



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SEMIAUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE  
PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA PARA  
RECUBRIMIENTO DE MATERIALES CON LA  
PISTOLA 5P-II (SULZER METCO).**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO  
P R E S E N T A N**

**ERAZO MIJARES DAVID  
GALICIA RIOJA DANIEL  
RODRÍGUEZ LÓPEZ JOSÉ LEONARDO**

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. JESÚS ROVIROZA LÓPEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, 2005.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **David Erazo Mijares.**

Dedico este trabajo y le agradezco enormemente a:

- A mis padres, Gonzalo y Silvia, por todas sus enseñanzas, amor, cariño, apoyo y paciencia que siempre me han brindado
- A mis hermanos: Ernesto, Cristina y Miguel, porque siempre han estado en las buenas y en las malas, porque además de ser hermanos han sido maestros, amigos, consejeros y hasta “cómplices”. Porque su compañía ha sido un continuo viaje de aprendizaje.
- A mis cuñados: Lucina y Steve, por cuidar parte de mi más grande tesoro.
- A mis tíos, de quienes he aprendido mucho y de quienes he recibido mucho.
- A mi “mamá grande” (Chata), que siempre ha creído en mi.
- A mis primos, en particular a Tania, Raquel y Daniel, por los buenos momentos que hemos pasado, por sus consejos y compañía.
- A mis sobrinos: César, Griselda, Juan, Atzin y Misim, por recordarme lo divertido que es ser niño.
- A todos los “mekanikus”, en particular a Laloc, David, Roberto, Leonardo y Mario por su amistad y compañía a lo largo de la carrera y no dejarme morir en el intento.
- A Daniel y Josefina, por compartir y ayudar a la realización de esta aventura, por ser excelentes amigos y hacerme sentir en familia.
- A Bety y Regina, quienes me enseñaron que la amistad trasciende aún en la distancia y más allá de las fronteras.
- A mi Universidad Nacional, por haberme brindado toda la formación académica y ofrecido tantos espacios culturales y de esparcimiento.
- A todos mis profesores, que me enseñaron que no solo basta tener información y conocimientos memorizados, sino que hay que saber cuándo y dónde aplicarlos.
- A toda la familia “Ersi-Quim” por todo su apoyo en este proyecto, por la convivencia diaria y por demostrar que aún las situaciones más difíciles pueden ser superadas mientras haya unidad.
- A todos mis amigos, los que están y los que ya no están, y también a todas aquellas personas con quien he tenido la oportunidad de convivir y que hayan contribuido a ser lo que soy hasta ahora.
- A mi México lindo y querido, por haberme dado la mejor familia, la mejor Universidad y los mejores amigos del mundo.

**Daniel Galicia Rioja**

A ti Elo por ser y estar, por todos los momentos que hemos compartido, por nuestros encuentros y reencuentros mágicos, TQM y TAMM.

A mis padres: María de la Luz y Naúm por todo su cariño y su apoyo incondicional, moral y material durante todos estos años. Más que unos padres, son mis grandes amigos a quienes admiró.

A mis hermanas: Pili y Rosi, por compartir el espacio y los momentos significativos, por nuestra eterna amistad.

A mi familia: abuelita Lupe, tíos y primos por todo su apoyo.

A mis abuelos: Daniel, Regina, Maurilio y Carmelo. Estén donde estén. Que la luz ilumine su sombra y su sombra defina su luz. Gracias por todo lo que me enseñaron.

A mis amigos, en especial a Leonardo y David, por la aceptación incondicional y el apoyo mutuo que hemos conquistado.

A mi querida Universidad: Universidad Nacional Autónoma de México por que ha sido, es y será muy importante en mi existencia.

**Rodríguez López José Leonardo**

A mis padres, a mi hermana

Porque dieron todo por apoyarme  
Porque creyeron en mi  
Por su cariño...

A Daniel y David

Porque no fue fácil  
Por el esfuerzo  
Por su ayuda...

Y porque gracias a todos ellos esto es posible.

# ÍNDICE

## **INTRODUCCIÓN** **...1**

- I. Objetivo
- II. Justificación del proyecto
- III. Hipótesis
- IV. Viabilidad del proyecto

## **CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES HISTÓRICOS**

### **1.1 Proyección Térmica** **...3**

- 1.1.1 Historia de los procesos de proyección térmica
- 1.1.2 La proyección térmica en la industria
- 1.1.3 Aplicaciones de la proyección térmica

### **1.2 Automatización** **...6**

- 1.2.1 Definición
- 1.2.2 Clasificación
- 1.2.3 Tipos de sistemas automáticos
- 1.2.4 Argumentos a favor de la Automatización

### **1.3 Mecatrónica** **...10**

- 1.3.1 Definición
- 1.3.2 Ingeniería Mecatrónica en México

## **CAPÍTULO 2: PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA**

2.1	Proceso de proyección térmica por flama	<b>...16</b>
2.1.1	Principio de funcionamiento	
2.1.2	Características y aplicaciones	
2.1.3	Parámetros del proceso	
2.1.4	Estructura del recubrimiento	
2.2	Pistola de proyección térmica tipo 5P-II de Sulzer Metco	<b>...19</b>
2.2.1	Descripción	
2.2.2	Equipo requerido	
2.2.3	Unidad de control de gas tipo 3G	
2.2.4	Flujómetro de gas tipo 3GF	
2.2.5	Operación de la pistola tipo 5p-II	
2.2.6	Conexiones	
2.2.7	Alimentación de polvos	
2.2.8	Encendido	
2.2.9	Proyección	
2.2.10	Apagado	
2.2.11	Combustibles	
2.2.12	Importancia del sistema de aire comprimido	
2.2.13	Almacenamiento y cuidado de polvos	
2.2.14	Mantenimiento	
2.2.15	Medidas de seguridad	

## **CAPÍTULO 3: DISEÑO**

3.1	Proceso de diseño	<b>...29</b>
3.1.1	Introducción.	
3.1.2	¿Por qué la NECESIDAD de automatizar el equipo 5P-II de Sulzer METCO?.	
3.1.3	Análisis del problema.	
3.1.4	Especificaciones.	
3.2	Subsistemas a desarrollar	<b>...37</b>
3.2.1	Antecedentes.	
3.2.2	Dispositivo controlador del gatillo de la pistola de proyección térmica 5p-II de Sulzer Metco.	
3.2.3	Dispositivo de soporte de la pistola de proyección 5P-II.	
3.2.4	Dispositivo controlador de la distancia de proyección entre el substrato y la pistola, de acuerdo al tipo de polvo.	
3.2.5	Diseño del dispositivo de rotación a substratos cilíndricos y de revolución.	
3.2.6	Dispositivo controlador de los movimientos de avance transversal.	
3.2.7	Dispositivo de movimientos de avance vertical (placas).	

## **CAPÍTULO 4: INTEGRACIÓN Y FUNCIONAMIENTO**

4.1	Ubicación del sistema	<b>...69</b>
4.2	Acoplamiento de los subsistemas	<b>...69</b>
4.3	Pruebas de funcionamiento	<b>...72</b>
4.4	Manual de operación	<b>...76</b>



<b>SÍNTESIS DE RESULTADOS</b>	<b>...80</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>...81</b>
<b>ÁREAS DE OPORTUNIDAD DE MEJORA</b>	<b>...82</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>...83</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>...102</b>

## **I. Objetivo:**

Automatizar el equipo de proyección térmica por flama (modelo 5P-II de Sulzer METCO) con el fin de que este sea usado a un nivel educativo, de investigación y científico.

## **II. Justificación del proyecto:**

Dado que con el proceso de proyección térmica por flama es posible el recubrimiento de materiales desgastados por el uso, así como la recuperación de piezas, se pretende recubrir substratos tipo probetas de geometría plana y de revolución para que posteriormente puedan ser caracterizadas.

El proyecto surge por la necesidad de tener probetas uniformes ya que debido a la naturaleza del diseño original del equipo, las probetas que se obtienen actualmente dependen en gran medida del operador y de su habilidad para manipular el equipo resultando en su mayoría probetas con características muy diferentes unas de otras (no siendo uniformes en la capa aplicada) dando como resultado que la caracterización de las mismas resulte difícil y costosa.

Una vez terminado el proyecto, beneficiará a todos los académicos y estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UNAM interesados en el proceso de proyección térmica, puesto que el sistema quedará bajo la custodia del Departamento de Mecánica en donde se podrá hacer uso del mismo para investigaciones posteriores (por ejemplo: desgaste, obtención o mejoramiento de propiedades mecánicas, etc.).

## **III. Hipótesis:**

Con la automatización del equipo 5P-II de Sulzer METCO se obtendrán piezas con un recubrimiento uniforme, implicando un ahorro de material y consumibles (polvos utilizados y gases de proceso), disminuyendo mermas y obteniendo mejores acabados en las piezas recubiertas.

## **IV. Viabilidad del proyecto:**

El proyecto desde el punto de vista tecnológico es viable ya que el Departamento de Mecánica cuenta con una parte de la materia prima y el equipo apropiado para la manufactura de las piezas para lograr dicho fin.

Desde el punto de vista económico es viable debido a que se cuenta con el apoyo de Industrias ERSI-QUIM S.A. de C.V. para el desarrollo del proyecto.

# **CAPÍTULO 1**

# **ANTECEDENTES**

# **HISTÓRICOS**

## 1.1 Proyección Térmica

1.1.1 Historia de los procesos de proyección térmica

1.1.2 La proyección térmica en la industria

1.1.3 Aplicaciones de la proyección térmica

## 1.2 Automatización

1.2.1 Definición

1.2.2 Clasificación

1.2.3 Tipos de sistemas automáticos

1.2.4 Argumentos a favor de la Automatización

## 1.3 Mecatrónica

1.3.1 Definición

1.3.2 Ingeniería Mecatrónica en México

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES HISTÓRICOS

### 1.1 Proyección Térmica

La proyección térmica es un proceso industrial utilizado para realizar recubrimientos. De acuerdo al *Metals Handbook*<sup>1</sup>, proyección térmica es “un término genérico para un conjunto de procesos en los cuales materiales metálicos, cerámicos y algunos polímeros, en forma de polvo, alambre o barra son alimentados en una antorcha o pistola, con la cual son calentados a una cierta temperatura que depende del material y recubrimiento. Las partículas resultantes, fundidas o cerca de serlo, son aceleradas en una corriente de gas y proyectadas contra la superficie a ser recubierta (el sustrato)”. Este proceso se aplica típicamente a piezas metálicas para mejorar sus propiedades superficiales o incluso darle otras nuevas (térmicas, eléctricas, resistencia al desgaste o a la corrosión); también se puede utilizar para reconstruir o recuperar piezas dañadas o gastadas.

Una gran ventaja de los procesos de proyección térmica es la amplia variedad de materiales que pueden ser usados para hacer un recubrimiento. Prácticamente cualquier material que pueda fundirse sin degradarse puede ser usado. Una segunda ventaja es la habilidad de la mayoría de los procesos para aplicar un recubrimiento a un sustrato sin elevar su temperatura significativamente (por ejemplo, en la proyección térmica por flama la temperatura del sustrato generalmente debe estar entre 100 y 200° C, para el proceso de proyección térmica por plasma en atmósfera controlada (*CAPS*) el sustrato debe tener una temperatura de 0 a 30° C empleando la técnica *ATCS* (*Atmosphere Temperature Controller Spraying*)). Esto implica que pueden aplicarse materiales con altos puntos de fusión a partes totalmente maquinadas o previamente tratadas térmicamente, sin alterar sus propiedades ni causarle distorsión térmica. Una tercera ventaja es la habilidad de, en muchos casos, retirar y volver a depositar recubrimientos dañados o gastados, sin cambiar las propiedades o dimensiones de la parte.

Por otra parte, el proceso tiene el inconveniente de sólo poder recubrir lo que la antorcha o la pistola ve, es decir, que esté en su línea directa de acción. Esto implica limitaciones en cuanto al tamaño y la forma de las piezas, impidiendo el recubrimiento de cavidades pequeñas o profundas, en las cuales no entra la antorcha o la pistola sin el uso de extensiones y otros accesorios.

#### 1.1.1 Historia de los Procesos de Proyección Térmica

La invención del primer proceso de proyección térmica es generalmente atribuido al suizo M. U. Schoop, y es conocido actualmente como proyección por flama (*flame spraying*). Después de diversas patentes en 1882 y 1899, en 1911 Schoop comenzó a utilizar este proceso para recubrir superficies metálicas con estaño y plomo, mejorando así su desempeño contra la corrosión. El campo se desarrolló rápidamente y, en 1926,

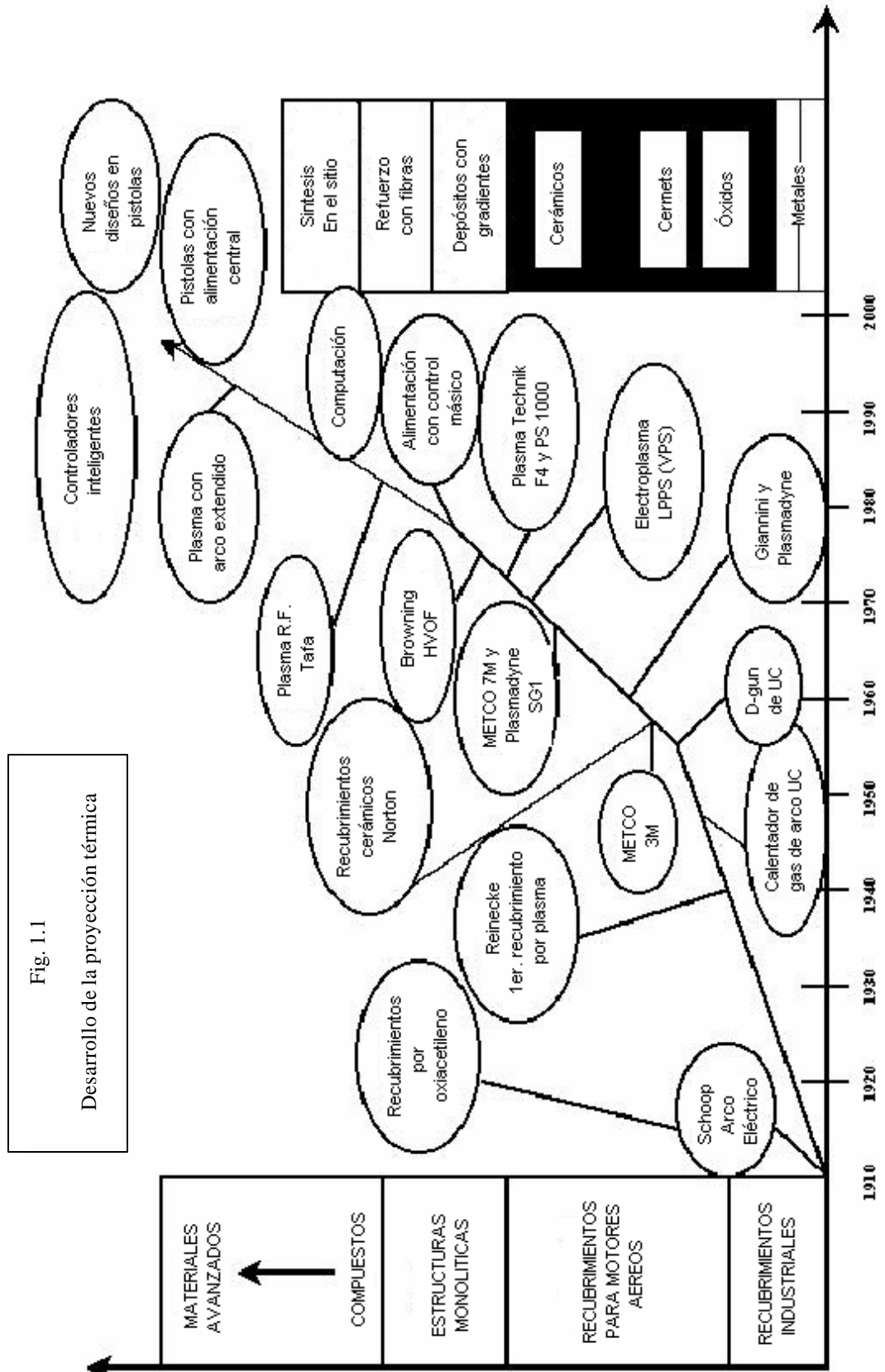
---

<sup>1</sup> ASM Handbook, *Surface Engineering* ed. 3ra., Vol. 5, USA, 1996.

T.H. Turner y N.F. Budgen publicaron un libro llamado *Metal Spraying*. Una nueva edición fue publicada en 1963 con el título *Metal Spraying and the Flame Deposition of Ceramics and Plastics*, el cual reflejaba el cambio hacia el uso de materiales no metálicos. Otros procesos importantes para proyección térmica incluyen proyección por alambre, deposición por pistola detonante (inventada por R. M. Poorman, H. B. Sargent y H. Lamprey, y patentada en 1955), proyección por plasma (inventado por R. M. Gage, O. H. Nestor, y D. M. Yen, y patentada en 1962), y *HVOF (High Velocity Oxyfuel*, inventado por G. H. Smith, J. F. Pelton y R. C. Eschenbach, y patentada en 1958).

La fig. 1.1 ofrece un panorama del desarrollo en la tecnología de proyección térmica. Podemos observar en ésta que la evolución en las aplicaciones ha sido posible debido al avance tecnológico, al tiempo que muestra avances existentes dirigidos por empresarios o compañías particulares. La curva describe un típico ciclo de vida: al comienzo con Schoop en 1911 el progreso es lento y se va incrementando modestamente hasta 1950, época en que aparecen una gran variedad de modernos plasmatrónes, aumentando el desarrollo considerablemente. A mediados de la década de 1950 viene un despunte en el crecimiento tecnológico, debido a la aparición en el mercado de la industria aeroespacial. El segundo gran despunte se presenta en la década de 1980 con la invención del *VPS (Vacuum Plasma Spraying)*, el *LPPS (Low Pressure Plasma Spraying)* y el *Jet Kote/HVOF*, técnica creada por Browning Engineering, Enfield, NH, USA. En las pasadas dos décadas, se ve un incremento en el uso de los recubrimientos por proyección térmica en los sectores militar y comercial.

Los futuros desarrollos indudablemente destacarán por un incremento en la innovación tecnológica; probablemente contarán con control a través de información en tiempo real, inteligencia artificial, diseño de nuevo equipo y polvos para proyección, etc.



### **1.1.2 La Proyección Térmica en la Industria**

Para dar una idea del crecimiento en el uso del proceso de proyección térmica, se tiene como ejemplo el de los recubrimientos cerámicos.

De acuerdo a un estudio hecho<sup>2</sup>, las ventas de materiales cerámicos en el ámbito mundial alcanzaron US \$4 billones en 1995, siendo el 80% de esta cantidad recubrimientos cerámicos. En 1986 las ventas de recubrimientos cerámicos fueron de US \$1 billón: el 36% fue en la industria de la construcción, 21% en la industria metálica, 12% en el área militar y el 31% restante en otras industrias (química, motores de combustión interna, producción de petroquímicos).

De los recubrimientos cerámicos, el 39% son producidos por *PVD (Physical Vapor Deposition)*, el 26% por *CVD (Chemical Vapor Deposition)*, el 12% por otras técnicas y el 23% por proyección térmica.

Las expectativas en el mercado de los recubrimientos en el año 2000 ascienden a US \$3 billones con un crecimiento anual aproximado del 12%. Así en la industria automotriz se tiene un crecimiento anual del 28%, en equipo de la marina del 18%, en procesos químicos del 15%, en el área militar del 11% y en la industria de la construcción del 11%.

### **1.1.3 Aplicaciones de la Proyección Térmica**

Las aplicaciones de la proyección térmica son variadas, entre ellas se tienen las de aumentar la resistencia superficial al desgaste o la corrosión de una superficie, incluso a altas temperaturas. Otras aplicaciones incluyen su uso para restauración dimensional, mantenimiento de tolerancias, como barreras térmicas, como conductores térmicos, conductores o resistencias eléctricas, como blindaje electromagnético, y para aumentar o retardar la radiación. Son usados en prácticamente cualquier industria, incluyendo la aeroespacial, de implementos de agricultura, automotriz, metalurgia primaria, minería, del papel, biomédica, producción de aceite y gas, y producción de químicos y plásticos.

## **1.2 Automatización**

### **1.2.1 Definición**

Automatizar incluye la idea de utilizar algún tipo de máquina; dicha máquina tiene asociada un dispositivo de procesamiento, el cual controla la tarea que ésta realiza, de modo que aumenta la productividad, reduce los costos, mantiene una misma calidad del producto, etc. De este modo la máquina puede funcionar durante un mayor número de horas en un entorno más hostil, y realizar determinadas tareas más rápidamente y con menor cantidad de errores que su contraparte humana. Por otro lado, la máquina puede ejecutar acciones reducidas en comparación con un ser humano, y debe contener

---

<sup>2</sup> Gorham Advanced Materials Institute (dato tomado de la siguiente referencia: B.Heimann, Robert Plasma-Spray Coatings, Alemania, Ed. VCH, 1996.)

instrucciones prefijadas (un programa) que le diga cómo tiene que comportarse en cada posible situación.

La Automatización es una tecnología que tiene que ver con la aplicación de sistemas mecánicos, electrónicos y de software para operar y controlar la producción.

La automatización suele utilizarse para aumentar la fiabilidad o la precisión de un proceso, y, en la mayor parte de las aplicaciones industriales, para incrementar la productividad.

La automatización de un proceso industrial depende de la capacidad que exista de controlar ese proceso con poca o ninguna ayuda humana. Lo que hay que controlar depende habitualmente del proceso, pero en general el control conlleva el arranque, el paro y la regulación del movimiento, de la posición o del flujo de cada uno de los componentes del mismo. A su vez, la capacidad para controlar depende usualmente de las posibilidades que existan para monitorear o medir variables durante el proceso, de modo que pueda asegurarse que el producto final es exactamente como se desea. Y esto depende, a su vez, de la capacidad que exista de comparar el producto real con el que se desea y de realizar en el proceso los ajustes necesarios, si fuese necesario.

*“Hoy día la clave de una automatización con éxito y una fabricación competitiva radica en la utilización de electrónica de alta tecnología, que proporcione un sistema flexible de fabricación por medio de sistemas electrónicos programables.”<sup>3</sup>*

### **1.2.2 Clasificación**

Podemos clasificar la automatización industrial de la siguiente forma:

- Automatización fija
- Automatización programable
- Automatización flexible

#### Automatización fija

Es un sistema en el que la secuencia de procesamiento o ensamble son fijas debido a la configuración del equipo. Las operaciones son usualmente simples, de tal forma que la integración y coordinación de dichas operaciones conforman un sistema complejo. Las características que presenta la automatización fija son:

- Elevada inversión inicial
- Altos rangos de producción
- Relativa inflexibilidad para cambios en un producto

La justificación económica para la automatización fija se encuentra en productos con altos rangos de demanda y volumen. Un ejemplo de este tipo de automatización son las líneas mecánicas de ensamble.

---

<sup>3</sup> M. Schmitt , Neil, A fondo: Robótica y sistemas automáticos, España, Ed. ANAYA, 1988, p. 14



### Automatización programable

El equipo de producción es diseñado con la capacidad de modificar la secuencia de operaciones con el fin de permitir diferentes configuraciones del producto. La secuencia de operación es controlada por un programa, el cual está conformado por una serie de instrucciones codificadas, así el sistema puede leerlas e interpretarlas. Nuevos programas pueden ser preparados e introducidos al sistema para producir nuevos productos. Algunas de las características de la automatización programable son:

- Inversión inicial alta
- Volúmenes de producción bajos relativos a la automatización fija
- Flexibilidad para aceptar cambios en la configuración de los productos
- Idóneo para tandas (o grupos) de producción.

Los sistemas de producción que son programables son usados en bajos y medianos volúmenes de producción. Las partes o productos son usualmente hechos en tandas (o grupos). Para producir cada nuevo grupo de un diferente producto, el sistema debe ser reprogramado con una serie de instrucciones máquina que correspondan al nuevo producto. La preparación física de la máquina también debe ser llevada a cabo: Las herramientas deben ser cargadas, así como sus características y elementos (dimensiones, compensaciones, etc.) deben ser dados de alta. Estos cambios producen un cierto tiempo, consecuentemente, el típico ciclo que tiene un producto incluye un periodo durante el cual se efectúa la preparación de la máquina y la reprogramación de la misma, seguido por un periodo en el que el grupo es producido. Ejemplo de este tipo de automatización son las maquinas de control numérico.

### Automatización flexible

Es una extensión de la automatización programable. Un sistema de automatización flexible es aquel que tiene la capacidad de producir una variedad de productos o partes con menos pérdida de tiempo debido a la preparación de la máquina al cambiar de un producto a otro (caso de la automatización programable). En la Automatización flexible no existe tiempo perdido en la producción mientras se programa el sistema y tampoco mientras se hacen instalaciones físicas (cambio de herramientas, elementos, parámetros). Consecuentemente el sistema puede producir varias combinaciones y programas de productos, en lugar de requerir que éstos sean hechos en grupos o tandas separados, en otras palabras, se cuenta con mayor versatilidad. Por ejemplo, se pueden obtener diferentes productos o partes al mismo tiempo en el mismo sistema. Las características de la automatización flexible son las siguientes:

- Alto costo de inversión inicial
- Producción continua de productos variables
- Medianos rangos de producción
- Flexibilidad para aceptar variaciones en el diseño de los productos

### 1.2.3 Tipos de sistemas automáticos

La aplicación de la electrónica a los procesos industriales ha dado como resultado varios tipos de sistemas automáticos. Estos tipos pueden clasificarse de la forma siguiente:

- Máquinas herramientas de control numérico
- Controladores programables
- Robótica
- Sistemas de fabricación flexibles

Máquinas herramientas de control numérico: Esta es una herramienta (o un conjunto de ellas) movida por energía eléctrica, capaz de realizar una cierta operación de maquinado (fresado, taladrado, etc.). Cuando esta máquina herramienta es controlada por una computadora, entonces el sistema se conoce de forma técnica como máquina de control numérico (máquina *CNC*). Si la computadora se utiliza para controlar más de una máquina, el sistema se denomina una máquina de control numérico directo (máquina *DNC*). La ventaja de esta forma de control es la capacidad para integrar la producción de varias máquinas en el control general de una máquina de montaje. La desventaja, sin embargo, es la dependencia de un gran número de máquinas del buen funcionamiento de la computadora.

Controladores lógicos programables (PLC): son dispositivos compactos que no sólo son capaces de controlar un proceso o una máquina, sino que también pueden ser programados con rapidez. Estos dispositivos varían mucho de unos a otros en lo que se refiere a complejidad de las operaciones que son capaces de controlar, pero pueden ser conectados a una microcomputadora, y funcionar de modo similar a una máquina *DNC*, con un aumento considerable de flexibilidad.

Robótica: Un robot es un dispositivo controlado por un procesador, capaz de moverse en una o más direcciones, a la vez que realiza una secuencia de operaciones dada. Una máquina *CNC* puede considerarse un robot, pero usualmente la aplicación de dicho término se restringe a aquellos dispositivos que son capaces de realizar movimientos similares a los de los humanos, particularmente a los del brazo y de la mano. Un robot podría ser la elección adecuada para realizar una tarea relativamente simple, de precisión, repetitiva o potencialmente peligrosa para un ser humano.

Sistemas de fabricación flexibles: La incorporación de máquinas herramientas de control numérico, robots y computadoras a una cadena de montaje dan como resultado lo que se denomina un sistema de fabricación flexible. Se le llama flexible, porque pueden realizarse en él cambios de importancia con inversiones relativamente reducidas de tiempo y de dinero. En su forma definitiva aceptaría como entradas por un extremo las materias primas, y proporcionaría a su salida el producto terminado, listo para ser transportado sin intervención humana alguna.

### 1.2.4 Argumentos a favor de la automatización

Incremento en la productividad: Se alcanzan mayores rangos de producción (por hora) con la automatización que con la correspondiente operación manual.

Disminución del alto costo de la mano de obra: Como consecuencia del alto costo de la mano de obra se ha sustituido ésta por máquinas que son económicamente justificables debido a que la automatización puede producir altos rangos de producción, el uso de esta tecnología resulta en un bajo costo por unidad del producto.

Calidad en los productos: Automatizando los procesos se pueden producir rápidamente mayor cantidad, con una mayor consistencia y de conformidad a las especificaciones. El resultado de automatizar son los precios bajos y mejores productos.

Aumento de Seguridad: A través de la automatización se transfiere al operador de una participación activa a una labor de supervisión, de tal forma que el trabajo se torna seguro.

Disminución del alto costo debido al material de desperdicio: El alto costo por el material desperdiciado en el proceso de manufactura da como resultado que se busque incrementar la eficiencia en uso de dicho material.

El crecimiento de la automatización industrial puede por si misma traer oportunidades de empleo para un sector más especializado (programadores, ingenieros, mantenimiento, etc.).

Reducción de los tiempos de manufactura: El ser competente al manufacturar promueve un buen servicio al cliente. Se disminuye el tiempo entre la orden del cliente y la entrega del fabricante.

## **1.3 Mecatrónica**

### **1.3.1 Definición**

Acuñada en 1969 por el ingeniero japonés Yakasawa, la palabra mecatrónica ha sido definida de varias maneras. Un consenso común es describir a la mecatrónica como una disciplina integradora de las áreas de mecánica, electrónica e informática cuyo objetivo es proporcionar mejores productos, procesos y sistemas. La mecatrónica no es, por tanto, una nueva rama de la ingeniería, sino un concepto recientemente desarrollado que enfatiza la necesidad de integración y de una interacción intensiva entre diferentes áreas de la ingeniería.

Con base en lo anterior, se puede hacer referencia a la definición de mecatrónica propuesta por J.A. Rietdijk *"Mecatrónica es la combinación sinérgica de la ingeniería mecánica de precisión, de la electrónica, del control automático y de los sistemas para el diseño de productos y procesos"*<sup>4</sup>. Existen, claro está, otras versiones de esta definición, pero ésta claramente enfatiza que la mecatrónica está dirigida a las aplicaciones y al diseño.

---

<sup>4</sup> J.A. Rietdijk *"Ten propositions on mechatronics"*, en Mechatronics in Products and Manufacturing Conference, Lancaster, Inglaterra, 1989.

Un sistema mecatrónico típico recoge señales, las procesa y, como salida, genera fuerzas y movimientos. Los sistemas mecánicos son entonces extendidos e integrados con sensores, microprocesadores y controladores. Los robots, las máquinas controladas digitalmente, los vehículos guiados automáticamente, las cámaras electrónicas, las máquinas de telefax y las fotocopiadoras pueden considerarse como productos mecatrónicos. Al aplicar una filosofía de integración en el diseño de productos y sistemas se obtienen ventajas importantes como son mayor flexibilidad, versatilidad, nivel de "inteligencia" de los productos, seguridad y confiabilidad así como un bajo consumo de energía. Estas ventajas se traducen en un producto con más orientación hacia el usuario y que puede producirse rápidamente a un costo reducido.

Un diseño mecatrónico da como resultado sistemas mecánicos más simples, es decir con menos partes y movimientos a diferencia de un diseño mecánico, esta reducción de componentes se debe a la integración de las diferentes áreas ya mencionadas como por ejemplo la electrónica y el control en el sistema.

Cuando estos conocimientos se integran y se relacionan entre sí, resulta más completa la evaluación de los problemas de diseños. La mecatrónica es una disciplina orientada a integrar las tecnologías de la Ingeniería Mecánica, Electrónica e Informática para innovar productos, procesos o sistemas.

Existen muchas máquinas que podrían considerarse de tipo mecatrónico, como por ejemplo un horno de microondas, una lavadora programable o un teléfono. Sin embargo, el concepto de la mecatrónica no se basa en el hecho de que estos productos tengan componentes mecánicos, eléctricos y de cómputo, que de hecho una buena parte así es, sino también en la forma en que estos productos fueron diseñados y desarrollados.

La mecatrónica es:

- Una filosofía de diseño que utiliza la integración sinérgica de la mecánica, electrónica y la computadora (control) para producir productos avanzados, procesos o sistemas (diseño y manufactura de productos y procesos industriales).
- Una forma de pensar durante el proceso de diseño, dónde el equipo de diseño trata de vencer las barreras entre las disciplinas de ingeniería mecánica, electrónica, tecnología de información y física. Debido al efecto sinérgico, el resultado es más óptimo que en el que se obtendría en el caso de contribuciones separadas de las disciplinas diferentes. La visión mecatrónica del proceso del diseño gana popularidad en las industrias. La mecatrónica tiene muchas ventajas en el proceso de diseño, especialmente para productos con un gran valor agregado.
- La unión de fundamentos, procedimientos y técnicas para el servicio, producción y el desarrollo de máquinas, dispositivos e instalaciones orientados al futuro. La mecatrónica es así una rama interdisciplinaria técnica, construida sobre la base de la ingeniería mecánica clásica, eléctrica y electrónica, amarrando estas ciencias no el uno al otro, sino con informática e ingeniería de software. Cabe mencionar que no solo es agregar al diseño tradicional en una forma secuencial todas las áreas mencionadas

anteriormente sino que dichas ingenierías deben participar de una forma concurrente desde las primeras etapas del diseño. El foco central es el desarrollo integral de sistemas de componentes ("Meca"), el cual debe ser inteligentemente controlado ("tronica").

### 1.3.2 Ingeniería Mecatrónica en México

La historia de la Mecatrónica en México<sup>5</sup> inicia a principios de los 90, cuando varias Instituciones de Educación Superior como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Anáhuac del Sur (UAS) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN) ofrecen las primeras asignaturas orientadas en la enseñanza del concepto de la Mecatrónica en licenciatura y postgrado. En 1994, inicia esta opción educativa la Universidad Anáhuac del Sur, posteriormente en 1997 la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA) del IPN ofrece la Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica en México.

