

70  
2ej



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

## PROPUESTA METODOLOGICA DEL DISEÑO DE UN MANIPULADOR

T E S I S  
Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico Electricista  
(Area Mecánica)

p r e s e n t a

JULIO ALEJANDRO PEREZ CONTRERAS

Director de Tesis: Dr. Marcelo López Parra



MEXICO, D. F.

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

278887



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.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por su guía y apoyo en todo momento, gracias a los cuales, he podido concluir una etapa más en mi vida.

A mis hermanos, por su ejemplo de lucha y esfuerzo para alcanzar las metas trazadas.

Al Dr. Marcelo López Parra, por su asesoría y colaboración en la realización de esta tesis.

# CONTENIDO

OBJETIVOS	III
INTRODUCCIÓN	IV
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	VIII
<b>CAPÍTULO 1 HISTORIA EN LA ROBÓTICA</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 ELABORACIÓN DE ESPECIFICACIONES</b>	<b>9</b>
2.1 Clarificación de la tarea	9
2.2 Restricciones y Requerimientos	9
<b>CAPÍTULO 3 DISEÑO CONCEPTUAL</b>	<b>19</b>
3.1 Clasificación	19
3.2 Identificación de Estructuras Funcionales	26
3.2.1 Función General	26
3.2.2 Descomposición Funcional	28
3.2.3 Material, Energía y Señales	34
3.2.4 Estructuras Funcionales	35
3.2.4.1 Flujo de Material	35
3.2.4.2 Flujo de Señales	44
3.2.4.3 Flujo de Energía	46
3.3 Establecimiento de Sistemas	48
3.4 Generación de Conceptos	48
3.5 Combinación de Conceptos Funcionales y Selección de Alternativas	56
3.6 Evaluación de Alternativas de Solución	61
<b>CAPÍTULO 4 DISEÑO DE CONFIGURACIÓN</b>	<b>68</b>
4.1 Configuración	68
4.2 Componentes	71
<b>CAPÍTULO 5 MODELACIÓN</b>	<b>76</b>
5.1 Cinemática Directa	76
5.2 Cinemática Inversa	81
5.3 Velocidad de Variables Articulares	85
5.4 Aceleración de Variables Articulares	87

5.5 Perfil de Trayectoria	88
5.5.1 Perfil de Posición	92
5.5.1 Perfil de Velocidad y Aceleración	93
5.6 Caracterización	94
5.6.1 Tiempos	98
5.6.2 Velocidades y Aceleraciones Máximas	102
<b>APÉNDICE A</b>	<b>106</b>
<b>APÉNDICE B</b>	<b>129</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>140</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>142</b>

## OBJETIVOS

El objetivo de esta tesis es, presentar una aplicación derivada de algunas de las distintas metodologías de diseño con mayor difusión, y desarrollar por medio de ésta, una propuesta de diseño para un manipulador. Cabe aclarar que, no se pretende establecer propiamente una metodología, tan sólo, se busca adaptar diferentes métodos a un problema, y obtener así lo que se considera una solución a éste.

## **INTRODUCCIÓN**

En las últimas décadas, diferentes personas han desarrollado metodologías de diseño según sus necesidades y su punto de vista sobre el diseño. Entre los autores más difundidos se encuentran G. Pahl y W. Beitz, David. G. Ullman, Michael French, por mencionar algunos. Son tan variadas las metodologías que se pueden utilizar al momento de diseñar, que a veces resulta difícil encontrar alguna que se apege a nuestras necesidades ya que no se pueden aplicar como una receta y por lo mismo, no es tan sencilla su aplicación. A lo largo del presente trabajo, se aplicarán los métodos que se han considerado más significativos dentro de estas metodologías.

La metodología seguida en esta tesis contiene elementos pertenecientes a distintos autores (en especial Pahl & Beitz [5] y Ullman [6]); esto no significa que se pretenda establecer una nueva metodología a partir de éstas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, en muchos ocasiones es difícil aplicarlas al pie de la letra. Por ejemplo, cuando se tienen grandes limitaciones económicas, a veces es más sencillo seleccionar componentes ya existentes en el mercado en lugar de diseñarlos partiendo de cero; por el contrario, cuando el aspecto económico no es tan limitante, se pueden diseñar componentes que den origen a nuevos diseños. De consideraciones como estas, depende que una metodología (ya existente) se aplique en su totalidad.

Todas las metodologías parten de un tronco común, es decir, se desarrollan tomando en cuenta los mismos elementos esenciales como son: entender e

identificar las necesidades y condiciones del problema, generar, conceptualizar y describir ideas de solución, seleccionar la más adecuada y llevarla al cabo. Ahora bien, la diferencia radica en que cada autor nombra de diferente manera a cada etapa y las implementa según le parezca, es decir, cada uno utiliza diferentes métodos en cada una. Algunos llaman *planeación* o *clarificación de la tarea* a identificar las necesidades y condiciones del problema; otros se refieren como *diseño conceptual* a generar y conceptualizar, utilizando técnicas de lluvia de ideas o matrices morfológicas; para evaluar y seleccionar la más adecuada utilizan métodos de eliminación directa, matrices de decisión, asignación de pesos o porcentajes; también se refieren como *diseño de configuración*, *diseño de forma* o *diseño de cuerpo* a la actividad de describir ampliamente las formas y configuración de la solución elegida; finalmente llaman *diseño de detalle* a la etapa en que se generan los planos y de más elementos necesarios para su manufactura.

En la figura 1 se muestra un esquema que describe el proceso utilizado para proponer el diseño de un manipulador. El flujo que se sigue es iterativo, pues conforme se desarrolla un diseño van saliendo aspectos que no fueron considerados desde un inicio, aspectos que impiden que se lleve a término un diseño o bien, elementos que permitan mejorar o reevaluar el diseño ya existente. Las flechas continuas indican el flujo original, las líneas punteadas indican retorno a una etapa previa o salida para buscar información. La *Búsqueda de Información* puede regresar a la etapa que la originó o a cualquier otra.

El área de aplicación de la tesis tiene que ver con la Robótica, es por ello que en el capítulo primero se presenta una cronología del desarrollo que ésta ha tenido desde sus inicios. En el capítulo segundo, se inicia propiamente el flujo mostrado en la figura 1. Se parte de la *Clarificación de la Tarea* en la cual, se entiende el problema, se plantean las necesidades y se formulan los objetivos; se establecen las especificaciones las cuales, incluyen las condiciones iniciales o restricciones del problema, las características que se quiere en el diseño, y los

elementos (requerimientos) que permitan alcanzar éstas últimas. El capítulo tercero trata el *Diseño Conceptual* que recurre esencialmente, a la descomposición funcional y a matrices morfológicas para la generación de conceptos y alternativas. El capítulo cuarto trata el *Diseño de Configuración*, que define la configuración de la alternativa de solución, identifica y da forma a los componentes de ésta, generando una propuesta. Finalmente, en el capítulo quinto se realiza un *Modelado Matemático* de la cinemática inversa y directa, con el objeto de tener una idea más clara del funcionamiento del manipulador.

