dos sustratos pequeños, si no que se desarrollen estudios *in-situ* del crecimiento de los recubrimientos, etc, esto es, que se pueda tener un sistema multifuncional.

El Sistema NE-150505 como lo muestra la figura 4.1 consta de 6 componentes de los cuales se presentan 2 de ellos que son directamente las aportaciones que se hicieron:

4.1.1. Cámara de Vacío.

Para la construcción de los elementos del componente se requiere de un material que cumpla con ciertos parámetros tales como excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene, adecuada maquinabilidad, excelente soldabilidad, que se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas, etc, siendo el óptimo un acero inoxidable de la Serie 300: Aceros Inoxidables Austeníticos. Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el nombre. El contenido de Cromo varía de 16 a 28%, el de Níquel de 3.5 a 22% y el de Molibdeno 1.5 a 6%. Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. En este caso la elección fue el acero AISI 304 porque cumple con las características anteriormente mencionadas y es de los más comerciales y accesibles.

El acero AISI-304 es un acero inoxidable austenítico al cromo-níquel de bajo carbono resistente al calor, superior en resistencia a la corrosión que el tipo AISI 302. Se puede trabajar en caliente y en frío. El análisis químico del acero AISI-304 esta dado en la tabla 4.1, donde los valores numéricos de la tabla son porcentajes.

Tabla 4.1. Análisis químico del acero AISI 304

*Carbono	*Manganeso	*Silicio	*Fósforo	*Azufre	Cromo	Ni
0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	18.00/20.00	8.00/10.50

* Contenido Máximo

Las aplicaciones típicas del acero AISI-304 están en la industria química, alimenticia, textil y petrolera, para piezas que requieran ser soldadas; para fabricar flechas, tuercas, birlos, tornillos, partes de válvulas, cuchillería, artículos domésticos, etc. En la tabla 4.2 se muestra el tratamiento térmico, así como algunas características del Acero AISI-304. En la tabla 4.3 se dan las características técnicas de la soldadura utilizada.

Tabla 4.2. Tratamiento térmico del Acero AISI-304.

<p>FORJADO Calentar a una temperatura de 1150-1200°C (2100-2190°F). No forjar debajo de 900°C (1700°C)</p> <p>RECOCIDO Enfriar rápidamente desde 101-1120°C (1850-2050°F), hasta temperatura ambiente.</p> <p>DUREZA MÁXIMA: 187 Brinell</p> <p>TEMPLADO Endurecible solamente por trabajo en frío</p> <p>PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS DE ESTE ACERO EN BARRAS RECOCIDAS Resistencia a la tracción: 74.43 Kg/mm² Límite de fluencia: 30.65 Kg/mm² Alargamiento de área: 60 % Reducción de área: 70 % Dureza: 150 Brinell</p>	<p>No Magnético; aunque lo es ligeramente cuando se trabaja en frío</p> <p>RESISTENCIA A LA CORROSION Excelente, superior a la del AISI 302 en una amplia variedad de medios corrosivos incluyendo productos de petróleo caliente y gases de combustión.</p> <p>SOLDABILIDAD Excelente, usar electrodos tipo 54-L</p> <p>MAQUINABILIDAD Es poco maquinable, por lo que recomendamos velocidades de 40-85 pies de superficie por minuto</p> <p>EFICIENCIA DE MAQUINADO 45 %, comparado con el acero 1112</p>
--	---

Tabla 4.3. Características Técnicas de la soldadura (ELECTRODO 54 – L)

Resistencia a la Tensión	5273 Kg / cm ²
Identificación	Punta color oro
Tipo de corriente de aplicación	CA – CC Polaridad Invertida

Esta es la parte más importante de la tesis porque este elemento es el que se diseñó y se construyó, de ahí que este punto es donde vamos a hacer énfasis en todas las partes de las que consta y dar una idea de cual fue el proceso para llegar a construirlas. La Cámara de vacío podemos definirla como un conjunto de partes las cuales mediante el ensamble de ellas van a proveer de un espacio ideal para la creación de alto vacío para poder evaporar metales o aleaciones sobre cualquier superficie, en este caso un plástico, a este conjunto lo denominamos cámara de vacío [Ver la figura 1, anexo A], en esta figura se pueden ver los 3 cuerpos principales que tiene la cámara y estos son:

1. La campana
2. El collar de alimentación
3. El plato o base

La campana es de una medida de 18" [el símbolo " indica pulgadas] de diámetro y 20" de alto con un espesor de ¼", en la parte más alta se le ha soldado una argolla de 3" de diámetro exterior para que se le pueda levantar con un brazo mecánico, tiene dos ventanas ubicadas a 6" con respecto a la parte baja donde hace contacto con el servidor, estas ventanas están a 90° una con respecto a la otra con una visibilidad total de 4.375", en la parte baja de la campana que es la que hace contacto con el collar se va a colocar un empaque del tipo L-Gasket de 18" esto es para que el ensamble entre estas dos partes sea el mejor posible y de esta manera se eviten fugas, en principio se pensó el usar un empaque del tipo o'ring pero el área de contacto es mucho más grande en el empaque tipo L-Gasket

[Ver la figura 2, anexo A]. El vidrio es de un espesor de $\frac{1}{2}$ ", la ventana lleva 2 empaques comerciales de neopreno de diámetro interior de 4.875" y sección transversal de .125", con la opción de que se pueden conseguir de vitón. El ancho total del ensamble de la ventana es de 1.25" y se le dejó un espacio de 1" entre la pared de la campana y la ventana para poder maniobrar más a adecuadamente en caso de querer desarmar la ventana, poner algún elemento en esa zona, etc. El ensamble de la ventana va armado con 8 tornillos de acero inoxidable de .25" x 1.5" y estos tornillos apretarán por medio de tuercas [Ver figura 3, anexo A].

Unida a la campana esta un servidor que se le ha nombrado el collar de alimentación ya que su función radica en proporcionar espacios para darle al proceso elementos necesarios para su funcionamiento, tales como, conexión de los medidores de vacío, del calentador de substratos, de la alimentación, todos estos elementos se adecuarán de acuerdo a las necesidades del usuario, estos espacios son los 4 puertos horizontales del tipo CF-2.75" y son compatibles con los que tendrá el plato. [Ver la figura 4, anexo A],

El collar es un cilindro hueco de 5.5" de altura con un diámetro exterior de 17.5" y diámetro interior de 17", este elemento tiene un espesor de .25", a este collar van unidos dos partes muy importantes uno por la parte de arriba y otra por la parte de abajo. Por la parte de arriba este servidor va a tener contacto directo con la campana por medio del empaque L-Gasket, este es un aro de diámetro exterior de 19" y diámetro interior de 16.5" y un espesor de .5", este aro va soldado a el cuerpo del servidor. Por la parte de abajo el servidor va a tener contacto directo con el plato, para efectos de diseño y para tener la posibilidad de que en ese lugar también se tenga un empaque de L-Gasket de 18", el cual tiene más ventajas que un o'ring, este aro tiene 17.5" de diámetro interior y 18" de diámetro exterior con un espesor de .25" y una altura de .75", al igual que el que hace contacto con la campana este aro va soldado a la mitad de su altura (.375") al cuerpo del collar [Ver la figura 5, anexo A]. De los puertos CF-2.75" podemos decir que son una medida ya estandarizada, lo importante en este punto son los empaques, se han diseñado las ranuras en los puertos tal que se pueda utilizar empaques de neopreno, de vitón y hasta de cobre lo que hace a estos puertos altamente funcionales, estos puertos se ensamblan con 6 tornillos de acero inoxidable de .1875" por 1.5" con su tuerca para la sujeción, la separación entre el inicio del ensamble del puerto es de 1" esto se ha cuidado mucho en el diseño para tener la oportunidad de hacer alguna maniobra y darle mayores posibilidades al collar de alimentación [Ver la figura 6, anexo A].

Por último toca el turno a la parte que es soporte de la cámara de vacío y al cual van conectadas partes vitales para el funcionamiento del sistema, el plato llamado así por su forma es el soporte de la campana y el collar de alimentación, el espesor de este elemento es de 1", consta de cuatro orejas con agujeros de .75" en las cuales van unos espárragos de .625" de diámetro por un largo de 10" con tuerca de la misma medida, estos elementos tienen la característica de que se pueden mover las tuercas en los cuatro puntos de apoyo y por lo tanto se puede regular la altura de la cámara de vacío en razón del movimiento que se le da a los espárragos, este plato cuenta con un puerto especial mediante la cual se conecta la bomba difusora y de ahí los demás elementos, este puerto tiene un diámetro exterior de 9" y un diámetro interior de 5.91", con un espesor de .25", tiene una ranura para colocar el empaque con un diámetro interior de 6.06" y con un ancho de .18", tiene una distancia de 3" entre el plato y el puerto [Ver la figura 7 del anexo A]. Este plato también cuenta con 4 puertos pero estos son verticales, tienen las mismas características que los mencionados en el collar de alimentación con excepción de que la distancia entre el inicio del ensamble del

puerto y el plato cambia de 1" a 1.5" con la misma finalidad de darle mayor holgura a los puertos haciendo un total de 8 puertos del tipo CF-2.75" para los elementos que controlan el proceso [Ver la figura 8 del anexo A].