A mediados de los 90s, otras Universidades se interesan en conocer más sobre esta disciplina y de las posibilidades que tiene esta disciplina para lograr un mejor desarrollo profesional de sus egresados. A finales de los 90s, algunas Instituciones brindan estudios más completos de la Mecatrónica mediante diplomados y cursos de especialización en postgrado, como es el caso del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) en colaboración con la empresa FESTO.

A mediados del 2000, el ITESM se ofrece la carrera de Ingeniería Mecatrónica y en el 2002 se abre la carrera de ingeniería mecatrónica en Universidad Nacional Autónoma de México. Recientemente, se han creado diversos Departamentos de Mecatrónica en Universidades, Institutos y Centros de Investigación y Desarrollo, los cuales se encuentran en los primeros años de operación. En las Universidades la formación del Ingeniero se basa en lograr una generalización de conocimientos en mecánica, electrónica e informática bajo un enfoque mecatrónico. Por su parte, los centros de investigación se orientan a realizar proyectos tecnológicos en donde se requieren resolver problemas complejos de Ingeniería.

**La Mecatrónica en la UNAM** a través de un Departamento especializado tiene como misión<sup>6</sup> llevar a cabo todas aquellas actividades encaminadas a la adecuada preparación de los alumnos de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, Mecánica e Ingeniería Industrial en las diversas áreas de la Ingeniería Mecatrónica, para que estos tengan conocimientos, habilidades y actitudes para prestar servicios útiles a la sociedad en la investigación, desarrollo, diseño, manufactura, uso y mantenimiento de las tecnologías creadas con principios mecatrónicos.

Para llevar a cabo su misión, el Departamento de Mecatrónica realiza actividades de docencia, investigación básica y aplicada, desarrollo tecnológico y diseño, dando asesoría y servicio a organismos públicos y privados con el objeto de formar profesionales en el área de Ingeniería Mecatrónica.

---

<sup>5</sup> José Emilio Vargas Soto, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, [www.mecamex.net/sitio%20mecatro/Articulo1.php](http://www.mecamex.net/sitio%20mecatro/Articulo1.php)

<sup>6</sup> <http://dimei.fi-b.unam.mx/MECATRONICA/mision.htm>

Algunos de los muchos proyectos que tiene actualmente el departamento son:

- Brazo manipulador de un apoyo para el concurso nacional de minirobótica
- Desarrollo de robot móvil con fines didácticos
- Restauración de un sistema pequeño de control numérico

La Unidad de Posgrado del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial del Estado de Querétaro (*CIDESI*), a través del Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología, (*PICYT*), se encuentra realizando programas de Mecatrónica a nivel de Especialización, Maestría y Doctorado, estos programas se suman a la formación de alto nivel en México que efectúa desde 1997 el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, a través del Doctorado en Ingeniería con especialidad en Mecatrónica.

El Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, (*CENIDET*) ofrece desde 1997 el Programa de Especialización en Ingeniería Mecatrónica y desde el 2000 los programas de Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Recientemente, en el 2004 la Universidad Modelo en Mérida, se encuentra desarrollando su programa de Maestría en Ingeniería Mecatrónica.

# **CAPÍTULO 2**

# **PROYECCIÓN TÉRMICA**

# **POR FLAMA**

## 2.1 Proceso de proyección térmica por flama

- 2.1.1 Principio de funcionamiento
- 2.1.2 Características y aplicaciones
- 2.1.3 Parámetros del proceso
- 2.1.4 Estructura del recubrimiento

## 2.2 Pistola de proyección térmica tipo 5P-II de Sulzer Metco

- 2.2.1 Descripción
- 2.2.2 Equipo requerido
- 2.2.3 Unidad de control de gas tipo 3G
- 2.2.4 Flujómetro de gas tipo 3GF
- 2.2.5 Operación de la pistola tipo 5p-II
- 2.2.6 Conexiones
- 2.2.7 Alimentación de polvos
- 2.2.8 Encendido
- 2.2.9 Proyección
- 2.2.10 Apagado
- 2.2.11 Combustibles

- 2.2.12 Importancia del sistema de aire comprimido
- 2.2.13 Almacenamiento y cuidado de polvos
- 2.2.14 Mantenimiento
- 2.2.15 Medidas de seguridad



# CAPÍTULO 2

## PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA

### 2.1 Proceso de proyección térmica por flama

#### 2.1.1 Principio de funcionamiento

La Proyección por Flama es un proceso relativamente silencioso y no siempre de fácil control; usa gas combustible como fuente térmica para fundir el metal que se convertirá en el recubrimiento (para este proceso, el material usualmente viene en forma de polvo, alambre o barra). Las pistolas para proyección por flama utilizan comúnmente acetileno, propano, metil-acetileno-propadieno (*MAPP*) e hidrógeno, conjuntamente con oxígeno. Las temperaturas y características de la flama dependen de la relación oxígeno-combustible y de la presión. En cualquier pistola de proyección térmica por flama, la máxima eficiencia es obtenida cuando los flujos de gases está exactamente balanceada. Cambios muy finos en las proporciones oxígeno-combustible pueden disminuir significativamente la eficiencia de la flama.

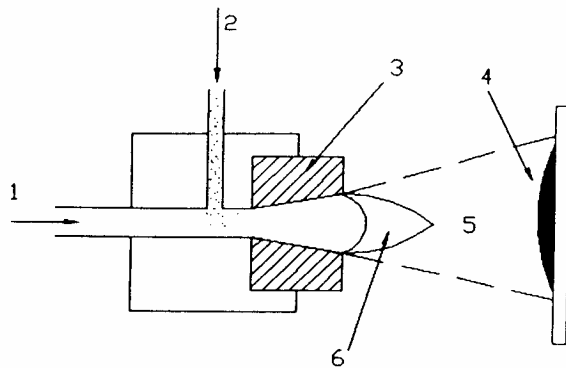


Fig. 2.1  
Principio de la proyección térmica por flama

Los gases entran de forma axial (1), el polvo (2) es introducido axialmente o perpendicularmente a la antorcha. Las partículas son fundidas en la flama (6) y aceleradas en dirección del sustrato (4).

(5) Chorro de partículas,  
(3) Boquilla

#### 2.1.2 Características y aplicaciones

El proceso de proyección por flama se caracteriza por:

- Bajo costo del equipo.
- Altas tasas de deposición y eficiencia.
- Relativa facilidad de operación.
- El proceso de proyección por flama es ampliamente usado para la recuperación de partes gastadas o fuera de tolerancias, frecuentemente usando para este fin aleaciones basadas en níquel. Además, las aleaciones de bronce pueden ser usadas para la fabricación de algunos rodamientos y áreas de sellado; mezclas de carburo de tungsteno y aleaciones de níquel pueden utilizarse para aumentar la resistencia al desgaste, mientras que el zinc es comúnmente aplicado para resistir la corrosión en puentes y otras estructuras.

### 2.1.3 Parámetros del proceso

#### FLAMA

- La relación oxígeno - combustible puede variar de 1:1 a 1.1:1, la temperatura de la flama se encuentra en el rango de 3000 - 3350 K y su velocidad entre 80 - 100 m/s.
- El flujo y la presión del gas combustible dependen del tipo de antorcha.
- El flujo y la presión del oxígeno dependen del tipo de antorcha.

#### POLVOS

- Métodos de producción.
- Composición química.
- Propiedades físicas (densidad, punto de fusión, calor latente de fusión, etc.).
- Forma de las partículas.
- Tamaño de las partículas: usualmente en el rango de 5-100  $\mu\text{m}$ .
- Es deseable que la distribución del tamaño sea lo más estrecha posible con el fin de tener una mejor eficiencia en la proyección.

#### BARRAS O ALAMBRES

- Composición química (las barras son materiales cerámicos como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y los alambres están hechos de metales como Mo, Zn o Al).
- Diámetros de 3 a 6 mm.
- La alimentación puede variar de 80 a 650 g/ min.

#### ALIMENTACIÓN DE POLVOS

- En viejos equipos el polvo era suministrado perpendicularmente al eje de la antorcha, en modernos equipos la alimentación es axial.
- En viejos equipos la alimentación es por gravedad, en modernos equipos el polvo puede encontrarse suspendido en un gas que es inyectado a la flama.
- La alimentación varía de 50 a 100 g/min.
- La presión del gas transportador se encuentra entre 68947.6 a 103421.4 Pa.

#### CARACTERÍSTICAS DE LA PROYECCIÓN

- La distancia de proyección varía de 120 a 250 mm.
- El ángulo de proyección es usualmente de 90°, algunas veces puede variar por la forma del sustrato.
- Atmósfera de proyección: aire.

#### SUBSTRATO

- Composición química.
- Preparación de la superficie.
- Enmascarado de la superficie.
- Temperatura de la superficie.

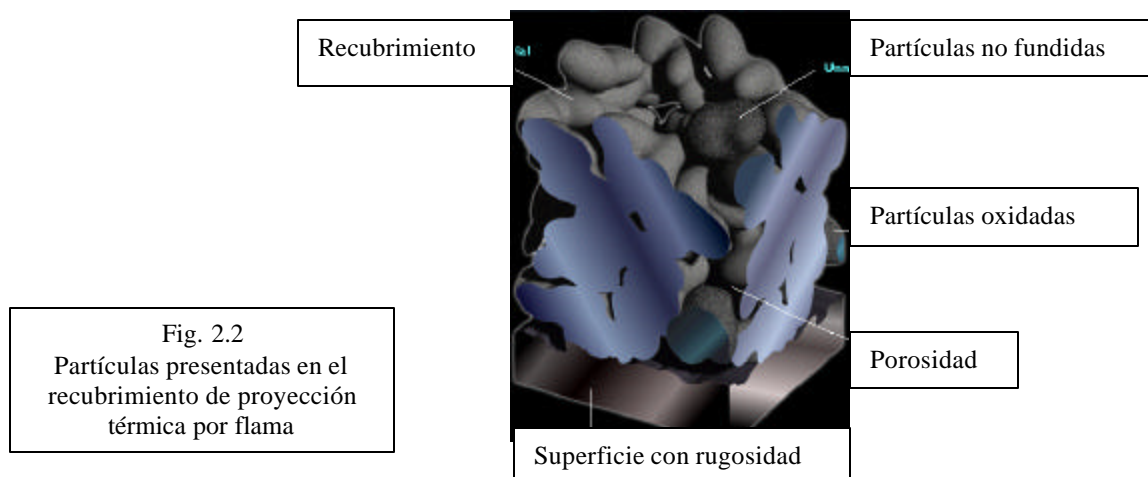
## 2.1.4 Estructura del recubrimiento

El mecanismo de unión de las partículas a la superficie no está completamente entendido, pero se cree que se debe en gran medida a interferencia mecánica de las partículas, que solidifican y se contraen, con las asperezas de la superficie que está siendo recubierta. De hecho, la mayoría de los procesos de proyección térmica requieren que el sustrato sea sometido a un tratamiento para que adquiera alta rugosidad, y así una adherencia adecuada.

Los recubrimientos hechos por proyección térmica consisten en varias capas de partículas delgadas de forma esencialmente laminar, las cuales fluyen adquiriendo esta forma al impactarse contra la superficie, adhiriéndose a ésta, superponiéndose e interfiriendo entre ellas mientras se solidifican. En general, imprimiendo mayores velocidades a las partículas se obtienen recubrimientos más densos y con mejores uniones, tanto cohesivos (partícula a partícula) como adhesivos (recubrimiento a sustrato). En un recubrimiento por proyección térmica se pueden tener partículas no fundidas, partículas oxidadas y porosidades.

La aparición de partículas oxidadas durante el proceso depende del material, el método y el proceso específico de deposición. La oxidación puede ocurrir debido al potencial oxidante de la mezcla combustible en el proceso de proyección por flama, *HVOF* o pistola detonante, o debido a la aspiración de aire en el flujo de gas en la proyección por plasma. Los recubrimientos metálicos son tal vez los más susceptibles a sufrir oxidación, pero los de carburo, en cambio, pueden sufrir pérdidas significativas de carbono por efecto de la presencia de oxígeno. Por otra parte, el uso de mezclas ricas en carbono puede causar carburización en vez de oxidación en algunos recubrimientos metálicos. La oxidación durante la deposición puede llevar a mayores porosidades y generalmente recubrimientos menos resistentes, y es usualmente considerada indeseable.

Las porosidades estimadas para los recubrimientos por proyección por flama pueden exceder el 15%, mientras que para la mayoría de los proyectados por plasma están en el rango de 5 a 15%. Para algunas pistolas detonantes y recubrimientos por *HVOF* las porosidades son menores al 2%<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> Metals Handbook, Vol. 5, Ed. 1996.

Un buen recubrimiento es determinado por diferentes aspectos. El tipo de recubrimiento que se seleccione depende de la función de la pieza. Así, se pueden tener recubrimientos porosos o recubrimientos densos y duros, u otras propiedades, dependiendo de su aplicación.

En general, los recubrimientos depositados por proyección por flama presentan las siguientes características:

- Uniones menos fuertes.
- Alta porosidad.
- Exhiben altos grados de oxidación.
- Manejan un menor rango de temperaturas de trabajo.
- Transmiten mayor calor al substrato que la mayoría de los procesos de proyección térmica.

## **2.2 Pistola de proyección térmica tipo 5P-II de Sulzer Metco.**

### **2.2.1 Descripción**

Este modelo de pistola utiliza un sistema especial de alimentación y proyección de los polvos. El polvo es alimentado por gravedad a través de una válvula de medición que se encuentra a una presión reducida dentro de la cámara de aspiración. Desde la cámara es impulsado a través de la flama donde se mezcla y después se deposita en la superficie en forma de recubrimiento. Esta pistola es capaz de manejar polvos de metal, cerámicos, y cementos.

La pistola 5P-II fue diseñada para uso exclusivamente manual, por lo que tiene una estructura robusta. Sin embargo, cuenta con una base que puede ser acoplada a un torno u otra máquina herramienta.

Otras características son:

- La construcción de la cabeza de inyección es muy resistente a daños causados por flama alta.
- El inyector, el aspirador y la tobera están contruidos como una sola unidad que puede ser rápidamente removida cuando se requiera un cambio de inyector o para mantenimiento.
- En caso de emergencia, se puede cortar abruptamente la alimentación de combustible, sin que esto afecte las condiciones del fluido.

### **2.2.2 Equipo Requerido**

Esta pistola puede quemar acetileno o hidrógeno con oxígeno. Para ciertas aplicaciones, el aire es requerido para enfriar el equipo (boquilla) o para obtener un patrón especial de rocío y características del recubrimiento. Por estas razones se requiere la instalación de equipo para controlar y dosificar oxígeno, combustible y aire comprimido. Algunos polvos requieren que se instale un vibrador neumático en la pistola (opcional).

### 2.2.3 Unidad de control de gas

Los cilindros de gas deben de estar equipados con reguladores apropiados de presión y manómetros para obtener la presión correcta de trabajo. La unidad de regulación de gas comprende reguladores de pasos múltiples. Dichos reguladores son de dos etapas con un diafragma de metal en la etapa de alta presión y un diafragma de hule de diámetro grande en la etapa de baja presión.

### 2.2.4 Flujómetro de gas

Este flujómetro cuenta con escalas fáciles de leer para asegurar el flujo correcto de gas. Es también muy útil en la detección de problemas en las líneas de gas o en el inyector. Indica el flujo de gas y el de combustible hacia la pistola.

En cualquier pistola de proyección térmica por flama, la máxima eficiencia es obtenida cuando la mezcla de gases está exactamente balanceada. Cambios muy finos en las proporciones oxígeno-combustible pueden disminuir considerablemente la eficiencia de la flama.

El flujómetro disminuye el error humano en el balanceo de la flama ya que este mide el flujo de oxígeno y combustible distribuidos a la pistola. El flujómetro toma en cuenta todas las variables presentes como el paso de los gases a través de accesorios e inyectores y mide el flujo actual de gases en la flama. Si las válvulas de control son ajustadas para obtener lecturas correctas en el flujómetro, los flujos del oxígeno y del gas estarán en balance aún cuando los manómetros sean inexactos o que el diámetro de las mangueras sea reducido por estrangulamiento.

Fig. 2.3  
Flujómetro de gas



### 2.2.5 Operación de la pistola tipo 5P-II

El correcto funcionamiento del equipo de proyección térmica por flama (pistola 5P-II), depende de una buena operación del mismo y del control de ciertos parámetros como son el flujo de gases y la alimentación de polvos, este control varia de acuerdo al tipo de polvo que se utilice para el recubrimiento.

Existen tres controles de operación en la pistola:

1. La válvula de gas, la cual controla los flujos de oxígeno y combustible al inyector.
2. La válvula de control de alimentación, la cual determina la velocidad de alimentación de polvos.
3. El gatillo, el cual enciende o apaga el flujo de polvos.

Para preparar la pistola, se tiene que realizar lo siguiente:

- Se debe colocar la boquilla y la válvula de alimentación de acuerdo al polvo que se utilizará.
- Debe asegurarse que el inyector esté firme y ajustado.
- Debe asegurarse que las entradas de las mangueras de gases y aire estén firmemente conectadas a la pistola. Las superficies que van a ser recubiertas deben estar limpias y libres de polvos y grasa.
- Se debe colocar la boquilla de aire requerida.

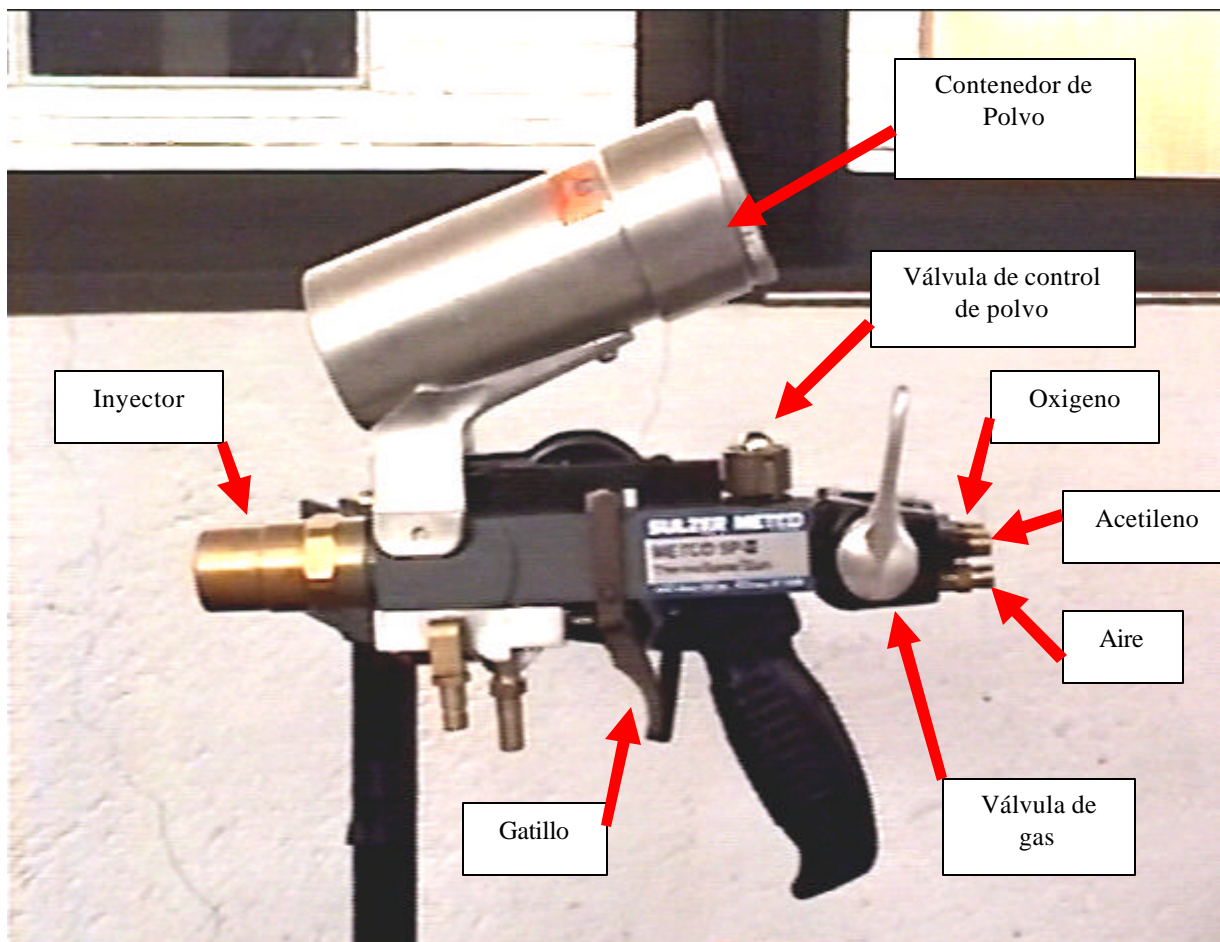


Fig. 2.4  
Descripción de la pistola 5P-II

## 2.2.6 Conexiones

Las conexiones de los reguladores de gas, el control de aire y el flujómetro de gases se tienen que realizar como se ilustra en la Fig. 2.5

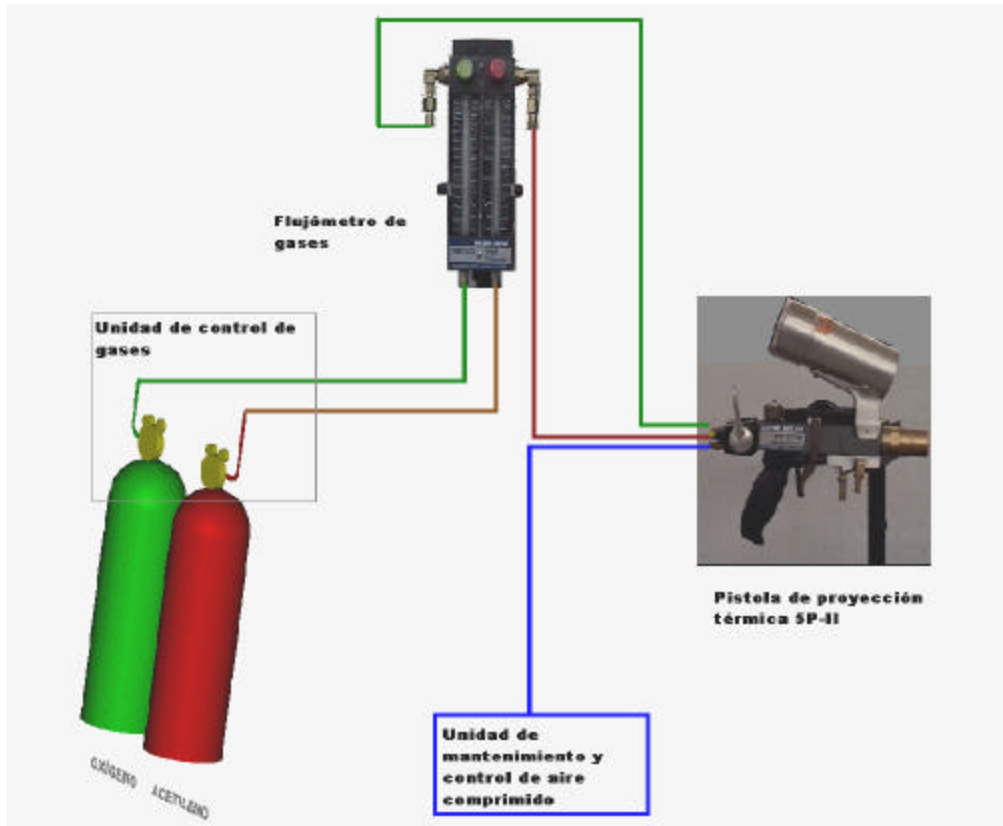


Fig. 2.5  
Diagrama de Instalación

Los accesorios de la manguera están situados en la parte posterior de la manguera. Las conexiones de entrada de combustible y de oxígeno se encuentran a ambos lados de la pistola uno al lado del otro. La conexión de entrada de aire se encuentra centrado por debajo de los accesorios de combustible y oxígeno. La manguera de oxígeno es de color verde y la del combustible es roja. Las entradas de aire y de oxígeno tienen rosca derecha, la del combustible tiene rosca izquierda.

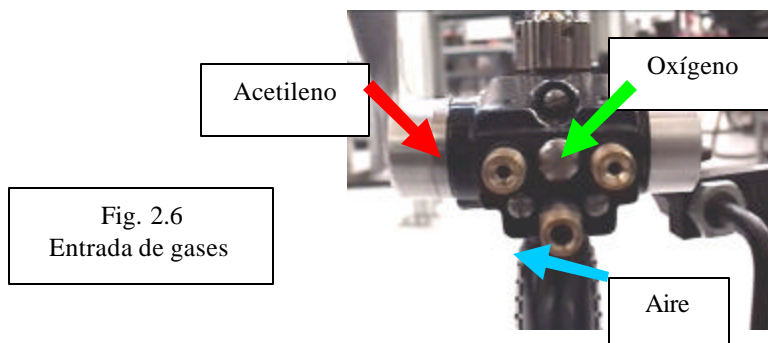


Fig. 2.6  
Entrada de gases

### 2.2.7 Alimentación de polvos

Los polvos de alimentación están compuestos de diversos tamaños de partículas. Los polvos que no han sido usados regularmente tienden a separarse por lo que las partículas más finas se precipitan hacia el fondo del contenedor. Para obtener un buen recubrimiento y propiedades homogéneas, es necesario mezclar los polvos. Se recomienda que el contenedor de alimentación de polvo esté parcialmente lleno para que se agite por algunos momentos la pistola y lograr una buena mezcla. Antes de hacer la aplicación deben tenerse las siguientes precauciones:

1. Asegurarse que el gatillo esté en la posición de apagado antes de colocar el polvo en el contenedor.
2. Limpiar el contenedor antes de vaciar los polvos para evitar la existencia de partículas extrañas.
3. Se deben mantener los polvos limpios y libres de humedad, ya que las partículas extrañas pueden provocar comportamientos erráticos del polvo al ser aplicado y dañar las boquillas e inyectores.
4. Los polvos proyectados con anterioridad y que no se adhirieron a la superficie no se deben regresar al contenedor.

### 2.2.8 Encendido

La manija de la válvula de gas se encuentra en posición vertical y hacia arriba cuando ésta se encuentra cerrada y hacia delante en posición vertical cuando la válvula está completamente abierta. Existe una posición intermedia y que indica que se encuentra parcialmente abierta.



Fig. 2.7  
Válvula de gas  
completamente cerrada

Para encender la pistola se debe de proceder de la siguiente manera:

1. Se deben ajustar las presiones del oxígeno y del combustible de acuerdo al polvo a utilizar y BAJO LA PRESIÓN DE ENCENDIDO (de acuerdo a tablas de caracterización de las propiedades de los polvos).
2. La alimentación del polvo hacia la pistola varía de acuerdo al polvo utilizado, esto se controla mediante la válvula de entrada polvo (de acuerdo a tablas).
3. La válvula de gas se debe abrir lentamente hasta escuchar un “clic” en la posición de encendido (aproximadamente a la mitad de la posición de encendido total).
4. Se debe de colocar enfrente del inyector (aproximadamente a 6 mm.) un chispero y producir una chispa.
5. La válvula de gases debe abrirse completamente.





Fig. 2.8  
Perilla de la válvula

Una vez que se ha encendido la mezcla de gases, se deben ajustar los reguladores de combustible y de oxígeno hasta que las lecturas en el flujómetro correspondan a los valores determinados en las tablas de acuerdo al polvo a utilizar.

### 2.2.9. Proyección

El procedimiento básico para realizar la proyección es el siguiente:

1. Preparar y precalentar la pieza de trabajo. La limpieza de la pieza debe de realizarse por métodos químicos y mecánicos.
2. La válvula de control de flujo debe abrirse hasta alcanzar los valores recomendados en las tablas.
3. Con la pistola encendida y con la válvula de control de flujo abierta, jalar el gatillo totalmente. La pistola inmediatamente comenzará a proyectar.

Fig. 2.9  
Gatillo en posición de “apagado”



4. El rocío debe dirigirse hacia la pieza de trabajo y, de acuerdo a las tablas proporcionadas por el fabricante, proyectarse a la distancia recomendada.
5. La aplicación debe ser en dirección transversal a la pieza de trabajo siempre que sea posible. Cuando la pieza de trabajo sea estacionaria, la velocidad transversal deberá ser, de  $\frac{1}{2}$  pulgada/segundo a  $\frac{1}{4}$  pulgada/segundo (1.27 cm/s a 0.635 cm/s respectivamente), formando bandas de  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{3}{4}$  de pulgada (1.27cm a 1.905 cm respectivamente) de ancho en cada paso. En piezas cilíndricas rotatorias, la velocidad de la superficie deberá ser de 20 a 100 piés/min (6.096 m/min a 30.48 m/min respectivamente), con una velocidad de avance transversal de  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  pulgada por revolución (0.635 cm/rev a 1.27 cm/rev respectivamente).
6. En secciones con barrenos o cortes, se debe dirigir el rocío hacia las esquinas con un ángulo de  $45^\circ$  respecto a la superficie; de igual manera de debe proceder al terminar una superficie. Esto tiende a cubrir el fin de la

sección ligeramente más rápido que en el centro y previene del exceso de óxido que pueda generarse en las esquinas.

7. El periodo de tiempo en el cual se debe trabajar la pistola es de treinta segundos a un minuto.

### **2.2.10 Apagado**

Para apagar la pistola se debe proceder de la siguiente manera.

1. El gatillo de la pistola debe colocarse en posición de “apagado”, lo cual se logra jalándolo hacia la manija de la pistola.
2. La válvula de entrada de gases debe cerrarse colocando la manija de la misma en posición vertical y hacia arriba.

Siempre debe seguirse la secuencia antes mencionada para evitar la acumulación de polvo en los conductos. Nunca se debe abrir o cerrar bruscamente la válvula de entrada de gases; siempre tiene que hacerse gradualmente.

### **2.2.11 Combustibles**

La pistola de proyección térmica tipo 5P-II puede ser utilizada con acetileno e hidrógeno. Debido a que su costo es alto, el hidrógeno se recomienda usar solamente cuando se requiera aplicar polvos de granos muy finos o polvos de cobre.

### **2.2.12 Importancia del sistema de aire comprimido**

El sistema de aire comprimido debe estar siempre funcionando aun cuando la pistola se encuentre apagada ya que realiza las siguientes funciones:

1. Enfría la pistola.
2. Enfría las mangueras cuando se recubren piezas por su interior (tubos, contenedores, tanques, etc.).
3. Enfría la pieza de trabajo o sustrato.
4. Provee de brillo y limpieza a recubrimientos.
5. Aumenta la eficiencia de la deposición de carburos cuando se esté proyectando polvos con altas concentraciones de carburo de tungsteno.
6. Reduce la generación de humo de los polvos metálicos.
7. Permite la proyección de polvos de granos muy finos utilizando acetileno en vez de hidrógeno.
8. Reduce el diámetro del rocío, lo que aumenta la precisión del mismo al estar proyectando en piezas pequeñas.
9. El aire comprimido debe estar libre de aceite y de humedad.

La conexión de aire está situada entre la parte posterior de la pistola y el sistema de control de aire. La válvula de gases no controla el flujo de aire.

### **2.2.13 Almacenamiento y cuidado de polvos**

1. Los polvos deben permanecer secos y limpios. Nunca deben dejarse los contenedores de polvos descubiertos ni reutilizar los polvos no adheridos.
2. Todos los polvos tienden a separarse por lo cual deben mezclarse antes de ser colocados en la pistola. Esto se puede lograr girando ciento ochenta grados los contenedores de los polvos repetidamente.
3. Antes de colocar los polvos en la pistola, se debe limpiar y eliminar la presencia de partículas y sustancias extrañas en el interior del contenedor de la misma.

### **2.2.14 Mantenimiento de la pistola tipo 5P-II**

La pistola debe estar siempre libre de polvo, grasas y aceites. Si al proyectar no hay una distribución homogénea del rocío o el gatillo falla, se debe desarmar la pistola y limpiar cada componente para remover todo el polvo atorado.

Una vez que se halla desarmado por completo la pistola, se deben de lubricar las válvulas de entrada de gases, la de polvos y el gatillo.

#### **MANGUERAS:**

Las obstrucciones en las mangueras reducen el flujo de oxígeno y de combustible, lo que provoca variaciones importantes en el balance de la flama. Se debe evitar la entrada de aceite en las mangueras ya que esto provoca que se reblandezcan las paredes de la misma lo cual es peligroso ya que pueden presentarse fugas y aumentar el riesgo de una explosión.

#### **BOQUILLAS:**

Para obtener una adecuada proyección, las boquillas deben estar limpias y sin daños (rotas, fisuradas, etc.).

Las boquillas deben ser limpiadas ocasionalmente. Para limpiar los orificios de la boquilla, se debe desmontar de la pistola y pasar un alambre del diámetro del orificio, no se deben utilizar brocas u otros objetos. Posteriormente, debe limpiarse con un agua y secarse con aire comprimido.

Se deben inspeccionar los empaques y los "O-rings" para remplazar los que estén dañados. Los que no requieran ser cambiados, deben ser lubricados.

#### **VÁLVULA DE ENTRADA DE GAS:**

La válvula de entrada de gases puede trabajar durante largos periodos de tiempo sin necesidad de recibir mantenimiento. Cuando la pistola requiere de un mantenimiento mayor, la válvula puede ser desarmada para limpieza y lubricación. Las conexiones de gas, aire y oxígeno deben ser remplazadas si presentan algún daño. Si la pistola ha estado sin utilizar un periodo largo de tiempo o si la válvula ha sido recién lubricada, es necesario que ésta se abra y se cierre algunas veces con los gases fluyendo. Esto permitirá que se elimine el exceso de lubricante.