La etapa de *Diseño de Detalle* se desarrolla una vez definido en su totalidad el diseño. La propuesta presentada contiene conceptos que están sujetos a experimentación y estudios más minuciosos, razón por la cual, el *Diseño de Detalle* no se realiza. Además, ésta etapa por si misma puede dar pie a otro trabajo de tesis ya que, abarca desde la generación de planos de fabricación hasta todo un análisis de procesos de manufactura, costo-beneficio, etc., lo cual ya no se contempla en este trabajo.

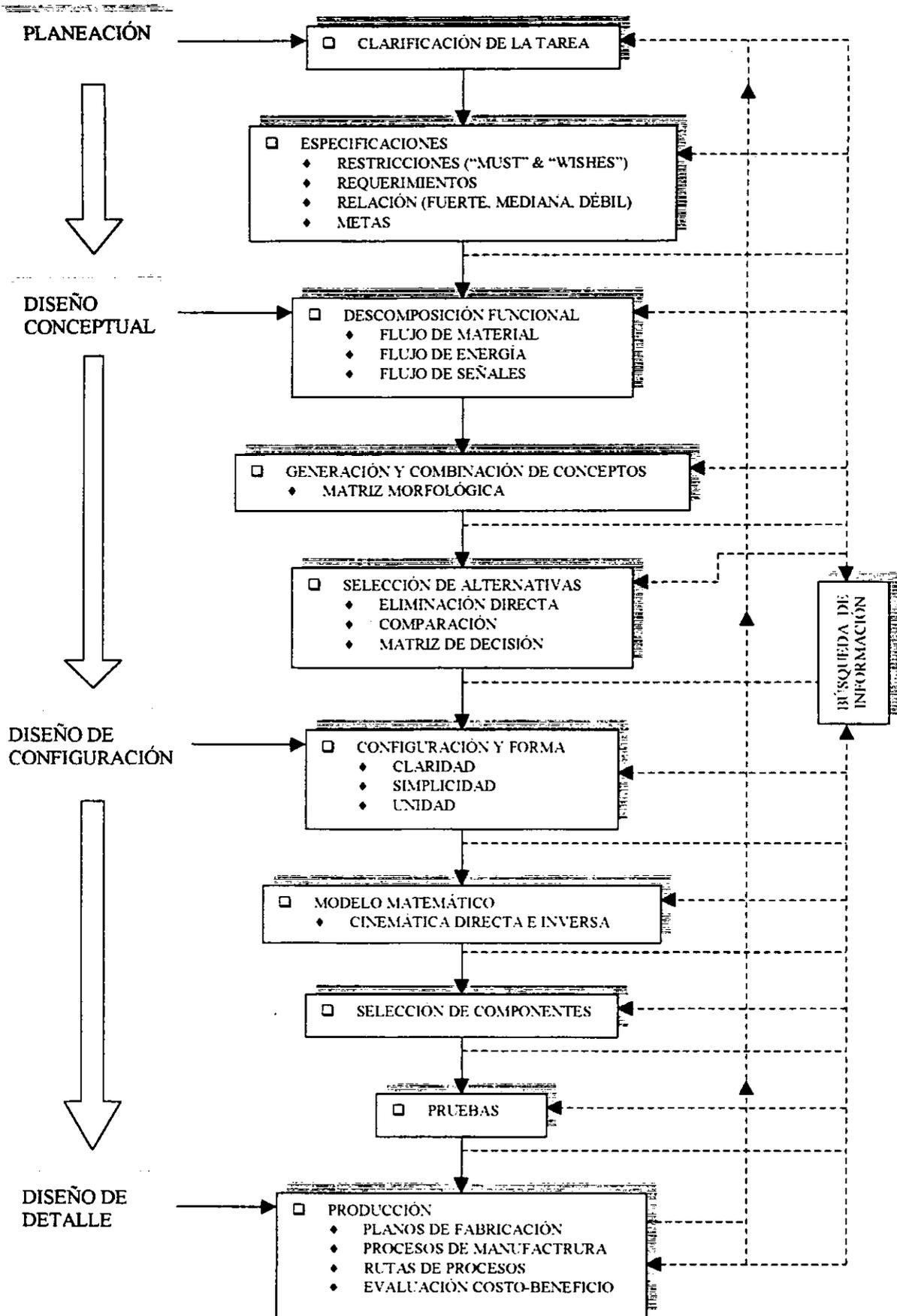


Fig. 1 Proceso de Diseño.

# ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

<b>Figura 1</b>	<b>VII</b>
Figura 1.1	8
Figura 1.2	8
Figura 2.1	13
Figura 2.2	16
Figura 2.3	16
Figura 2.4	17
Figura 2.5	18
Figura 2.6	18
Figura 3.1	20
Figura 3.2	21
Figura 3.3	21
Figura 3.4	22
Figura 3.5	24
Figura 3.6	26
Figura 3.7	28
Figura 3.8	29
Figura 3.9	29
Figura 3.10	30
Figura 3.11	31
Figura 3.12	31
Figura 3.13	31
Figura 3.14	32
Figura 3.15	33
Figura 3.16	35
Figura 3.17	36
Figura 3.18	39
Figura 3.19	40
Figura 3.20	41
Figura 3.21	41
Figura 3.22	43
Figura 3.23	43
Figura 3.24	44
Figura 3.25	45
Figura 3.26	47
Figura 3.27	49
Figura 3.28	62
Figura 3.29	63
Figura 3.30	65
Figura 3.31	66
Figura 4.1	70
Figura 4.2	74
Figura 4.3	75
Figura 5.1	78

Figura 5.2	78
Figura 5.3	84
Figura 5.4	90
Tabla 1.1	5
Tabla 2.1	11
Tabla 2.2	12
Tabla 2.3	14
Tabla 3.1	24
Tabla 3.2	27
Tabla 3.3	37
Tabla 3.4	42
Tabla 3.5	52
Tabla 3.6	53
Tabla 3.7	54
Tabla 3.8	58
Tabla 3.9	60
Tabla 3.10	57
Tabla 3.11	57
Tabla 3.12	57
Tabla 3.13	61
Tabla 3.14	64
Tabla 4.1	69
Tabla 4.2	71
Tabla 4.3	72
Tabla 5.1	91
Tabla 5.2	98
Tabla 5.3	98
Tabla 5.4	99
Tabla 5.5	101
Tabla 5.6	102
Tabla 5.7	104
Tabla 5.8	104
Tabla 5.9	105

## CAPÍTULO 1

### HISTORIA EN LA ROBÓTICA

Por siglos, la gente ha tratado de construir mecanismos para imitar partes del cuerpo humano. Los antiguos egipcios adaptaban brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses. Estos brazos eran operados por los sacerdotes, quienes clamaban que actuaban inspirados por los dioses. Los griegos construyeron estatuas operadas hidráulicamente, para ilustrar los principios de la hidráulica.

El concepto popular de un robot es que tiene apariencia humana y que actúa como un ser humano. Este concepto humanoide ha sido inspirado y estipulado por varias narraciones de ciencia-ficción.