Todo lo mencionado en este apartado es lo referente al diseño, por último hay que mencionar que el sistema tiene otra característica que es la de que la cámara de vacío no es un cuerpo rígido, esto es, que se puede separar en cualquier momento en cualquiera de sus tres componentes, esto le dará al sistema una mejor funcionalidad por lo que se pueden hacer dos posibles combinaciones dependiendo de las necesidades del usuario, una sin collar, o sea, la campana y el plato y la otra con los tres elementos campana, collar de alimentación y el plato.

4.1.2. Accesorios. Los accesorios son el componente 6 y que son los elementos que no se clasificaron dentro de los 5 ya mencionados y podemos decir que se dividen en 2 grupos: la mesa donde se va a montar el sistema y las conexiones del sistema de evaporación, refiriéndonos a conexiones como las mangueras y válvulas que conectan la bomba difusora, la mecánica y la cámara de vacío.

En el primer grupo se puede mencionar que este componente se está construyendo. La mesa es una estructura construida con PTR de 1.5", tiene 47.5" largo con 27" de profundidad y 41.5" de alto, tiene una división a lo largo que parte la mesa en 24" y 19". En la parte donde quedan las 24" se va a montar la cámara de vacío, esto quedaría en la parte de arriba, en la parte de abajo van la bomba difusora, la bomba mecánica y todas las conexiones y válvulas que hay entre ellas, para poder sujetar la cámara de vacío a la mesa se tiene que soldar unas orejas que van a estar acopladas con las orejas del plato de la cámara de vacío [Ver las figuras 7 y 8 del apéndice A], de esta manera al colocar los espárragos de .625" de diámetro por un largo de 10" con tuerca de la misma medida quedará ensamblada la cámara de vacío con la mesa. La otra parte de la mesa que da una medida de 19" está pensada para que en este espacio estén los medidores de presión, la fuente de poder y algún otro dispositivo que en el futuro se le pueda adaptar. En las patas de mesa se le han colocado unas tapas circulares que tienen rosca, en estas tapas se van a colocar unos niveladores que son tornillos con cabeza de hule de 1" que sirven para que la mesa se pueda adaptar a diferentes superficies, incluso en aquellas superficies que no estén del todo planas [Ver la figura 9, anexo A]

También como parte del diseño de la mesa existe una parte fundamental tanto para la misma mesa como para el sistema en general y en particular para la cámara de vacío, a este elemento se le ha llamado el brazo de la cámara de vacío, este sirve para levantar la campana de la cámara de vacío de tal manera que permite tanto darle mantenimiento a la parte interna de la cámara como para los movimientos comunes que va a tener el sistema, esto es, meter una muestra en la cámara, cerrar la cámara bajando la campana que hace contacto con el collar, evaporar sobre la muestra y después sacar esta muestra, todos estos movimientos son los que va a desarrollar el brazo de la cámara de vacío. Para el brazo (el cual se está construyendo) se está utilizando fierro hueco, al cual se le conoce como ángulo y su medida es de 1" x 2", se unen dos piezas con dimensiones de 45" y 28", estos van soldados a un plato de 8" de diámetro con un espesor de .5" el cual es de fierro rolo en frío, este plato va unido a un eje de .75" de diámetro y 4" de largo que a su vez va a entrar en un cilindro de 1.25" de diámetro y que va soldado a la mesa, de esta forma al ensamblar todo nos va a quedar un brazo de 45" de alto y 28" de largo, esta estructura es doble, o sea, después de que se haya soldado se va a unir con otra igual con un espacio entre ellos de 4" y de esta forma se arma el brazo, el levantamiento de la campana se va a realizar con una

cadena la cual se mueve a través de 2 engranes que están colocadas a lo largo de la pieza de 28". Unido a la cadena está la campana por un lado y el contrapeso por el otro lado. [Ver la figura 10, anexo A]

4.2 Trabajo a futuro. A este proyecto le queda mucho por delante, lo que hasta aquí se ha hecho solo es el comienzo de lo que podría ser un gran proyecto ya que tienen muchas aristas en las que se puede desarrollar. Primeramente hay que realizar la terminación de todos los elementos que hasta este momento se han iniciado y proceder a la puesta en marcha del sistema cosa que en un principio se pensaba terminar pero el tiempo rebasó todo lo pensado y por situaciones ya comentadas en esta tesis no se ha logrado el objetivo que se trazó al iniciar este trabajo. Se puede pensar que va a ser fácil la puesta en marcha si es que no se cometió ningún error durante el diseño de la cámara de vacío lo cual es básicamente imposible, probablemente la puesta en marcha de este sistema sea la parte más complicada de lo que queda por hacer a corto tiempo, se va a requerir de mucha paciencia y de encontrar la mejor solución a los problemas que se presenten. Tiene buena base, todo se planteó bajo un marco teórico estructurado que le da solidez al sistema y que de alguna manera nos debe de llevar a que el sistema esté funcionando adecuadamente en un tiempo no muy largo. Pero también se tiene que pensar en todos los elementos involucrados, como las partes que faltan todavía para poder armar el sistema de bombeo, todos los empaques y terminar la mesa sobre la que el sistema va a ir montado, queda pendiente terminar el brazo mecánico que va a levantar la campana de vacío, queda también el armado de la cámara de vacío todo lo que implica esto ya que esta parte del sistema es el corazón del mismo y esto claramente es trabajo de otra cantidad de tiempo igual o mayor a la que se tuvo en esta tesis que de por sí ya ha superado los límites normales. Después de que se llegue a la puesta en marcha del sistema se puede pensar en la optimización para que funcione a su máxima capacidad, hacer las primeras pruebas y empezar a desarrollar la evaporadora para lo que está pensada que son los recubrimientos metálicos o aleaciones sobre plásticos, así como en otras superficies, pensando que esta evaporadora en un futuro pueda llegar a ser un sistema multifuncional.

4.3 Discusión. Esta tesis en particular me ha dejado muchas enseñanzas, una de ellas es que un proyecto que involucre diseñar, construir y armar que tenga elementos o piezas que vengan de otras partes de México o del mundo no se puede terminar en un lapso de un año, ya que hasta el momento casi se ajustan los dos años y todavía no se concluye por lo que para algún otro proyecto similar debe tomarse este proyecto como una experiencia y aprender de los errores que se tuvieron.

En lo que respecta a la parte positiva de este proyecto podemos decir en primera instancia que se determinó que la mejor opción para recubrir un plástico ya sea con elementos metálicos o con aleaciones, esta es la técnica de evaporación, es importante mencionar que el objetivo a futuro sería tratar de metalizar piezas industriales por lo que no estamos viendo a las técnicas en sí para tratar de desarrollar una película delgada o tratar de desarrollar algún semiconductor en que las películas deben cumplir con ciertas condiciones y se debe tener una pureza de elementos para que se pueda desarrollar algún dispositivo, la idea es usar las técnicas de recubrimiento que ya están desarrolladas en el país a nivel de microestructuras, las cuales todavía tienen mucho que optimizar en los próximos años, para utilizarlas a nivel de macroestructuras, esto es, de substratos de 5 pulgadas o mucho más grandes que comparados con lo que se trabaja en un laboratorio de investigación las diferencias son muy notorias, esto nos da mucha ventaja en que nuestro sistema no tiene

que ser tan rígido en lo que respecta a vacío y componentes de la misma evaporadora, claro que se tiene la visión de diseñar una evaporadora de alta eficiencia pero también viendo que estrictamente no se necesitan unas condiciones tan altas como en otros sistemas de vacío.

En el diseño de una cámara de alto vacío la base para realizar esto es la ingeniería de diseño. Del esquema 2.1, página 14 ya se han cubierto algunos puntos. Primero se tuvo un entendimiento del objetivo el cual llevó algunos meses y determinar sobre cual camino se quería ir, entre ellos la elección de la técnica de evaporación, después los elementos que se necesitaban para la construcción de una evaporadora, etc. De ahí se hizo una descripción de actividades la cual estaba en función del tiempo y que a final de cuentas se desvió de ese camino original, pero esas actividades que todavía no se han empezado, en algunos casos están esperando que se terminen otras actividades que se están realizando en este momento por lo que podemos afirmar que el plan original no se ha modificado en nada. De ahí se fue al siguiente punto que es la formación del concepto, en este punto se aterrizaron todo lo que se analizó en las dos primeras etapas, ya de aquí en adelante no se regresó mucho a la información que se recabo en las dos primeras fases, ya que se tenía perfectamente entendido el objetivo que se quería alcanzar.