#### **FLUJÓMETRO Y MANÓMETRO:**

No requieren de mantenimiento durante largos periodos de tiempo. Si llegara a dañarse alguno de estos elementos, es aconsejable reemplazarlo inmediatamente.

## **2.2.15 Medidas de seguridad**

Debido a que la proyección térmica por flama requiere del uso de gases combustibles, mangueras y contenedores que trabajan bajo presiones altas y materiales que son potencialmente tóxicos e irritantes, se deben seguir algunas medidas de seguridad como son:

### **VENTILACIÓN:**

Para minimizar el peligro de una explosión, se debe tener una adecuada ventilación en la cabina de proyección y otros espacios cerrados. Estas medidas evitan la acumulación de humos y polvo. La limpieza de la cabina de proyección es también importante para asegurarse que no existe una acumulación peligrosa de polvo. Los colectores de bolsa o filtro intercambiable no son aconsejables para el polvo metálico; se recomienda colectores de filtro húmedo (preferentemente con agua).

Los ventiladores, la tubería, los extractores de polvo y los motores deben estar eléctricamente aislados y aterrizados. Los motores deben ser externos al sistema de ductos.

### **REDUCCIÓN DE DAÑOS POR FUEGO Y EXPLOSIÓN:**

Cuando la pistola esté encendida, no se debe de acercarse a ninguna parte del cuerpo ni a materiales que puedan encenderse (madera, papel, tanques de aceite o gasolina, etc.). Por ningún motivo debe de proyectarse sobre las mangueras o cerca de ellas, ya que pueden encenderse.

Se debe mantener en óptimas condiciones de trabajo todo el equipo de gases y de aire tales como compresores, reguladores, manómetros, etc. Se deben inspeccionar regularmente.

Los polvos deben estar almacenados lejos de fuentes de calor, ya que pueden explotar.

### **REDUCCIÓN DE DAÑOS AL SISTEMA RESPIRATORIO:**

El material que tiene un tamaño de grano muy pequeño puede dañar el sistema respiratorio de diferentes maneras, de igual forma, la concentración de humo puede causar alteraciones en el sistema respiratorio y pueden presentarse mareos, dolor de estomago y de cabeza. Con un buen sistema de ventilación, los riesgos se minimizan, pero es necesario el uso de equipo respiratorio de acuerdo al tipo de material que se esté utilizando (mascaras, filtros, caretas, etc.).

### **PROTECCIÓN PERSONAL:**

Existe la posibilidad de reacciones alérgicas a los polvos, humos y otras causas debido al contacto de la piel y mucosas con los productos por lo que se debe evitar la entrada de polvo y humo a la boca, nariz, cortadas, raspones o heridas abiertas. Después de haber proyectado, se debe lavar cuidadosamente las manos. De preferencia, deberá usarse ropa a prueba de flama.

Se deben proteger los oídos con tapones u orejeras para evitar daños auditivos. También es necesario el uso de lentes de protección de 5 sombras para evitar daños por intensidad luminosa y por penetración de algún objeto extraño.

# CAPÍTULO 3

## DISEÑO

### 3.1 Proceso de diseño

3.1.1 Introducción.

3.1.2 ¿Por qué la NECESIDAD de automatizar el equipo 5P-II de Sulzer METCO?.

3.1.3 Análisis del problema.

3.1.4 Especificaciones.

### 3.2 Subsistemas a desarrollar

3.2.1 Antecedentes.

3.2.2 Dispositivo controlador del gatillo de la pistola de proyección térmica 5P-II de Sulzer Metco.

3.2.3 Dispositivo de soporte de la pistola de proyección 5P-II.

3.2.4 Dispositivo controlador de la distancia de proyección entre el sustrato y la pistola, de acuerdo al tipo de polvo.

3.2.5 Diseño del dispositivo de rotación a sustratos cilíndricos y de revolución.

3.2.6 Dispositivo controlador de los movimientos de avance transversal.

3.2.7 Dispositivo de movimientos de avance vertical (placas).

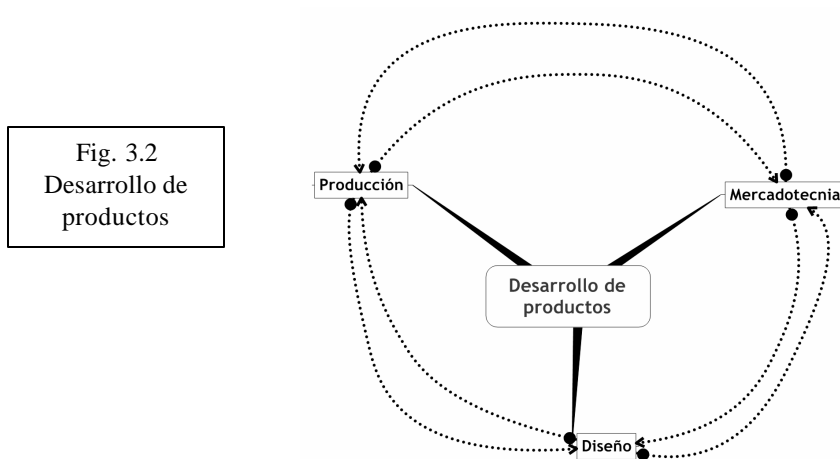
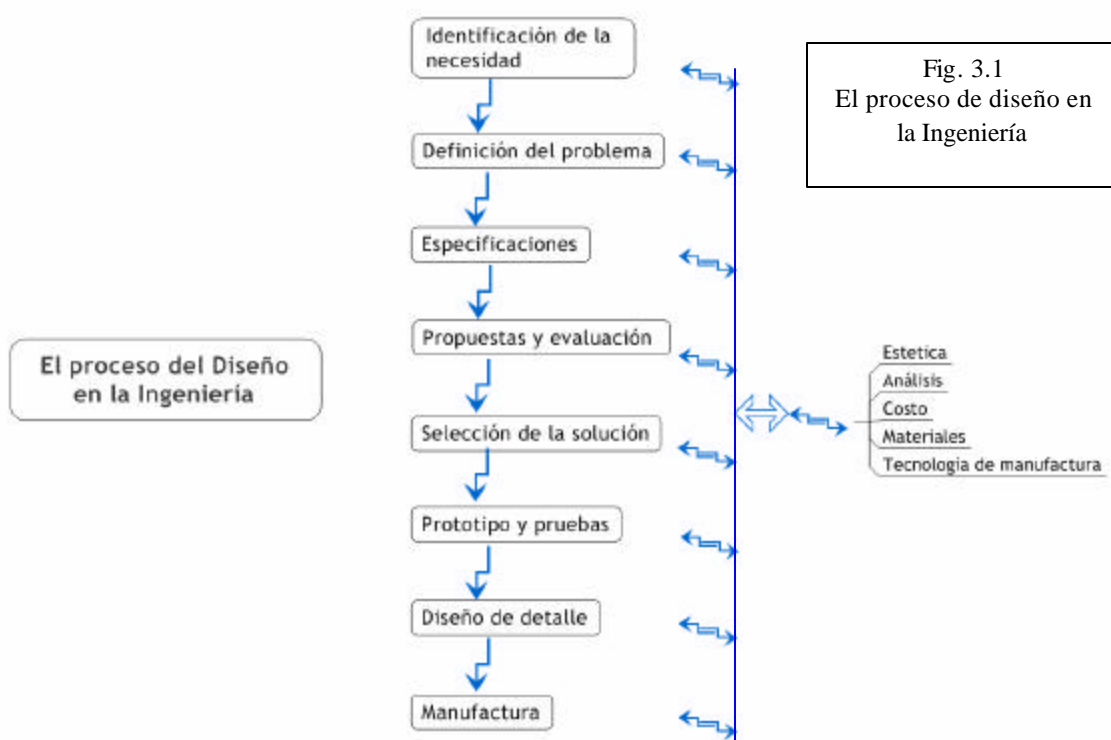
# CAPÍTULO 3

## DISEÑO

### 3.1 Proceso de diseño

#### 3.1.1 Introducción

El diseño en ingeniería y el desarrollo de productos son, como se ilustra en los siguientes diagramas, un proceso complejo que implica la interacción de muchas áreas y disciplinas:



Se puede considerar que las etapas necesarias para realizar un diseño son las siguientes:

*1. La necesidad*

El proceso de diseño se inicia con una necesidad, quizás formulada por un cliente, o bien detectada mediante una investigación de mercado.

*2. Análisis del problema*

La primera etapa en la elaboración de un diseño es definir la verdadera naturaleza del problema, es decir, analizarlo. Se trata de una etapa muy importante, ya que no definir el problema de manera precisa podría conducir a una pérdida de tiempo en diseños que no satisfacen la necesidad.

*3. Elaboración de una especificación*

Después del análisis, se procede a especificar lo que se requiere. En esta etapa hay que dejar claro en qué consiste el problema, las restricciones que deberá satisfacer la solución y los criterios que se aplicarán para evaluar la calidad del diseño. Al formular el problema, deben especificarse las funciones que se desean obtener del diseño, así como sus características deseables. Por ejemplo, masa, dimensiones, tipos y variedad de movimientos requeridos, exactitud, requisitos de entrada y de salida de elementos e interfaces, especificaciones de las fuentes de alimentación, entorno de operación, normas correspondientes, normas de ejecución, etc.

*4. Propuesta de posibles soluciones*

Con frecuencia esta etapa se denomina etapa conceptual. Se elaboran bosquejos de soluciones, con el suficiente detalle para indicar cómo obtener cada una de las funciones requeridas, por ejemplo: dimensiones, formas, materiales y costos aproximados. También determina qué se ha inventado con anterioridad para problemas similares; no hay por qué volver a inventar la rueda.

*5. Selección de una solución idónea*

Se evalúan las soluciones propuestas y se elige la más adecuada.

*6. Prototipo*

Se realizan prototipos para validar funciones o principios de funcionamiento.

*7. Elaboración de un diseño detallado*

El diseño más adecuado se realiza con todos sus detalles, lo cual podría requerir la creación de prototipos o modelos para simular los detalles óptimos del diseño. El diseño elegido se traduce en dibujos de trabajo, diagramas de circuito, etcétera, en los cuales se basará la realización del producto.

*8. Manufactura*

Manufactura o elaboración de partes para creación del producto.

Las anteriores etapas del diseño no necesariamente se van dando de acuerdo con la secuencia mencionada. En ocasiones será necesario regresar a una etapa anterior y reconsiderarla. Por ejemplo, durante la generación de posibles soluciones, puede ser necesario reconsiderar el análisis del problema.

El diseño en Ingeniería como ya se mencionó es un proceso complejo que involucra diversas disciplinas y habilidades. La parte medular del enfoque mecatrónico radica en la participación conjunta de dichas disciplinas.

La mecatrónica involucra e integra diversas áreas tecnológicas:

- sensores y sistemas de medición.
- sistemas de control y microprocesadores.
- sistemas de mando y de accionamiento.
- diseño de ingeniería.

Para alcanzar el objetivo de integrar las diferentes tecnologías se presenta el siguiente sistema mecatrónico modular<sup>1</sup>:

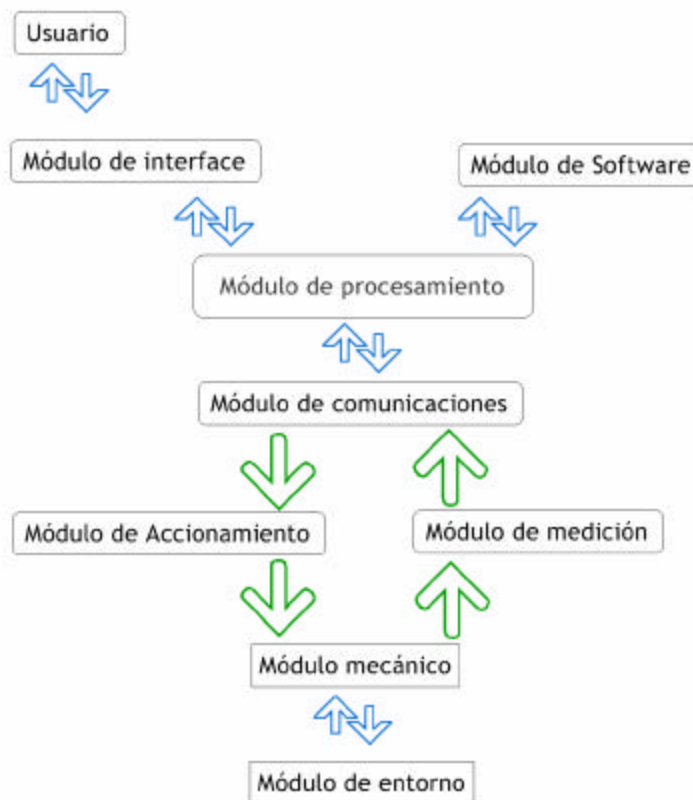


Fig. 3.3  
Sistema Mecatrónico modular

#### *Módulo de entorno*

Se refiere a todos aquellos parámetros y factores externos que pueden influir en la operación del sistema. Dentro del diseño este módulo constituye una serie de parámetros en los que el sistema debe existir y funcionar, por consecuencia incluye normas y estándares a los que se debe sujetar.

<sup>1</sup> D.A. Bradley, et al. Mechatronics: Electronics in products and processes, Ed. Chapman & Hall, Gran Bretaña, 1996, p. 11



#### *Módulo mecánico*

Este módulo representa los mecanismos y elementos estructurales físicos del sistema. La entrada a este módulo consiste de movimientos que provienen del módulo de accionamiento y que son definidos por las condiciones del módulo de entorno. La salida de este módulo provee de información al módulo de medición. A este módulo también confiere la apariencia del sistema la cual debe contener elementos estéticos.

#### *Módulo de medición*

Le concierne la reunión de información sobre el estado y comportamiento del sistema. Los parámetros de entrada son propiedades físicas que provienen del módulo mecánico mientras que los parámetros de salida dependen de la naturaleza de la información que será transmitida.

#### *Módulo de comunicaciones*

Este módulo tiene la tarea de transmitir información entre los módulos que pertenecen al sistema. Las condiciones de las entradas y salidas dependen de la naturaleza de la información a ser transmitida, la distancia a la que se va a transmitir dicha información y del ambiente en que debe ser transmitida.

#### *Módulo de procesamiento*

Le corresponde el procesamiento de la información que proviene de los módulos de medición y del módulo de interfase de acuerdo al módulo de software. La salida de este módulo determina la operación del sistema de accionamiento y provee de información al módulo de interfase.

#### *Módulo de software*

Este módulo contiene instrucciones de operación y algoritmos definidos por el sistema y control de operación del módulo de procesamiento.

#### *Módulo de Accionamiento*

Este módulo representa los “músculos” (actuadores) requeridos en el sistema para cambiar las condiciones del sistema. Las condiciones de entrada son fijadas por la salida del módulo de procesamiento y las salidas son definidas de acuerdo al tipo de movimiento requerido.

#### *Módulo de interfase*

Se encarga de la transferencia de información entre el sistema y niveles de alto lenguaje que proporciona una efectiva comunicación hombre-máquina.

### **3.1.2 ¿Por qué la NECESIDAD de automatizar el equipo 5P-II de Sulzer METCO?**

En todos los procesos de proyección térmica, una buena proyección depende de un preciso control de sus parámetros como son: el flujo de gases, el suministro eléctrico (para procesos como el de Plasma), la alimentación de polvos, alambre o barra, la temperatura del proceso, distancia de proyección, velocidad de proyección, etc. Una gran variedad de equipos están disponibles para tales efectos pero es esencial, para obtener un mejor control en la calidad del recubrimiento, que todo el equipo sea

correctamente calibrado, no solo cuando se instala por primera vez, sino que se debe efectuar la calibración periódicamente.

Una forma de tener control del proceso de proyección térmica es a través del control ya sea por computadora u otro dispositivo que nos permita monitorear y corregir parámetros del proceso (PLC, microcontroladores).

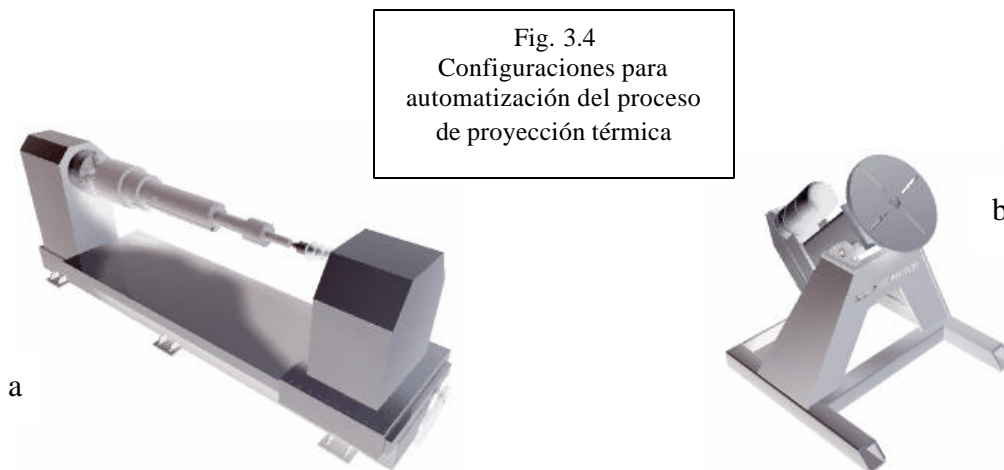
### 3.1.3 Análisis del problema

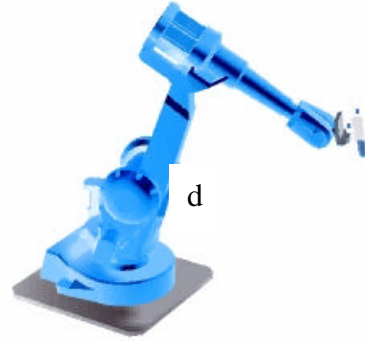
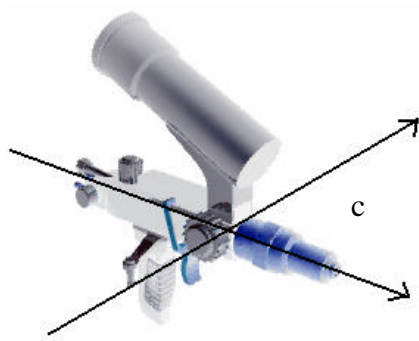
Como se vera más adelante (en especificaciones) se pretende que el equipo de proyección térmica 5P-II siga usándose de forma manual, además no es viable controlar ciertos parámetros propios de la pistola y del proceso por lo que solo podemos controlar aspectos como los movimientos y distancias.

*Cuando algunas partes, mecanismos o sistemas del equipo de proyección térmica se operan de forma manual, la única forma de asegurar una deposición uniforme es automatizando el proceso de recubrimiento con un correcto control del movimiento (de la pistola o antorcha) relativo a la pieza a ser recubierta (substrato).*

Esto no solamente provee una deposición uniforme de la masa del recubrimiento por unidad de área por unidad de tiempo, sino que, también da uniformidad en la temperatura. Obviamente este control solo es posible si se tiene una uniforme “proyección”, la cual se logra con un correcto flujo del material (polvos, alambre o barra) y un uniforme suministro de energía a la antorcha.

Un método común y sencillo de automatización para el recubrimiento de piezas cilíndricas o de revolución es hacer girar estas por medio de alguna máquina (como un torno) y mover la antorcha a lo largo del eje de rotación (figura a). Para pequeñas piezas se recomienda que estas sean montadas en un plato circular rotatorio (figura b). Largas y delgadas piezas deben ser recubiertas usando un dispositivo con movimiento en 2 ejes (figura c). Para piezas con formas más complejas deben recubrirse utilizando robots (figura d).





Con lo descrito anteriormente tenemos de forma general cuatro diferentes opciones para automatizar el equipo dependiendo de las piezas (substratos) a recubrir.

Se ha decidido trabajar solamente con las piezas cilíndricas o de revolución (figura 3.4.a) y piezas planas (figura 3.4.c). En nuestro caso quedan fuera las piezas de formas complejas (uso de robots, ver figura 3.4.d) y las piezas pequeñas (plato giratorio, ver figura 3.4.b), el primero por ser no viable en cuanto el costo y el segundo por cuestión de tiempo y recursos disponibles para este proyecto.

### **3.1.4 Especificaciones**

El diseño del sistema o mecanismo deberá cumplir con los siguientes aspectos:

1. Mejorar el efecto económico del proceso de proyección térmica, el cual se determina por la eficiencia del proceso, la longevidad del mecanismo, así como con los gastos de su construcción y de operación.
2. Aumentar la velocidad del proceso de proyección térmica con el fin de aumentar el número de piezas recubiertas, mejorar la calidad de las mismas (aumentar la eficiencia) y disminuir al mismo tiempo los gastos de operación.
3. Garantizar un plazo duradero de funcionamiento del sistema o mecanismo
4. Se buscará el abaratamiento de la fabricación del sistema, pero no se limitarán los gastos en la fabricación de piezas que son clave para la longevidad y fiabilidad del mismo.
5. Al diseñar las piezas del mecanismo o sistema, se deberá asegurar la elevada resistencia mecánica de las mismas por procedimientos que no exijan aumentar su peso. Se deberán considerar materiales de construcción que soporten cargas cíclicas y dinámicas así como elementos que amortigüen los choques y oscilaciones de las cargas. Para nuestro caso la idea es construir una máquina que nos pruebe el principio de funcionamiento y para tal efecto contamos con pedacería de Nylamid que también fue donada por Industrias ERSI-QUIM S.A. de C.V., así que nos ajustaremos al material con el que contamos.

6. En cuanto a la operación del equipo 5P-II de Sulzer Metco, este debe operar tanto en forma manual como en forma automática, es decir, dicha pistola de proyección debe operar como fue concebida por sus diseñadores originales y el dispositivo a diseñar debe acoplarse a la pistola 5P-II. Con lo anterior se infiere que el equipo no tendrá variación alguna en su diseño.

Debido a las características propias de la pistola (pistola manual) la alimentación de polvos seguirá siendo por gravedad y el control del flujo de los mismos se tendrá que hacer de forma manual: ajustar la válvula de control de alimentación, así como colocar la boquilla y la válvula de alimentación adecuada al polvo que se utilizará. La alimentación de los polvos es un aspecto importante, pero depende en mucho del manejo de estos (ver 2.2.13).

Otro aspecto que se tiene que hacer de forma manual es el encendido de la antorcha y el ajuste de esta por medio de la válvula de gases, debido a que su forma de operación resulta muy compleja para pensar en la automatización de esta sin modificar el diseño original.

La alimentación y el flujo de los gases también operarán en su forma original, sin embargo, se tendrá un mejor cuidado en el aspecto de alimentación y tratado del aire comprimido atendiendo a las recomendaciones hechas por el fabricante (ver parte 2.2.12).

Lo que se puede automatizar de la pistola es el gatillo (control de sus posiciones: encendido y apagado) con el que propiamente al estar este en la posición de encendido empieza el proceso de proyección.

7. El mecanismo o sistema debe contar con las medidas de seguridad siguientes:

- a) El proceso de proyección debe ser fiable al ser controlado por el manipulador. Los órganos de mando y de control se concentrarán, en lo posible en un mismo lugar y fuera de la zona de trabajo del sistema.
- b) Deberá existir un sistema de parada de emergencia cumpliendo con los siguientes requisitos:
  - Los movimientos peligrosos deberán detenerse.
  - La energía almacenada deberá descargarse.
  - El arranque después del paro de emergencia, solamente será posible actuando el dispositivo de control.
  - Los controles del sistema de parada de emergencia deberán ser fácilmente identificables y accesibles para cualquier operario.
- c) Deberán existir controles separados para el arranque. El arranque automático no deberá ser posible.

- d) Los dispositivos de corte o desconexión (aire, gases, electricidad, etc.) deberán ser operados independientemente y deberán estar protegidos contra acciones no intencionadas.
  - e) Deberá existir un dispositivo que indique que el mecanismo o sistema está en movimiento o que va a ponerse en movimiento.
  - f) Todas las funciones de seguridad deberán ser controladas automáticamente.
  - g) Los cables y mangueras flexibles que van al sistema o mecanismo estarán tendidos de manera que no puedan ser dañados.
  - h) El ajuste del equipo sólo deberá hacerse cuando el mecanismo o sistema esté desconectado y en posición adecuada.
  - i) Para proteger al o los dispositivos del sistema (diferentes mecanismos), estos estarán protegidos de las finas partículas pulverizadas.
8. De acuerdo al tipo de substratos a recubrir debemos tomar en cuenta que dichos substratos serán piezas largas y planas de medidas máximas de 350 x 250 x 38 mm; piezas cilíndricas de longitud máxima de 200 mm y diámetro máximo de 38 mm, y piezas pequeñas (se consideran piezas pequeñas aquellas que sean cubiertas por el área de la flama de proyección sin necesidad de mover la antorcha).
9. Del capítulo 2 se observa que:
- a) El rocío debe dirigirse hacia la pieza de trabajo y, de acuerdo a las tablas proporcionadas por el fabricante, proyectarse a la distancia recomendada.
  - b) La aplicación debe ser en dirección transversal a la pieza de trabajo siempre que sea posible.
  - c) Cuando la pieza de trabajo sea estacionaria, la velocidad transversal deberá ser, de  $\frac{1}{2}$  pulgada/s a  $\frac{1}{4}$  pulgada/s (1.27 cm/s a 0.635 cm/s respectivamente), formando bandas de  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{3}{4}$  de pulgada (1.27cm a 1.905 cm respectivamente) de ancho en cada paso.
  - d) En piezas cilíndricas rotatorias, la velocidad de la superficie deberá ser de 20 a 100 pies/min (6.096 m/min a 30.48 m/min respectivamente), con una velocidad de avance transversal de  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  pulgada por revolución (0.635 cm/rev a 1.27 cm/rev respectivamente).

Por lo anterior, no es viable controlar algunos parámetros importantes del proceso sin modificar el diseño original, pero si es posible controlar otros que inciden de manera directa con el terminado de las piezas, como es el control de los movimientos (de la pistola o antorcha) relativos a la pieza a ser recubierta (substrato). De lo anterior podemos ver que en realidad no se tratará de una automatización, sino de una semiautomatización del equipo.

## 3.2 Subsistemas a desarrollar

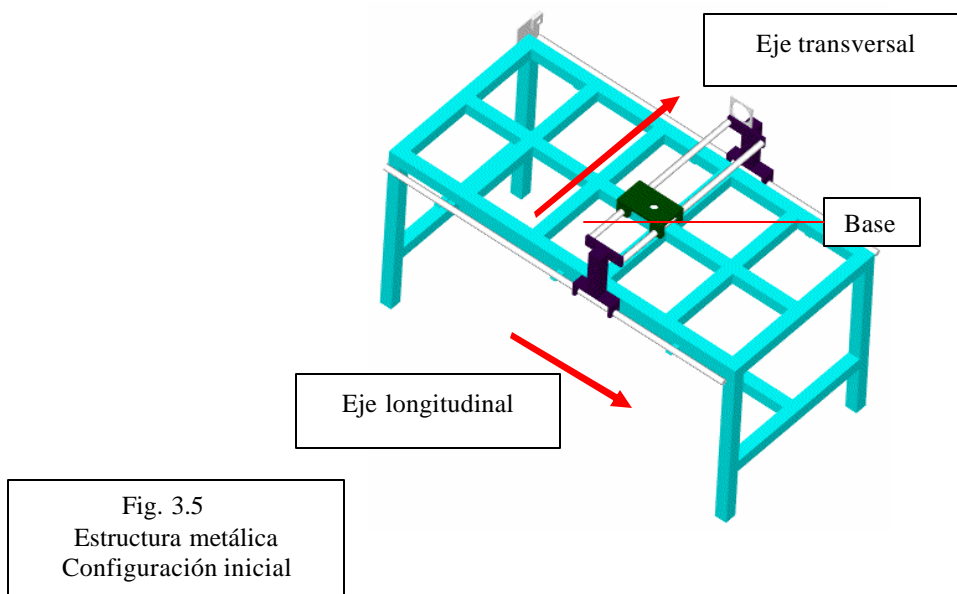
El sistema final debe contar con los siguientes dispositivos:

- A. Dispositivo controlador del gatillo de la pistola de proyección térmica 5P-II de Sulzer Metco.
- B. Dispositivo de soporte de la pistola de proyección 5P-II.
- C. Dispositivo controlador de la distancia de proyección entre el sustrato y la pistola, de acuerdo al tipo de polvo.
- D. Dispositivo controlador del movimiento de rotación a sustratos cilíndricos y de revolución.
- E. Dispositivo controlador de los movimientos de avance transversal.
- F. Dispositivo controlador de los movimientos de avance vertical.

### 3.2.1 Antecedentes

El Laboratorio de Recubrimientos Electrolíticos de la Facultad de Ingeniería donó una estructura metálica para este proyecto, dicha estructura contaba ya con dos ejes móviles. El primero consta de una plataforma del ancho de la mesa apoyada sobre dos tubos y con movimiento a lo largo de la misma. La transmisión del movimiento es proporcionada por un tornillo sinfín y una base roscada unida a la plataforma.

El segundo eje se encuentra montado sobre la plataforma antes mencionada y consta de un sistema de tracción similar que es de tornillo sinfín con base roscada unida a la plataforma móvil y dos guías laterales.



La mayoría de los equipos que existen comercialmente tienen la pistola de proyección en un arreglo colgante, es decir, la pistola cuelga del mecanismo de movimiento para evitar que los polvos caigan en los diferentes mecanismos y evitar que se dañen.

Se decidió utilizar la base con la que se cuenta, y por la configuración de esta, es muy difícil y costoso tener a la pistola colgando por lo que se decidió montar la pistola sobre la base "A" tomando en cuenta que se le debe dar protección a los diferentes mecanismos con una especie de camisas que los envuelvan e impidan el paso de los polvos y demás partículas que puedan llegar a dañar los mecanismos.

Con base en las características de esta estructura metálica ya existente, se diseñó, adaptó y se montó cada uno de los sistemas posteriores. Se pensó que, dadas las dimensiones de la mesa, en uno de los extremos se podía colocar el dispositivo para sujetar y mover piezas de revolución, mientras que en el otro extremo se podía colocar el sistema de sujeción y movimiento de piezas planas.

Cabe mencionar que se contaba con un PLC modelo millenium II de la marca Crouzet con 20 puntos de conexión, cilindros neumáticos y varios motores que se encontraban en desuso y que fueron donados por Industrias ERSI-QUIM S.A. de C.V. para este proyecto.

De acuerdo al esquema del sistema mecatrónico modular presentando al inicio de este capítulo podemos mencionar que el PLC cubre los siguientes módulos:

- *Módulo de interfase*: porque cuenta con un teclado ergonómico a través del cual se puede introducir los diferentes valores y además cuenta con un display LCD retroiluminado que nos indica el estado del sistema, mensajes de usuario, así como los diferentes valores (velocidades y otros parámetros); en resumen proporciona la comunicación usuario-máquina.
- *Módulo de software*: El PLC cuenta con un software de programación *CLS (Crouzet Logic Software)* para la PC que nos proporciona un medio de comunicación, simulación, monitorización y supervisión, carga / descarga de programas, edición de proyectos personalizados, compilación automática del programa y ayuda en línea.
- *Módulo de procesamiento*: Con el algoritmo de programación establecido, el PLC, determina qué acción tomar de acuerdo a las señales de entrada, proporcionando a la salida el accionamiento requerido.
- *Módulo de comunicaciones*: En particular este PLC, es el modelo XT-20 y cuenta con 8 entradas analógico-digitales más 4 entradas digitales y 6 salidas que pueden manejarse estáticas digitales o *PWM (Pulse Width Modulation* o modulación de ancho de pulso) y dos salidas estáticas digitales.

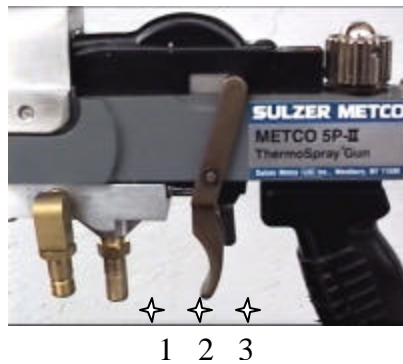
### 3.2.2 Dispositivo controlador del gatillo de la pistola de proyección térmica 5P-II de Sulzer Metco.

#### Módulo mecánico:

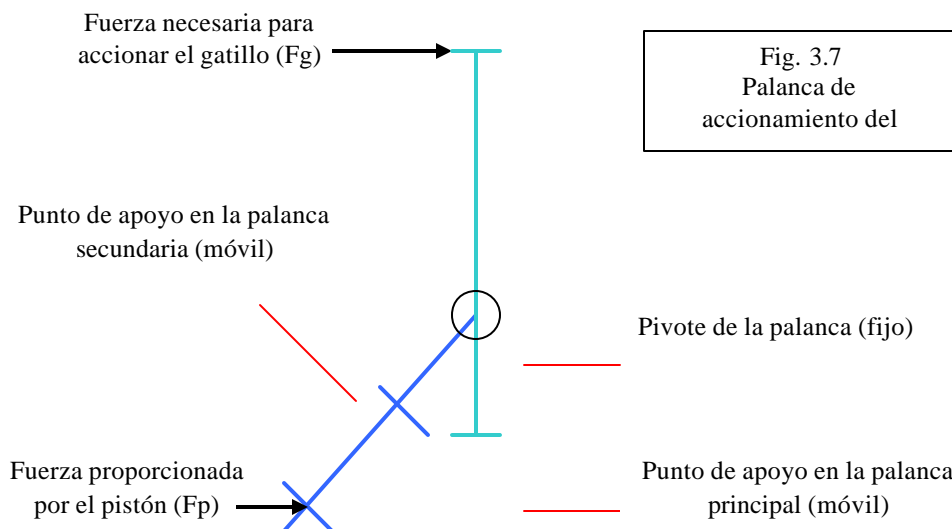
La fuerza requerida para accionar el gatillo es de 90N, se cuenta con un pistón neumático de doble efecto (6bars, marca FESTO) que ejerce una fuerza de 45N por lo que se pensó en utilizar una palanca simple (módulo mecánico).