Una obra checoslovaca publicada en el año de 1917 por Karel Capek denominada *Rossum's Universal Robots*, dio lugar al término *robot*. La palabra checa "*robota*" significa servidumbre o trabajador forzado, y cuando se tradujo al inglés se convirtió en el término *robot*. Dicha narración se refiere a un brillante científico llamado Rossum y su hijo, quienes desarrollan una sustancia química que es similar al protoplasma. Utilizan esta sustancia para fabricar robots, y sus planes consisten en que los robots sirvan a la clase humana de forma obediente y para realizar todos los trabajos físicos. Rossum prosigue realizando mejoras en el diseño de los robots, eliminando órganos y otros elementos innecesarios, y finalmente desarrolla un ser "perfecto". El argumento experimenta un giro

desagradable cuando los robots perfectos comienzan a no cumplir con su papel de servidores y se rebelan contra sus dueños, destruyendo toda vida humana.

Entre los escritores de ciencia-ficción, Issac Asimov ha contribuido con varias narraciones relativas a robots, comenzando en 1939, y a él se atribuye el acuñamiento del término “robótica”. La imagen de un robot que aparece en su obra es el de una máquina bien diseñada y con una seguridad garantizada que actúa de acuerdo con tres principios. Estos principios fueron denominados por Asimov las Tres Leyes de la robótica, y son:

- 1) Un robot no puede actuar en contra de un ser humano o, mediante la inacción, permitir que un ser humano sufra daños.
- 2) Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, salvo que este en conflicto con la Primera Ley.
- 3) Un robot debe proteger su propia existencia, a no ser que este en conflicto con las dos primeras leyes.

Varias películas cinematográficas y de televisión han añadido al saber popular de la robótica algunos robots que actúan de servidores amistosos y compañeros de aventuras en diferentes maneras así como, una imagen de robots con cierto peligro de locura homicida. Como en la cinta *The Day Earth Stood Still*, de 1951, *2001: Odisea del espacio*, de 1968, la serie de *La Guerra de las Galaxias* (*Guerra de las Galaxias* en 1977, *El Imperio contraataca* en 1980 y *El Retorno del Jedi* en 1983), la serie *Short Circuit*, la serie de televisión *Star Trek the Next Generation* y *Terminator* entre otras.

Durante el siglo XVII y XVIII, ingeniosos dispositivos mecánicos fueron construidos en Europa. Hicieron el papel de imitaciones muy convincentes de acciones humanas y animales, y fueron de un tremendo éxito en la época. Éstos incluían modelos exactos de personas con brazos, labios y otras partes

manejadas por medio de eslabonamientos y levas controlados por selectores de barril rotacionales, lo que se utilizaba como el programa en el dispositivo. Algunos podían escribir y dibujar como la muñeca construida en 1805 por Henri Maillardet la cual, se encuentra en el Instituto Franklin en Filadelfia, Pennsylvania, y uno famoso en particular, un pastor, que podía tocar una flauta. Arte y tecnología habían avanzado al punto tal que, el diseñador Jacques Vaucanson, fue capaz de hacer que unos labios de hule se pudieran mover en la posición adecuada para controlar el flujo de aire hacia la flauta para producir notas musicales, de igual manera en que un músico lo hace. Hubo otras invenciones mecánicas durante la revolución industrial, dirigidas al sector de la producción textil. Entre ellas pueden citarse la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), el telar mecánico de Cartwright (1785), el telar de Jacquard (1801) y otros.

En tiempos más recientes, el control numérico y la telequérica son dos tecnologías importantes en el desarrollo de la robótica. El control numérico (NC) se desarrolló para máquinas-herramientas a finales de los años 40 y principios de los años 50. Como su nombre lo indica, el control numérico implica el control de las acciones de una máquina-herramienta por medio de números. Esta basado en el trabajo original de John Parsons, que concibió el empleo de tarjetas perforadas, que contienen datos de posiciones, para controlar los ejes de una máquina-herramienta. Es interesante destacar el hecho de que el telar de Jacquard y el ejecutor de obras al piano, desarrollados hacia 1876 pueden considerarse como precursores de la máquina-herramienta NC moderna. Ambos dispositivos operaban utilizando una forma de cinta de papel perforada como un programa para controlar las acciones de las respectivas máquinas.

El campo de la telequérica abarca la utilización de un manipulador remoto controlado por un ser humano. A veces denominado teleoperador, el manipulador remoto es un dispositivo mecánico que traduce los movimientos del operador humano en movimientos correspondientes en una posición remota. Un ejemplo

frecuente de un teleoperador esta en la manipulación de sustancias peligrosas tales como materiales radiactivos. El operador humano puede permanecer en un lugar seguro. Los primitivos dispositivos eran completamente mecánicos, pero los sistemas más modernos utilizan una combinación de sistemas mecánicos y control electrónico de reglamentación. Es la combinación del control numérico y de la telequímica lo que constituye la base para el robot moderno. El robot es un manipulador mecánico cuyos movimientos se controlan mediante técnicas de programación muy similares a las empleadas en el control numérico. La fluencia de estas dos tecnologías se debe en general a dos personas, el primero fue el inventor británico llamado Cyril Walter Kenward, que solicitó una patente británica para un dispositivo robótico en marzo de 1954 (figura 1.1).

La segunda persona es George C. Devol, el inventor americano, al que deben atribuirse dos invenciones que llevaron al desarrollo de los robots en nuestros días. La primera invención se desarrollo en 1946, y era un dispositivo para grabar magnéticamente señales eléctricas y reproducirlas para controlar una máquina. La segunda invención se denominaba "Transferencia de Artículos Programada" en 1961 (figura 1.2), que fue el primer robot programable. Aunque la patente de Devol siguió a la de Kenward, fue el trabajo de Devol el que estableció las bases para el robot industrial moderno.

Joseph Engelberg inició la compañía llamada Unimation, en 1962 compró los derechos del dispositivo de Devol y desarrollo posteriormente el robot. Posteriormente en el mismo año General Motors instaló el primer robot industrial de Unimation. En 1976, el primer brazo robot en el espacio fue el proyecto Vikingo de la NASA, para recolectar muestras del suelo de Marte para análisis

Parte del trabajo pionero se desarrolló en la Standford University y Standford Research Institute sobre lenguajes de robot orientados a computadoras. En 1973 se desarrolló el lenguaje experimental denominado

WAVE, que fue seguido por el desarrollo de AL. El primer lenguaje de robot comercial fue VAL desarrollado para Unimation, Inc. El lenguaje se utilizó primero para programar el robot PUMA de Unimation. En la siguiente tabla se presenta una lista cronológica que resume los desarrollos históricos producidos en la tecnología de la robótica.

**Tabla 1.1 Cronología de desarrollos relacionados con la Robótica.**

Fecha	Desarrollo
A mediados del siglo XVIII	J. de Vaucanson construyó varias muñecas mecánicas de tamaño humano que ejecutaban piezas de música.
1801	J. Jacquard inventó su telar, que era una máquina programable para la urdimbre.
1805	H. Mailardet construyó una muñeca mecánica capaz de hacer dibujos.
1946	El inventor americano G.C. Devol desarrolló un dispositivo controlador que podía registrar señales eléctricas por medios magnéticos y reproducirlas para accionar una máquina mecánica. La patente de Estados Unidos correspondiente se emitió en 1952.
1951	Trabajo de desarrollo de teleoperadores (manipuladores de control remoto) para manejar materiales radiactivos. Patente de Estados Unidos relacionadas emitidas para Goertz (1954) y Bergsland (1958).
1952	Una máquina prototipo de control numérico fue objeto de demostraciones en el Instituto de Tecnología de Massachusetts después de varios años de desarrollo. Un lenguaje de programación de piezas denominado ATP (Automatically Programmed Tooling - Herramental Automáticamente Programado) se desarrolló posteriormente y se publicó.
1954	El inventor británico C. W. Kenward solicitó una patente para diseño de robot. Patente británica emitida en 1957.
1954	G. C. Devol desarrolla diseños para "transferencia de artículos programada". Patente de Estados Unidos emitida para diseño en 1961.
1959	Se introdujo el primer robot comercial por Planet Corporation. Estaba controlado por interruptores de fin de carrera y levas.
1960	Se introdujo el primer robot "Unimate", basado en la "transferencia de artículos programada" de Devol. Utilizaba los principios del control numérico para el control del manipulador y era un robot de transmisión hidráulica.
1961	Un robot Unimate se instaló en la Ford Motors Company para atender una máquina de fundición en troquel.
1966	Trallfa, una firma noruega, construyó e instaló un robot de pintura por pulverización.