Ya de la formación del concepto sigue el análisis de ingeniería y es aquí donde nos hemos quedado. En este punto tiene como objetivo la formación de un modelo analítico y un modelo experimental los cuales tienen una relación directa y dependen uno del otro de tal forma que primero se realiza el modelo analítico el cual básicamente implica la realización del diseño aplicando diversas ramas de la ingeniería, además de observar otros sistemas, ver sus errores y sus aciertos y tratar de generar una mejor idea que además se adecue a nuestras necesidades, para esto se realizaron más de 100 dibujos la mayoría de ellos en dos dimensiones en los que su tuvieron muchas complicaciones al grado que para diseñar la ranura de un empaque se pasaba hasta una semana y aún así parecía que no quedaba del todo bien, si esto fue complicado el empezar a llevarlo a la realidad ha sido más difícil ya que cuando algo se quiere construir, ya entran en juego factores económicos y factores humanos, entre otros, por ejemplo al principio no se empezó la construcción de la cámara de vacío porque el taller a donde se mando construir no contaba con material en ese momento y luego no se pudo arreglar el pago y así situaciones por las que hasta el momento no está construida al 100% la cámara.

Otra parte fundamental de este proyecto fue todo el proceso de cotización el cual se menciono en el punto 3.5, página 22, aquí lo importante es que todos los elementos que forman parte del sistema de evaporación NE-150505 están cotizados desde mediados del 2004, este proceso fue muy largo y se estuvo muy de cerca con los proveedores ya que básicamente todo lo que se estuvo cotizando son elementos que no se pueden construir ni comprar en México, tales como los medidores de presión tanto de bajo vacío como de alto vacío, las bombas de vacío que incluye la bomba difusora y la mecánica, las mangueras que van a conectar a las bombas que son de acero inoxidable y son flexibles para permitir que el sistema ocupe la menor área posible, las válvulas, tanto de seguridad como las necesarias para que funcione la evaporadora, empaques, aceites, abrazaderas, etc., y este proceso como ya lo mencioné esta todavía en su última parte que es la compra de estos elementos.

De todos los elementos que han llegado que son parte fundamental del sistema y que por esta razón es importante conocer su funcionamiento se han hecho las traducciones correspondientes de los manuales del usuario de la bomba mecánica, la bomba difusora, el calentador del substrato, el medidor de vacío Pirani y el medidor de vacío de cátodo frío,

fueron de todos estos manuales alrededor de 250 páginas de traducción, es obvio que se tienen errores en la traducción ya que tenía muchos conceptos técnicos que probablemente no se expresaron de la forma más adecuada, la intención de estas traducciones es hacer la operación de estos importantes elementos más fácil, sin tener que leer todo el manual en inglés sin que esto quiera decir que ya no se deba consultar el manual original ya que esto servirá para que la traducción este lo más completa posible lo que da todavía un valor agregado a este proyecto.

Aquí en San Luis Potosí y personalmente se ha construido completamente la mesa que va a servir de base para el sistema, aquí se ha comprado el material, se ha cortado, se ha soldado, se le ha dado forma y se ha terminado, todo esto lo ha realizado el que escribe, las tapas de la mesa que son de aluminio ya están listas solo esperando que la cámara de vacío esté lista, el brazo mecánico ya está cortado y una parte ensamblada. La terminación de estos elementos quedó interrumpida por la terminación de la escritura de la tesis. Al termino de esta podemos decir que hay un gran rompecabezas y que si este trabajo queda aparente incompleto se tendría que pensar que las piezas de este rompecabezas ya están concebidas, pedidas y otras en camino, pero que al tiempo que estas piezas vayan llegando entonces podemos pensar en terminar, lo que hay que resaltar es que en esta tesis están todos los elementos necesarios para poder diseñar y construir una evaporadora de recubrimientos metálicos y aleaciones sobre plásticos, la puesta en marcha de este sistema solo es cuestión de tiempo.

CONCLUSIONES

Esta tesis en particular me ha dejado muchas enseñanzas y me ha mostrado lo que es tratar de sacar un proyecto de esta magnitud, sobra decir que me hubiera gustado llegar a conclusiones mucho más contundentes y dejar menos trabajo a futuro pero el reto ahí está y espero que este proyecto llegue a feliz término. Las conclusiones después del trabajo realizado son:

Un proyecto que involucre diseñar, construir y armar que tenga elementos o piezas que vengan de otras partes de México o del mundo no se puede terminar en un lapso de un año, ya que hasta el momento casi se ajustan los dos años y todavía no se concluye por lo que para algún otro proyecto similar debe tomarse este proyecto como una experiencia y aprender de los errores que se tuvieron.

Se determinó que la mejor opción para recubrir un plástico ya sea con elementos metálicos o con aleaciones, esta es la técnica de evaporación. Tomando en cuenta que el objetivo a futuro sería metalizar piezas industriales.

Se inició, desarrollo y terminó el diseño de una cámara de alto vacío que se piensa que tendrá presiones de entre 1×10^{-6} a 1×10^{-9} Torr, siendo la base para realizar esto la ingeniería de diseño. El material de la cámara de vacío es acero inoxidable y esta cámara consta de tres elementos: la campana, el collar y el plato.

Se terminó todo el proceso de cotización de los 6 elementos que conforman la evaporadora. Por otra parte se diseñó y construyó la base que va a sostener a la cámara de vacío, así como el brazo mecánico que forma parte de la misma base y que sirve para mover la campana de la cámara de vacío.

La ingeniería de diseño es una herramienta de gran utilidad que nos ayuda a resolver problemas utilizando diversas áreas de la ingeniería. Un punto muy importante de esta tesis es que el objetivo principal es diseñar la cámara de vacío y después ensamblar todo el sistema de evaporación. El método utilizado para el diseño de la cámara de vacío no sufrió ningún cambio y de ninguna manera falló. Hay que resaltar que en esta tesis están todos los elementos necesarios para poder diseñar y construir una evaporadora de recubrimientos metálicos y aleaciones sobre plásticos, la puesta en marcha de este sistema solo es cuestión de tiempo.

REFERENCIAS

- [1] Bunshah Rointan F, Handbook of Deposition Technologies for films and coating. Noyes Publications. New Jersey, U.S.A. (1994).
- [2] L. Talavera y M. Farias, El vacío y sus aplicaciones. Fondo de Cultura Económica, México. (1995).
- [3] Yee, K. K., International Metal Reviews, No.226, The Metals Society and American Society for Metals (1978).
- [4] Campbell, D.S., Handbook of Thin Film Technology, (L. Maisell and R. Glang, eds.), Ch. 5, McGraw-Hill (1970).
- [5] Handbook of Thin Film Technology (L. Maisell and R. Glang, eds.), McGraw-Hill (1970).
- [6] Schiller, S., Heising, O., and Geodick, K., Proc. 7th Int'l. Vacuum Congress, (R. Dobrozemsky, ed.), p. 1545, Vienna (1977).
- [7] Weissmantel, C., *ibid*, p. 1533.
- [8] Bunshah, R. F. and Mattox, D. M., Physics Today (May 1970).
- [9] R. Quiñones Sergio, Diseño Mecánico, Editorial Paradigma, México (1992).
- [10] Kennedy, K. D., Schevermann, G. R., Smith, H. R., Jr., Res. Dev. Mag., 22:40 (1971).
- [11] Beale. H. A., Bunshah, R. F., Proc. 4th Int'l. Conf. On Vac. Met, p.238, Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan (June 1973).
- [12] Thornton, J.A., SAE Transactions, (1973).
- [13] Langmeir, I., J. Am. Chem. Soc., 35:931 (1913).
- [14] Smith, H. R. And Hunt, C. D'A., Trans. Vac. Met. Conf., p.227, Am. Vac. Soc.

- [15] Glang, R., Handbook of Thin Film Technology, (L. I. Maissel and R. Glang, eds.), pp. 1-7, McGraw-Hill (1970).
- [16] Catalogo Intercovamex, Referencias de Sistemas de Deposición, México (2000).
- [17] VHS-4, Difusión Pump, Instruction Manual, Varian Vacuum Technologies., USA (2000).
- [18] Rotary Vane Pumps, Serie Pascal, User's manual, Alcatel High Vacuum Technology, France (2004).
- [19] Digital Pirani Vacuum Sensor System, Operation and Maintenance Manual, HPS products Series 945, USA (1999).
- [20] Digital, Cold Cathode Vacuum Sensor System, Operation and Maintenance Manual, HPS products Series 943, USA (1998).
- [21] High Temperature Substrate Heater, Operation and Maintenance Manual 2" Resistive Substrate Heater, US products, USA (1998).
- [22] A. Juárez, M. Hernández, R. Hernández, R. Puente; Un sistema ad hoc para la evaporación de metales. Laboratorio de Ciencias Aplicadas, Facultad de Ciencias UAP & Taller Mecánico IF-UNAM. Superficies y Vacío 8, 99-103, México (1999).
- [23] KI – Industrias, empresa fabricante de componentes plásticos. www.kiindustries.com
- [24] Situación de la Ciencia y Tecnología en las Universidades Públicas de los Estados, Los Cabos Baja California Sur, 6 y 7 octubre del 2003. Foro Consultivo Científico y Tecnológico-Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación superior, A. C. 1ª edición 8 abril del 2004).

APENDICE "A"

Diseño del Sistema de Evaporación NE-150505.