La fig. 3.6 muestra el gatillo en la posición de apagado (1), la posición (2) es la de encendido; El gatillo de la pistola es de dos posiciones, pero para acceder a la posición de encendido (2) se debe llevar el gatillo hasta una tercera posición (3).

Fig. 3.6  
Posiciones del gatillo

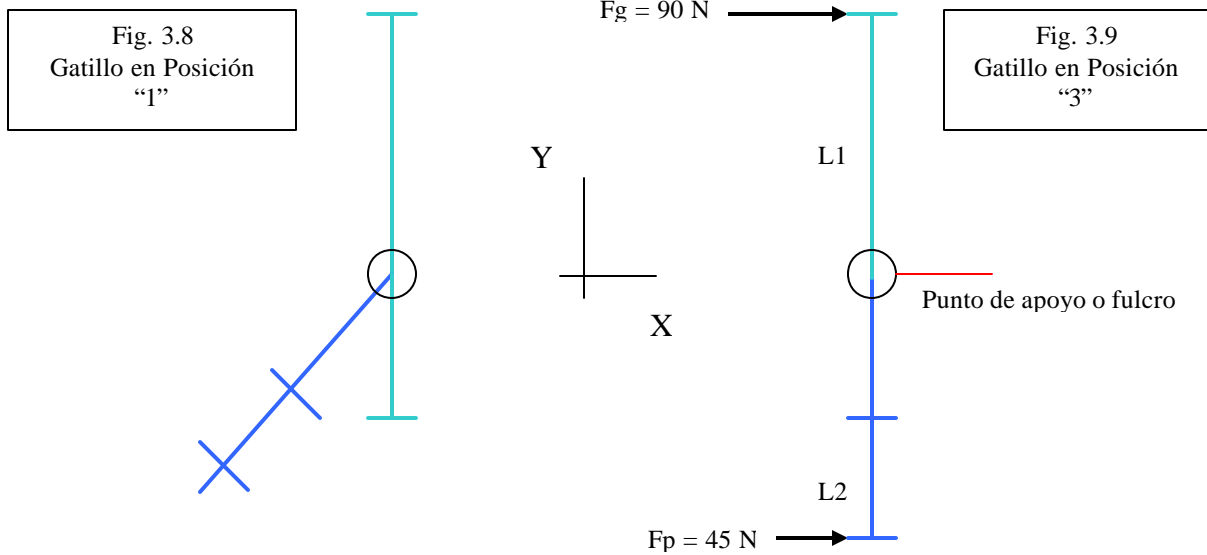


Debido a las características del pistón (de doble efecto), el diseño de la palanca se basó en llevar el gatillo hasta la posición (3) para poder encender la pistola y llegar hasta la posición (2). El pistón no tiene posiciones intermedias, así que se buscó una configuración de palanca que permitiera dicha posición. La solución fue hacer una palanca simple en dos piezas como se muestra en la siguiente figura:





Al realizar el análisis de cuerpo libre en la palanca se obtiene lo siguiente:



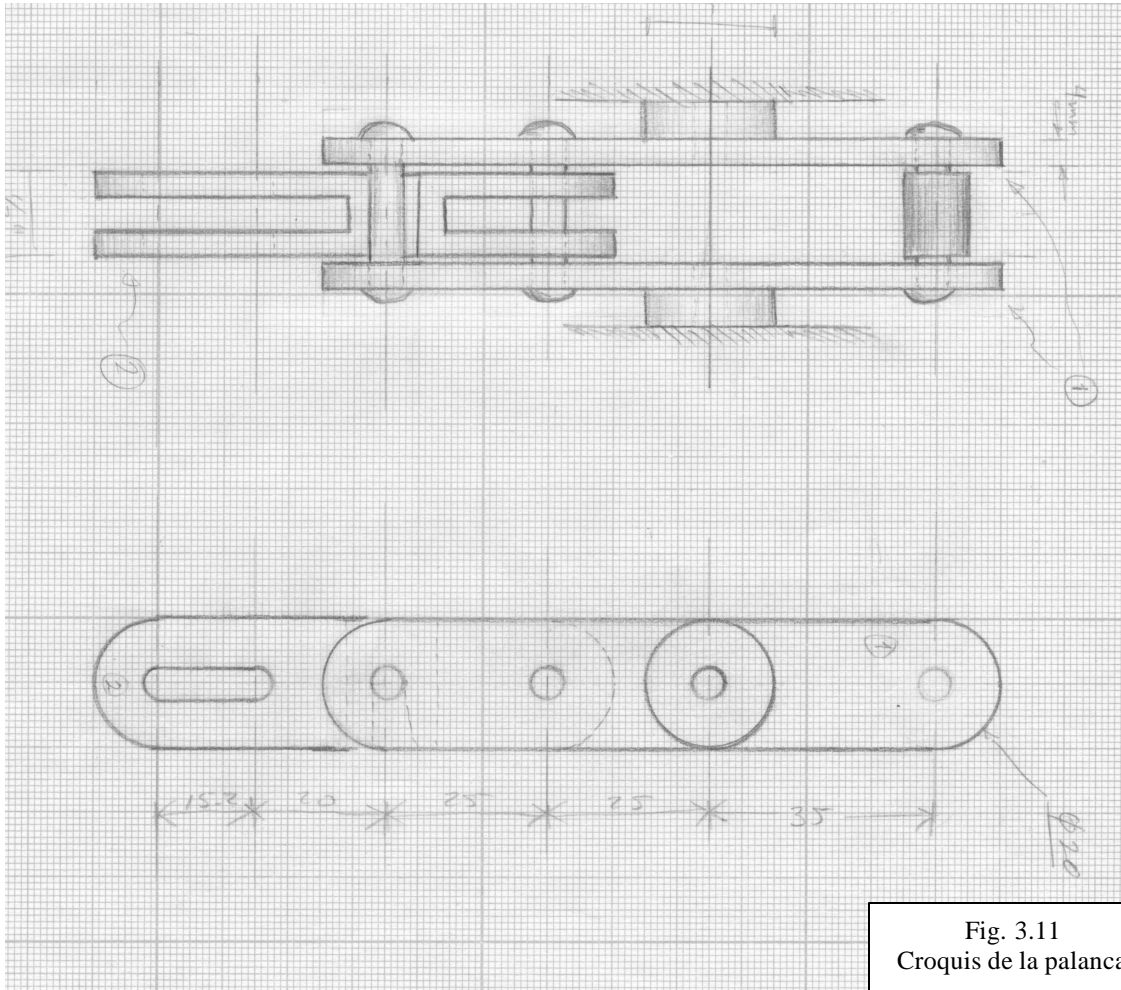
Sabemos que  $L1 \cdot Fg = L2 \cdot Fp$ , y de acuerdo a las fuerzas se puede observar que  $L2=2 \cdot L1$ .

Tomando en cuenta que el pistón debe ir en el mismo plano que la fuerza del gatillo y como ya se mencionó: no se modificará la pistola; se ubicó el pistón justo debajo del mango de la misma, por lo que la distancia del gatillo al centro del vástago del pistón es de mínimo 9 cm, considerando el cuerpo del pistón lo ubicamos a una distancia de 10.5cm. (Ver la Fig. 3.10).



Por lo tanto,  $L1 + L2=10.5$  cm y  $L2=2 \cdot L1$ , resolviendo el sistema, se obtiene que  $L1=3.5$  cm y  $L2=7.0$  cm.

La Fig. 3.11 muestra la palanca que se fabricó:

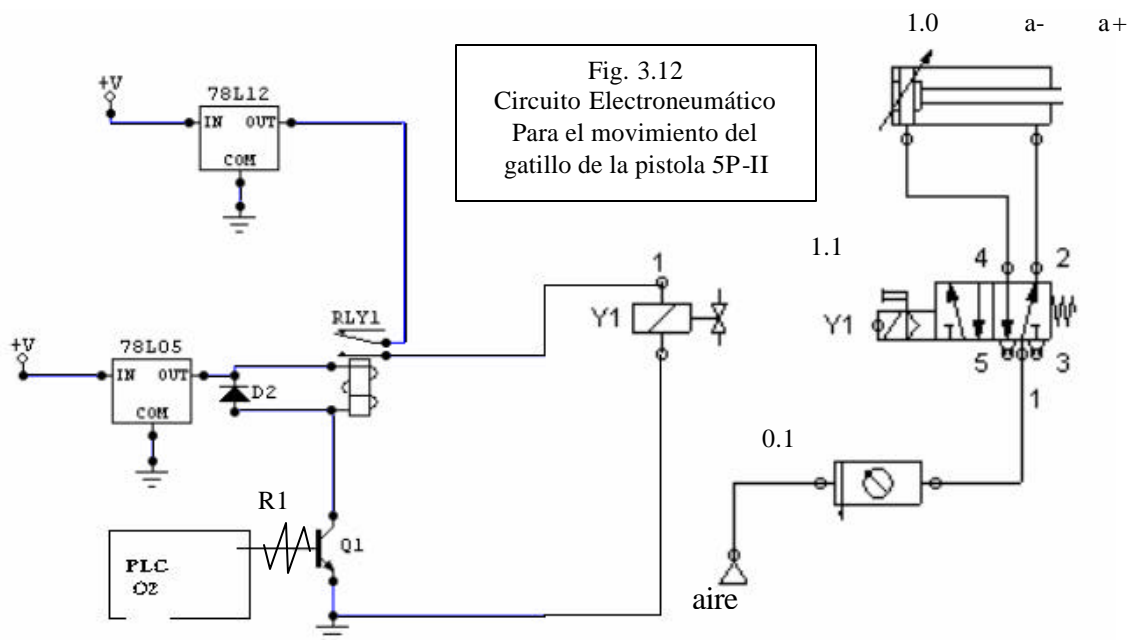


Nota: ver planos de detalle en anexo A.

**Módulo de accionamiento:**

El control de la señal se hace por medio del PLC, utilizando un transistor como interruptor para activar o no el relevador (RLY1), este a su vez manda el voltaje al solenoide de la válvula que controla el estado del actuador (pistón).

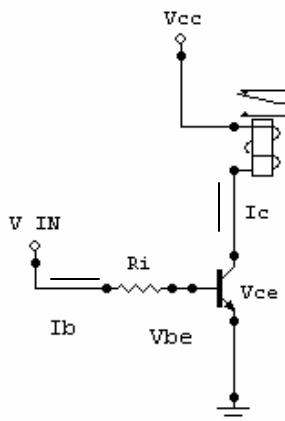
Así al mandar la señal (O2) del PLC el pistón 1.0 pasa de (a-) a (a+) en nuestro caso estas posiciones sirven para activar o desactivar la palanca.



ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
LM7805	Regulador 5v
LM7812	Regulador 12v
RLY1	Relevador 5v 1 polo 2 tiros
D2	Diodo IN4001
1.1	Electro válvula 5/2
aire	Toma de aire 6bars
0.1	Unidad de mantenimiento
1.0	Cilindro de doble efecto
Q1	Transistor TIP142
R1	Resistencia
Y1	Pilotaje

Se muestra a continuación los cálculos para obtener el valor de **R1**  
 El siguiente diagrama presenta al transistor como interruptor:

Fig. 3.13  
 El transistor como interruptor



Tenemos que

$$V_{IN} = V_{be} + R_i \cdot I_b \quad \dots (1)$$

Se quiere encontrar el valor de  $R_i$

De las características del relevador  $V_{cc} = 5V$  y  $I_c = 0.072 A$

De las características del Transistor  $V_{be} = 3V$   
con una ganancia de:

$$\beta = 1000 = I_c / I_b \quad \dots (2)$$

De (1)  $R_i = (V_{IN} - V_{be}) / I_b$ , sustituyendo  $I_b$  de (2)

$$R_i = (V_{IN} - V_{be}) 1000 / I_c$$

Sustituyendo valores  $R_i = (5 - 3)1000 / 0.072$

Por lo tanto  $R_i = 27.7 k\Omega$

### 3.2.3 Dispositivo de soporte de la pistola de proyección 5P-II.

#### Módulo mecánico:

Partiendo de la geometría de la pistola, se diseñó una base en la cual se pudiera acoplar el sistema de accionamiento del gatillo y que sirviera como soporte. Se pensó en varias posibilidades como las siguientes:

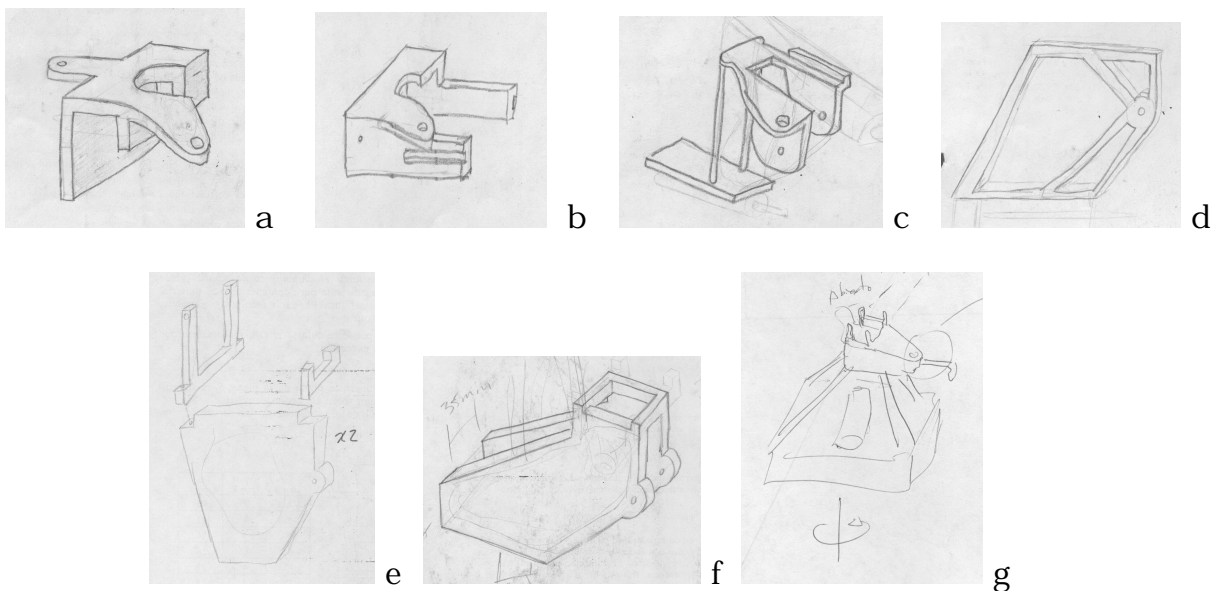
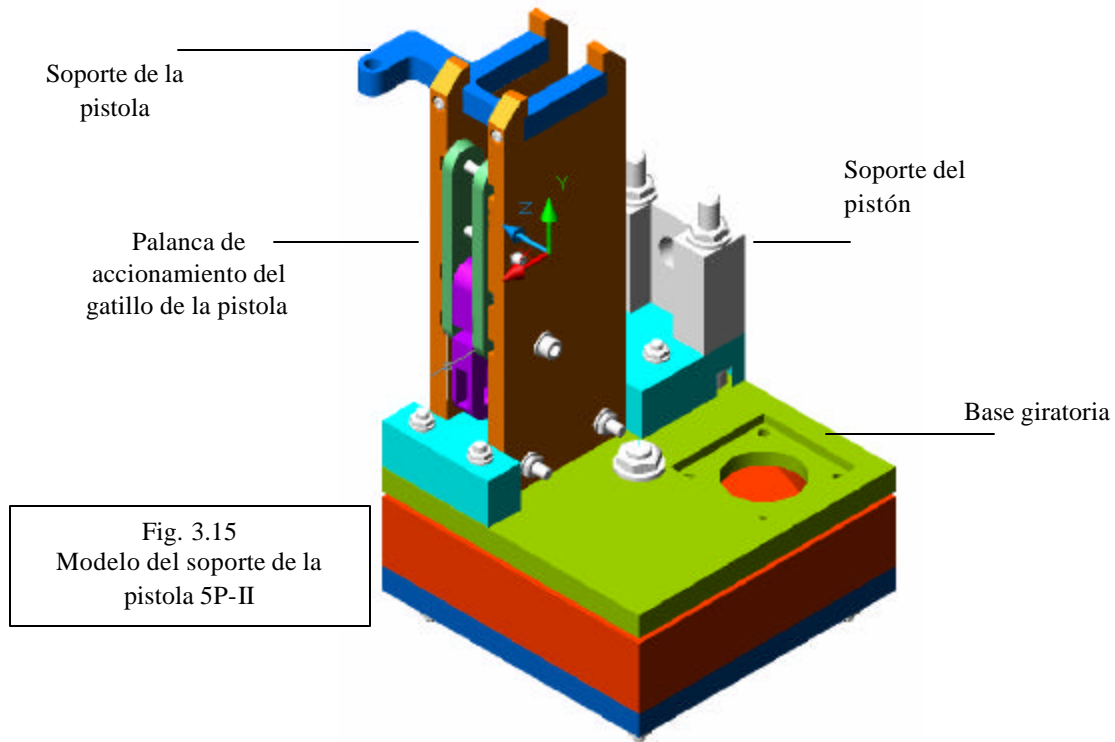


Fig. 3.14  
Conceptos preliminares del  
soporte

Se consideró que la mejor opción era una combinación de los bocetos 3.14.e y 3.14.f, debido a su factibilidad económica y de manufactura (disposición del material y sencilla fabricación) (ver plano de detalle en Anexo A).

Para la parte de giro (posicionamiento para proyectar substratos planos o de revolución) se pensó en un sistema similar al de un Scorbobot ER-V plus (la base -eje 1-) ver más detalle en el módulo de accionamiento.

Esta base (ver Fig. 3.15) se fija a la base "A" de la estructura metálica. (Ver Fig. 3.5)



### **Módulo de accionamiento:**

La base se gira manualmente para posicionarla de acuerdo al tipo de substrato a recubrir, pero se contempló la posibilidad de operar este movimiento por medio de un motor, ya sea de pasos o de un servo motor.

Para tal efecto, se dejó un sistema de engranes como se muestran en las siguientes fotos:

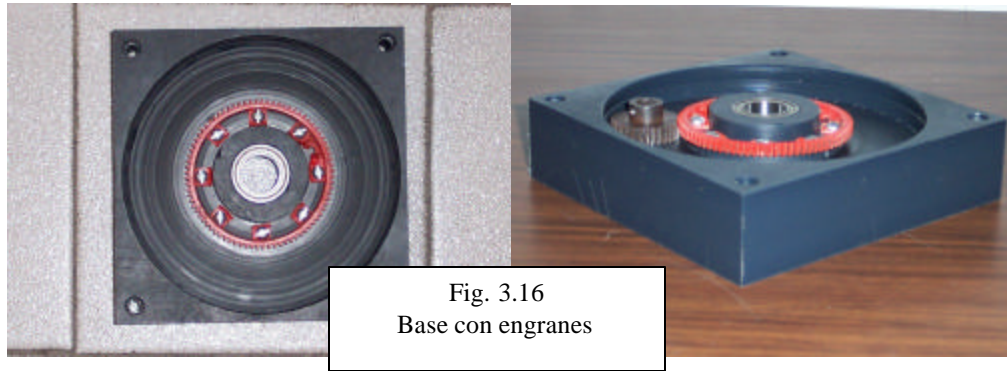


Fig. 3.16  
Base con engranes

**Módulo de medición:**

La base cuenta con dos sensores de posición (microinterruptores) no habilitados, los cuales indicarían al PLC que tipo de pieza se va recubrir en el caso de que se instale un motor para el movimiento de la base.

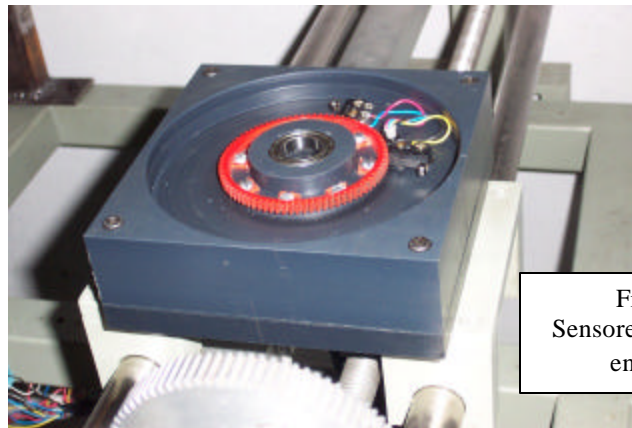
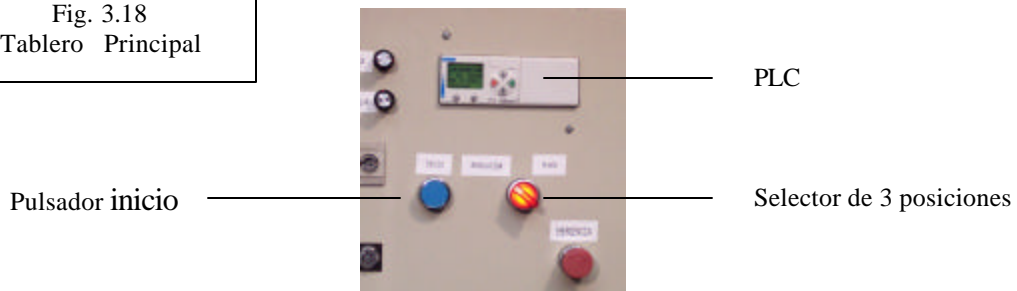


Fig. 3.17  
Sensores de posición  
en la base

En nuestro caso el posicionamiento de la pistola viene dado por un selector ubicado en el tablero principal (ver manual de funcionamiento - capítulo 4 -).

A continuación mostramos la foto del tablero principal (Fig. 3.18) y más abajo el diagrama de conexiones (Fig. 3.19).

Fig. 3.18  
Tablero Principal



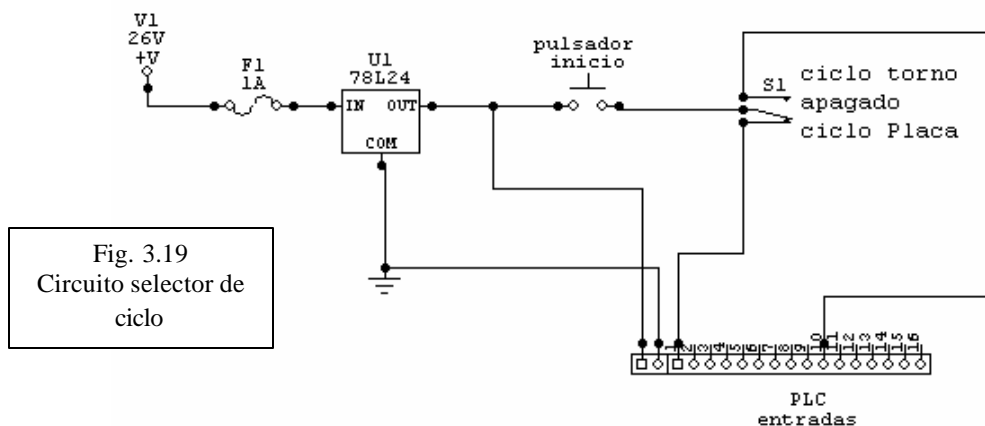


Fig. 3.19  
Circuito selector de ciclo

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
V1	voltaje de alimentación + 26v
F1	Fusible 1A
U1	Regulador de voltaje 24v LM7824
PULSADOR	pulsador NA
S1	Selector de 3 posiciones
PLC	Entradas del PLC XT20 Millenium II

### 3.2.4 Dispositivo controlador de la distancia de proyección entre el substrato y la pistola, de acuerdo al tipo de polvo.

#### ***Módulo mecánico:***

Transmisión por tren de engranes:

Un modo sencillo de transmitir movimiento de un árbol o eje rotatorio a otro es mediante un par de cilindros o ruedas que se encuentran en contacto en su superficie.

La transmisión por tren de engranes es una variante de este tipo de mecanismo, el cual transfiere potencia mediante el contacto, y puede hacerlo en grandes niveles de fuerza motriz y siempre que sea necesario una sincronía en fase absoluta y los niveles de potencia sean considerables.

En este caso, se requiere transmitir un par de torsión lo suficientemente grande para poder mover la plataforma donde están instalados el eje transversal y el sistema de soporte de la pistola. La sincronía de ambos ejes es necesaria, ya que se busca la mayor precisión en cuanto a la distancia que recorre la plataforma.

Como se mencionó con anterioridad, la estructura metálica cuenta con una plataforma de movimiento longitudinal, se trata de un mecanismo de tornillo sinfín y un engrane acoplado originalmente a un motor de pasos.

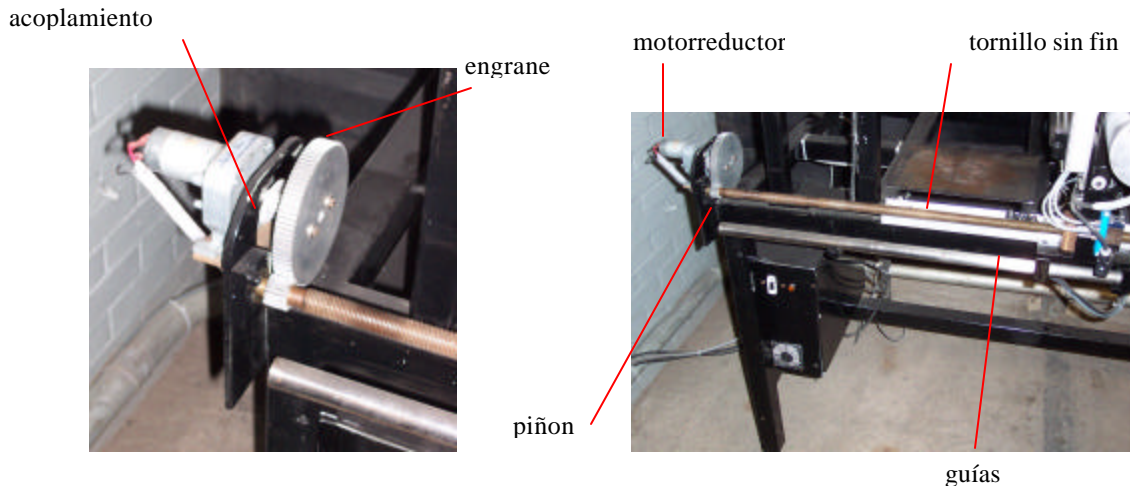


Fig.3.20  
Transmisión eje longitudinal (distancia de proyección)

### **Módulo de accionamiento:**

Para poder controlar la distancia de proyección se quitó el motor a pasos debido a que no se encontraba en buen estado y se acopló un motorreductor de corriente directa al tornillo sin fin por medio del engrane original.

El motivo de no sustituir el motor original por otro del mismo tipo se debió a su elevado costo y tiempo de entrega. Además como ya se mencionó se tenían a disposición varios motorreductores donados por Industrias ERSI-QUIM.

El uso de un motorreductor de corriente directa se justifica ya que para este movimiento en particular se obtiene una par de torsión suficiente y no se requiere de gran velocidad ni variación de ella ya que, una vez determinada la distancia de proyección, esta quedará fija durante todo el proceso.

Se fabricó el acoplamiento del motorreductor al engrane original. Ver Fig. 3.20

A continuación se muestran los diagramas eléctricos de la etapa de potencia, así como sus respectivos cálculos para su elaboración.



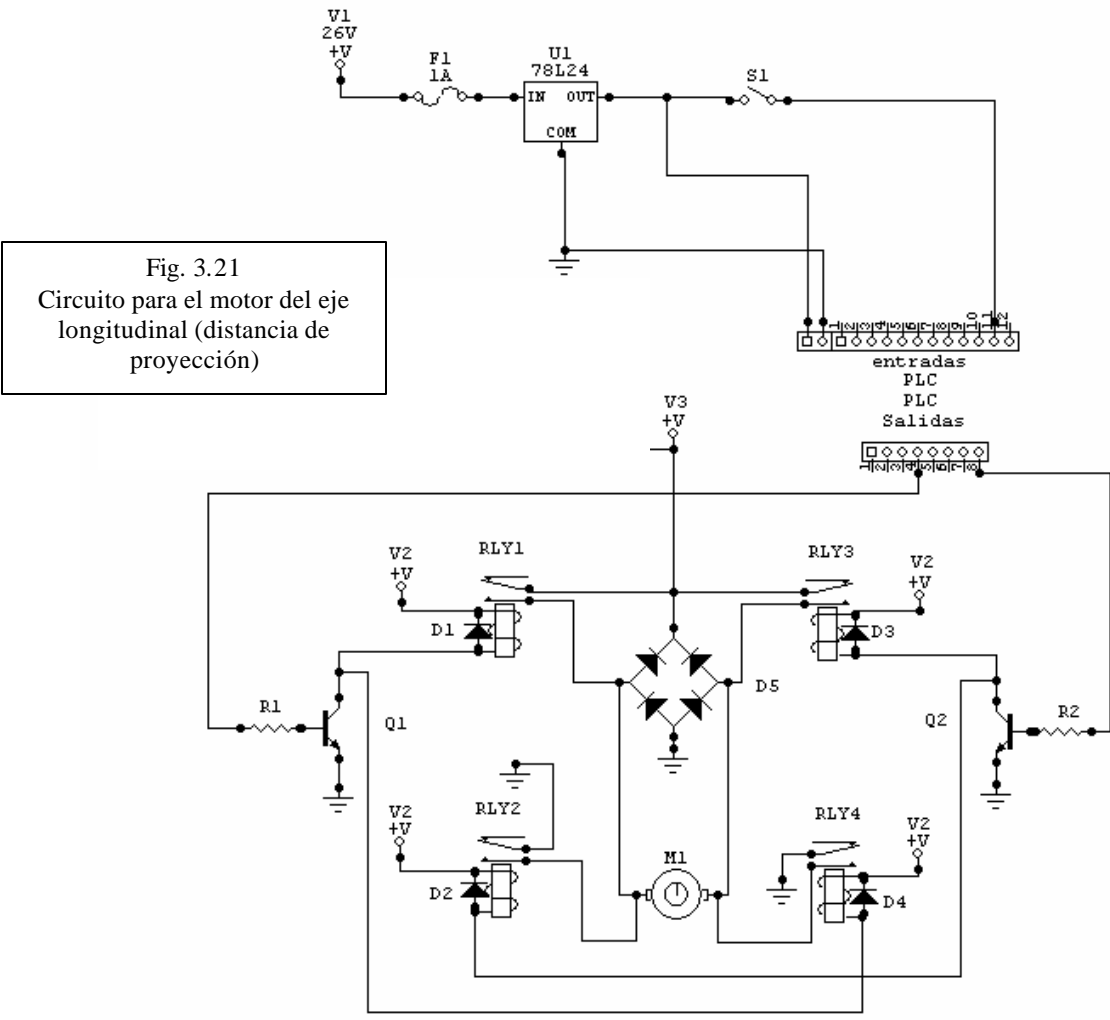


Fig. 3.21  
Circuito para el motor del eje longitudinal (distancia de proyección)

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
V1	Voltaje +26V DC
F1	Fusible 1 A
U1	Regulador 24V LM7824
Q1	Transistor TIP142
S1	Interruptor (habilita la función de distancia de proyección)
PLC	PLC XT20 Millenium II
V3	Voltaje 24V DC
V2	Voltaje 5V DC
RLY1,2,3,4	Relevador 1polo 2 tiros, 5V
R1, R2	resistencias
D1,2,3,4	Diodos IN4001
D5	Puente de diodos
M1	Motor 24v DC

Las resistencias **R1** y **R2** se calcularon de acuerdo al procedimiento mostrado en la sección 4.2.1 solo que en este caso **Ic** por tratarse de 2 relevadores es la suma de las corrientes es decir  $I_{cT} = I_{c \text{ RLY1}} + I_{c \text{ RLY4}}$

$$I_{cT} = 0.144 \text{ A}$$

Por lo tanto **R1** = **R2** = 13.89 k?

**Módulo de medición:**

Se colocaron dos sensores de posición (microinterruptores de rodillo) sobre una base móvil, dichas bases corren en una regleta para poder ajustar la distancia.

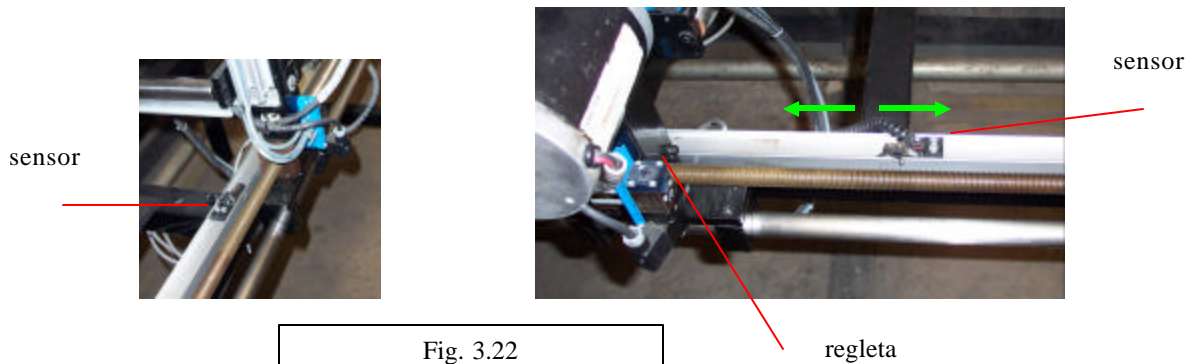


Fig. 3.22  
Sensores de posición para la distancia de proyección

Las señales de dichos sensores van conectadas al tablero principal y el control del motorreductor se efectúa por medio del teclado del PLC (vea manual de funcionamiento capítulo 4).