Tabla 1.1 *Continúa:*

Fecha	Desarrollo
1968	Un robot móvil llamado "Shakey" se desarrollo en SRI (Standford Research Institute). Estaba provisto de una diversidad de sensores, incluyendo una cámara de visión y sensores táctiles, y podía desplazarse por el suelo.
1971	El "Standford Arm", un pequeño brazo de robot de accionamiento eléctrico, se desarrolló en Standford University.
1973	Se desarrolló en SRI el primer lenguaje de programación de robot del tipo de computadora para la investigación con la denominación WAVE. Fue seguido por el lenguaje AL en 1974. Los dos lenguajes se desarrollaron posteriormente en el lenguaje VAL comercial para Unimation por Victor Scheinman y Bruce Simano.
1974	ASEA introdujo el robot IRb6 de accionamiento completamente eléctrico.
1974	Kawasaki, bajo licencia de Unimation, instaló un robot para soldadura por arco para estructuras de motocicletas.
1974	Cincinnati Milacron introdujo el robot T con control por computadora.
1975	El robot "Sigma" de Olivetti se utilizó en operaciones de montaje, una de las primitivas aplicaciones de la robótica al montaje.
1976	Un dispositivo de Remote Center Compliance (RCC) para la inserción de piezas en la línea de montaje se desarrolló en los laboratorios Charles Stark Draper Labs en Estados Unidos.
1978	Se introdujo el robot PUMA (Programable Universal Machine for Assembly) para tareas de montaje por Unimation, basándose en diseños obtenidos en un estudio de la General Motors.
1979	Desarrollo del robot SCARA (Selective Compliance Arm for Robotic Assembly) en la Universidad de Yamanashi en Japón para montaje. Varios robots SCARA comerciales se introdujeron hacia 1981.
1980	Un sistema robotico de captación de recipientes fue objeto de demostración en la Universidad de Rhode Island. Con el empleo de la visión de máquina, el sistema era capaz de captar piezas en orientaciones aleatorias y posiciones fuera de un recipiente.
1981	Se desarrollo en la Universidad de Carnegie-Mellon un robot de impulsión directa. Utilizaba motores eléctricos situados en las articulaciones del manipulador sin las transmisiones mecánicas habituales empleadas en la mayoría de los robots.
1982	IBM introduce el robot RS-1 para montaje, basado en varios años de desarrollo interno. Se trata de un robot de estructura de caja que utiliza un brazo construido por tres dispositivos de deslizamiento ortogonales. El lenguaje de robot AML, desarrollado por IBM, se introdujo también para programar el robot RS-1.

Tabla 1.1 *Continúa:*

Fecha	Desarrollo
1983	Informe emitido sobre la investigación en Westinghouse Corp. Bajo el patrocinio de National Science Foundation sobre un "sistema de montaje programable-adaptable" (APAS), un proyecto piloto para una línea de montaje automatizada flexible con el empleo de robots.
1984	Varios sistemas de programación fuera de línea se demostraron en la exposición Robots 8. La operación típica de estos sistemas permitía que se desarrollaran programas de robots utilizando gráficos interactivos en una computadora personal y luego se cargaban en el robot.

Actualmente no hay una definición general aceptada para un robot. Los japoneses han definido un robot como 'cualquier dispositivo que reemplace las labores humanas', y la Asociación Industrial de Robots ha clasificado a los robots en seis categorías, desde manipuladores manuales hasta robots inteligentes. El Instituto Americano de Robots tiene una definición más restringida:

'Un manipulador multifuncional programable diseñado para mover material, piezas, herramientas o dispositivos especiales mediante movimientos programables variables para la ejecución de una diversidad de tareas.'

(Schlussel, 1985)

Esta definición restringe a los robots a aplicaciones industriales, ya que muchas de las aplicaciones actuales de los robots son en la manufactura tanto fija como flexible. Por lo mismo, una mejor definición es:

'Un Robot es una máquina que puede ser programada para realizar una variedad de tareas, de la misma manera en que una computadora es un circuito electrónico que puede ser programado para hacer una variedad de tareas.'

(McKerrow, 1986)

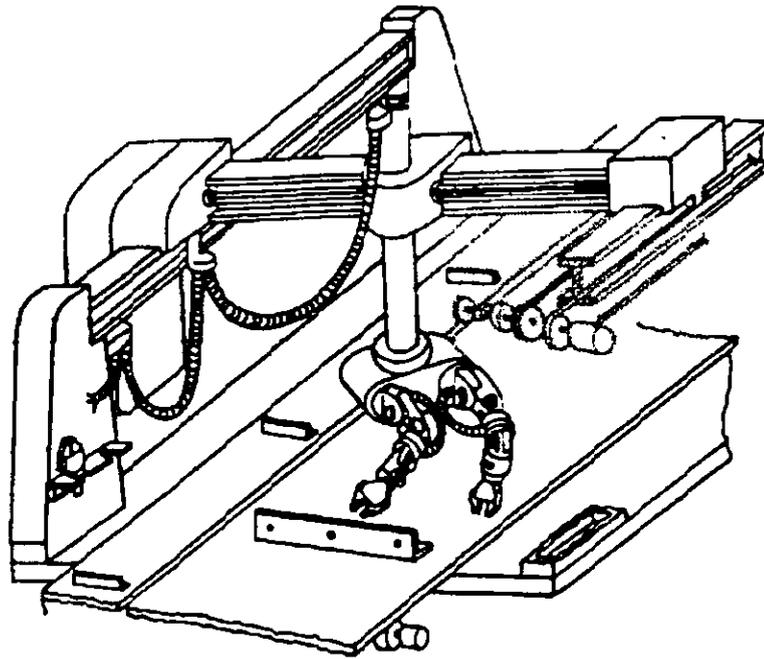


Fig. 1.1

Dispositivo robótico de Cyril Walter Kenward.

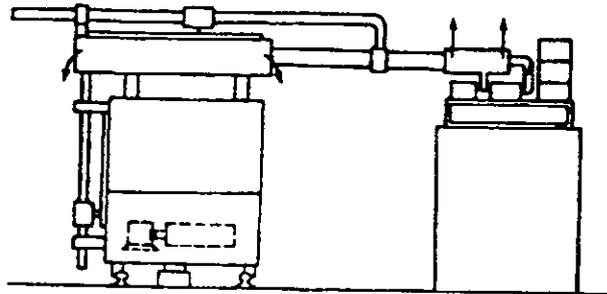


Fig. 1.2

Esquema del dispositivo de "Transferencia de artículos programada" de Devol.