Como se mencionó en el capítulo IV el sistema de evaporación NE-150505 consta de 6 componentes [Ver figura 4.1]:

1. Cámara de Vacío.
2. Bombeo del Vacío.
3. Medición de Presión.
4. Fuente de Evaporación.
5. Sujetador y Calentador del Substrato.
6. Accesorios.

Para conocer un equipo se debe tener una base que consta de dos partes:

- Descripción escrita de los sistemas, componentes y elementos del equipo.
- Descripción gráfica de los sistemas, componentes y elementos del equipo.

Una descripción gráfica no es más que un dibujo del equipo, esto se tuvo que realizar en primera instancia para que el diseño se pudiera construir pero también con la idea de dejar constancia de como se diseñó la cámara, para en el futuro poder detectar posibles fallas y mejorar el sistema. Estos dibujos se hicieron bajo la ayuda del paquete de dibujo AUTOCAD 2000 y los dibujos que se presentan en este anexo están en el formato A-4, es necesario aclarar que todas las dimensiones están dadas en pulgadas a menos que se especifique otra cosa.

Este anexo se presenta como complemento y apoyo del presente proyecto, en el entendido, de que en el se presentan algunos de los dibujos que intervienen en el diseño de la cámara de vacío. Es importante decir que no se pueden presentar todos los dibujos que se realizaron para el diseño de la cámara ya que se extendería bastante este anexo solamente, el objetivo de lo que a continuación se presenta es darle al lector una idea general de lo diseñado y por lo tanto una mejor comprensión del sistema.

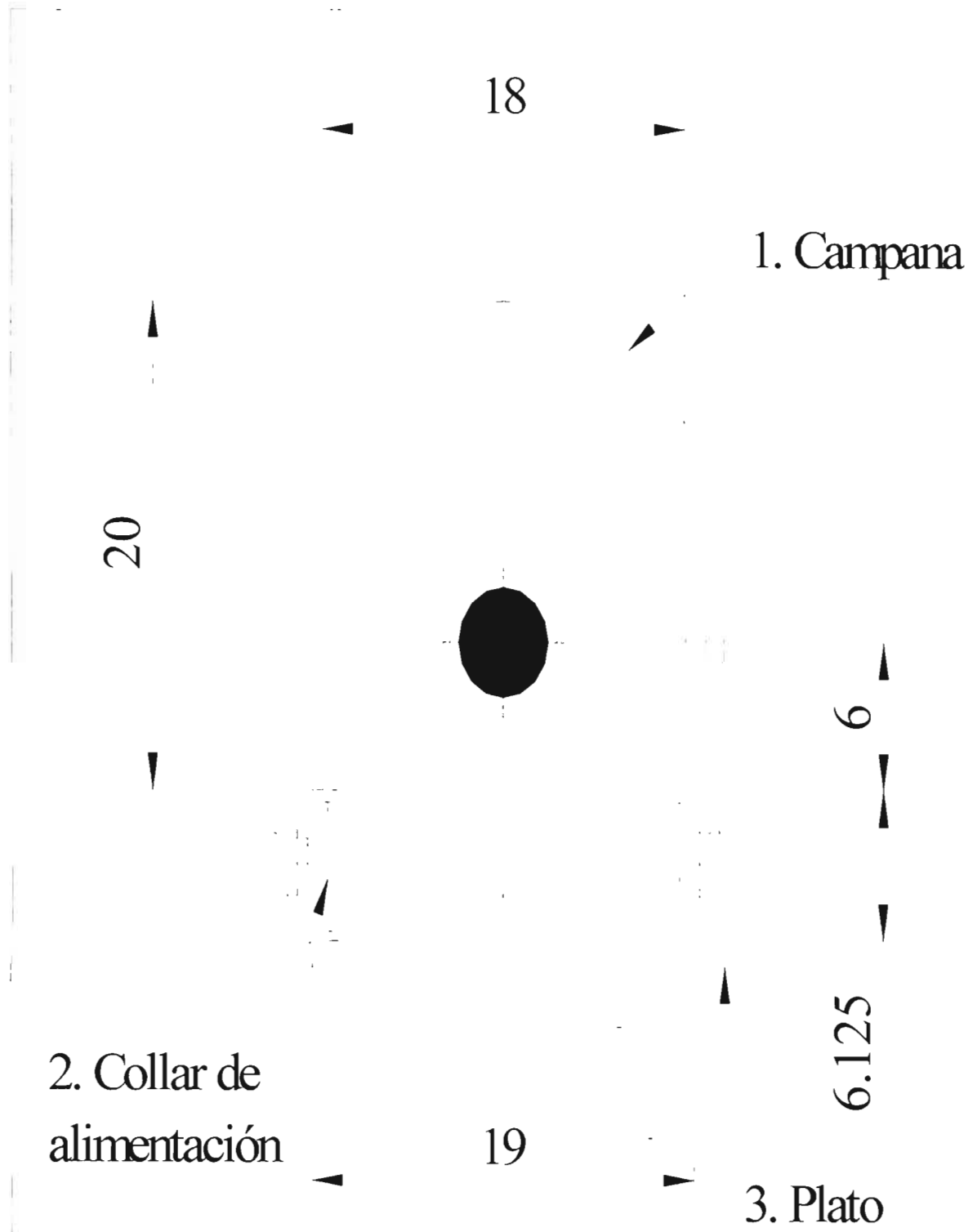


Figura 1. Cámara de Vacío del Sistema NE-150505 [Lozano@2004]

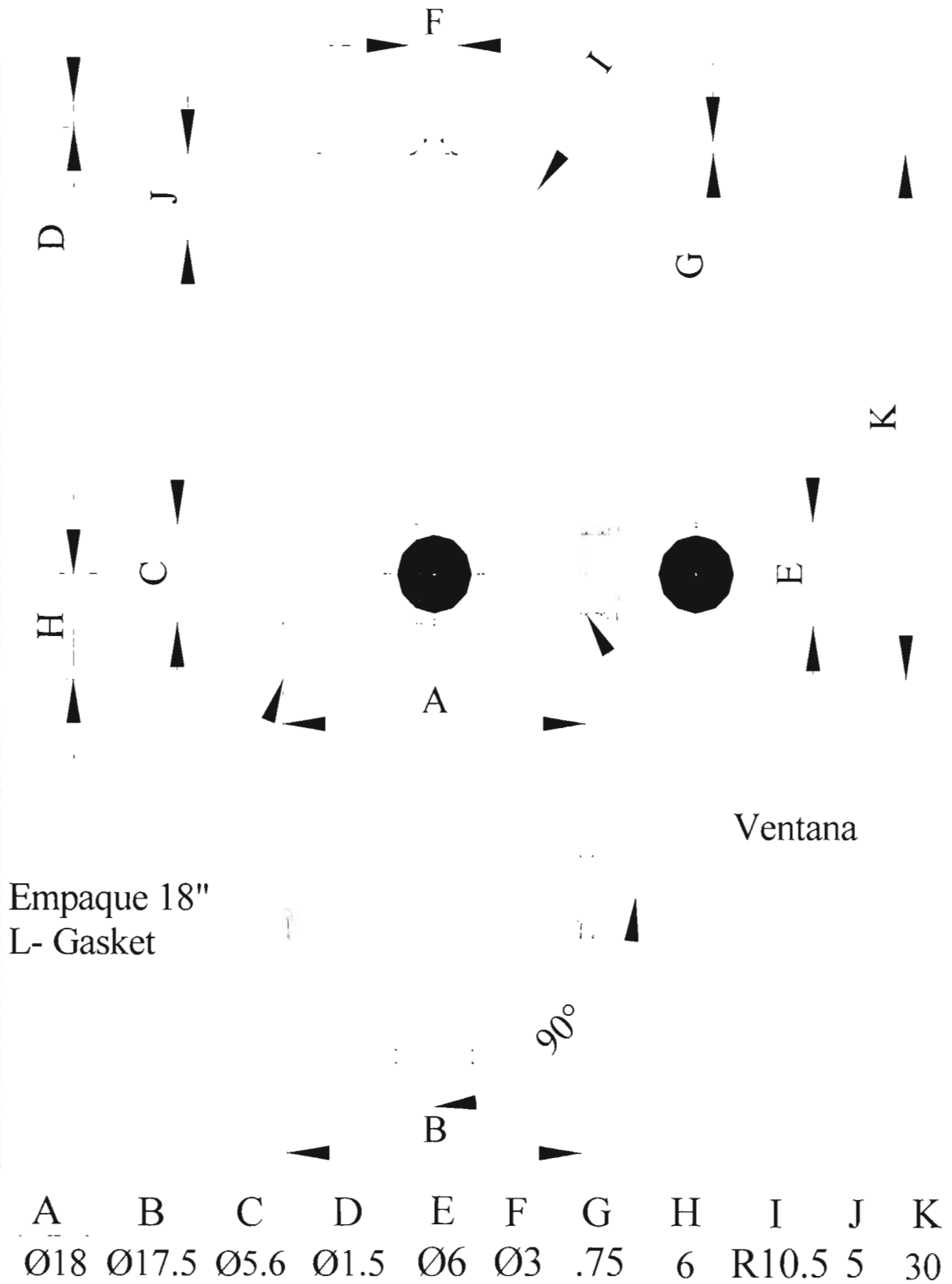


Figura 2. Campana de la Cámara de Vacío [Lozano@2004]