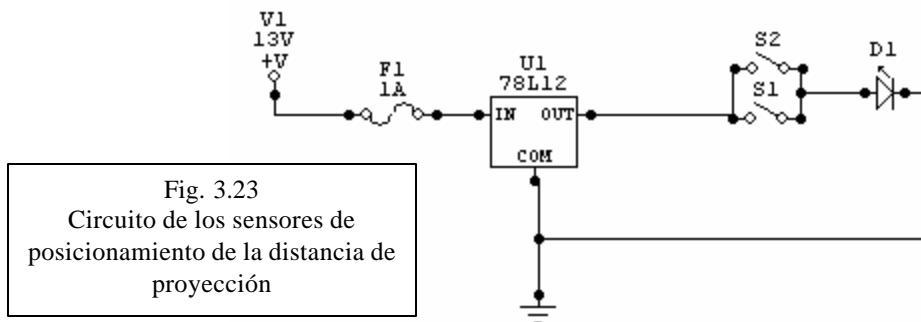


Fig. 3.23  
Circuito de los sensores de posicionamiento de la distancia de proyección

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
F1	Fusible 1A
U1	Regulador 12V LM7812
S1, S2	Sensores de rodillo
D1	Led 12V

### **3.2.5 Diseño del dispositivo de rotación a substratos cilíndricos y de revolución.**

#### **Módulo mecánico:**

La sujeción de las piezas de revolución se hará básicamente con un chuck o mandril de torno acoplado a un eje rotatorio. El empleo del chuck se justifica ya que es un sistema de gran sencillez probado con anterioridad y cumple con nuestra necesidad. En este caso se utiliza uno con las siguientes características:

Marca: Yantai  
Número de Mordazas: 3  
Apertura Máxima de Mordazas: 1.5 pulgadas (38.1 mm)  
Masa: 3.5 kg.

Transmisión por banda

Una forma de transmitir movimiento de un árbol o eje rotatorio a otro es mediante un par de cilindros o ruedas lisas en contacto rodante. Siempre que exista la fricción suficiente en la interfaz de contacto, este sencillo mecanismo funcionará bien. No habrá deslizamiento entre los cilindros hasta que la fuerza de rozamiento máxima disponible se exceda por las demandas de la transmisión de torque o par torcionante.

La transmisión por banda es una variante de este tipo de mecanismo, el cual transfiere potencia mediante la fricción, y puede hacerlo en grandes niveles de fuerza motriz, siempre que se usen bandas con la sección transversal suficiente y siempre que no sea necesario una sincronía en fase absoluta y los niveles de potencia sean moderados.

Dado que, para el caso del sistema de rotación del sustrato, no se requiere de sincronía de fase absoluta y los niveles de potencia son muy bajos, puesto que no intervienen fuerzas transversales que se apliquen directamente al sustrato, la transmisión por banda resulta ser la mejor opción ya que cuenta con las siguientes ventajas (en comparación con transmisiones de engrane o de cadena):

- Es silencioso.
- No requiere lubricación.
- Bajo costo.
- Elimina algunos problemas de alineación y excentricidad (en comparación de acoplamientos directos).
- Es un elemento flexible de transmisión de potencia y por tanto absorben vibraciones y choques, de los cuales tienden a transmitir sólo un mínimo al eje conectado.
- Bajo costo de mantenimiento y larga vida útil.

DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DEL MOTOR.

INTRODUCCIÓN:

Momento de Inercia de Masa (Segundo Momento Másico).

- *Torque.*

Tomando en cuenta que para sistemas en rotación y en traslación, se aplica la 2ª Ley de Newton, se puede decir que para la forma rotacional es:

$$\mathbf{T} = \mathbf{I} \mathbf{a}$$

Donde **T** es el Torque o momento de fuerza rotatorio, **a** es la aceleración angular, e **I** es el momento de inercia. Este concepto se considera también en relación con algún eje geométrico de rotación, con gran frecuencia, uno que pase por el centro de gravedad del cuerpo. El momento de inercia de masa de un elemento diferencial (dm) es igual al producto de su masa y el cuadrado de su distancia **r** desde el eje de interés.

$$\mathbf{I} = \int \mathbf{r}^2 \mathbf{d}m$$

El exponente 2 en la distancia radial **r** de esta propiedad corresponde al segundo momento másico.

En el caso de un martillo, donde la cabeza es de una masa considerablemente más grande que la del mango, cuando se toma apropiadamente desde el extremo del mango, la distancia radial hasta la masa de la cabeza, es relativamente grande. Su aportación al momento total **I** del cuerpo es proporcional al cuadrado de la distancia desde el eje de rotación; por lo tanto se requiere de un torque considerablemente grande para acelerar angularmente el martillo, cuando se le sujeta desde el extremo en forma normal, que si se le agarra cerca de la cabeza.

- *Capacidad de almacenamiento de energía cinética de un cuerpo.*

Por otro lado, la Capacidad de almacenamiento de energía cinética de un cuerpo está relacionado con la velocidad lineal **v** de acuerdo con:

$$\mathbf{EC} = \frac{1}{2} \mathbf{m} \mathbf{v}^2$$

y con la velocidad angular **v** en un sistema rotacional con:

$$\mathbf{EC} = \frac{1}{2} \mathbf{I} \mathbf{V}^2$$

En consecuencia, la energía cinética almacenada en el martillo es proporcional a su momento de inercia **I** y a su velocidad angular al cuadrado, **v<sup>2</sup>**. Se puede observar entonces que para el mismo martillo, mencionado anteriormente, al tomarlo cerca de la cabeza se reduce su **I**, esto hace disminuir la energía cinética disponible para un golpe efectivo sobre un clavo.

El momento de inercia másico es, entonces, un indicador de la capacidad del cuerpo para almacenar energía cinética rotacional, y también de la capacidad del torque necesario para acelerar angularmente al cuerpo que inicia un giro o está ya en rotación. A menos que se esté diseñando un dispositivo destinado al almacenamiento y transferencia de grandes cantidades de energía mecánica (prensa, punzonadora,

trituradora, etc.), siempre se tratará de minimizar los momentos de inercia máxicos de partes rotatorias.

Así como la masa es una medida de la resistencia a la aceleración lineal, el momento de inercia de masa lo es de la resistencia a la aceleración angular. Un valor grande de **I** requerirá un mayor torque, y por lo tanto un motor de mas potencia, para obtener una misma aceleración angular.

- *Potencia.*

Dado que la potencia se define como el producto del Torque por la velocidad angular:

$$\mathbf{Pot = T v}$$

Entonces:

$$\mathbf{Pot = (I a) v}$$

Por otro lado, la potencia de un motor eléctrico está dada por:

$$\mathbf{Pot = V (I_R)}$$

Donde:

**V**, es el voltaje nominal del motor.

**I<sub>R</sub>**, es la corriente nominal del motor.

Para la selección del motor para el sistema de rotación del sustrato, el proceso es el siguiente:

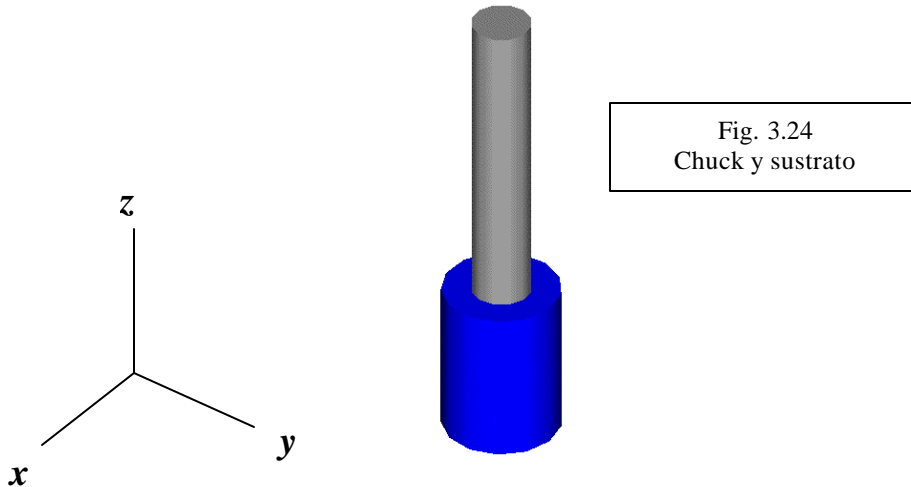
#### 1. Consideraciones.

Antes de empezar el análisis, se harán las siguientes consideraciones:

- a) El sustrato más grande que se utilizará será una barra de *cold rolled* de 38.1mm (1.5 pulgadas) de diámetro y una longitud de 200 mm y cuyo masa se estima en 3.5 kg.
- b) El análisis del chuck se hará idealizándolo como un cilindro sólido de acero de diámetro 75 mm y 100 mm de longitud y cuya masa se estima en 1.5 kg.
- c) Se considera que la fricción en los rodamientos de las chumaceras es despreciable.
- d) No existen fuerzas transversales que actúen directamente sobre el sustrato, salvo la del chorro de aire con la que son proyectados los polvos y que es despreciable.
- e) La velocidad angular máxima será de 61 RPM =6.39 rad/seg.
- f) Una vez alcanzada la velocidad deseada en el sustrato, esta no tendrá variaciones.
- g) Se utilizará una banda plana cuya tensión máxima será de 1kg<sub>f</sub> equivalente a 9.81 N.

- h) Se hará la suposición de utilizar poleas de 1.3 cm de radio.
  - i) Se supone una flecha de *cold rolled* AISI C1015 de esfuerzo máximo permisible de  $145 \times 10^6$  Pa.
2. Desarrollo.

Sabiendo que:  $\mathbf{Pot} = (\mathbf{I} \mathbf{a}) \mathbf{v}$ , y que  $\mathbf{v} = 6.39$  rad/seg, se procede al cálculo de  $\mathbf{I}$ , para dicho cálculo se idealiza el chuck y al sustrato más grande como si fuera una sola pieza con las siguiente configuración:



De acuerdo al sistema cartesiano de referencia sólo nos interesa el momento de inercia sobre el eje z, por lo tanto, el cálculo de  $\mathbf{I}_z$  es:

$$\mathbf{I}_z = \frac{1}{2} (\mathbf{m}_1 \mathbf{R}_1^2) + \frac{1}{2} (\mathbf{m}_2 \mathbf{R}_2^2)$$

Donde:

- $\mathbf{m}_1$  = masa del chuck = 3.5 kg.
- $\mathbf{R}_1$  = Radio del chuck = 37.5 mm.
- $\mathbf{m}_2$  = masa del sustrato = 1.5 kg.
- $\mathbf{R}_2$  = Radio del sustrato = 38.1 mm

El resultado es:  $\mathbf{I}_z = 2759.72 \text{ kg mm}^2 = 2759.72 \times 10^{-6} \text{ kg m}^2$

Suponiendo que parte del reposo y requiere alcanzar una velocidad angular  $\mathbf{v} = 6.39$  rad/seg en 0.05 seg, entonces:  $\mathbf{a} = \mathbf{v} / \mathbf{t}$ , donde  $\mathbf{t}$  es el tiempo en que se quiere alcanzar dicha velocidad. Por lo tanto  $\mathbf{a} = 127.8$  rad/seg<sup>2</sup>.

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior, se tiene que la potencia mínima requerida es:

$$\begin{aligned} \mathbf{Pot} &= (2759.72 \times 10^{-6} \text{ kg m}^2) (127.8 \text{ rad/seg}^2) (6.39 \text{ rad/seg}) \\ \mathbf{Pot} &= 2.254 \text{ (kg m/s}^2) \text{ (m/s)} \\ \mathbf{Pot} &= 2.254 \text{ N m/s} \end{aligned}$$

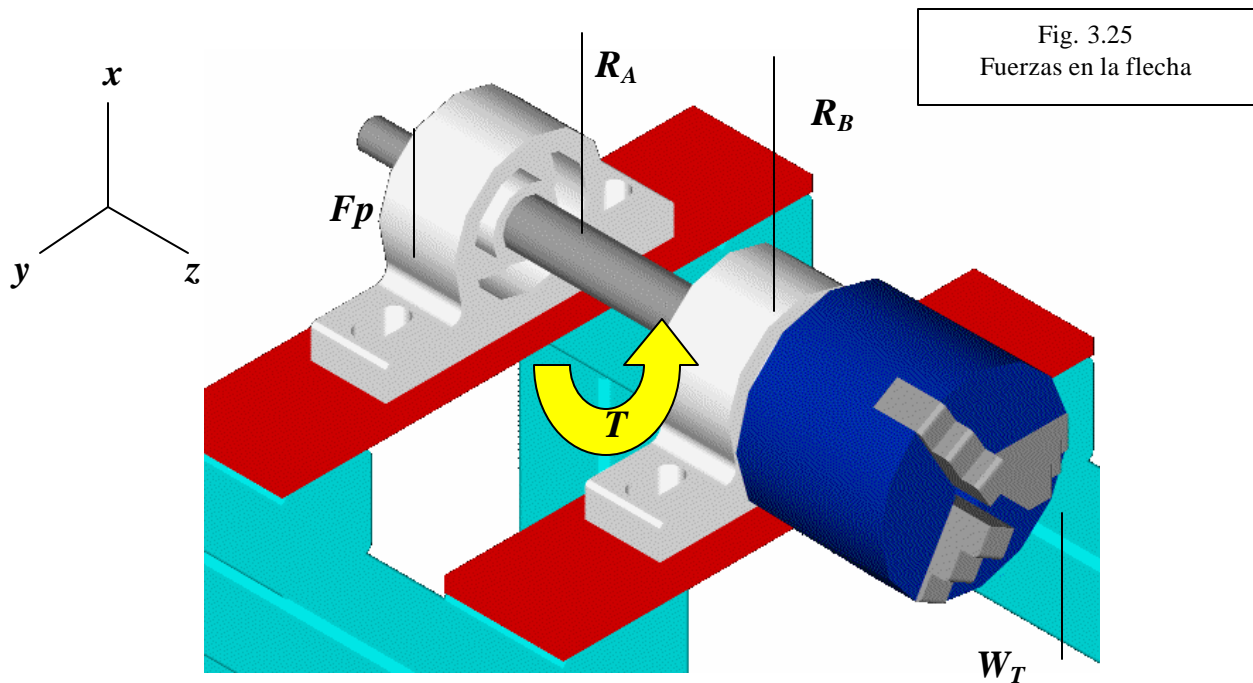
**Pot** = 2.254 W = 0.003 HP.

Se observa que la potencia mínima que necesita un motor para acelerar angularmente al chuck y al sustrato es de 2.254 W.

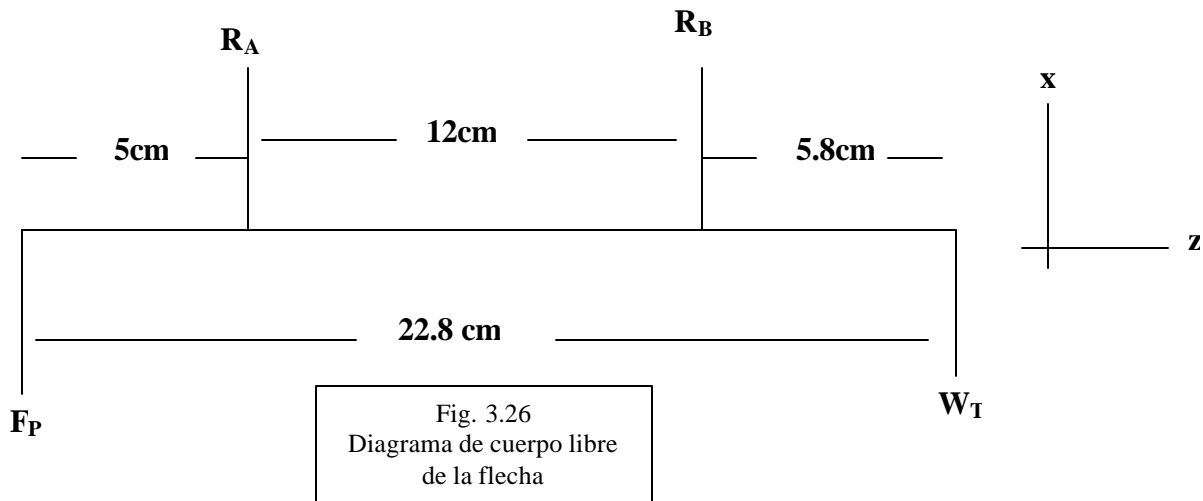
Se buscó en tablas de fabricantes un motor con las siguientes características:

Potencia: 2.5 W  
 Velocidad: 6.5 rad/seg.

Con estos datos, se procedió a calcular las reacciones en el sistema y calcular los esfuerzos para caracterizar la flecha de la siguiente forma:



El diagrama de cuerpo libre del sistema queda de la siguiente forma:



Donde:

- $\mathbf{F}_P$ , es la tensión ejercida por la banda que es igual a 9.81 N sumado a una fuerza resultante del par torcional ( $F_T$ ).
- $\mathbf{R}_A$ , es la reacción en la chumacera A.
- $\mathbf{R}_B$ , es la reacción en la chumacera B.
- $\mathbf{W}_T$ , es el peso total del chuck + el peso del sustrato más grade = 49.05 N.

Determinando el Torque:

$\mathbf{T} = \mathbf{Pot} / \mathbf{v}$ ; por lo tanto:

$$\mathbf{T} = (2.5 \text{ W}) / (6.5 \text{ rad/s}) = 0.3846 \text{ N m} = 38.46 \text{ N cm.}$$

$\mathbf{T} = \mathbf{F}_T$  (**Radio de polea**).

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{T} / \mathbf{Radio \ de \ polea} = 38.46 \text{ N cm} / 1.3 \text{ cm} = 29.60 \text{ N}$$

$$\mathbf{F}_P = \mathbf{F}_T + 9.81 \text{ N} = 39.47 \text{ N.}$$

Haciendo sumatoria de fuerzas en el eje "x" e igualando a cero se tiene:

$$\sum \mathbf{F}_x = 0$$

$$-\mathbf{F}_P + \mathbf{R}_A + \mathbf{R}_B - \mathbf{W}_T = 0$$

Sustituyendo valores y despejando, se obtiene que:

$$\mathbf{R}_A + \mathbf{R}_B = 88.52 \text{ N} \quad \dots(i)$$

Por otro lado, haciendo sumatoria de Momentos con respecto a **A** e igualando a cero

$$\sum \mathbf{M}_A = 0$$

$$-\mathbf{F}_P(5\text{cm}) + \mathbf{R}_B(12\text{cm}) + \mathbf{W}_T(17.8\text{cm}) = 0$$

Sustituyendo valores y despejando  $\mathbf{R}_B$ , se obtiene:

$$\mathbf{R}_B = 56.3116 \text{ N}$$

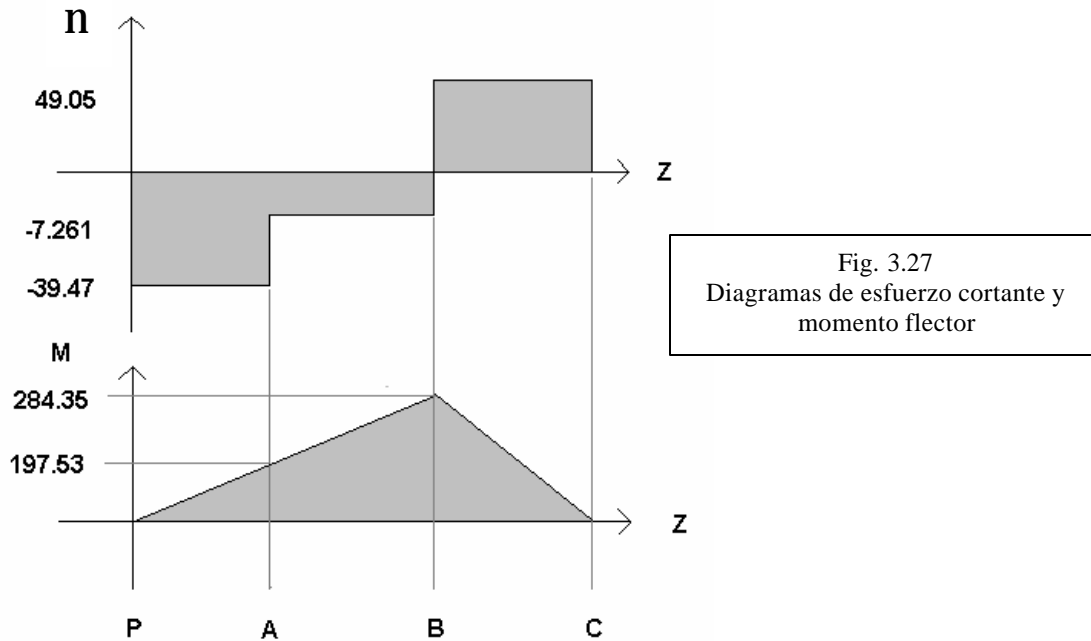
Sustituyendo en (i).

$$\mathbf{R}_A = 88.52 - \mathbf{R}_B = 32.208 \text{ N}$$

$$\mathbf{R}_A = 32.208 \text{ N}$$



Con estos valores se grafica el diagrama de esfuerzo cortante y momento flector, resultando:



Para el cálculo del momento flexionante, el procedimiento es el siguiente:

$$M_{XA} = F_P(5\text{cm}) = 197.35 \text{ N cm.}$$

$$M_{XB} = -F_P(17\text{cm}) - R_A(12\text{cm}) = 284.49 \text{ N cm.}$$

Puede observarse que el momento flexionante mayor se encuentra en B, por lo tanto al calcular el momento de torsión equivalente (**Te**) se obtiene:

**Te = (Mm<sup>2</sup> + T<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>**, donde **Mm** es el momento flector máximo y **T** es el momento de torsión máximo aplicado a la flecha, entonces:

$$Te = ((284,49)^2 + (38.198)^2)^{0.5} = 287.043 \text{ N cm} = 2.87043 \text{ N m}$$

Para obtener el diámetro mínimo de resistencia, se aplica la ecuación para ejes de sección circular, se utiliza el método del círculo de Mohr donde:

$$S_{\max} = (S/2) + ((S/2)^2 + S_s^2)^{1/2} \tag{A.1}$$

Además:

$$S = (4 Fa/pD^2) + (32 M_m / pD^3) \tag{A.2}$$

$$S_s = (16 T / 3 pD^2) + (16Te/ pD^3) \tag{A.3}$$

Donde:

**Fa**, es la sumatoria de fuerzas axiales equivalentes en el eje de la flecha.

**V**, es la fuerza cortante máxima actuando sobre la flecha.

**Te**, es el par de torsión máxima.

**D**, es el diámetro de la flecha.

**S**, es el esfuerzo normal al que está sometida la flecha.

**Ss**, es el esfuerzo cortante al que está sometida la flecha.

**S<sub>max</sub>**, es el esfuerzo máximo permisible del material antes de iniciar su deformación.

Para nuestro caso:

**Fa** = 0 (no hay fuerzas axiales actuando)

**V** = 49.05 N cm.

**Te** = 287.043 N cm.

Por lo tanto:

$$S_{\max} = \left( \left( \frac{4 Fa}{D^2} + \frac{32 M_m}{D^3} \right) + \left( \left( \frac{4 Fa}{D^2} + \frac{32 M_m}{D^3} \right)^2 + \left( \frac{16V}{3D^2} + \frac{16Te}{D^3} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

Sustituyendo valores y resolviendo por métodos numéricos el diámetro, se obtiene:

$$D = 6.25 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

Para el cálculo de la vida útil de la flecha, se utilizó el procedimiento de Charles R. Mieschke, el cual consiste en lo siguiente:

a) Se calcula el esfuerzo de vida (**Se**) del elemento mecánico:

$$S_e = 0.55 S_{ut} \quad (\text{A.5})$$

Donde **S<sub>ut</sub>** es el esfuerzo máximo permisible del material. Para el caso del acero 1015: **S<sub>ut</sub>** = 340 Mpa.<sup>2</sup>

Por lo tanto:

$$S_e = 0.55 (340) = 187 \text{ Mpa.}$$

b) Se calcula el esfuerzo de fatiga (**S<sub>f</sub>**) correspondiente a un número determinado de ciclos (N).

$$S_f = aN^b \quad (\text{A.6})$$

---

<sup>2</sup> Shigley, Joseph Edward et al. "Mechanical Engineering Design", ed. 5a., Ed. McGraw Hill, 1990.

Donde:

$$\mathbf{a} = (0.9 \text{ Sut})^2 / \text{Se} \quad (\text{A.7})$$

$$\mathbf{b} = -1/3 (\log (0.9 \text{ Sut} / \text{Se})) \quad (\text{A.8})$$

Para el caso de la flecha se propone  $10^4$  ciclos, por lo tanto:

$$\mathbf{a} = ((0.9)(340))^2 / 187 = 500.72$$

$$\mathbf{b} = -1/3 (\log ((0.9)(340) / 187)) = -0.0713$$

Entonces, sustituyendo en (A.6)

$$\mathbf{S}_f = (500.72) (10^4)^{-0.0713} = 0.3329 \text{ Mpa.}$$

Se calcula la vida esperada correspondiente de la flecha sometida a un esfuerzo completamente revertido (**sa**) de 145 Mpa.

$$\mathbf{N} = (\mathbf{sa} / \mathbf{a})^{1/\mathbf{b}} \quad (\text{A.9})$$

Sustituyendo los valores de **a** y **b** en (A.9)

$$\mathbf{N} = (145 / 500.72)^{1/-0.0713} = 35,380,574.9 \text{ Ciclos.}$$

Suponiendo que la flecha trabajara a una velocidad de 1400 RPM y si se divide el resultado obtenido entre esta velocidad, se puede observar que ésta podría trabajar 25,271.8 minutos continuos, equivalentes a 421.2 horas.

Para el prototipo, se utilizó un Chuck que requiere de una flecha de 15 mm de diámetro, por lo tanto, si se realizan los cálculos del esfuerzo con (A.4), manteniendo los valores de momento máximo, fuerza cortante, pero con el nuevo valor del diámetro se obtiene que:

$$\mathbf{S}_{\max} = 10.563 \text{ Mpa.}$$

Calculando la vida útil con este valor de esfuerzo máximo y recalculado los valores de la vida esperada (A.9) pero con un esfuerzo completamente revertido de 10.563 Mpa, se obtiene:

$$\mathbf{N} = (10.563 / 500.72)^{1/-0.0713} = 3.189 \times 10^{23} \text{ Ciclos.}$$

Haciendo el mismo análisis que con el diámetro anterior, se puede decir que su vida útil es infinita.

La foto siguiente muestra la configuración final de este subsistema, se aprecia que se hicieron protecciones, tanto para el motor como para el chuck.

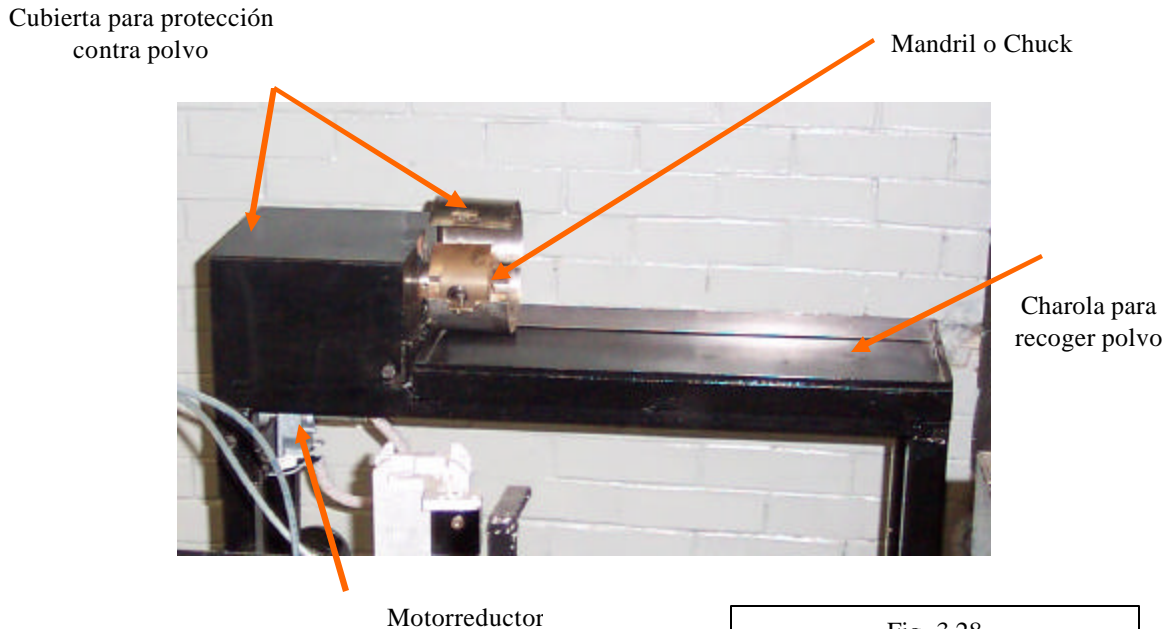


Fig. 3.28  
Subsistema para substratos de  
revolución

**Módulo de accionamiento:**

El actuador que se utiliza para mover el dispositivo de giro es un motorreductor de 24 V de CD.

La velocidad del motorreductor se varía por medio de una técnica conocida como *PWM (Pulse Width Modulation)* modulación por ancho de pulso.

Teoría del PWM

La velocidad de un motor de imán permanente depende de la magnitud de la corriente que pasa por el devanado de la armadura, por lo tanto para controlar la velocidad se puede utilizar el control del voltaje que se aplica a la armadura. Sin embargo, dado que el empleo de fuentes de voltaje de valor fijo es frecuente, el voltaje variable se logra mediante un circuito electrónico, lo más común es utilizar la técnica llamada modulación por ancho de pulso, la cual utiliza una fuente de voltaje de cd constante y secciona su voltaje para que varíe su valor promedio.

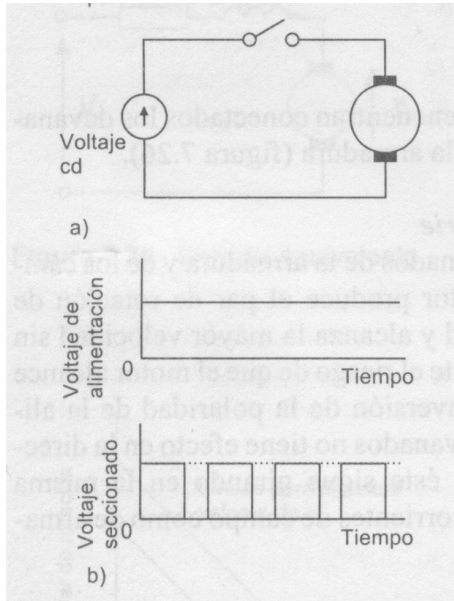


Fig. 3.29

**Modulación por ancho de pulso (PWM)**

a) Principio del circuito de PWM, Utiliza un interruptor de alta frecuencia controlado electrónicamente para seccionar la CD.

b) Variación del voltaje de armadura mediante el seccionamiento de voltaje de CD.

La figura siguiente muestra como obtener la PWM utilizando un circuito de transistor básico.

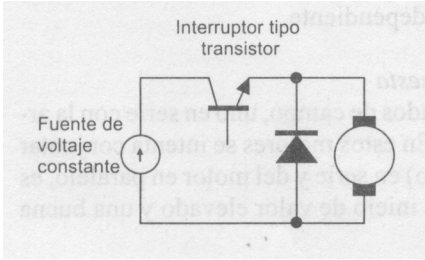


Fig. 3.30  
PWM con transistor

El transistor se activa y desactiva mediante una señal que se aplica a su base. El diodo tiene por objeto servir de trayectoria a la corriente que surge cuando el transistor se desconecta, debido a que el motor se comporta como generador.