## **CAPÍTULO 2**

### **ELABORACIÓN DE ESPECIFICACIONES**

#### **2.1 CLARIFICACIÓN DE LA TAREA**

- Identificación de la Necesidad
  - ⇒ Inspeccionar discos de silicio con rapidez.
- Formulación del Problema
  - ⇒ Manejar o manipular los discos en el menor tiempo posible.
- Definición del Problema
  - ⇒ Llevar discos de silicio de una posición a otra en el menor tiempo.
- Definición de objetivos
  - ⇒ Dado un arreglo de contenedores con discos de silicio en su interior, proponer un diseño para un manipulador capaz de colocar los discos en diferentes lugares, dentro del arreglo, en el menor tiempo posible de tal manera que, cumpla con las especificaciones indicadas.

#### **2.2 RESTRICCIONES Y REQUERIMIENTOS**

A continuación se nombran las restricciones del problema agrupadas bajo diferentes criterios [5], [6]:

##### **1. Funcionalidad.**

- Mover discos de un lugar a otro (M)

- Trayectoria de Operación (TO) (M)
  - Capacidad de manejo de discos > 500 discos/h (W)
  - No tomar los discos por su parte superior (M)
  - Mover discos de al menos  $\varnothing 100$  mm (M)
2. Cuerpo.
- Compacto (W)
  - Mecanismos por debajo del espacio de operación (W)
3. Geometría espacial.
- Discos dentro de las casillas (M)
  - Contenedores de 25 casillas cada uno (M)
  - Arreglo circular de los contenedores (M)
4. Producción.
- Mayor número de componentes nacionales (W)
  - Manufactura y ensamble nacional. (W)
5. Costo
- Económico (M)

Dentro de un arreglo circular de los contenedores, hay ' $n$ ' trayectorias de operación, se entiende por trayectoria de operación, al "camino" utilizado para mover los discos de una casilla a otra. La trayectoria más crítica o complicada será la que permita diseñar un manipulador con máximo rendimiento de acuerdo a las especificaciones, es decir, si se satisfacen las restricciones con la trayectoria más larga entonces, cualquier otra trayectoria que se elija podrá realizarse en menor tiempo. Por lo tanto, la trayectoria que se utilizará para evaluar el diseño es (figura 2.6):

"Tomar un disco de la casilla inferior (primera) de un contenedor A y moverlo a la casilla superior (ultima) de otro contenedor B, opuesto al contenedor A."

Entre las especificaciones hay restricciones que son más relevantes que otras, por lo que es de gran ayuda para el desarrollo, diferenciar entre las

restricciones que se “deben” cumplir sin distinción alguna durante el diseño y, las que se “desean” en el diseño y que se distinguen por su importancia para este último. Para ello, éstas se distinguen por medio de las letras “M” y “W”, para las que se “deben” y “desean”, respectivamente [5], [6].

**Tabla 2.1 Conjuntos M y W de restricciones.**

<b>M</b>	<b>W</b>
Mover discos de un lugar a otro.	Capacidad de manejo de discos > 500 discos/h.
Trayectoria de Operación (TO).	Compactabilidad.
No tomar los discos por su parte superior.	Mecanismos por debajo del espacio de operación.
Mover discos de al menos $\varnothing 100$ mm	Mayor número de componentes nacionales.
Discos dentro de las casillas.	Manufactura y ensamble nacional.
Contenedores de 25 casillas cada uno.	
Arreglo circular de los contenedores.	
Económico.	

En ocasiones, las restricciones son nombradas de manera cualitativa sin tener un parámetro que permita una evaluación directa del diseño, por ejemplo “facilidad de”, es por eso que se buscan requerimientos o parámetros ingenieriles que permitan nombrar de manera cuantitativa las restricciones haciéndolas mensurables [6]. En la figura 2.1, se muestra un diagrama con el que se busca relacionar las restricciones (w) con parámetros que permitan medir a éstas últimas y distinguirlas por un factor de peso. Se buscan y desglosan por niveles, elementos que estén relacionados con las restricciones de manera que, en el último nivel se tengan los parámetros requeridos. En cada nivel se asigna, a criterio del diseñador, un porcentaje que establece una jerarquía o importancia entre los elementos. Conforme se crea otro nivel, los elementos de éste, se dividen (también a criterio del diseñador) el porcentaje asignado a su elemento origen y así se mantiene siempre un peso total de 1 (100%). En el diagrama se indican tanto el peso asignado como el peso relativo al nivel inicial [5].

Habiendo establecido parámetros mensurables para las restricciones, ahora es necesario establecer una magnitud o meta para cada uno de ellos en

relación con una escala (tabla 2.2) y así, en la medida de lo posible, evaluar cuantitativamente el diseño [5]. Estas metas pueden ser un conjunto de valores específicos, valores dentro de un rango o bien, valores que se expresen como lo "más o lo menos" [6]. Luego, es conveniente establecer la relación existente entre las restricciones y los requerimientos ingenieriles para asegurar que éstos sean relevantes para la evaluación, y no se pierdan de vista los objetivos planteados [6]. Esta relación se realiza por medio valores, donde cada valor indica que tanta relación existe: 4 = fuerte, 2 = media, 1 = débil.