Campana

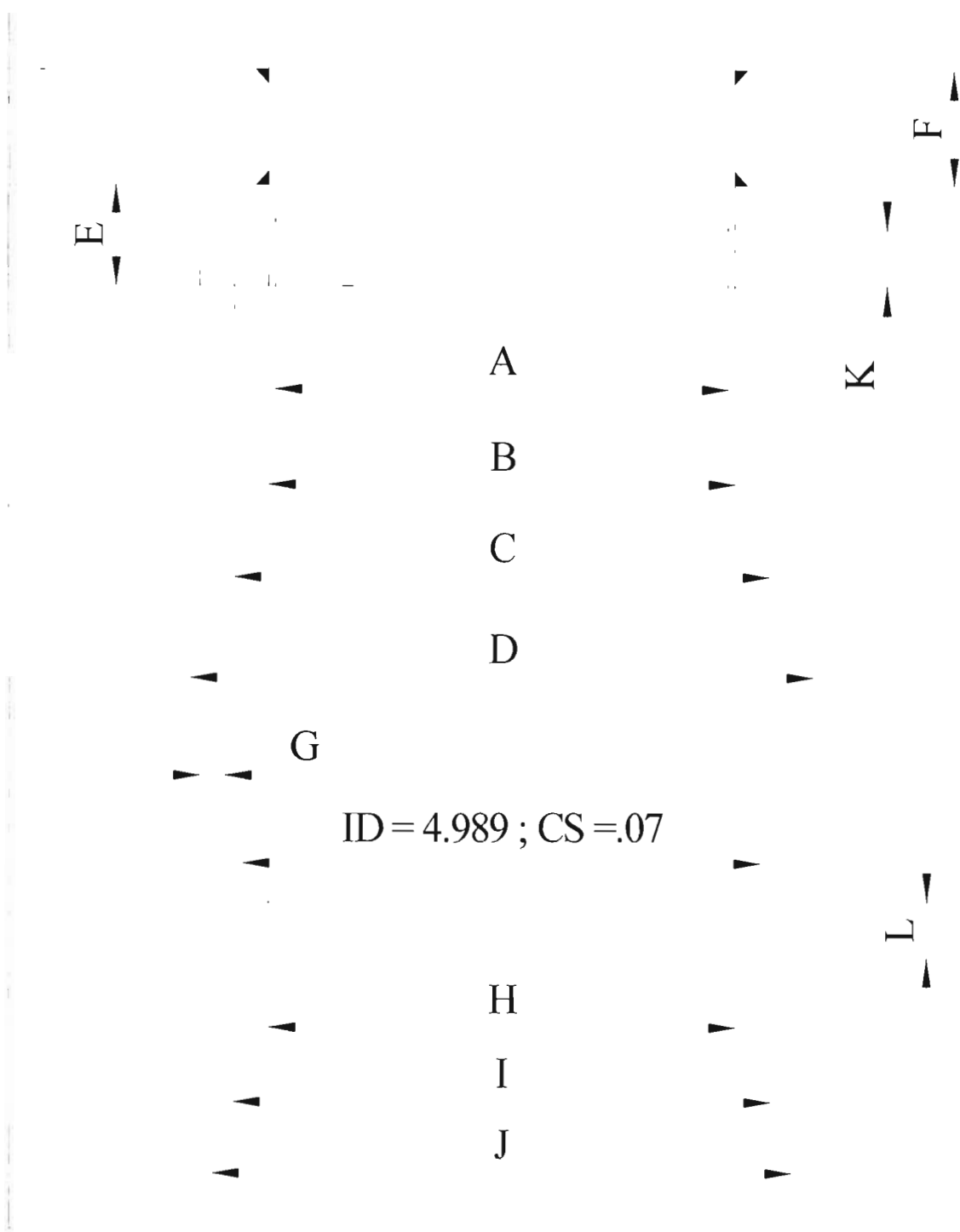


Figura 3. Detalle del ensamble de las ventanas de la Campana [Lozano@2004]

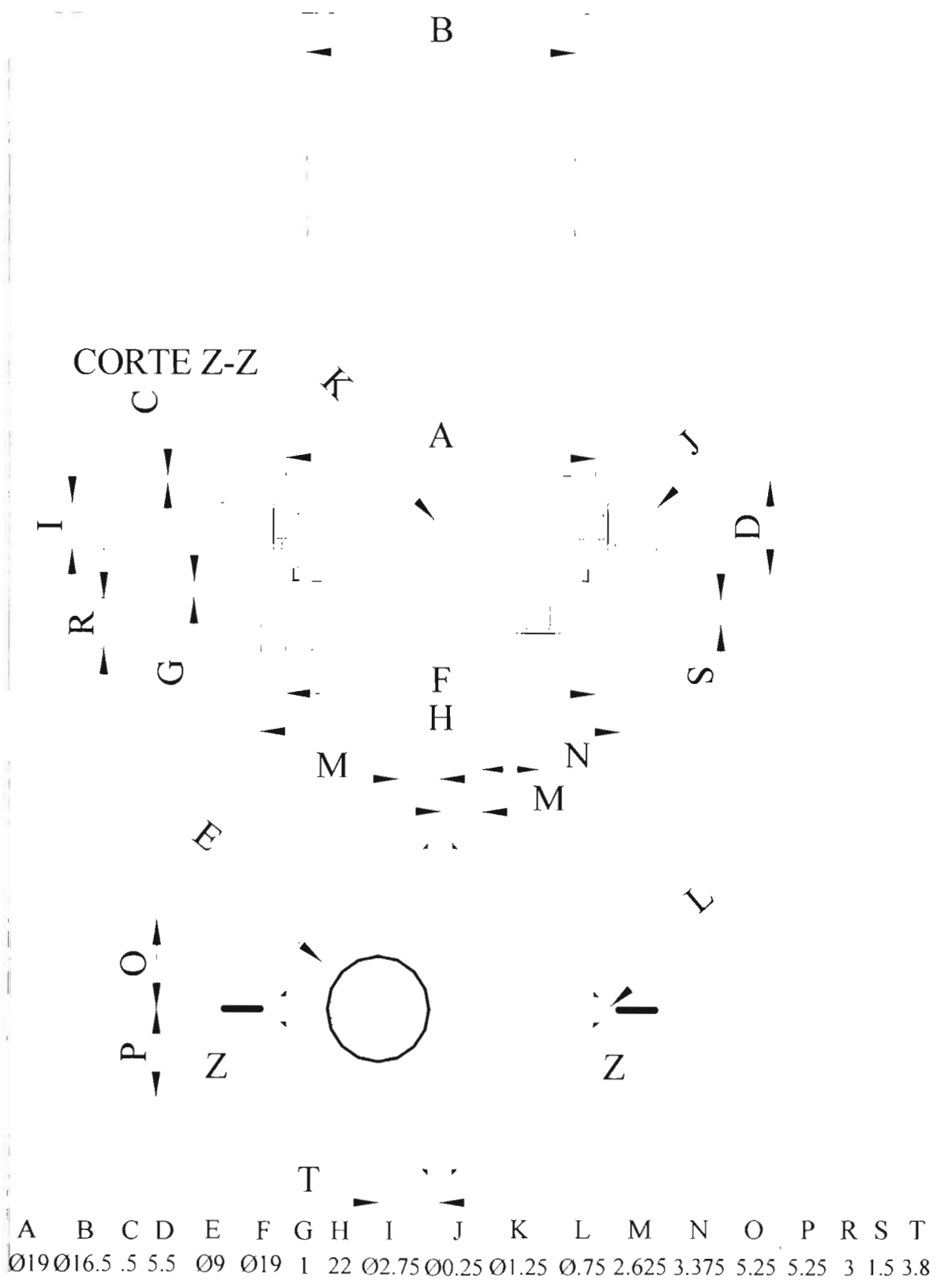
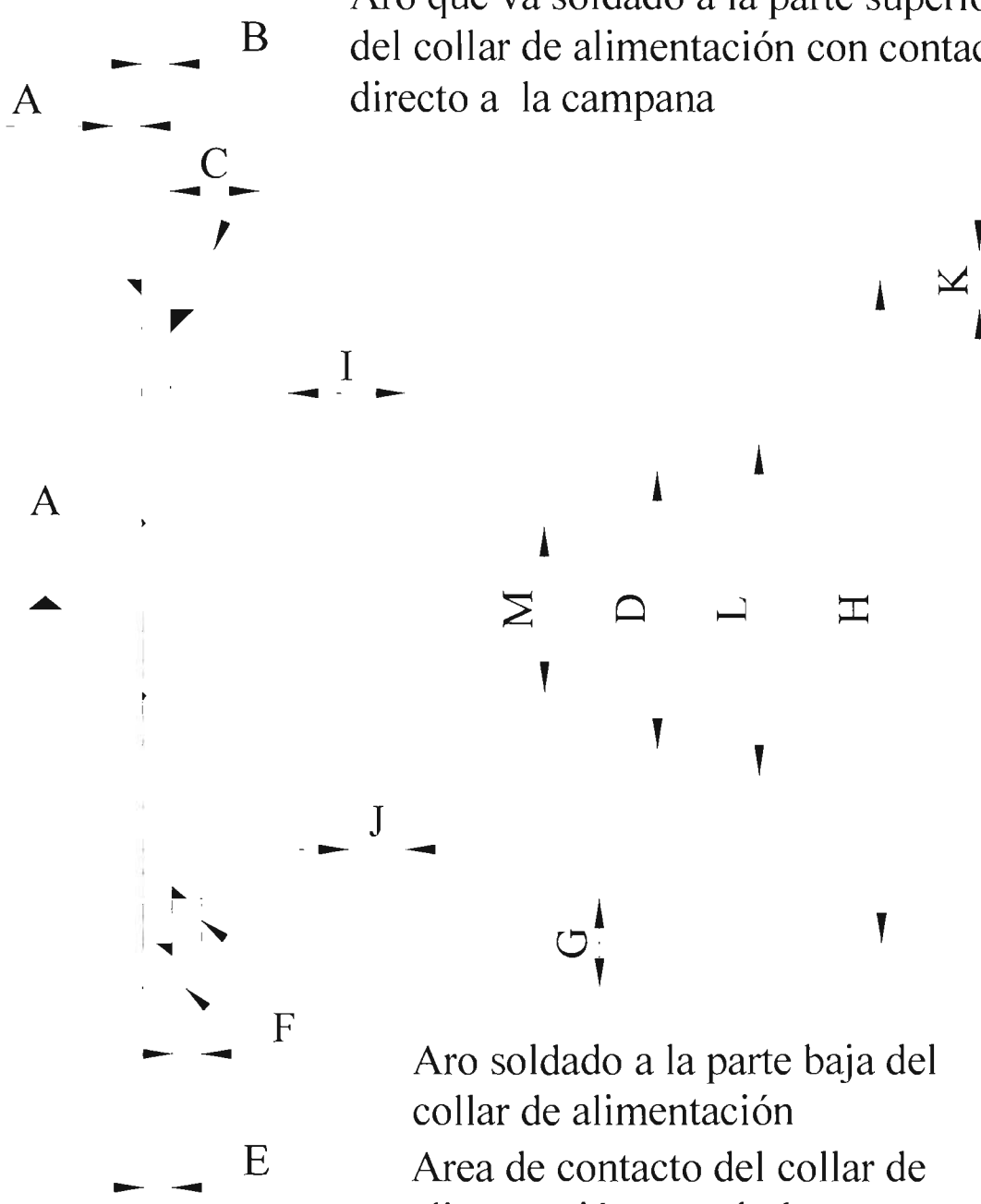