A continuación se muestran los cálculos de la fuente y la etapa de potencia, así como sus respectivos diagramas de conexiones:

Para el cálculo de **R1** tenemos que la corriente **Ic** = 500mA

Utilizando la ecuación usada en la sección 3.2.2

$$R_i = (V_{IN} - V_{be})1000 / I_c$$

Donde :

$$V_{IN} = 5 V$$

$$V_{be} = 3V$$

Tenemos que **R1 = Ri = 4 k?**

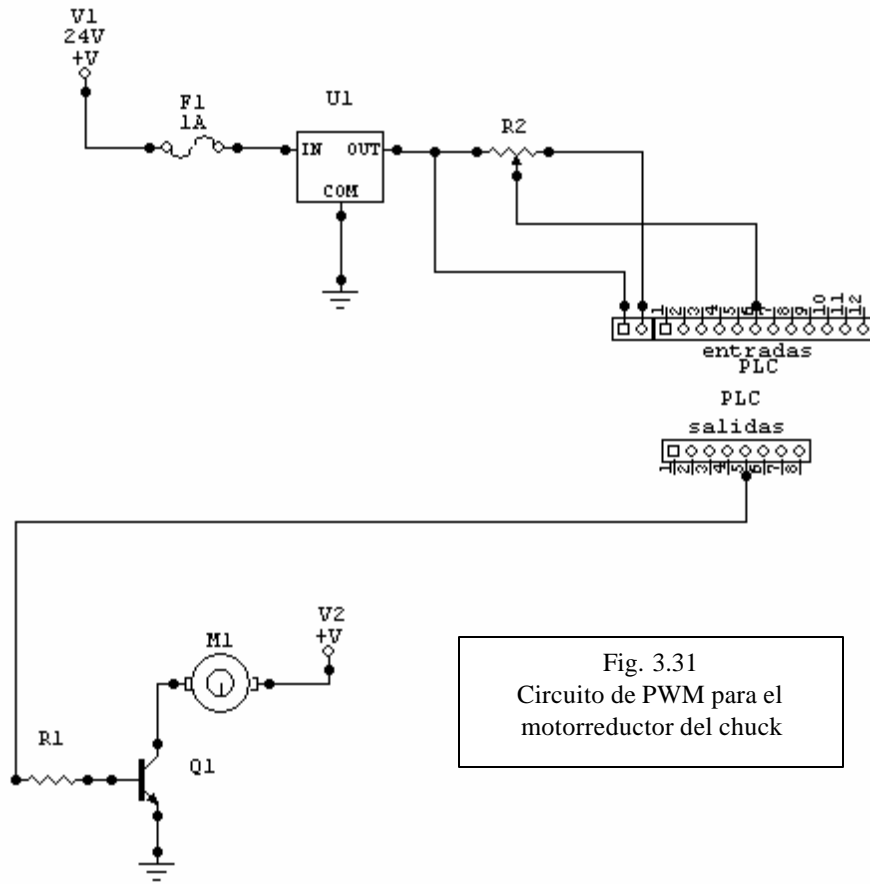


Fig. 3.31  
Circuito de PWM para el motorreductor del chuck

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
V1	24V CD
V2	24V CD
F1	Fusible 1A
U1	Regulador 24V LM7824
R2	Potenciómetro 2.2k? 0.5W
PLC	PLC Millenium II Crouzet XT20
R1	Resistencia
Q1	Transistor TIP142
M1	Motorreductor 24V

### **3.2.6 Dispositivo controlador de los movimientos de avance transversal.**

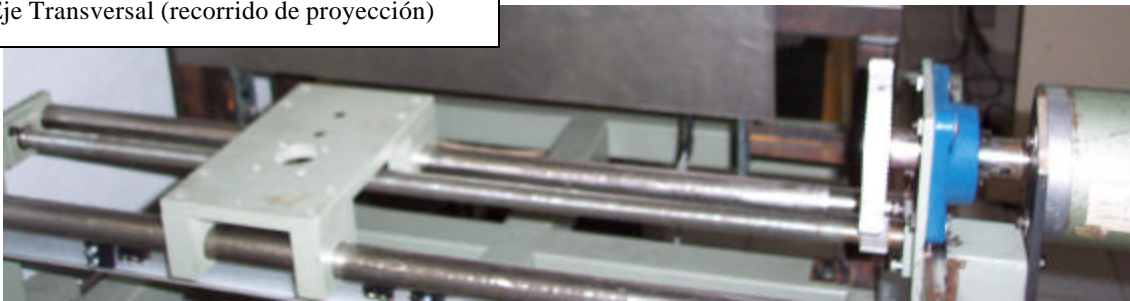
#### **Módulo mecánico:**

Como se mencionó al inicio del capítulo, la estructura metálica cuenta con una plataforma de movimiento transversal.

Un tren de engranes es el mecanismo de funcionamiento de este dispositivo.

Se tuvieron que cambiar los rodamientos para el tornillo sin fin por otros de las mismas características, así como darle mantenimiento al tornillo sin fin (se encontraba oxidado).

Fig. 3.32  
Eje Transversal (recorrido de proyección)



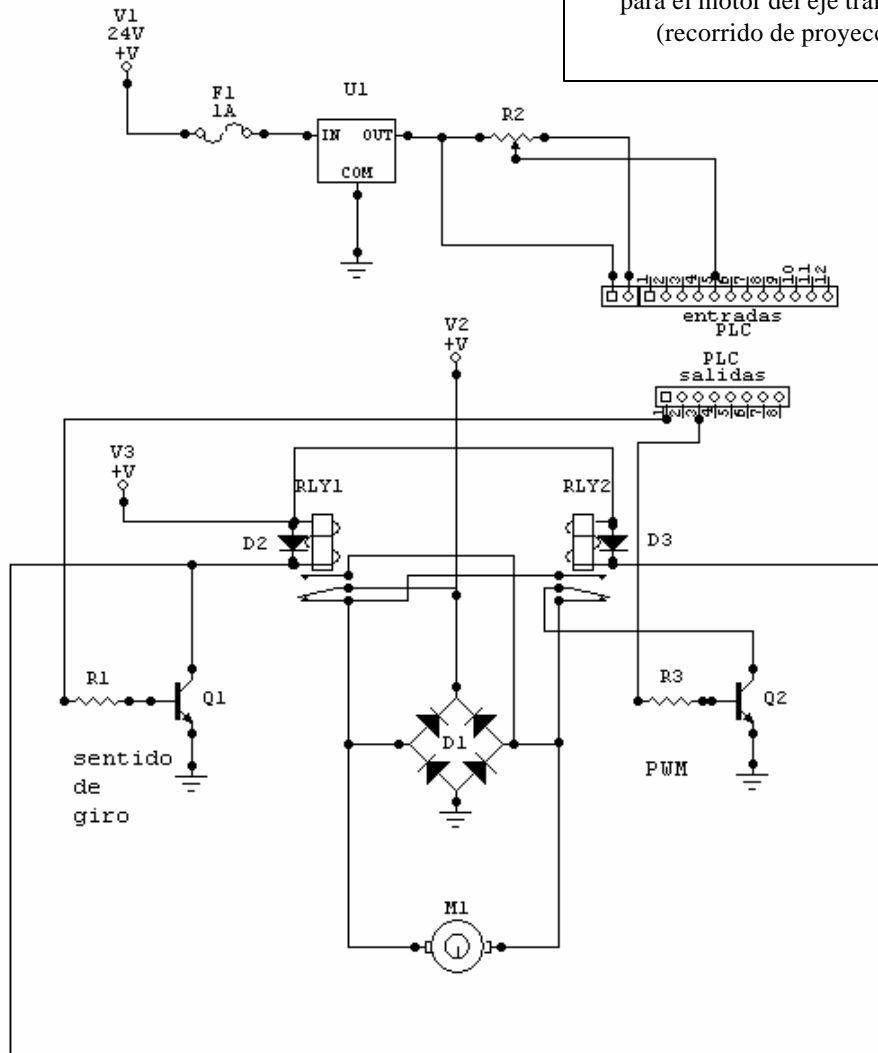
#### **Módulo de accionamiento:**

En este movimiento, la variable principal a controlar es la velocidad ya que esta incide directamente sobre la calidad del recubrimiento.

Como en el caso del dispositivo de distancia de proyección, el motor con el que se contaba era un motor de pasos que se encontraba en mal estado, por cuestiones de velocidad se cambio este motor por un motor de corriente directa acoplando el engrane original a este ultimo.

La justificación del uso de este motor se debe primordialmente a que en este tipo de actuadores puede controlarse la velocidad (como ya se describió) mediante el uso de la técnica llamada modulación por ancho de pulso, además el PLC con el que se cuenta, posee esta función.

Fig. 3.33  
Circuito PWM con cambio de giro  
para el motor del eje transversal  
(recorrido de proyección)



ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
F1	Fusible 1A
U1	Regulador LM7824 24V
R2	Potenciometro 2.2k $\Omega$ 0.5W
PLC	PLC Millenium II Crouzet XT20
V1	+25V
V2	Voltaje del motor 40V
V3	Voltaje de control +5V
RLY1, RLY2	Relevadores 5V , 1 polo, 2 tiros
D1	Puente de diodos
D2, D3	Diodos IN4001
Q1, Q2	Transistores TIP 142
M1	Motor de CD 40V
R1, R3	Resistencias 27.7 k $\Omega$



**Módulo de medición:**

Se colocaron dos sensores de posición o “microinterruptores de rodillo” sobre una base móvil y en una regleta para poder ajustar la distancia de inicio y fin de la carrera. Dichos sensores van conectados al PLC, el cual controla el movimiento de la base.

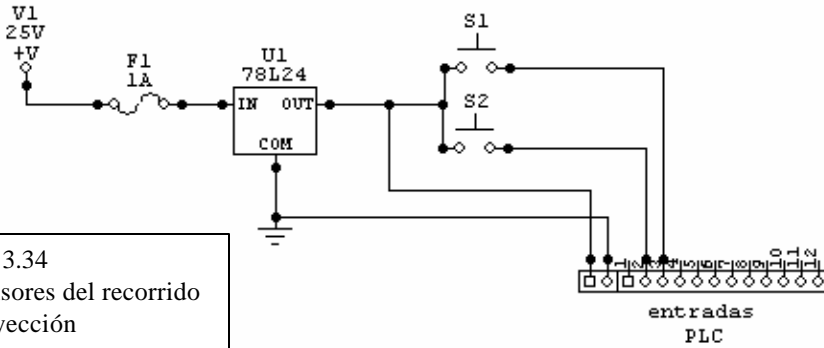


Fig. 3.34  
Circuito de los sensores del recorrido de proyección

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
V1	25V CD
F1	Fusible 1A
U1	Regulador LM7824 24V
S1, S2	Sensores (microinterruptores de rodillo)
PLC	PLC Millenium II Cruzet XT20

**3.2.7 Dispositivo de movimientos de avance vertical (placas).**

**Módulo mecánico:**

Para poder lograr este movimiento, se tuvieron diferentes ideas entre las que se encuentran:

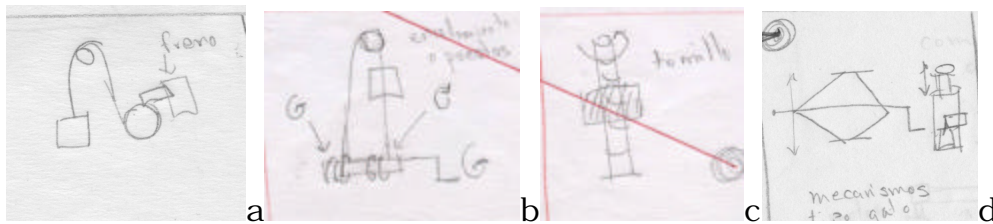


Fig 3.35  
Conceptos preliminares del sistema de elevación

Se optó por un sistema de elevación que consiste en una plataforma sujeta a un “gato automotriz de tornillo” con capacidad de carga de 1500 kg acoplado a un

motorreductor de corriente directa, lo que resuelve tanto el problema de elevación como el problema del peso de las placas. Con este sistema se logra un movimiento vertical uniforme y suave, además de facilitar su construcción y control. Puesto que la base superior del “gato de tornillo” es muy pequeña, se colocaron guías a cada costado de la plataforma donde descansarán las placas.

Para protección del mecanismo del gato automotriz se construyó una guarda de lámina.

La sujeción de las piezas planas consiste en un soporte en forma de “L”, dicho soporte está construido con varilla de sección cuadrada de 10mm, la “L” se ajusta a la altura de la pieza y se aprieta con el tornillo de ajuste que se muestra en la Fig. 3.36

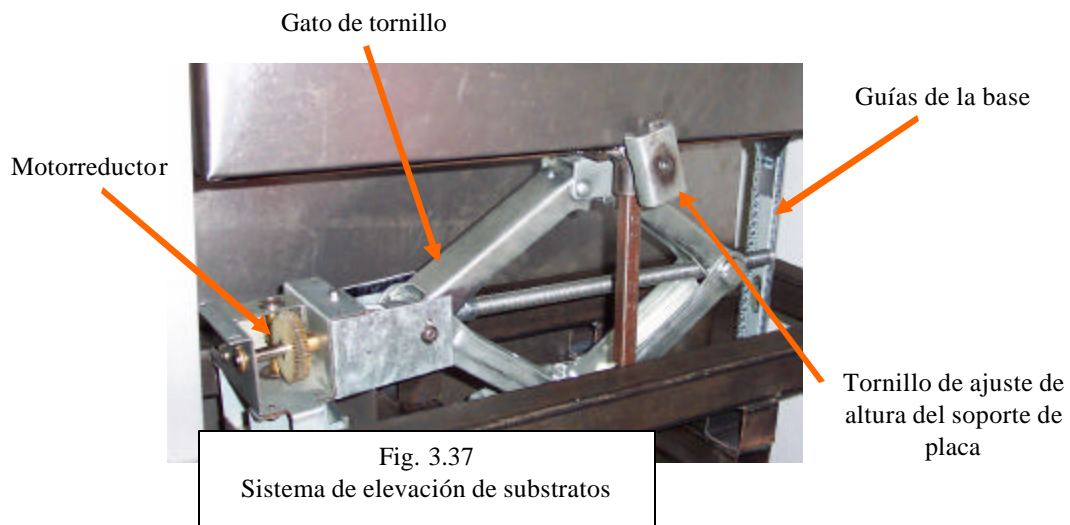


Fig. 3.36  
Sujeción de substratos (placas)

**Módulo de accionamiento:**

Se cuenta con un motorreductor que fue acoplado al gato automotriz mencionado anteriormente.

Para el funcionamiento de este motor se realizó un circuito tipo H porque nos interesa el sentido de giro del motor (que suba o baje el substrato). Como no se requiere control de velocidad el funcionamiento resulta sencillo: encendido-apagado y sentido de giro.



### **Módulo de medición:**

El control de posición del sistema de elevación se basa en el uso de un sensor óptico y un “encoder” lineal, el cual es una lámina con barrenos de 1/8” de diámetro y espaciados a 1/4” entre centros. El sensor (opto emisor receptor) se encuentra conectado al PLC y este último determina cuando debe pararse.

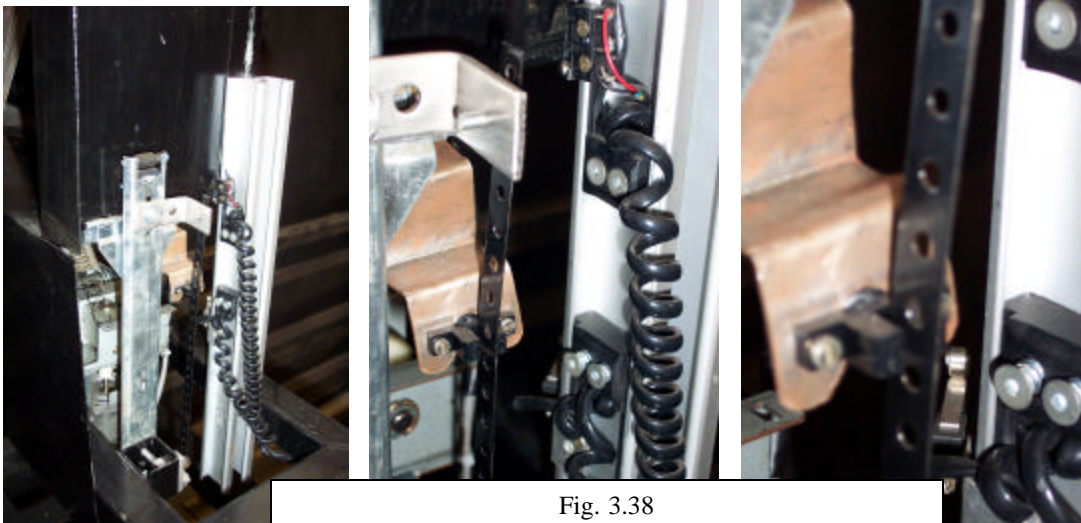
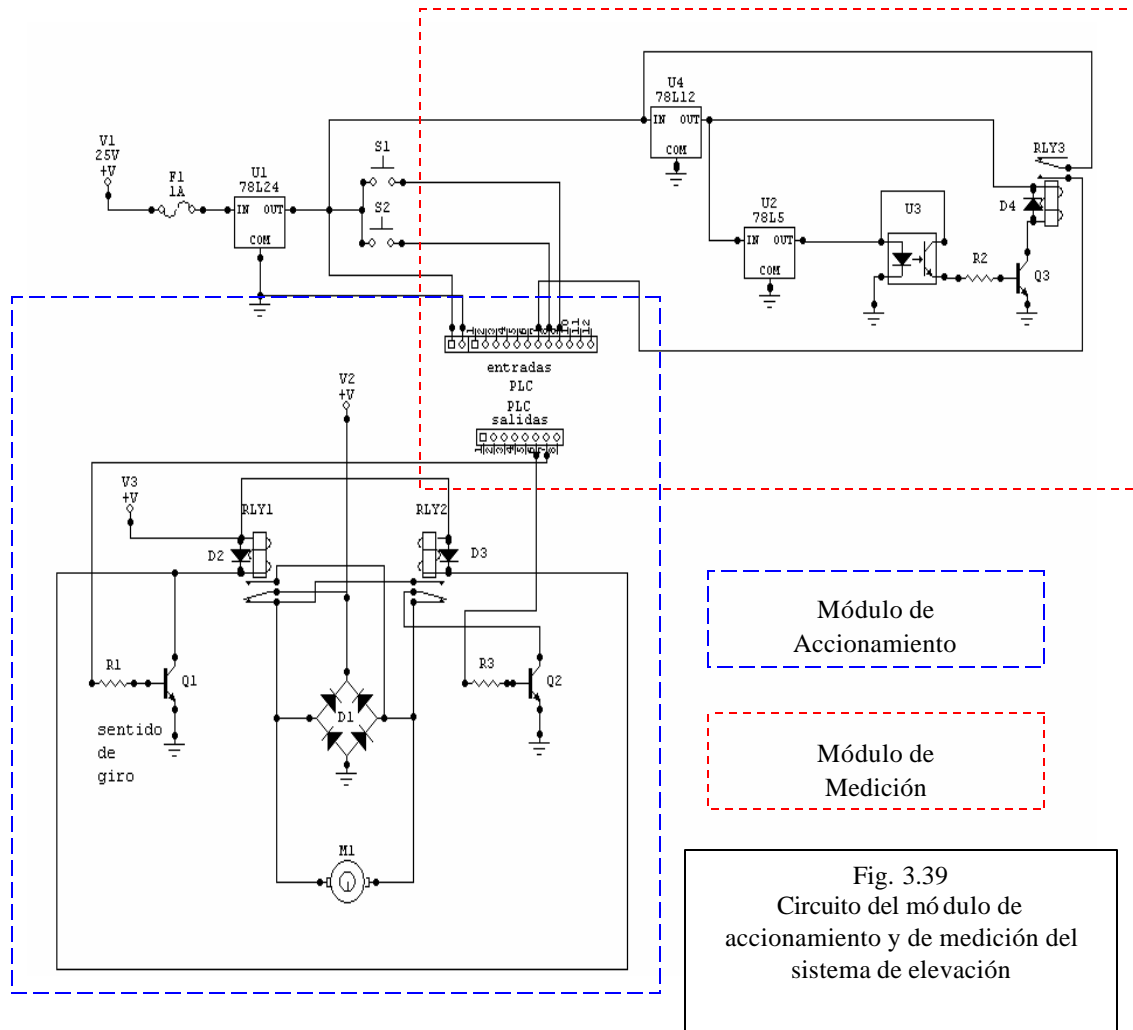


Fig. 3.38  
Encoder (contador) y sensores del sistema de elevación

El circuito de la Fig. 3.39 muestra las conexiones de los sensores mostrados en la Fig 3.38, además de las conexiones del motorreductor del sistema de elevación

ETIQUETA	DESCRIPCIÓN
V1	24V CD
F1	Fusible 1A
U1	Regulador 24V LM7824
S1, S2	Sensores (microinterruptores de rodillo)
U4	Regulador 12V LM7812
U2	Regulador 5V LM7805
U3	Opto emisor - receptor
RLY3	Relevador 12V 1polo 2 tiros
R2	Resistencia
Q3	Transistor TIP120
PLC	PLC Millenium II Crouzet XT20
V2	Voltaje del motor M1 30V
V3	Voltaje de control +5V
RLY1, RLY2	Relevadores 5V 1polo 2 tiros
D2, D3, D4	Diodos IN4001
R1, R3	Resistencias 27.7 k?
Q1, Q2	Transistores TIP142
D1	Puente de diodos
M1	Motorreductor 30V CD 2.2A



Para **R2** tenemos que los datos del relevador son 12v, 0.03A para activar la bobina.

Por lo tanto:

$$\mathbf{Ri} = (\mathbf{V_{IN}} - \mathbf{V_{be}}) 1000 / \mathbf{Ic}$$

Donde:

$$\mathbf{V_{IN}} = 5 \text{ V}$$

$$\mathbf{V_{be}} = 2.5\text{V}$$

Tenemos que **R2** = **Ri** = 83.3 k?

# **CAPÍTULO 4**

# **INTEGRACIÓN y**

# **FUNCIONAMIENTO**

- 4.1 Ubicación del sistema
- 4.2 Acoplamiento de los subsistemas
- 4.3 Pruebas de funcionamiento
- 4.4 Manual de operación

# CAPÍTULO 4

## INTEGRACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

### 4.1 Ubicación del sistema

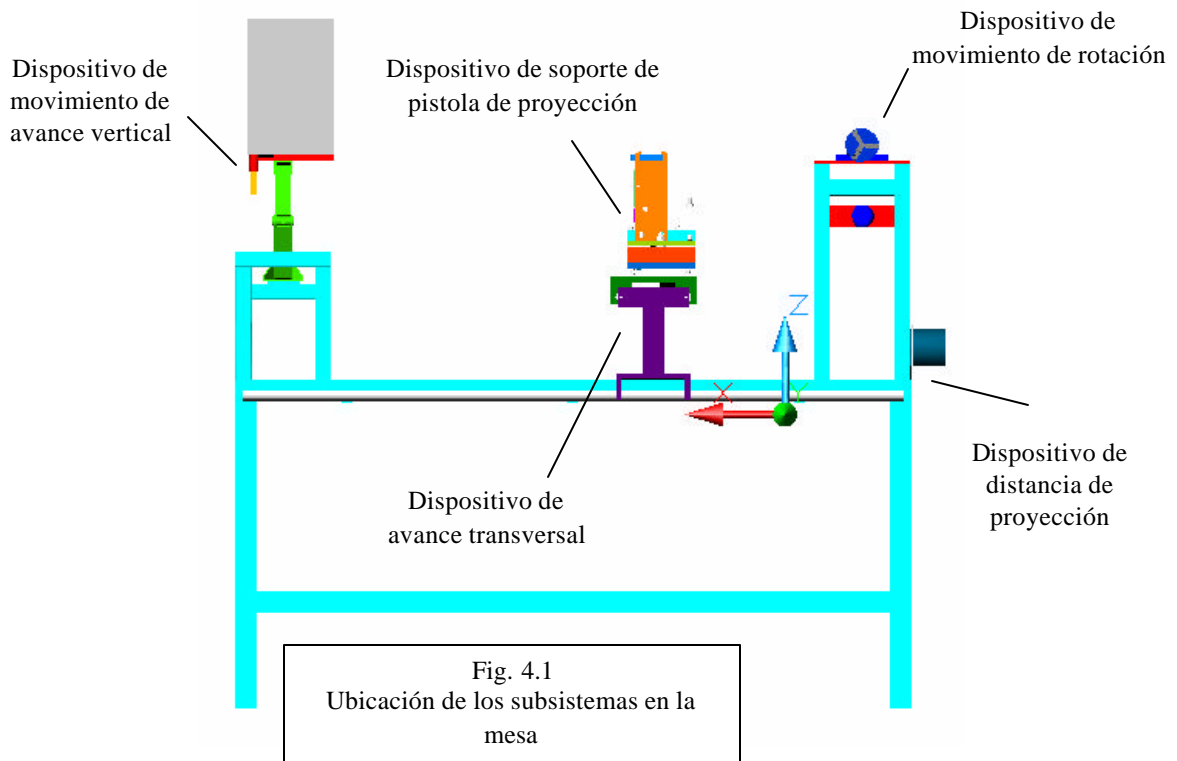
Como parte del proyecto se asignó un espacio para la instalación del equipo, la cual se ubica dentro de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica dentro del área de soldadura eléctrica.

El espacio originalmente era una caseta de soldadura eléctrica contando únicamente con una cortina de lona, por lo que fue necesario colocar una puerta con candado y protecciones para evitar el acceso a personas ajenas al proyecto.

La remodelación fue realizada por personal de los talleres de Manufactura y contempló también la instalación de una toma de aire comprimido además de una alimentación eléctrica de 127v

### 4.2 Acoplamiento de los subsistemas

Una vez que se terminó la fabricación de cada subsistema, estos fueron probados por separado y después de comprobar que cumplían con los objetivos planteados, estos fueron posicionados de acuerdo a la idea planteada en el capítulo 3 (capítulo de diseño)



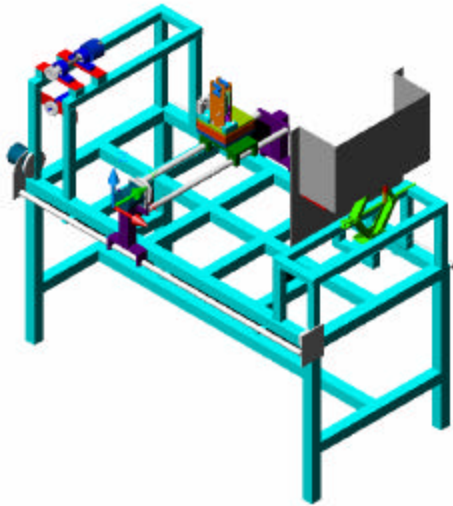


Fig. 4.2  
Modelo tridimensional  
del sistema



Fig. 4.3  
Sistema semiautomatizado  
de proyección térmica por  
flama

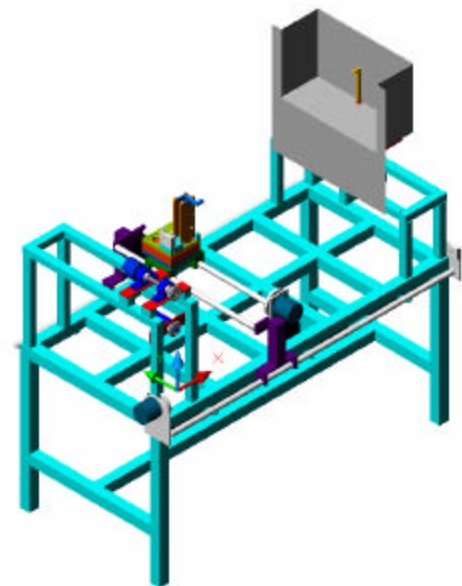


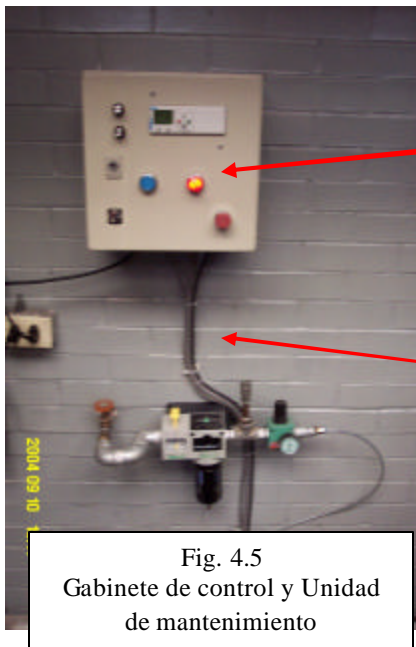
Fig. 4.4  
Modelo tridimensional  
del sistema

Como se vio en el capítulo anterior cada subsistema cuenta con un módulo de accionamiento y éste a su vez cuenta con una parte de control y una parte de potencia; Se decidió que la parte de control estuviera separada de los circuitos de potencia construyendo un gabinete para estos últimos y un centro de mando para la parte de control.

Debido a que la parte de control es propiamente ejecutada por el PLC y tomando en cuenta que éste cumple la función de interfaz Hombre-Máquina el centro de mando se colocó en un lugar accesible al operario, separado de la estructura del sistema, pero ubicado de tal forma que tenga visión completa de todo el proceso.

Por el contrario los circuitos de potencia se ubicaron junto a la estructura del sistema por la cercanía de conexión a los actuadores.

La comunicación (conexión) entre estos dos gabinetes se realiza mediante conectores DB25 y DB9 con cable blindado debidamente protegido.



Este gabinete contiene al PLC y los diferentes mandos de control así como la fuente que alimenta a todos los sensores y al PLC. También ubicamos en esta gabinete los pulsadores de paro de emergencia.

Interconexión entre los dos gabinetes por medio de cable multi-hilos y conectores DB25 y DB9.

Fig. 4.5  
Gabinete de control y Unidad de mantenimiento

Dentro de este gabinete se encuentran las tarjetas de las etapas de potencia, además de las diferentes fuentes de energía empleadas por cada motor

El gabinete cuenta con un break como protección además de un ventilador para evitar calentamiento interno

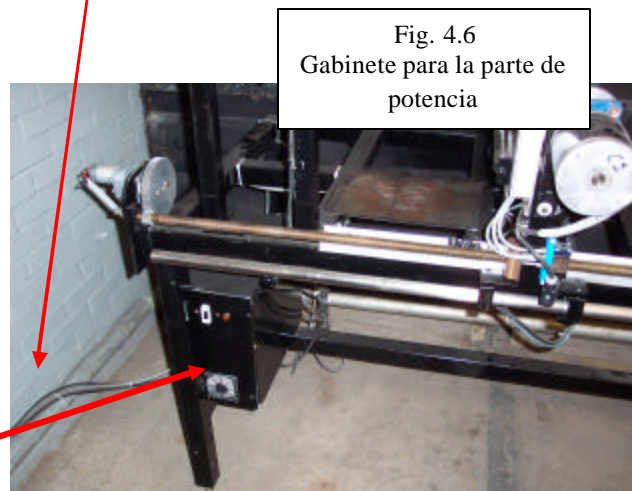


Fig. 4.6  
Gabinete para la parte de potencia



### 4.3 Pruebas de funcionamiento

Una vez integrado todo el sistema se procedió a realizar pruebas sin el equipo de proyección térmica para probar que el programa realizará la secuencia correcta del proceso de acuerdo al siguiente algoritmo:

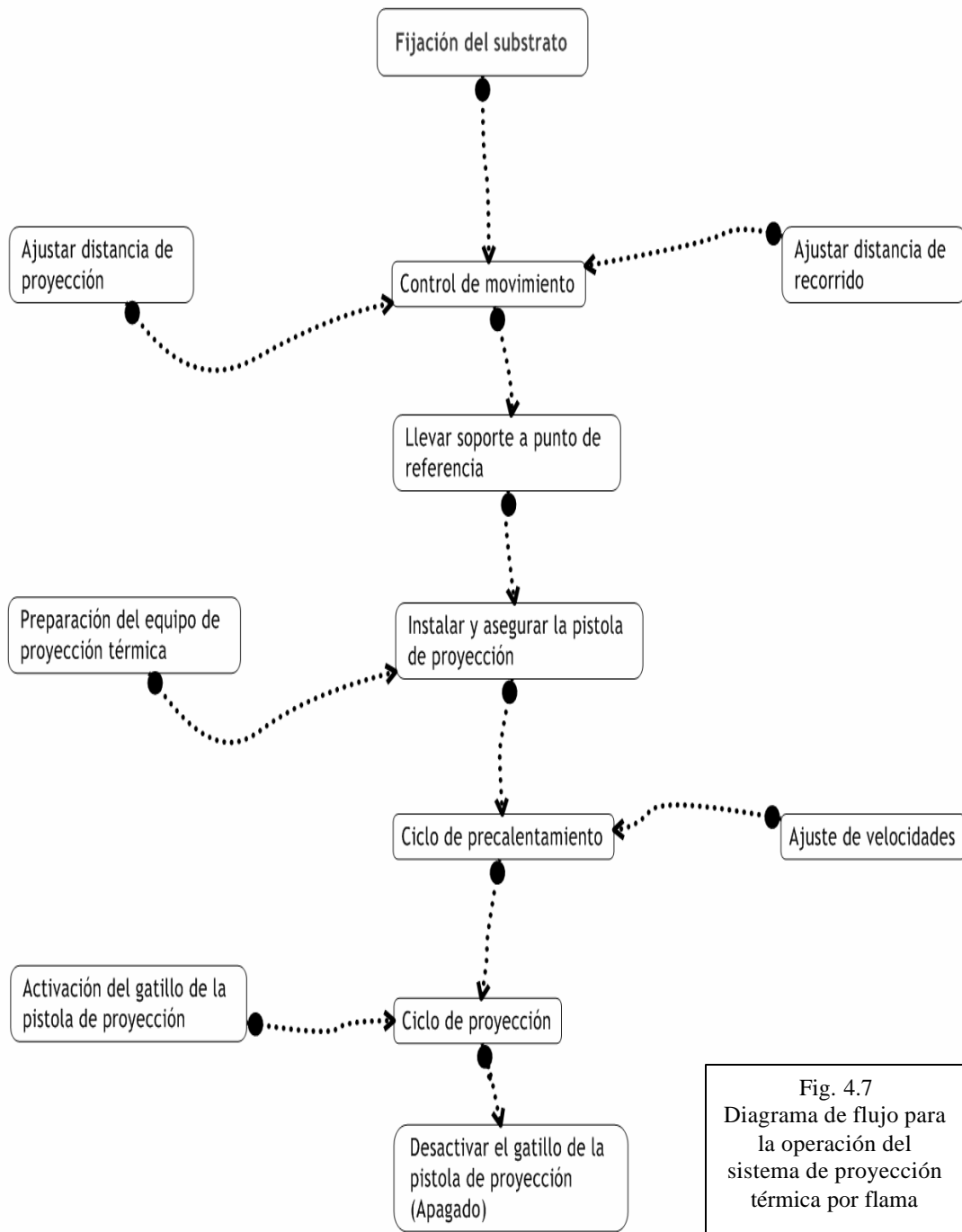


Fig. 4.7  
Diagrama de flujo para  
la operación del  
sistema de proyección  
térmica por flama

Como segundo paso se procedió a calibrar los valores que nos marca el display del PLC que correspondía a la velocidad de avance lineal del eje transversal y la velocidad de rotación del chuck. Para tal caso solamente se ajustó el valor de la ganancia en el programa para que este desplegara el valor correcto.