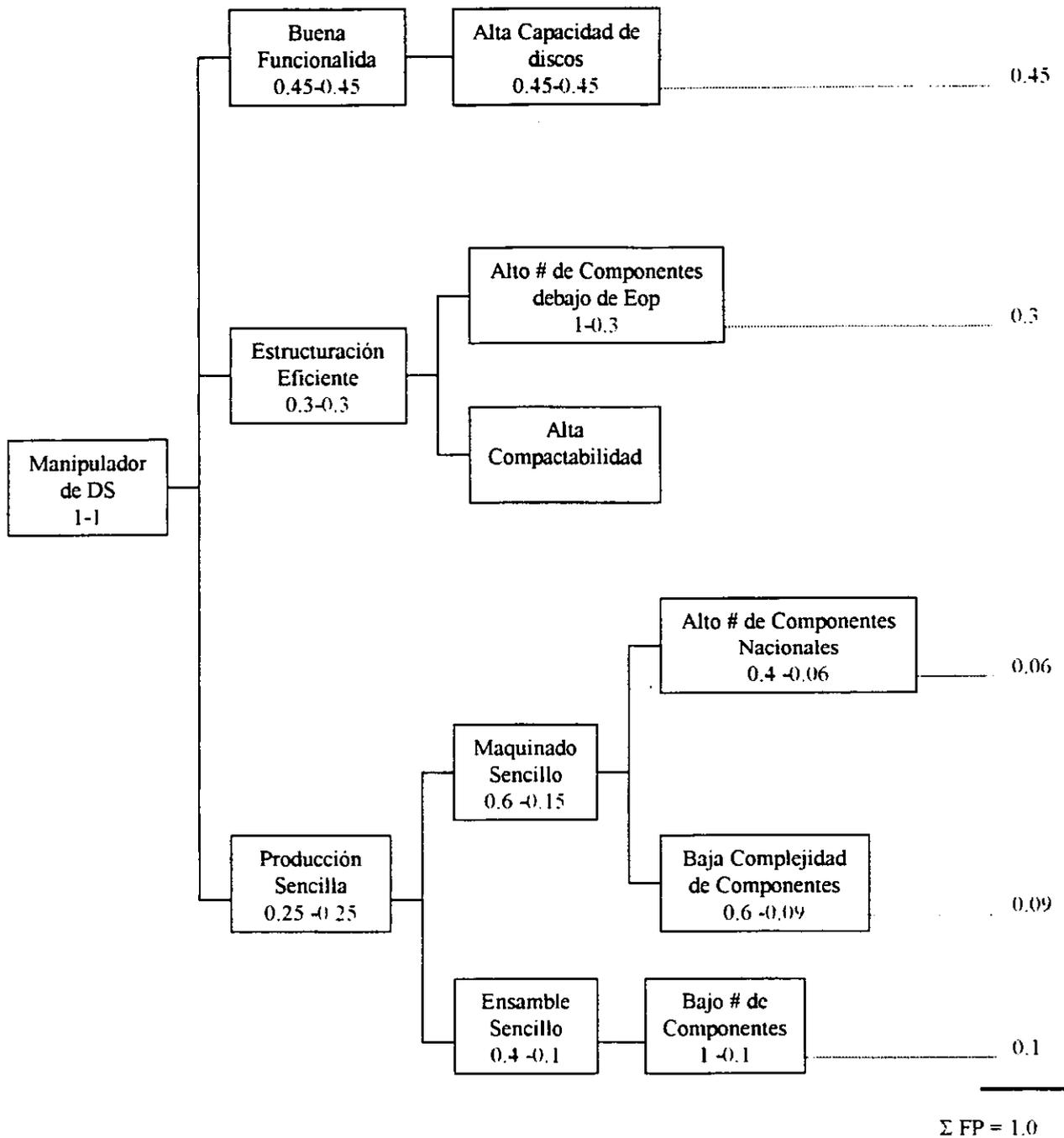
En la tabla 2.3, se conjunta la información generada, en ella se indican las restricciones del problema, los requerimientos con su factor de peso y, la relación que existe entre ambos conjuntos. Esta tabla de especificaciones no es definitiva, pues a lo largo del proceso pueden existir modificaciones.

**Tabla 2.2 Magnitudes de Requerimientos**

No	1	2	3	4	5	6
<b>Escala</b>	<b>Alta Capacidad de Discos top [s] * - discos/h</b>	<b>Alto # de Componentes debajo del Eop †</b>	<b>Alta Compactabilidad</b>	<b>Alto # de Componentes Nacionales</b>	<b>Baja complejidad de Componentes</b>	<b>Bajo # de Componentes</b>
0	7.5	475		$33 < \# < \infty$	Muy Compleja	$140 < \# < \infty$
1	7.2	500		$30 < \# \leq 33$		
2	6	600		$27 < \# \leq 30$	Compleja	$120 < \# \leq 130$
3	5.7	625		$24 < \# \leq 27$		
4	5.5	650		$21 < \# \leq 24$	Regular	$100 < \# \leq 110$
5	5.3	675		$15 < \# \leq 21$		
6	5.1	700		$12 < \# \leq 15$	Baja	$80 < \# \leq 90$
7	4.9	725		$9 < \# \leq 12$		
8	4.8	750		$6 < \# \leq 9$	Muy Baja	$60 < \# \leq 70$
9	4.6	775		$3 < \# \leq 6$		
10	4.5	800	$0 < \# \leq 3$			$40 < \# \leq 50$

\* top = tiempo de operación durante la trayectoria

† Eop = espacio de operación del órgano terminal.



**Fig. 2.1**  
Diagrama de Requerimientos y Factor de Peso

Tabla 2.3 Especificaciones.

MANIPULADOR DE DISCOS DE SILICIO		REQUERIMIENTOS INGENIERILES					
		Alta capacidad	Alto # de componentes debajo del Eop	Alta compactabilidad	Alto # de componentes nacionales	Baja complejidad de componentes	Bajo # de componentes
M	<b>RESTRICCIONES</b>						
W	<b>1. Funcionalidad.</b>	0.45	0.3	—	0.06	0.09	0.1
M	1.1 Mover discos de un lugar a otro.	1					
M	1.2 Trayectoria de Operación (TO) (fig. 2.6).	4		2			
	1.3 Mover discos de al menos $\varnothing 100$ mm	2		4		2	2
W	1.3 Capacidad > 500 discos/h.	4	1				1
M	1.4 No tomar <i>discos</i> (fig. 2.2) por su parte superior.						
	1.4.1. Diámetro $\geq 100$ mm					1	
	1.4.2. Espesor: 0.54 mm						
	<b>2. Estructura.</b>						
W	2.1 Compactabilidad.		2	4			
W	2.2 Mecanismos por debajo del espacio de operación.		4				
	<b>3. Geometría Espacial.</b>						
M	3.1. Discos dentro de las <i>casillas</i> (fig. 2.4).						
	3.1.1. Altura: 3 mm						
	3.1.2. Ancho: 109 mm						
	3.1.3. Profundidad: 88.36 mm						
	3.1.4. Distancia para tomar y colocar el disco: $a\theta = 1.5$ mm				1		
M	3.2. <i>Contenedores</i> (8) de 25 casillas c/u (fig. 2.3).						
	3.2.1. Altura: 143 mm						
	3.2.2. Ancho: 125 mm				2		
	3.2.3. Profundidad: 108 mm						
M	3.3. <i>Arreglo</i> circular de los contenedores (fig. 2.5).						
	3.3.1. Altura de operación: $d_1 = 117.2$ mm						
	3.3.2. Diámetro de operación: $D_o > 162.2$ mm		1	2			
	3.3.3. Área de operación: $A_o > 206.62$ cm <sup>2</sup>						
	3.3.4. Vol. de operación: $V_o > 2322.51$ cm <sup>3</sup>						
W	<b>4. Producción.</b>						
	4.1 Mayor número de componentes nacionales.				4	2	1
M	4.2 Manufactura y ensamble nacional.				2	4	4
	<b>5. Costo.</b>						
	5.1 Económico.	1		4	4	4	4

El requerimiento de *alta compactabilidad*, en principio, no se usará para evaluar y seleccionar alguna alternativa. Será, una vez seleccionada una alternativa, que este requerimiento se utilizará para comparar esta característica en la solución propuesta, con otros diseños ya existentes. Para ello, se determinará el volumen aproximado que ocupa el manipulador y, se establecerá una escala basándose en el manipulador con menor volumen. Esto permitirá tener una idea de si el tamaño del manipulador propuesto es "razonable" en comparación con otros.

La razón de evaluar este requerimiento hasta el final es, porque el espacio que ocuparía cualquiera de las alternativas de solución generadas podría ser viable, pues en general, es hasta en la etapa del *Diseño de Configuración*, cuando se tiene una idea más acertada de las dimensiones del diseño propuesto. Es por lo anterior que, en el diagrama de la figura 2.1 y en la tabla 2.2, no se asigna un factor de peso ni una magnitud, respectivamente, al requerimiento de *alta compactabilidad*.