Figura 4. Collar de alimentación de la Cámara de Vacío [Lozano@2004]

Aro que va soldado a la parte superior del collar de alimentación con contacto directo a la campana



Aro soldado a la parte baja del collar de alimentación

Area de contacto del collar de alimentación con el plato

NOTA: VER DIBUJO NE-11;NE-12

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	O	P	R	S
.25	.25	.75	Ø2.31	.25	.25	.75	5.5	1	0.5	0.5	Ø2.75	Ø1.375				

Figura 5. Acercamiento al Collar de alimentación con puerto lateral[Lozano@2004]

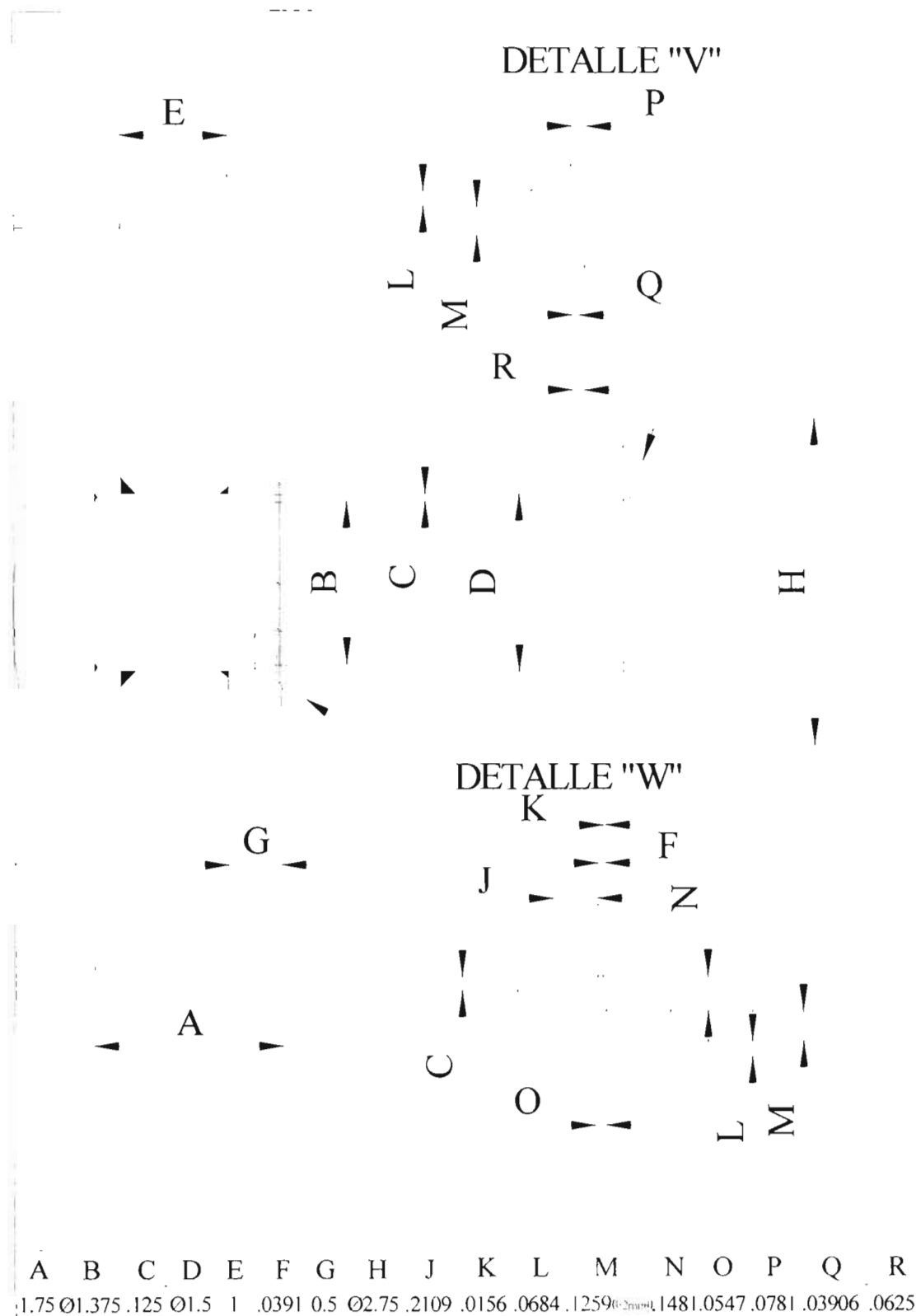


Figura 6. Acercamiento del Collar de alimentación donde se muestran detalles del ensamble del puerto lateral [Lozano@2004]