Por último se realizaron pruebas finales con el equipo de proyección térmica

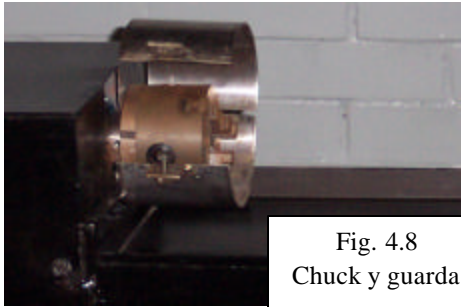


Fig. 4.8  
Chuck y guarda

Fijación del sustrato de revolución.

La guarda protege al chuck y deberá ser cerrada al termino de la colocación del sustrato.

La “L” nos sirve para sujetar las piezas planas o placas y para ajustar la altura.

La guarda brinda protección no solamente al operario sino también al motor y los mecanismos de este subsistema.



Fig. 4.9  
“L” sujeción de placas  
y guarda



Fig. 4.10  
Tablero de control

Como ya se mencionó en el capítulo 3, el PLC es nuestro módulo que gobierna todos los movimientos, además de ser la interfase Usuario - Máquina.

Se fija la distancia de proyección. Esta distancia se hace manualmente por medio del teclado del PLC.

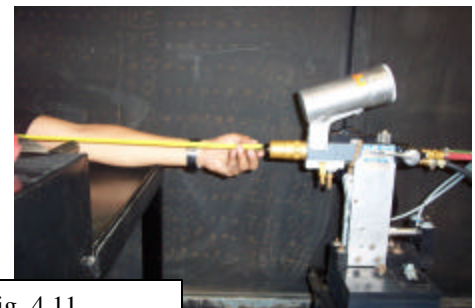


Fig. 4.11  
Distancia de proyección

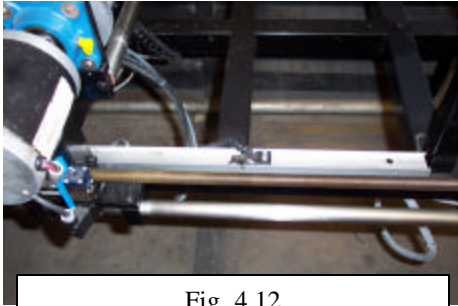


Fig. 4.12  
Sensores –distancia de proyección-

Los sensores (microinterruptores de rodillo)

Ayudan a ubicar mejor la distancia de proyección ya que estos se encuentran conectados con un foco piloto que enciende al momento de alcanzar la distancia deseada.

Los sensores ubicados en el eje transversal sirven para fijar el recorrido de la proyección, al igual que los anteriores sensores, estos se pueden mover sobre el riel para poder variar el recorrido.

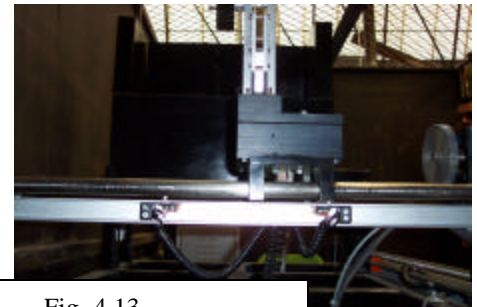


Fig. 4.13  
Sensores –recorrido de proyección-



Fig. 4.14  
Sensores –altura de placas-

Los sensores ubicados en esta parte nos determinan la altura de los substratos planos (placas).

Fig. 4.15  
Aseguramiento de la pistola



Preparación del equipo de proyección térmica.

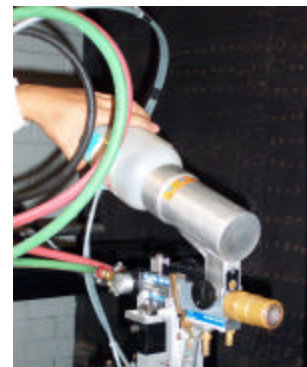


Fig. 4.16  
Llenado de polvos

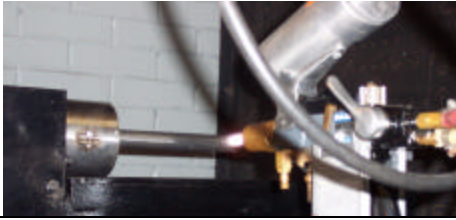


Fig. 4.17  
Pre calentamiento de la pieza de revolución

### Ciclo de Pre calentamiento

Además de ser un requisito en el proceso de proyección térmica nos sirve para ajustar las velocidades en el tablero de control.

También a las placas o piezas planas se les da un ciclo de pre calentamiento.

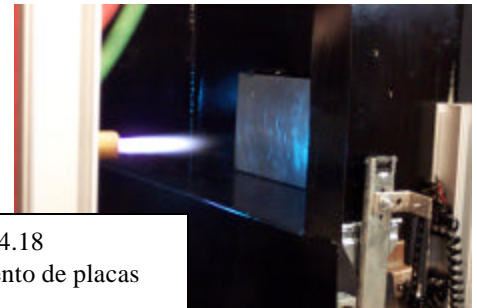
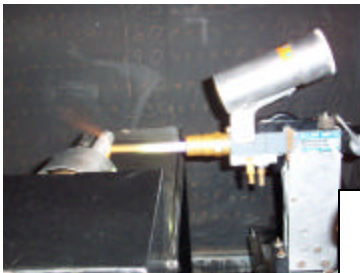
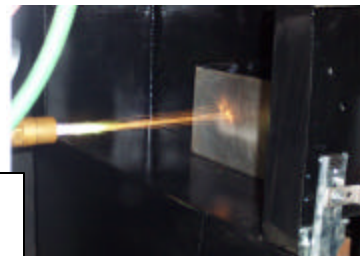


Fig. 4.18  
Pre calentamiento de placas



### Ciclo de proyección

Fig. 4.19  
Proyección térmica por flama en substratos



El equipo (sin proyectar, solamente con la pistola montada) se puso a funcionar durante 4 horas continuas sin presentar alguna anomalía o desperfecto, La operación se realizó alternando entre ciclos de substratos de piezas planas y ciclos de piezas de revolución.

También durante el transcurso de las 4hrs. se probó el paro de emergencia funcionando correctamente.

## 4.4 Manual de operación

TABLERO DE CONTROL GENERAL:

El tablero de control se muestra a continuación:

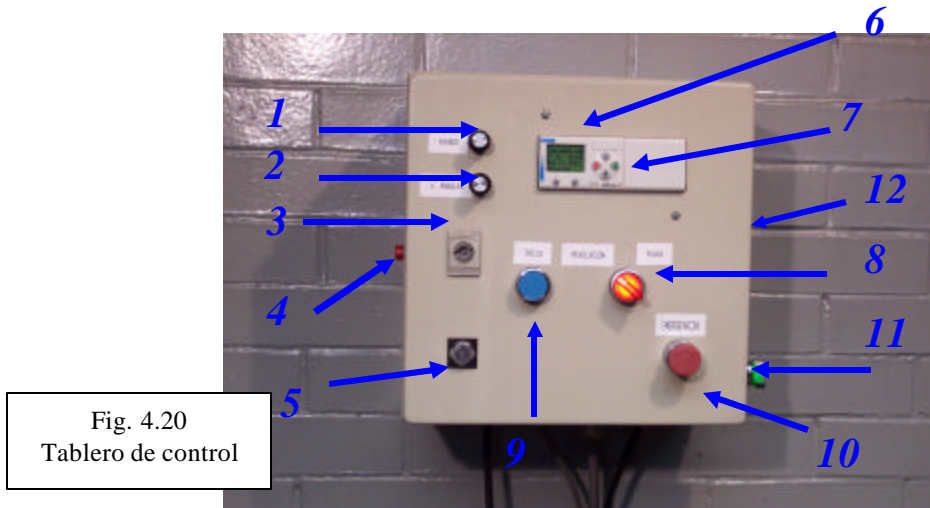


Fig. 4.20  
Tablero de control

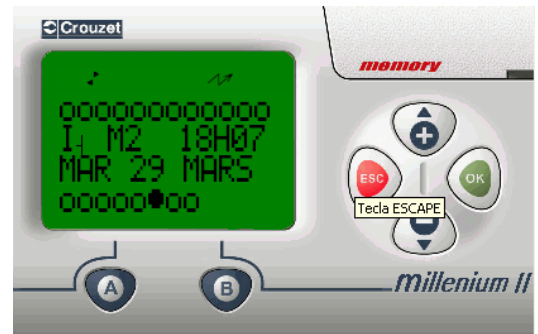
<b>1</b>	Perilla de velocidad de piezas de revolución.	<b>7</b>	Panel del PLC.
<b>2</b>	Perilla de velocidad de avance transversal.	<b>8</b>	Selector 3 posiciones.
<b>3</b>	Cerradura de tablero.	<b>9</b>	Botón de Inicio.
<b>4</b>	Botón de “Home” referencia.	<b>10</b>	Botón de Paro de Emergencia.
<b>5</b>	Interruptor general con llave.	<b>11</b>	Selector de control de distancia de proyección.
<b>6</b>	Pantalla del PLC.	<b>12</b>	Foco piloto de distancia de proyección.

### **Modo de funcionamiento:**

1. Colocar los substratos; para el caso de piezas de revolución, se deben abrir las mordazas del chuck con la llave y ajustarlo al diámetro del sustrato y cuidar que quede bien centrada. Para el caso de las placas, se debe ajustar el sujetador a la altura de la placa para evitar que se caiga y apretarlo con el tornillo de sujeción (Ver Fig. 4.8 y 4.9).
2. Colocar los sensores de inicio y fin de recorrido de proyección de acuerdo a la longitud del sustrato (Ver Fig. 4.13). Ajustar los sensores de la distancia de proyección (Ver Fig. 4.12), así como los sensores de altura para el caso de placas (Ver Fig. 4.14).

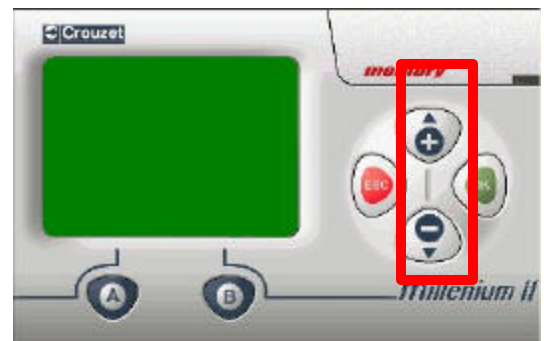
- Colocar la llave en el interruptor general (5) (Ver Fig. 4.20) en la posición de apagado y girarla en sentido de las manecillas del reloj. La pantalla del PLC se encenderá y se observará el estado inicial del sistema. (Ver Fig. 4.21).

Fig. 4.21  
Pantalla Inicial



- Subir el Interruptor general del gabinete negro que se ubica en la parte inferior de la estructura metálica, lo que activará las fuentes de alimentación del sistema (Ver Fig. 4.6).
- Se debe apretar el botón de posición inicial de referencia o "Home" (4) (Ver Fig. 4.20) para que la máquina se posicione en un estado de referencia.
- Colocar el selector de control de distancia (11) (Ver Fig. 4.20) en posición de encendido, posteriormente con la ayuda de las teclas (+) ó (-) del panel del PLC (7) (Ver Fig. 4.22) se colocará la distancia de proyección correcta según el proceso, siendo derecha e izquierda respectivamente. Cuando el eje transversal toque cualquiera de los sensores de posición de la regleta se encenderá un foco piloto (12) (Ver Fig. 4.20) que indicará que la posición es la correcta.

Fig. 4.22  
Botones (+) y (-)



- Colocar la Pistola en la base de sujeción cuidando que el gatillo de la misma quede por detrás de la palanca accionadora y que el perno de la pistola entre en el soporte para ser presionada por el tornillo de sujeción (Ver Fig. 4.15).
- Se debe cuidar que las mangueras del oxígeno, acetileno y aire comprimido queden por arriba de la pistola para evitar que se enreden durante el proceso.

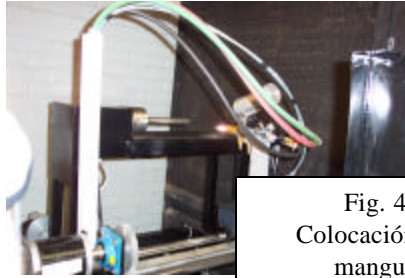


Fig. 4.23  
Colocación de las  
mangueras

9. Se debe hacer el encendido manual de la flama de la pistola según el manual de la misma (Ver 2.2.8).
10. Colocar el selector (8) (Ver Fig. 4.20) en la posición de acuerdo al tipo de recubrimiento que se quiere hacer. Posición derecha, es para recubrimiento de placas y hacia la izquierda para recubrimiento de piezas de revolución. El sistema espera la señal de inicio del proceso. En la posición central, la máquina estará en pausa.
11. Para poder cambiar el número de veces que la pistola recorrerá el substrato de revolución, se tiene que apretar el botón de "B" de la botonera inferior de la pantalla del PLC (Ver Fig. 4.24) e inmediatamente aparecerá en pantalla la frase "CICLOS TORNO" y un número. Para cambiar este número se deberá apretar la tecla "OK" hasta que el número empiece a parpadear, posteriormente con las teclas (+) ó (-) se aumentará o disminuirá el número de ciclos y se apretará la tecla "OK" nuevamente para guardar el valor; para salir de esta pantalla sólo se deberá apretar la tecla "B" de la botonera inferior de la pantalla.

Fig. 4.24  
Pantalla para el número de ciclos de  
substratos de revolución



12. Accionar el botón de inicio (9) (Ver Fig. 4.20) una sola vez para que el sistema empiece a moverse. Para el caso de placa, la plataforma empezará a bajar  $\frac{1}{2}$  pulgada y se detendrá. En seguida, el eje transversal comenzará a desplazarse y al tocar el sensor de fin de carrera nuevamente volverá a desplazarse el eje vertical otra  $\frac{1}{2}$  pulgada y el eje transversal regresará nuevamente hasta el primer sensor; esta rutina se repetirá hasta que la plataforma accione el sensor inferior. Para el caso de piezas de revolución, la diferencia es que en vez de que la plataforma se mueva, el chuck comenzará a girar. Es en este proceso que se recomienda ajustar las

velocidades de rotación y de recorrido (proyección) mediante las perillas (1) y (2) (Ver Fig. 4.20), respectivamente. Para aumentar la velocidad se debe girar en sentido horario cada una y apretar la tecla A del panel del PLC para ver el valor numérico en la pantalla (Ver Fig. 4.25).

Fig 4.25  
Pantalla para ajuste de velocidades



13. Al terminar el ciclo de calentamiento, el sistema estará listo para iniciar el proceso de proyección. Se debe tocar nuevamente el botón de inicio y se repetirá la rutina anterior con la diferencia de que en esta ocasión el gatillo de la pistola será accionado por medio de un pistón neumático y se realizará a la velocidad establecida en el ciclo de precalentamiento.

14. En caso de existir algún problema durante el proceso, este puede ser interrumpido apretando el paro de emergencia (10) (Ver Fig. 4.20), la pantalla del PLC desplegará un mensaje como el que se muestra en la Fig. 4.26. Todos los motores se pararán y en caso de que el gatillo de la pistola esté accionado este será desactivado. La flama de la pistola seguirá encendida. Al reestablecer el paro de emergencia se debe apretar el botón de "Home" para que la máquina regrese la posición de arranque o de referencia.

Fig 4.26  
Pantalla de paro de emergencia





# SÍNTESIS DE RESULTADOS

Al término de la fabricación del dispositivo para semiautomatizar la pistola de proyección Sultzer Metco, se obtuvieron los siguientes resultados:

Se logró diseñar y construir el dispositivo automático que controla el gatillo y soporta la pistola de proyección térmica 5P-II de Sulzer Metco sin necesidad de modificar el diseño original de la misma. Se diseñaron y fabricaron casi la totalidad de las piezas del soporte incluyendo partes mecánicas, así como las fuentes de energía de la misma. Se logró posicionar la pistola de acuerdo al tipo de sustrato a recubrir

Se logró habilitar la estructura metálica donada por el Laboratorio de Recubrimientos, tanto para soporte de todo el sistema como sus ejes: el eje longitudinal, para controlar la distancia de proyección entre el sustrato y la pistola, de acuerdo al tipo de polvo y al tipo de sustrato; y el eje transversal para realizar los movimientos de avance (recorrido). En este eje fue montado el soporte de la pistola y control del gatillo. La velocidad de avance transversal puede ser controlada de acuerdo a las necesidades del recubrimiento.

El sistema de sujeción de las piezas cilíndricas y el mecanismo que proporciona movimiento de rotación a sustratos de revolución fueron integrados en un solo dispositivo. Las tarjetas de potencia del motor y las interfases hacia el control central fueron construidas, logrando de esta forma controlar la velocidad de rotación de las piezas.

El dispositivo que realiza los movimientos de avance vertical y el sistema de sujeción de las piezas planas también fue integrado en un solo dispositivo. Se diseñó y construyó la base donde se sujetan los sustratos, así como sus respectivos circuitos electrónicos. Este movimiento fue sincronizado con el de avance transversal.

Se construyó el panel de control donde se encuentran la parte de control e interfase hombre máquina (PLC), además de la fuente de energía que alimenta a este y a los sensores.

Se construyó un gabinete centralizado de potencia donde se encuentran localizadas todas las fuentes de energía de los motores y las tarjetas de las etapas de potencia de los mismos.

Se realizó un programa de control para el PLC el cual gobierna las acciones a realizar por el mecanismo, sí como los tiempos y sincronización de cada movimiento.

Se logró automatizar el gatillo de la pistola, los avances transversal, longitudinal y vertical. Se puede controlar manualmente la velocidad de avance transversal y de rotación de los sustratos. La carrera de avance vertical de las piezas, así como la distancia de proyección tienen que ser determinadas manualmente.

# CONCLUSIONES

En virtud de haber realizado el diseño y fabricación del dispositivo para semiautomatizar la pistola de proyección Sulzer Metco 5P-II y, después de analizar los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El Objetivo planteado al inicio del proyecto fue llevado a cabo ya que se pueden controlar diversas variables que inciden directamente en el proceso; dichas variables son: Velocidad de avance transversal de la pistola respecto al sustrato, velocidad de rotación del sustrato de revolución y distancia de proyección.
- De acuerdo a lo planteado originalmente el equipo puede operar tanto dentro del sistema fabricado como manualmente.
- Con el mecanismo desarrollado, se logró que el proceso de proyección térmica por medio de la pistola 5P-II de Sulzer Metco fuera repetible y por lo tanto ahora es factible caracterizar de manera más adecuada el uso de los polvos de recubrimiento y el propio recubrimiento, lo cual será motivo de una tesis posterior.
- Se logró construir una máquina-prototipo funcional con recursos económicos limitados y que no hubiese sido posible sin el apoyo de Industrias ERSI-QUIM, empresa que donó partes esenciales del trabajo.
- Como experiencia personal el trabajo nos dejó ver lo valioso de todo lo aprendido durante la carrera, sin embargo, al llevar los conocimientos a la práctica observamos que no basta lo aprendido en el aula, también cuenta la experiencia, y la capacidad de resolver los diferentes problemas con los recursos disponibles.

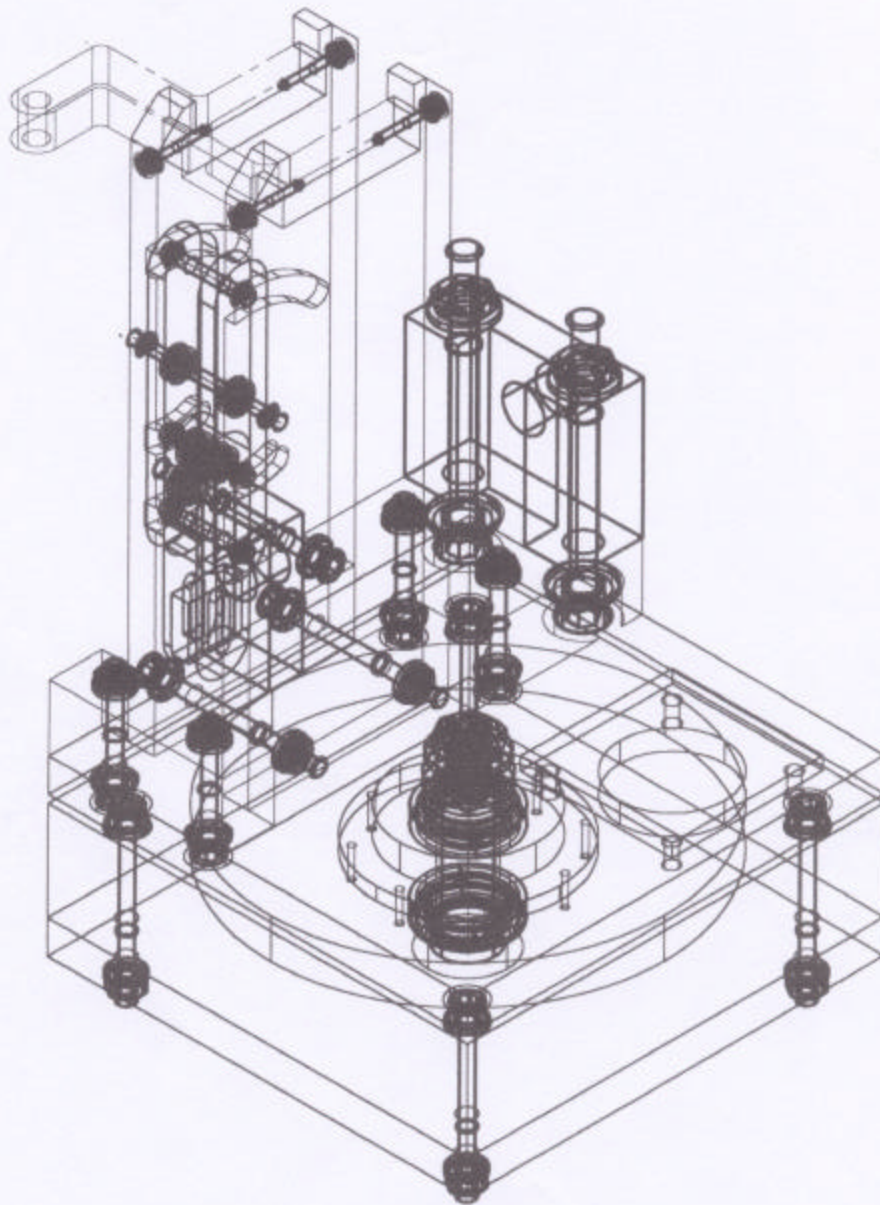
# ÁREAS DE OPORTUNIDAD DE MEJORA

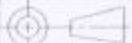
El mecanismo está sujeto a mejoras puesto que es un prototipo. Dentro de estas mejoras se proponen:

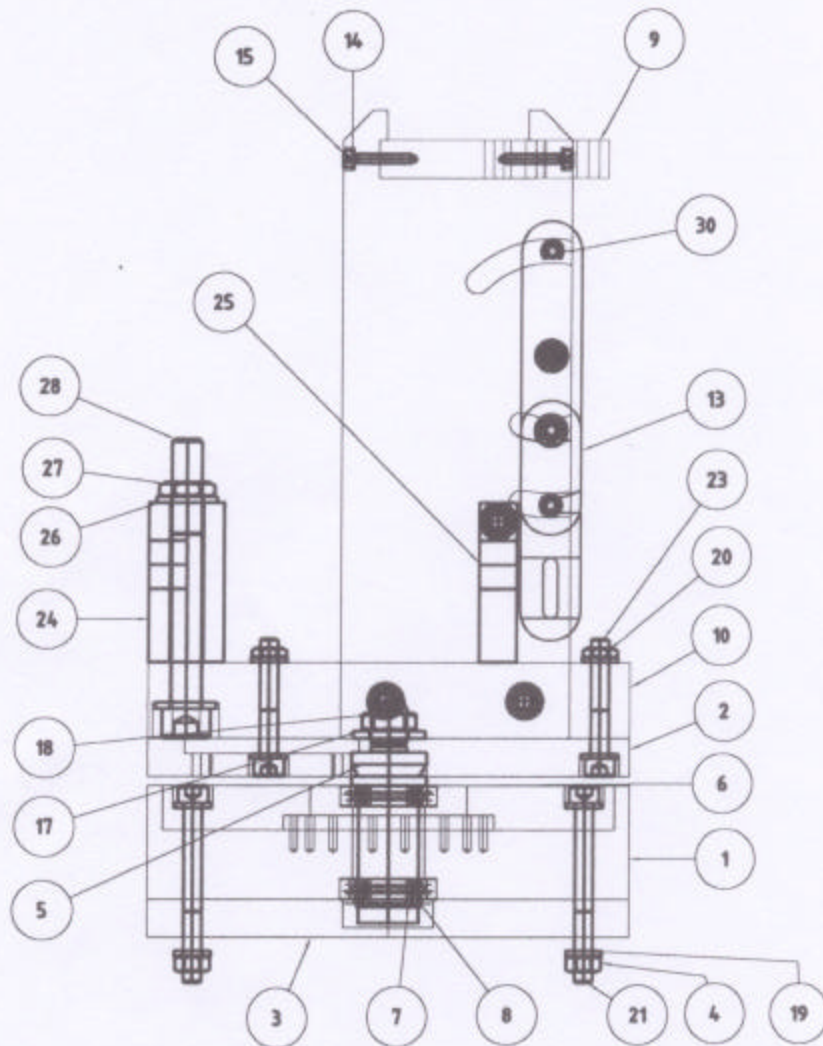
- Los sensores y microinterruptores utilizados en este proyecto no son de uso industrial, por lo que se recomienda cambiarlos para alargar la vida útil.
- El gabinete centralizado de sistemas de potencia no es a prueba de agua, por lo que se recomienda utilizar uno con protección.
- Colocar protecciones a los tornillos sinfín, así como a las guías que proporcionan los movimientos longitudinal y transversal para evitar que el polvo los dañe.
- Se recomienda cambiar las conexiones actuales de la pistola 5P-II (conexiones de gases) por conexiones rápidas para un manejo más sencillo y rápida instalación al mecanismo.
- Las tarjetas de los diferentes circuitos están hechas con tarjetas perforadas para soldadura e interconectadas con cables, por lo que se recomienda sean cambiadas por circuitos impresos.
- En la medida de lo posible, cambiar de lugar todo el sistema ya que en donde se encuentra actualmente hay mucha humedad, lo que provoca que exista corrosión de las partes mecánicas y de los circuitos o en su defecto tratar de controlar el ambiente.
- Colocar un regulador de voltaje para la línea de alimentación al panel de control, ya que la cercanía del área de soldadura eléctrica provoca alteraciones en el equipo, además de que puede dañar el PLC y otros componentes electrónicos.

# ANEXO A

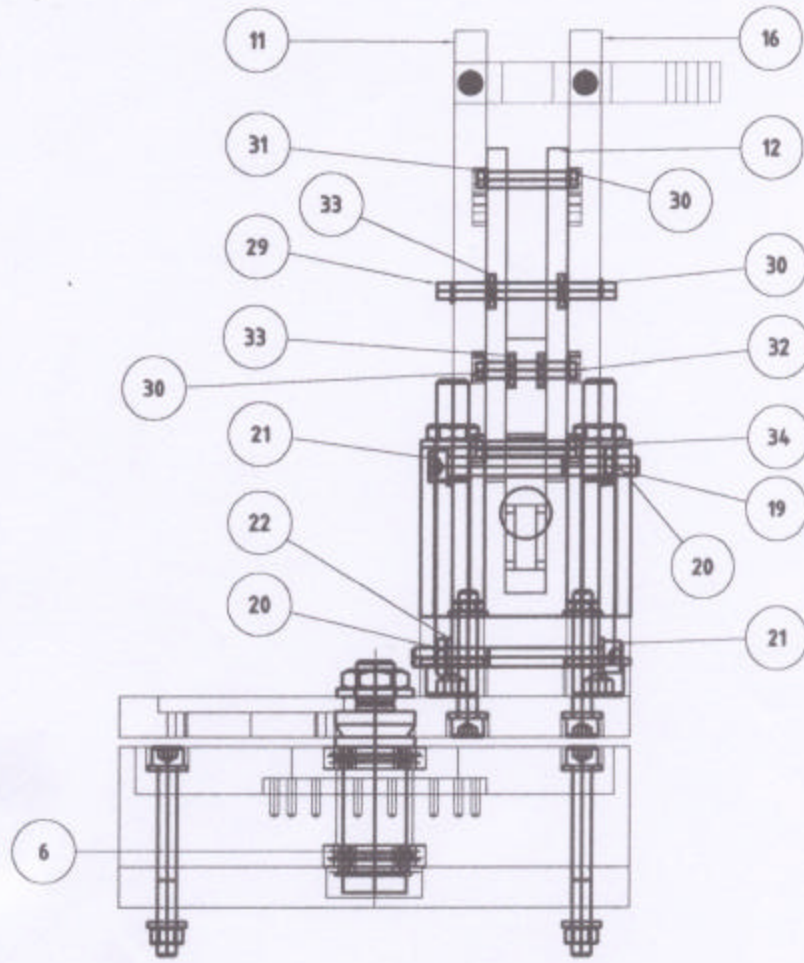
BASE GIRATORIA Y SOPORTE				
Parte	Cantidad	Nombre	Estándar	Material
1	1	Base 1		Nylamid SL
2	1	Base 2		Nylamid SL
3	1	Base 3		Nylamid SL
4	4	Tuerca hexagonal	ISO 4032-M6	
5	1	Flecha del soporte de la pistola		Acero 1018
6	2	Rodamiento de bolas	Din 625 t1-61804-20x32x7	
7	1	Arillo (Shim Ring)	DIN 988-20x28x1.5	
8	1	Prisionero	ANSI B27.7 - 19	
9	1	Soporte 1		Aluminio
10	1	Sujeción del soporte de la pistola		Nylamid SL
11	1	Soporte 2		Aluminio
12	2	Palanca larga		Aluminio
13	1	Palanca corta		Aluminio
14	4	Rondana	ISO 7089-3-140 HV	
15	4	Tornillo Allen	ISO 4762-M3x20	
16	1	Soporte 3		Aluminio
17	1	Rondana	ISO 7089-12-140HV	
18	1	Tuerca hexagonal	ISO 4035-M12	
19	21	Rondana	ISO 7089-6-140HV	
20	7	Tuerca hexagonal	ISO 4035-M6	
21	7	Tornillo Allen	ISO 4762- M6x60	
22	1	Rondana	ISO 7091-6-100HV	
23	4	Tornillo Allen	ISO 4762- M6x40	
24	1	Sujeción trasera del pistón		Nylamid SL
25	1	Sujeción delantera del pistón		Nylamid SL
26	4	Rondana	ISO 7089-10-140HV	
27	2	Tuerca hexagonal	ISO 4035 -M10	
28	2	Tornillo Allen	ISO 4762- M10x90	
29	1	Flecha 1 de la palanca		Acero 1018
30	8	Candado (retaining washer)	DIN 6799-3.2	
31	1	Flecha 2 de la palanca		Acero 1018
32	1	Flecha 3 de la palanca		Acero 1018
33	4	Rodamiento de bolas	DIN 625 T1-618/5-5x11x3	
34	1	Flecha 4 de la palanca		Acero 1018

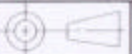


Parte		Modelo tridimensional	Material	Observaciones
Cantidad	Designación			
Fecha: Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy. Tesis	
Referencia:			Dib. GARD	
Acot.:			Rev.	
	Esc: sin	<b>No. 1</b>		

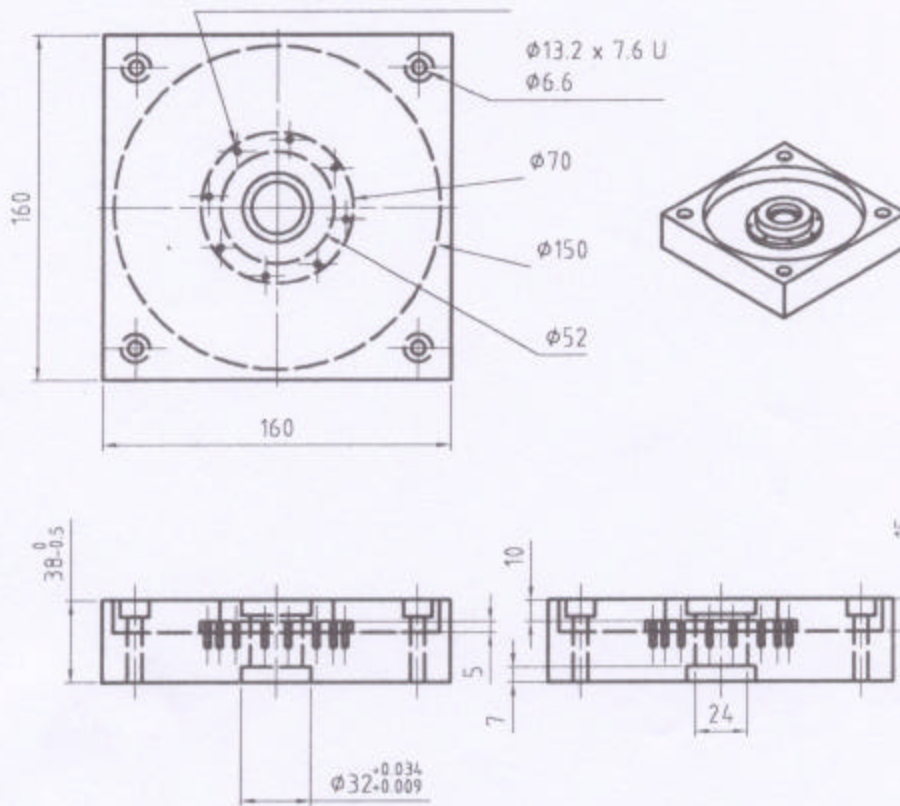


		Referencia 1		
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte		Proy. Tesis
Referencia:	Facultad de Ingeniería, UNAM			Dib. GARD
Acot.:				Rev.
Esc. sin		<b>No. 2</b>		