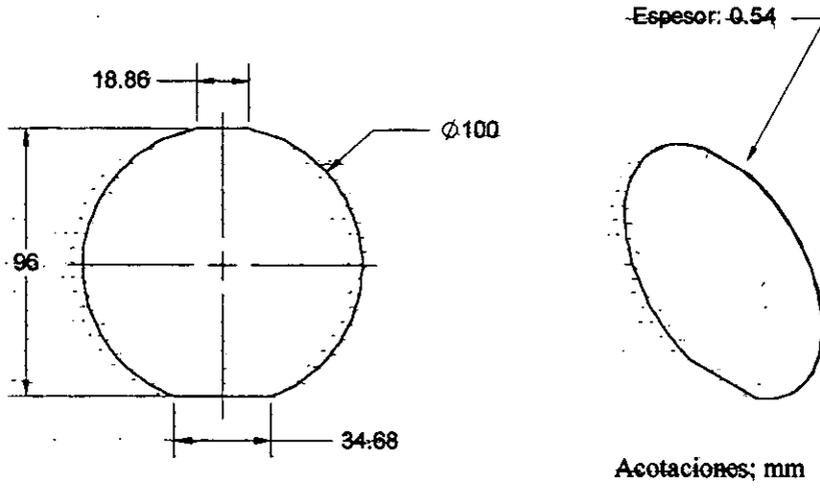


Fig. 2.2  
Disco

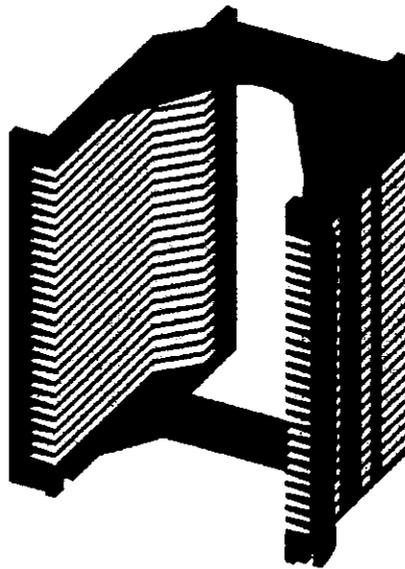
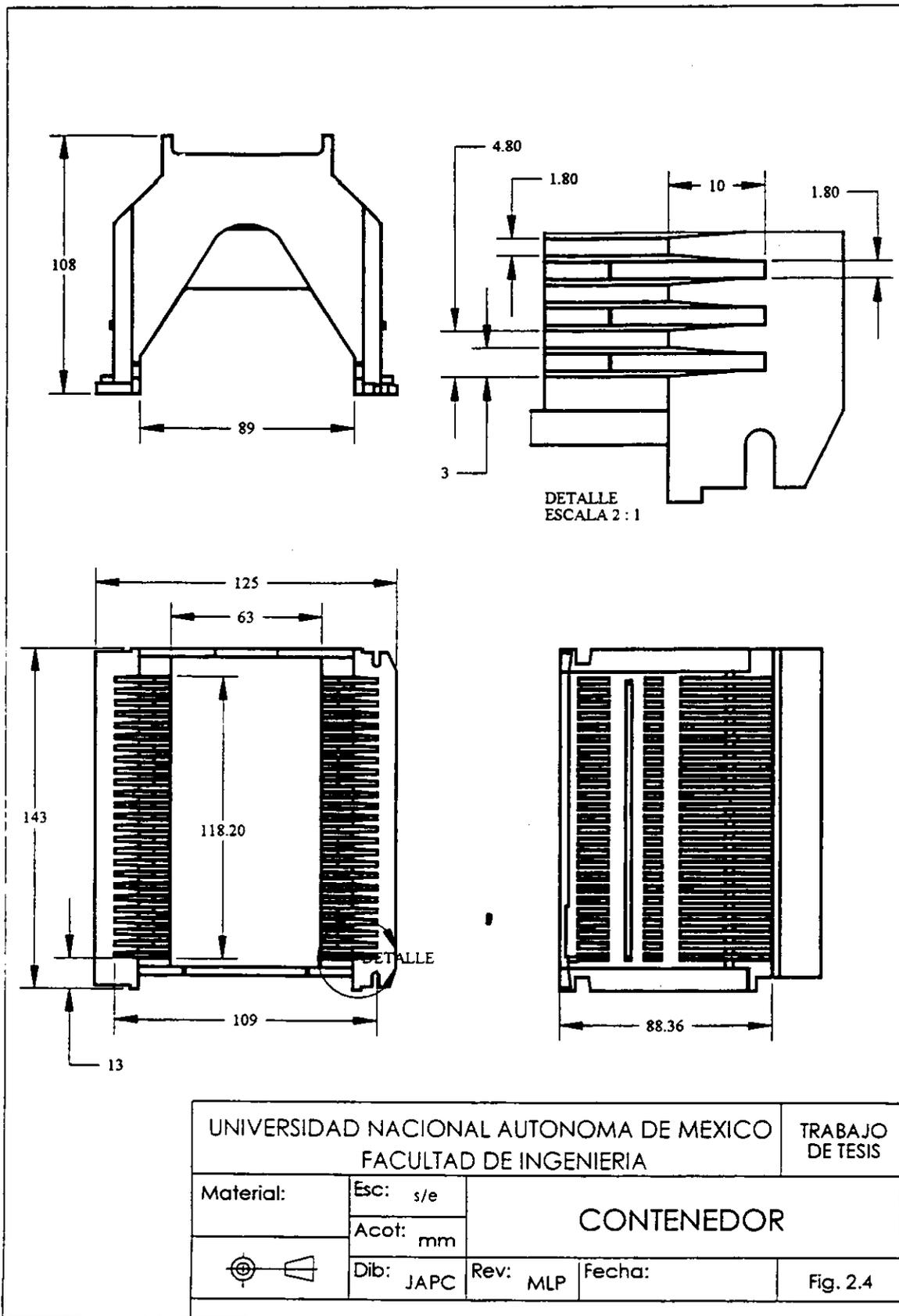