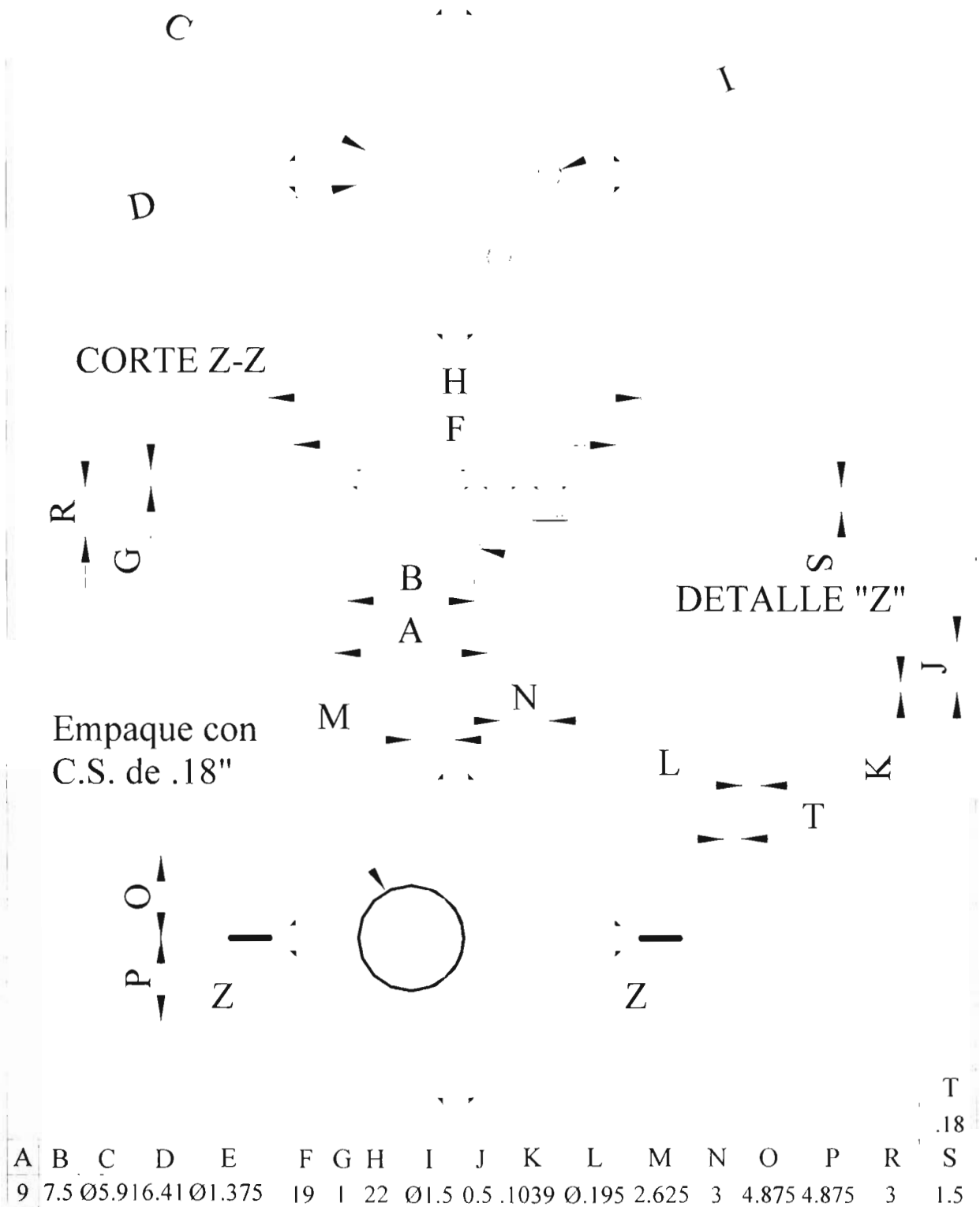


Figura 7. Plato de la Cámara de Vacío [Lozano@2004]

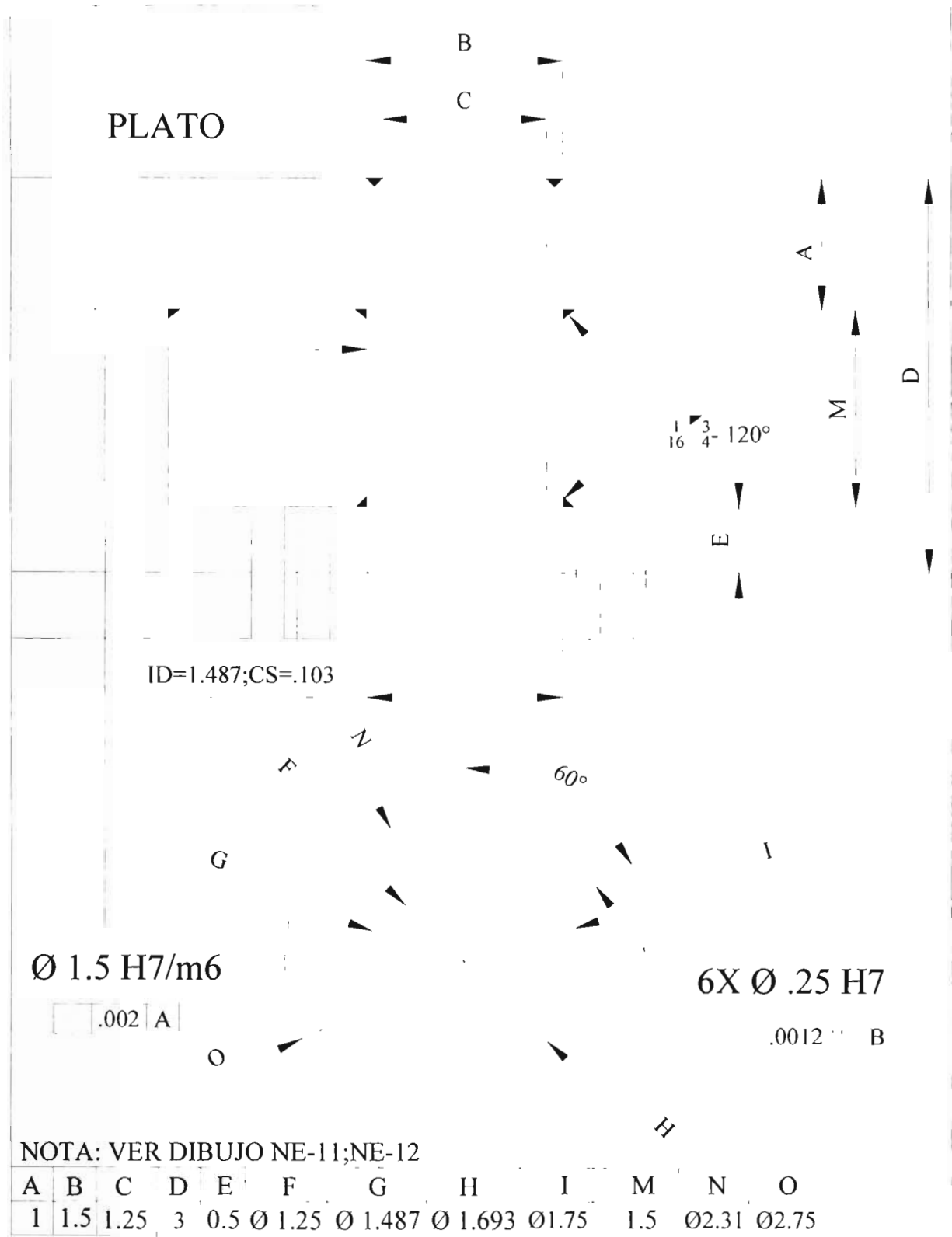


Figura 8. Acercamiento del puerto vertical del plato de la campana de vacío
[Lozano@2004]

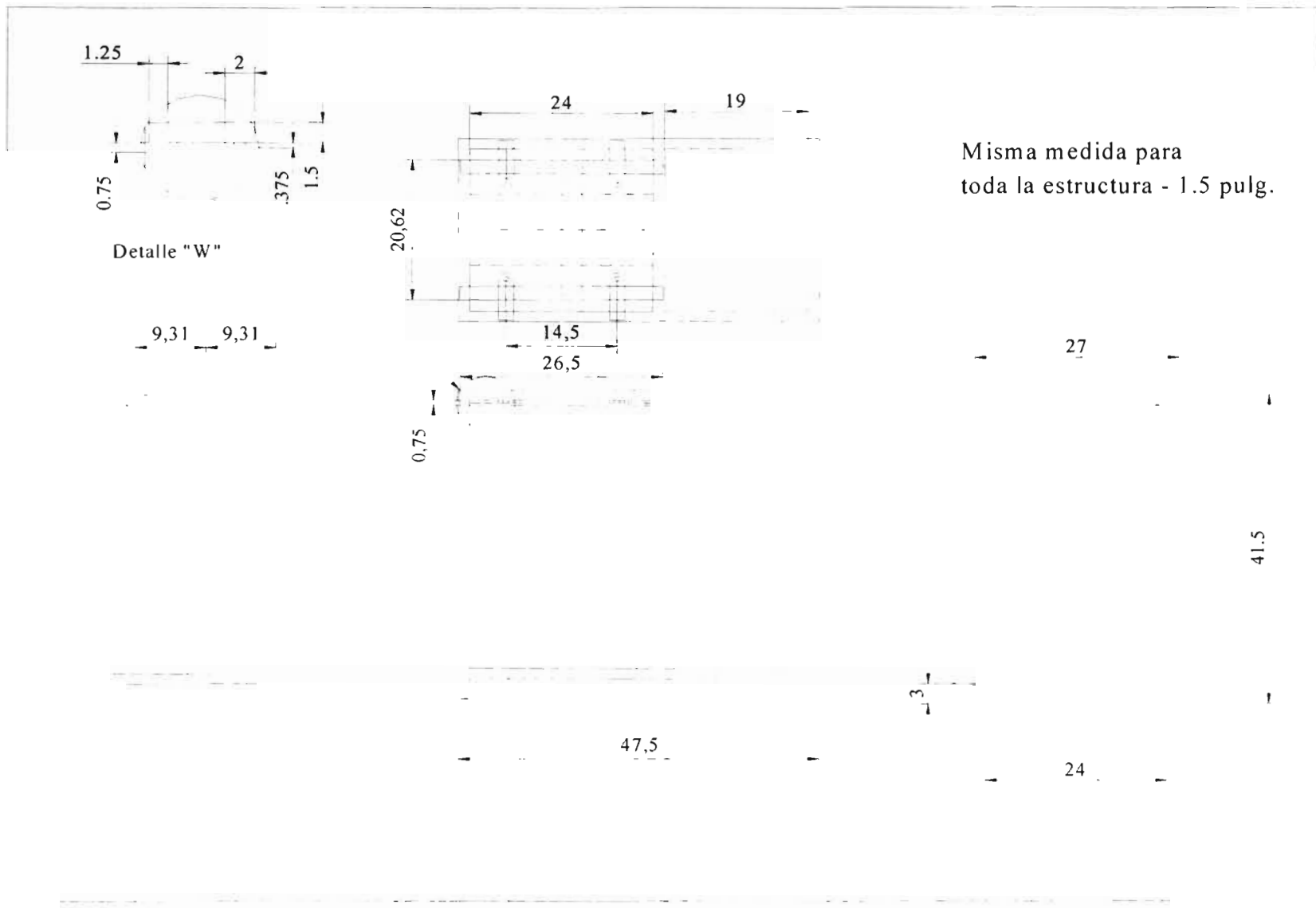


Figura 9. Mesa que es el soporte del Sistema de Evaporación NE-150505 [Lozano@2004]