Parte	Cantidad	Referencia 2 Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte		Proy. Tesis
Referencia:	Facultad de Ingeniería, UNAM			Dib. QARD
Acol:				Rev.
 Esc.: sin				<b>No. 3</b>

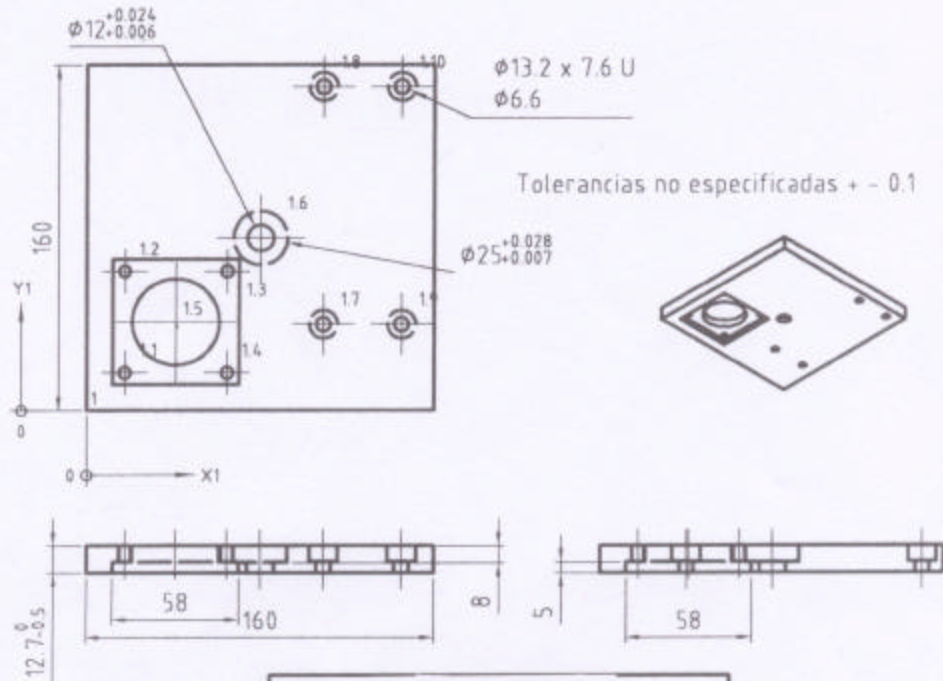
M3 x 0.35 x 10 / 11.4  
8 agujeros equiespaciados



Tolerancias no especificadas + - 0.1

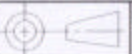
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
1	1	Base 1	Nylamid SL	
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingenieria, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:	Dib. GARD			
Acot:	mm			Rev.
	Esc.: 1:2.6			<b>No. 4</b>

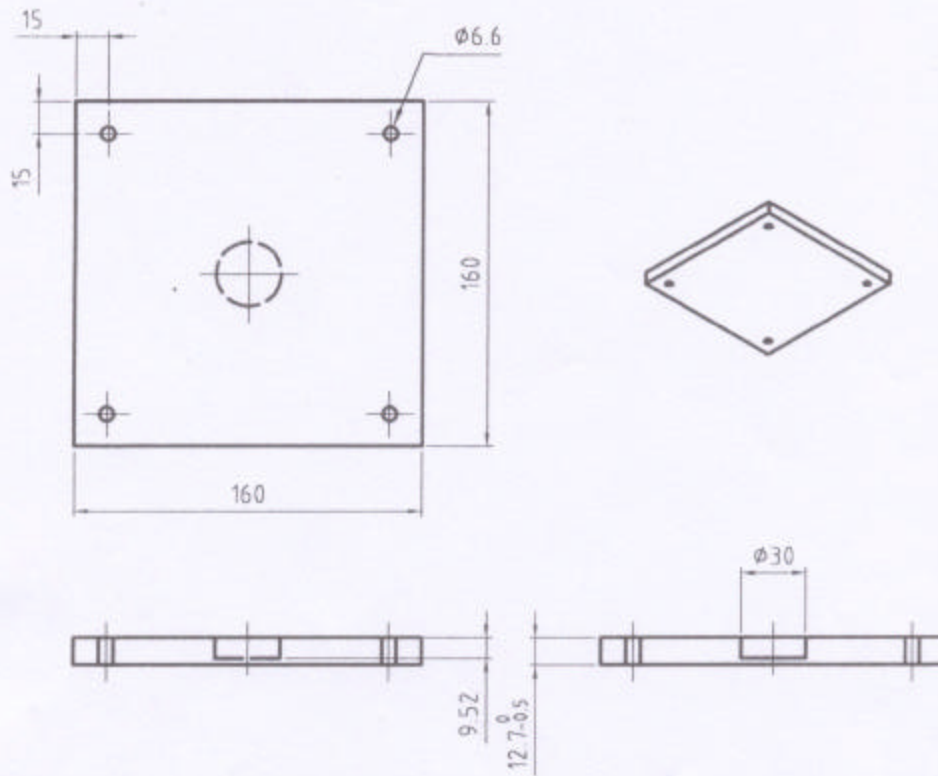




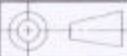
Tolerancias no especificadas + - 0.1

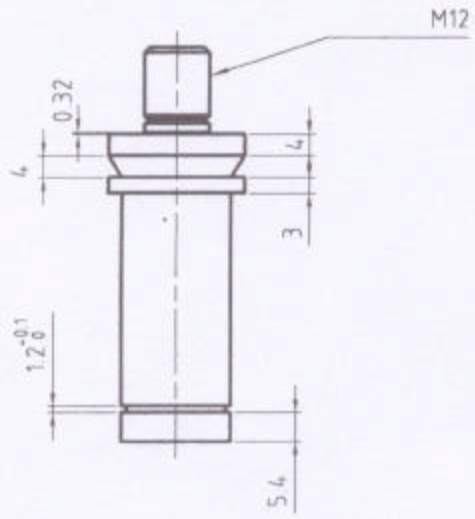
Tabla de coordenadas			
	X	Y	$\phi$
1.1	17.61	17.61	$\phi 5.5$
1.2	17.61	64.61	$\phi 5.3$
1.3	41.11	41.11	$\phi 4.0$
1.4	64.61	17.61	$\phi 5.5$
1.5	64.61	64.61	$\phi 5.5$
1.6	80	80	$\phi 12$
1.7	109	40	$\phi 6.6$
1.8	109	150	$\phi 6.6$
1.9	145	40	$\phi 6.6$
1.10	145	150	$\phi 6.6$

2	1	Base 2	Nylamid SL	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:				Dib. GARD
Acot.:	mm			Rev.
	Esc.: 1:2.6			<b>No. 5</b>

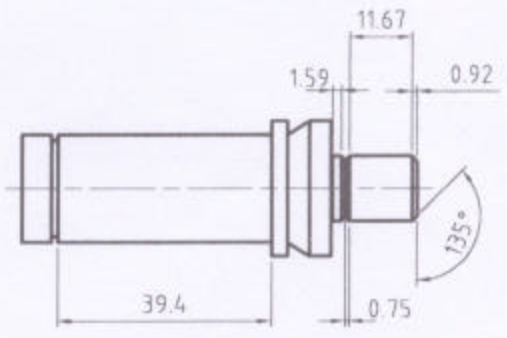
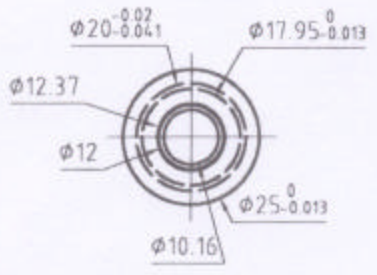
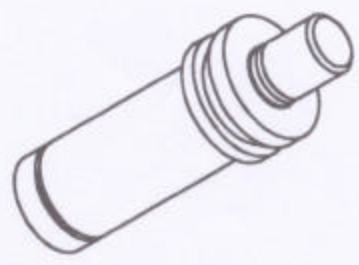


Tolerancias no especificadas + - 0.1

3	1	Base 3	Nylamid SL	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte:		Proy. Tesis
Referencia:		Facultad de Ingeniería, UNAM		Dib. GARD
Acot:	mm			Rev.
	Esc.: 1:2.6			<b>No. 6</b>

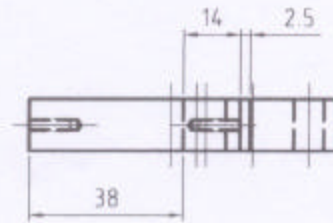
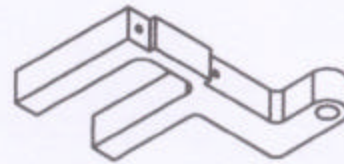
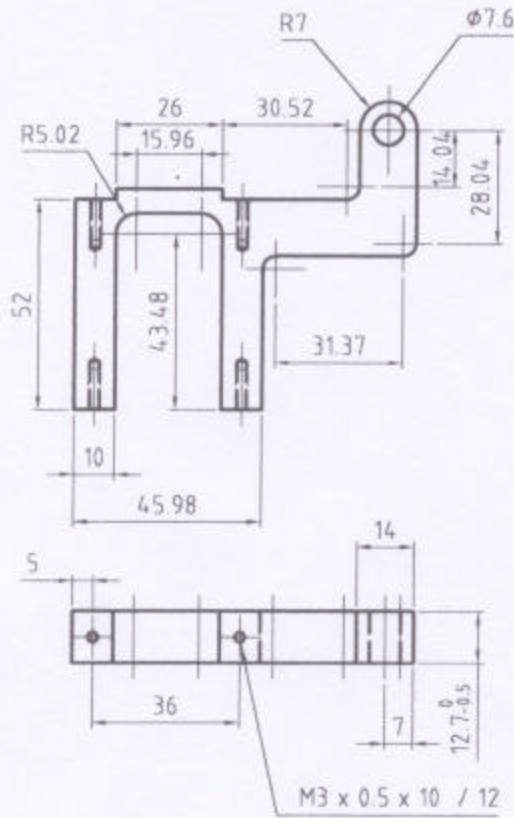


tolerancias no especificadas + - 0.1

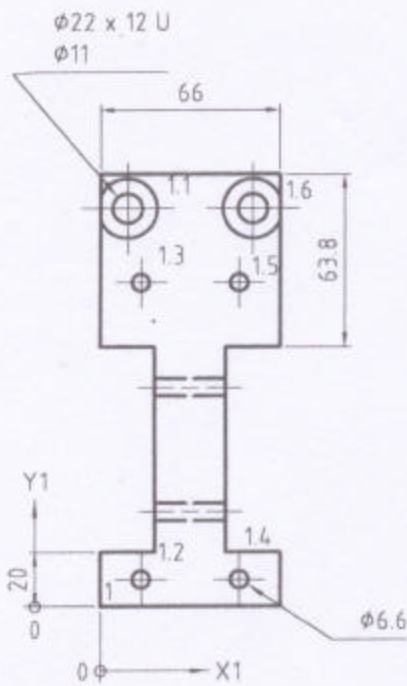


5	1	Flecha del soporte de la pistola	Acero 1018	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:				Dib. GARD
Acol:	mm			Rev.
	Esc. 1:1.1			<b>No. 7</b>

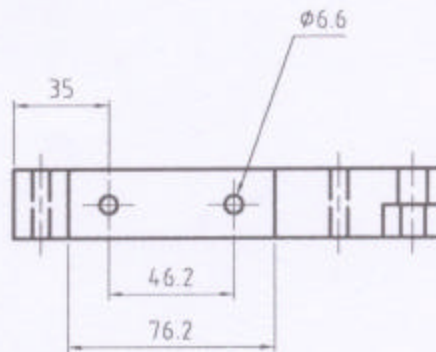
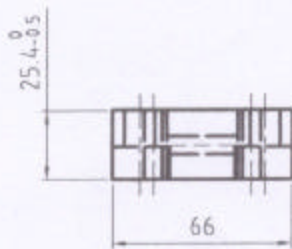
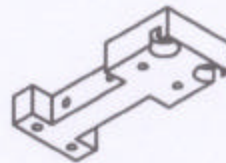
Radios no especificados = 3.17  
 Tolerancias no especificadas + - 0.1



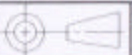
9	1	Soporte 1	Aluminio	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingenieria, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:				Db. GARD
Acol.:	mm			Rev.
	Esc.:			<b>No. 8</b>
	1:1.44			

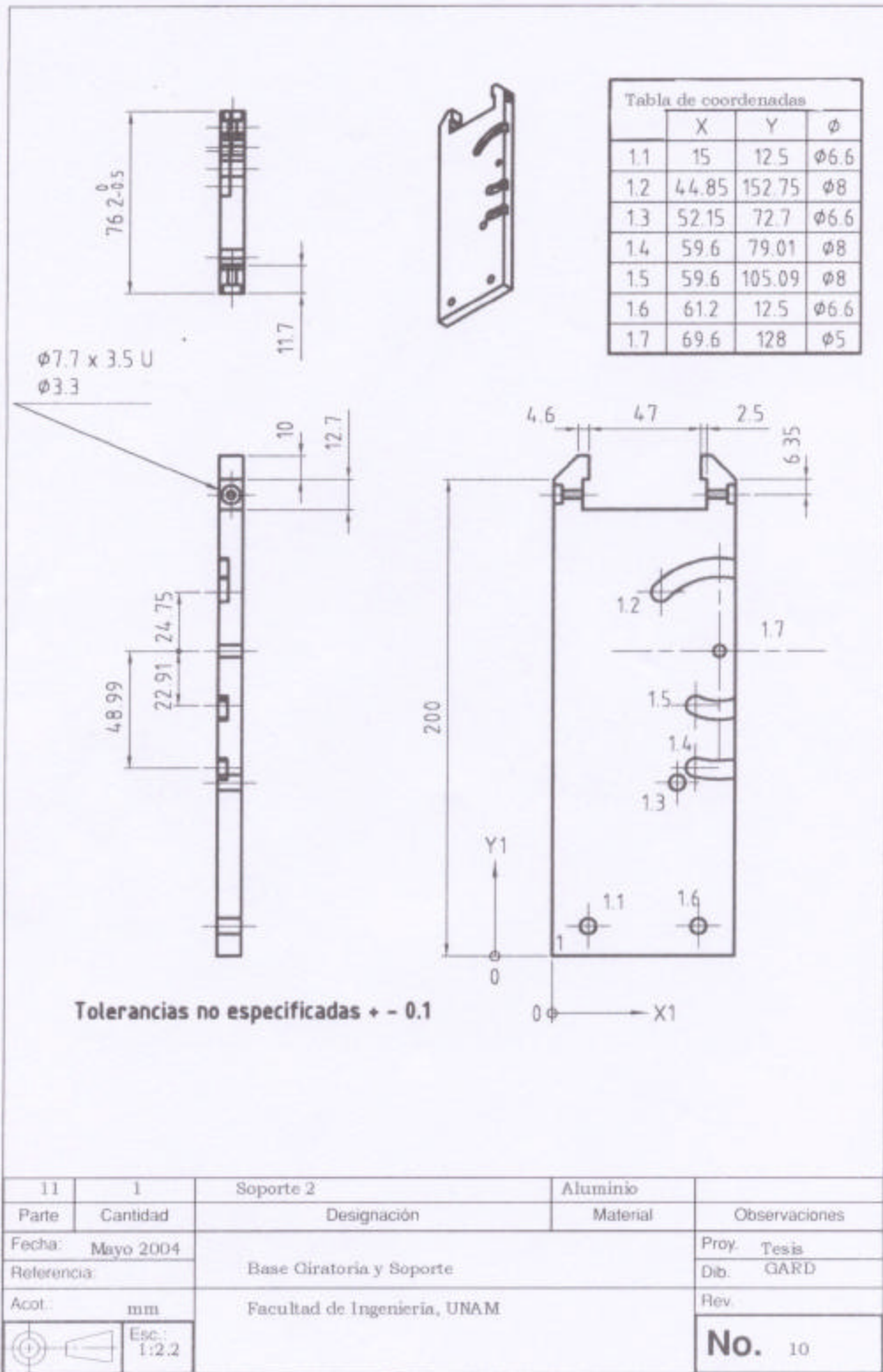


	X	Y	$\phi$
1.1	10	14.7.5	$\phi 11$
1.2	15	10	$\phi 6.6$
1.3	15	120	$\phi 6.6$
1.4	51	10	$\phi 6.6$
1.5	51	120	$\phi 6.6$
1.6	56	14.7.5	$\phi 11$

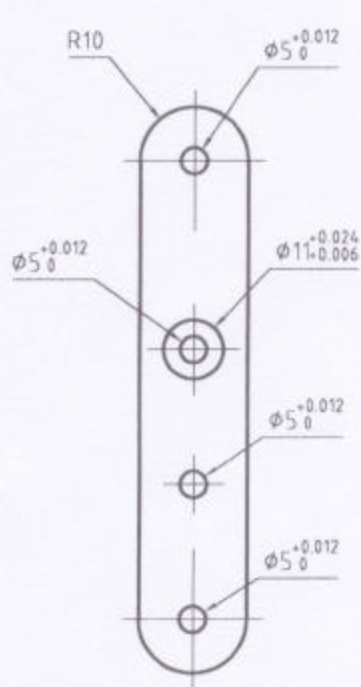
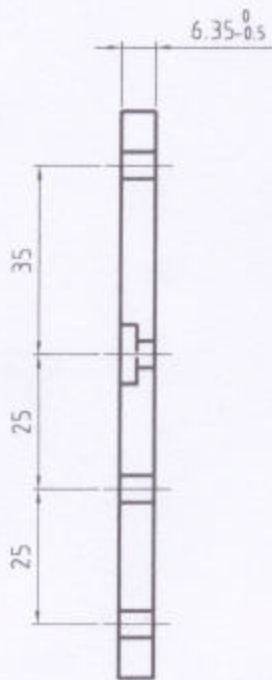
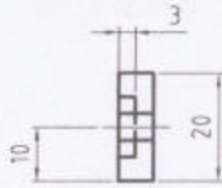


Tolerancias no especificadas + - 0.1

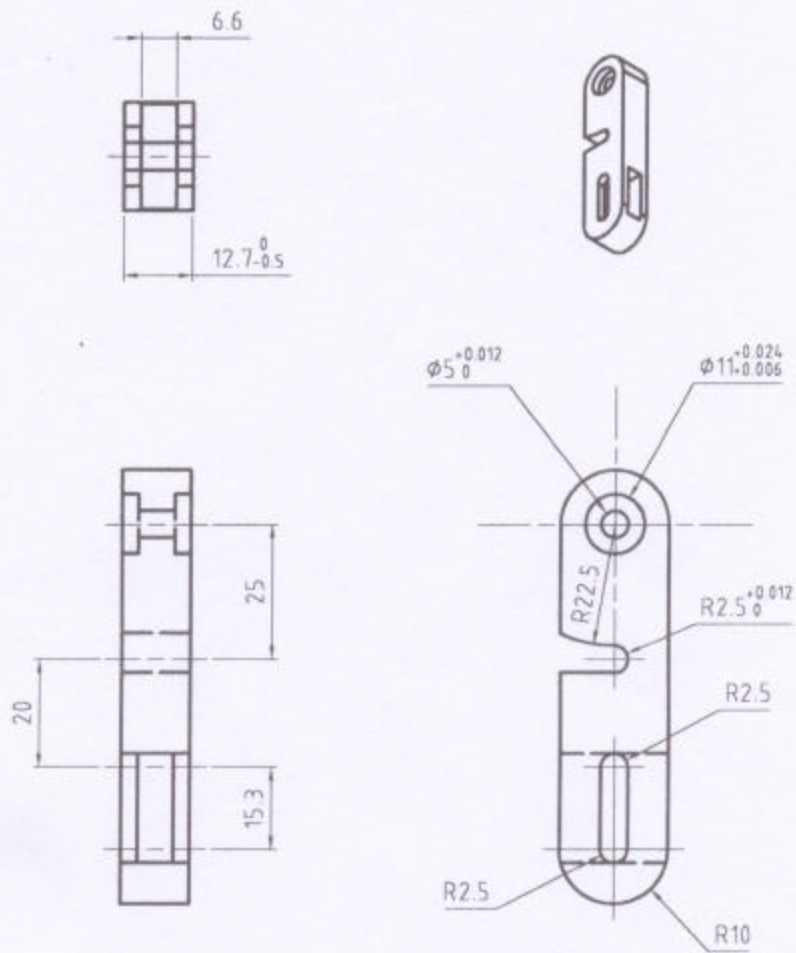
10	1	Sujeción del soporte de la pistola	Nylamid SL	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:				Dib. GARD
Acot.:	mm			Rev.
	Esc. 1:2.2			<b>No. 9</b>



Tolerancias no especificadas + - 0.1



Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
12	2	Palanca larga	Aluminio	
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:	Dib. GARD			
Acot.: mm	Rev.			
	Esc.: 1:1.1			<b>No.</b> 11

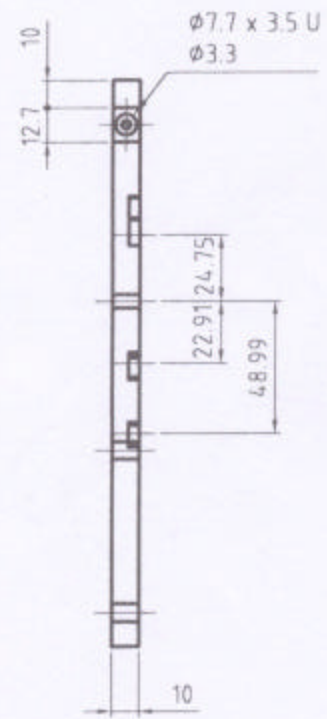
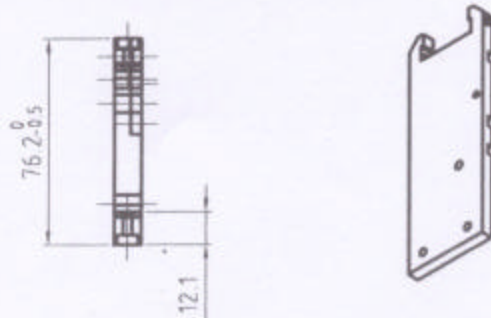


Tolerancias no especificadas  $\pm 0.1$

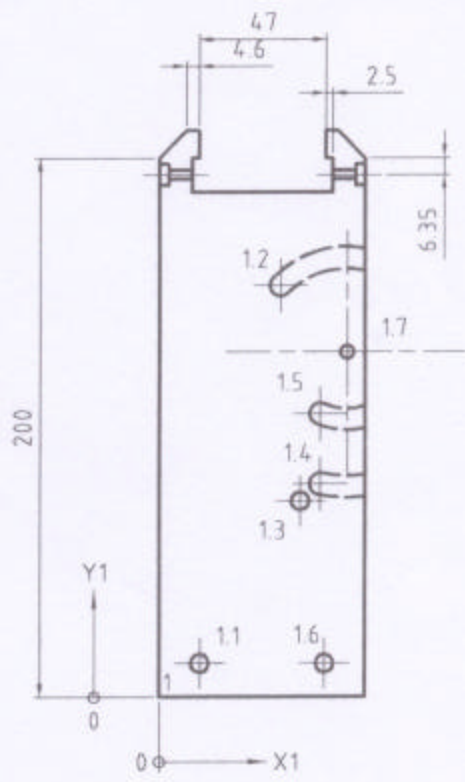
13	1	Palanca corta	Aluminio	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha: Mayo 2004		Base Giratoria y Soporte		Proy. Tesis
Referencia:				Dib. GARD
Acol: mm				Rev.
	Esc.: 1:1.1			<b>No.</b> 12



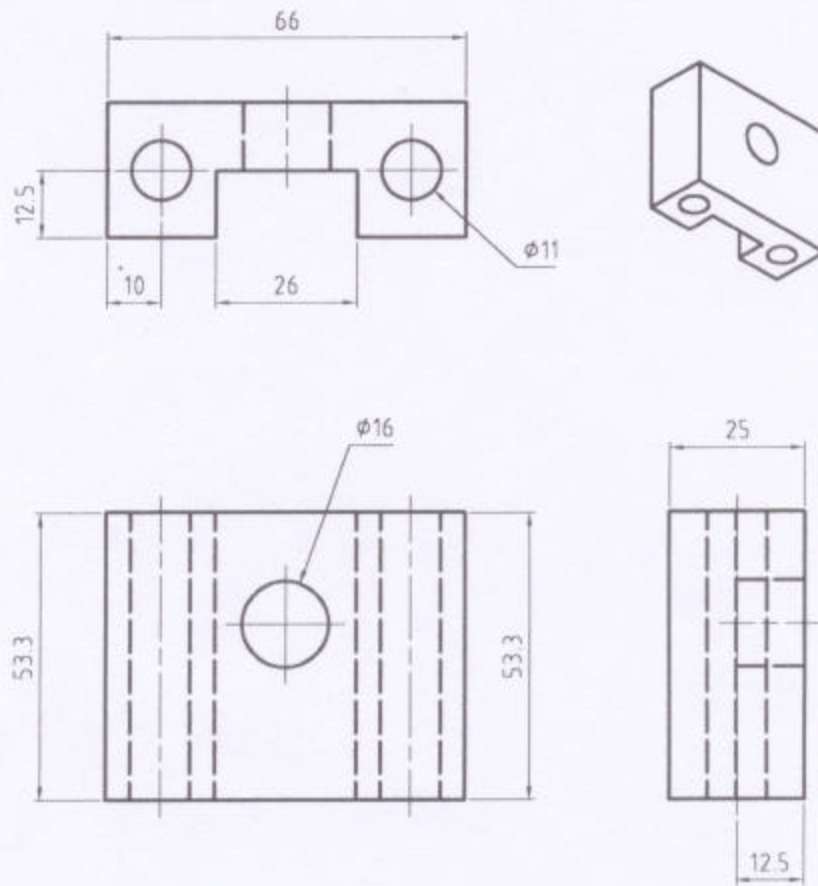
Tolerancias no especificadas + - 0.1



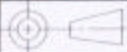
	X	Y	$\phi$
1.1	15	12.5	$\phi 6.6$
1.2	44.85	152.75	$\phi 8$
1.3	52.15	72.7	$\phi 6.6$
1.4	59.6	79.01	$\phi 8$
1.5	59.6	105.09	$\phi 8$
1.6	61.2	12.5	$\phi 6.6$
1.7	69.6	128	$\phi 5$



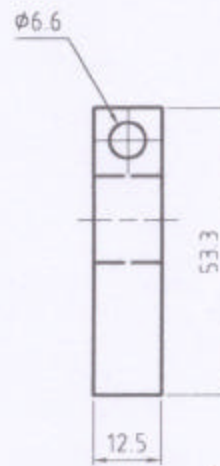
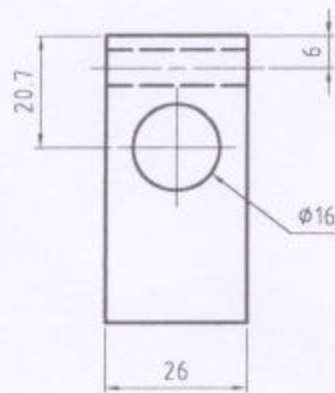
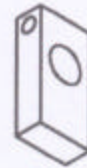
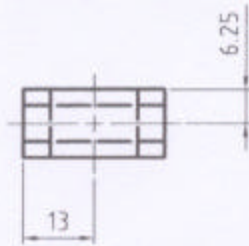
16	1	Soporte 3	Aluminio	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:				Dib. GARD
Acol.:	mm			Rev.
Esc. 1:2.2			<b>No. 13</b>	

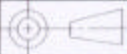


Tolerancias no especificadas + - 0.1

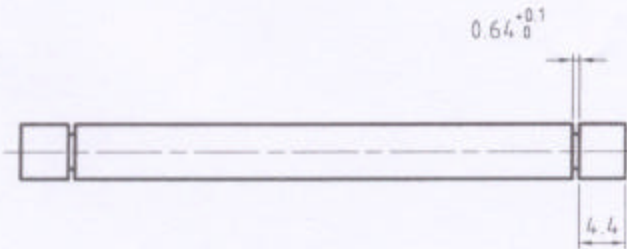
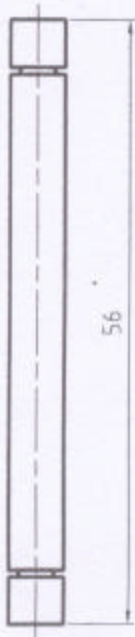
24	1	Sujeción trasera del pistón	Nylamid SL	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:				Dib. GARD
Acot.:	mm			Rev.
	Esc.: 1:1.1			<b>No.</b> 14

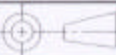
Tolerancias no especificadas + - 0.1



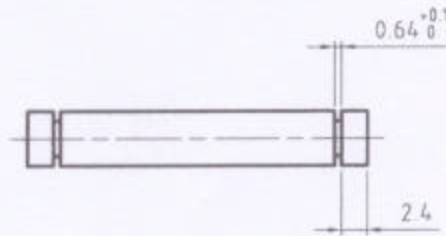
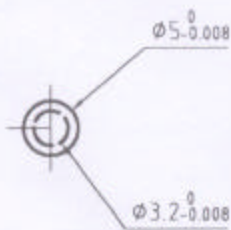
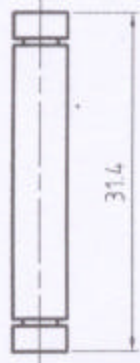
25	1	Sujeción delantera del pistón	Nylamid SL	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy. Tesis
Referencia:				Dib. GARD
Acol:	mm			Rev.
	Esc.: 1:1.1			<b>No.</b> 15


Tolerancias no especificadas + - 0.1



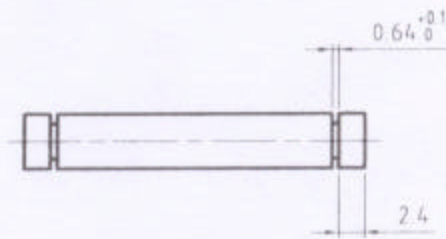
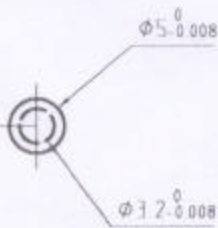
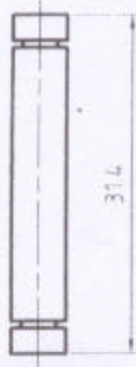
29	1	Flecha 1 de la palanca	Acero 1018	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha:	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte:		Proy. Tesis
Referencia:		Facultad de Ingeniería, UNAM		Dib. GARD
Acol:	mm			Rev.
	Esc.: 1.8:1			<b>No.</b> 16

Tolerancias no especificadas + - 0.1



31	1	Flecha 2 de la palanca	Acero 1018	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha: Mayo 2004		Base Giratoria y Soporte		Proy. Tesis
Referencia:				Dib. GARD
Acot: mm		Facultad de Ingeniería, UNAM		Rev
	Esc. 1:8:1			<b>No.</b> 17

Tolerancias no especificadas + - 0.1



32	1	Flecha 3 de la palanca	Acero 1018	
Parte	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
Fecha	Mayo 2004	Base Giratoria y Soporte	Facultad de Ingeniería, UNAM	Proy Tesis
Referencia				Dib GARD
Acot	mm			Rev
	Esc. 1:8:1			<b>No.</b> 18

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASM HANDBOOK, Surface Engineering, ed. 3ra., Vol. 5, USA, 1996.
- [2] B. HEIMANN, Robert, Plasma-Spray Coatings, Alemania, Ed. VCH, 1996.
- [3] M. SCHMITT, Neil, A fondo: Robótica y sistemas automáticos, España, Ed. ANAYA, 1988.
- [4] RIETDIJK, J.A., Mechatronics in Products and Manufacturing Conference, Lancaster, Inglaterra, 1989.
- [5] <http://www.mecamex.net/sitio%20mecatro/Articulo1.ph>
- [6] <http://dimei.fi-b.unam.mx/MECATRONICA/mision.htm>
- [7] METALS HANDBOOK, Vol. 5, Ed. 1996.
- [8] A. BRADLEY, D., et al., Mechatronics Electronics in products and processes, Ed. Chapman & Hall, Great Britain, 1996.
- [9] SHIGLEY, JOSEPH EDWARD et al., "Mechanical Engiennering Design", ed. 5a., Ed. McGraw Hill, 1990.
- [10] BOLTON, William, Mecatrónica: Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica, Ed. Alfaomega, México, 2002.
- [11] CERVANTES CABELLO, José Javier, Notas para el curso de programación de equipos de control numérico y robots, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2003.
- [12] HIBBELER, Russell, Mechanics of materials, Ed. Prentice-Hall, International Edition, 2004
- [13] L. NORTON, Robert, Diseño de máquinas, Ed. Prentice Hall, México, 1999.
- [13] P. GROVER, Mikell, Automation, Production, Systems, and Computer Integrated Manufacturing, Ed. Prentice Hall, USA, 1980.
- [14] PAWLOWSKI, Lech, The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, Ed. J.Wiley & Sons, 1995.
- [15] SULZER METCO, Type 5P-II Thermospray Gun, Westbury, NY, 1995.
- [16] <http://www.fairchildsemi.com/ds/TI/TIP142.pdf>