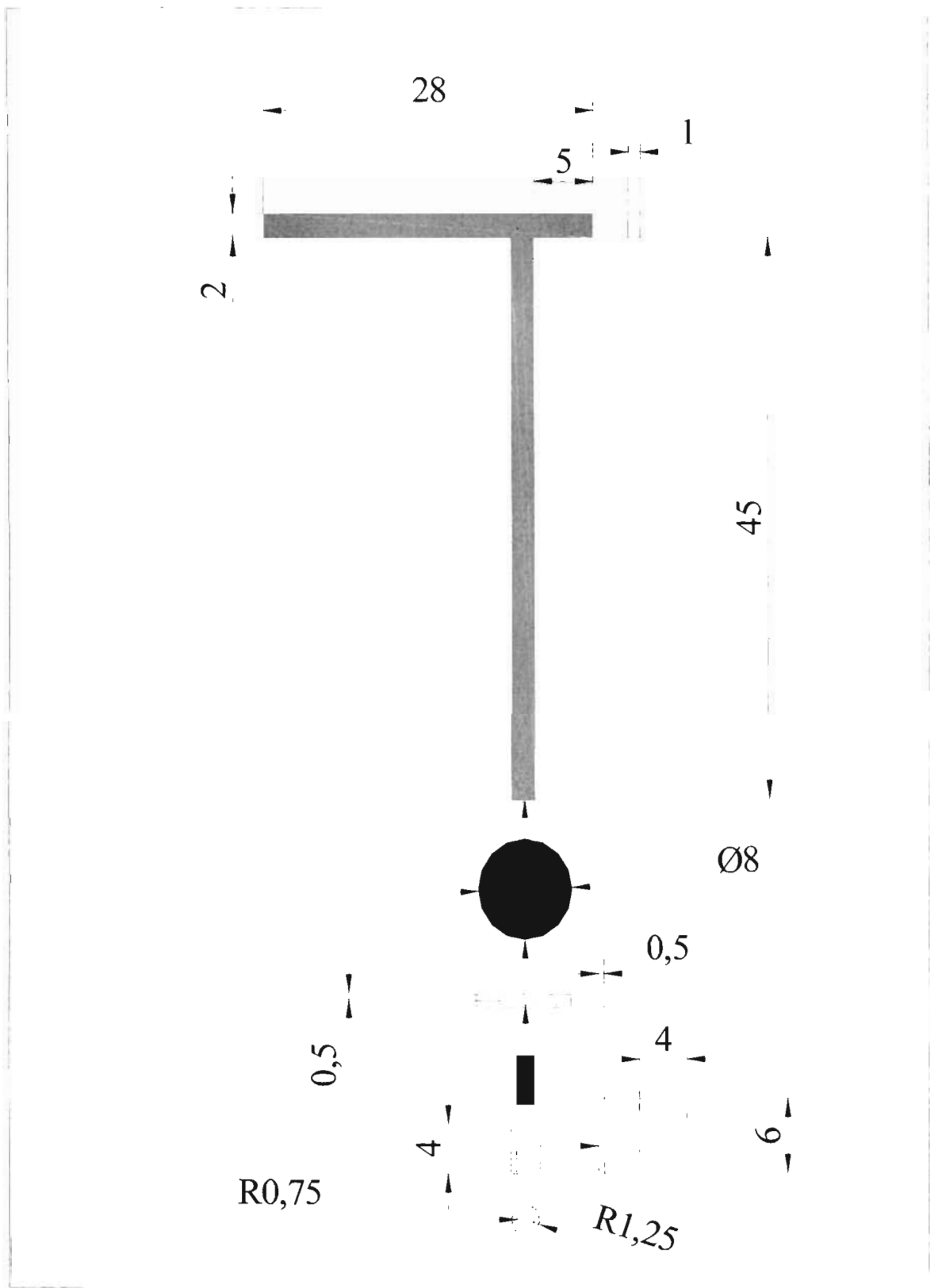


Figura 10. Brazo mecánico de la cámara de vacío [Lozano@2004]

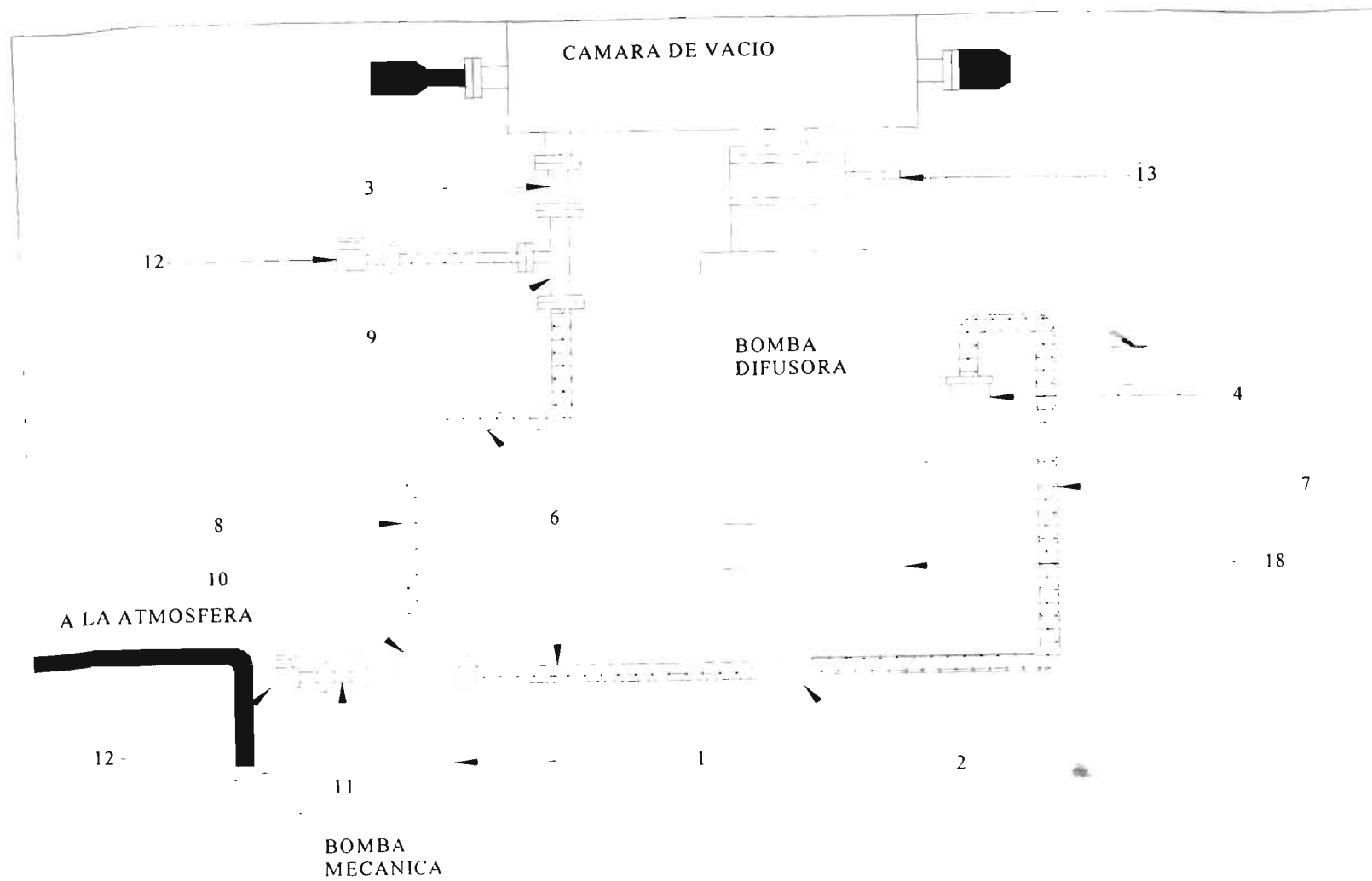


Figura 11. Conexiones del Sistema de Evaporación NE-150505. Los números de referencia son los de la tabla 4.10 de la página 44. [Lozano@2004]