Fig. 2.3  
Contenedor



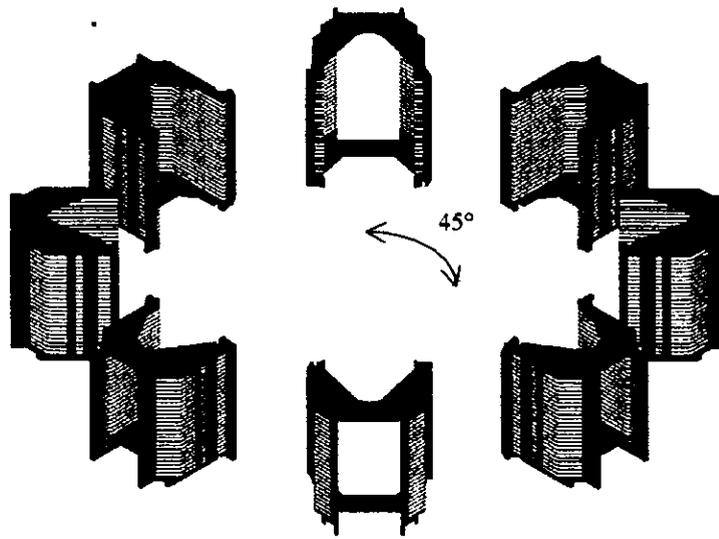


Fig. 2.5  
Arreglo de Contenedores

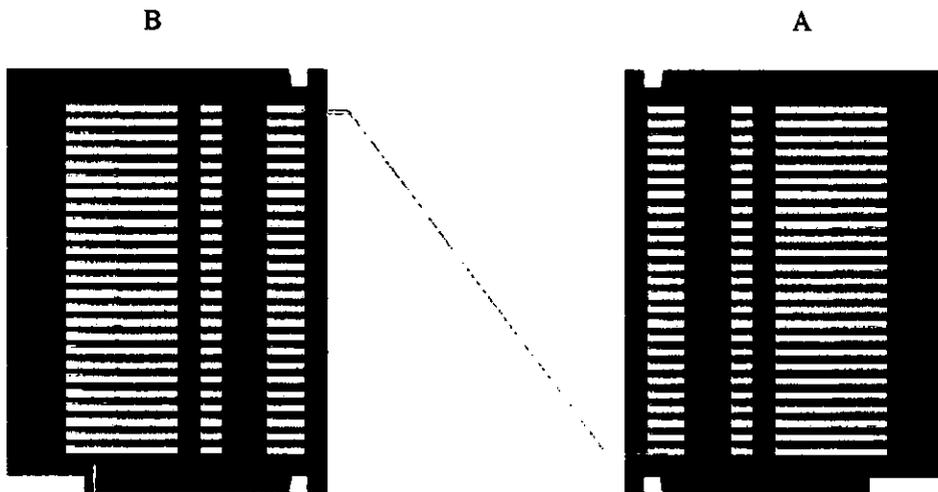


Fig. 2.6  
Trayectoria de Operación

## **CAPÍTULO 3**

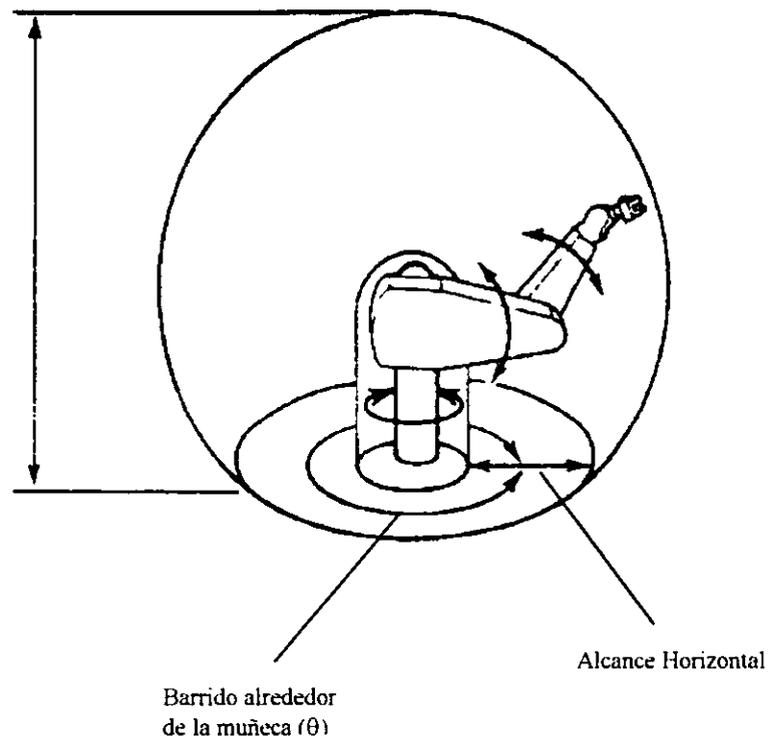
### **DISEÑO CONCEPTUAL**

#### **3.1 CLASIFICACIÓN**

Como se mencionó en el capítulo primero, los robots han tratado de simular al ser humano principalmente en dos formas, como máquinas móviles o vehículos, y como brazos o manipuladores. El tipo de robots que interesa para los fines buscados en esta tesis son los manipuladores.

Los manipuladores que simulan las características de un brazo humano se denominan como brazos articulados. Todas sus articulaciones son rotacionales o articulaciones de revolución. Un brazo articulado está conformado por tres eslabones (figura 3.1). El primero, que está orientado verticalmente, realiza la función del torso humano y rota alrededor de la articulación de la cintura. El segundo eslabón, el brazo, está conectado al torso por medio de la articulación del hombro. El tercer eslabón, el antebrazo, está conectado al brazo por medio de la articulación del codo. Unido al antebrazo está una muñeca de tres articulaciones y una mano. El movimiento de un robot del tipo brazo articulado difiere del movimiento de un brazo humano. Las articulaciones de un robot tienen pocos grados de libertad sin embargo, estos tienen un rango de movimiento angular muy grande. Por ejemplo, el codo de un brazo articulado puede doblarse hacia arriba o hacia abajo (figura 3.2), mientras que una persona solamente

puede doblar el codo en una sola dirección con respecto a la posición del brazo completamente estirado.



**Fig. 3.1**

También el hombro de un robot Puma esta desfasado o paralelo al eje de la cintura, como en un brazo humano. Consecuentemente, el robot puede moverse o cambiar de una configuración de brazo derecho a una configuración de brazo izquierdo simplemente con girar las articulaciones de la cintura y el hombro  $180^\circ$  (figura 3.3). Entonces, el gran rango de movilidad de las articulaciones en un robot les da una mayor flexibilidad en comparación con un brazo humano pero, esta gran flexibilidad a la vez incrementa la complejidad de los modelos usados para controlar el brazo.

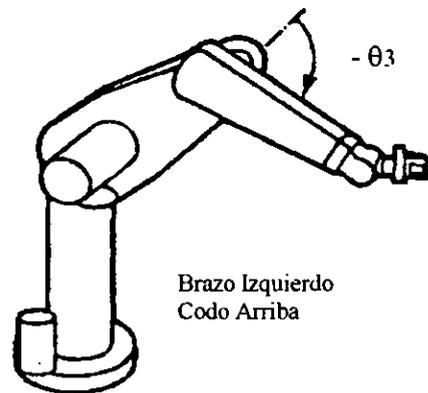
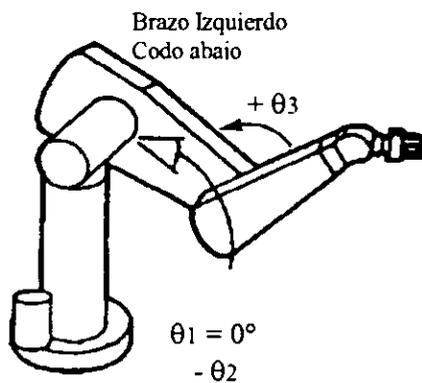


Fig. 3.2

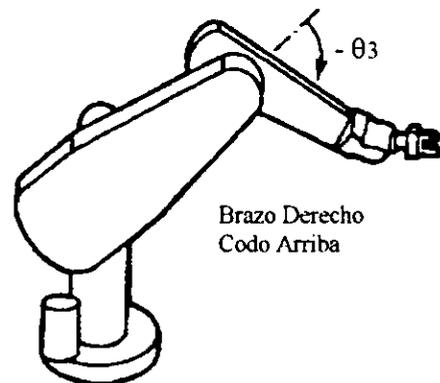
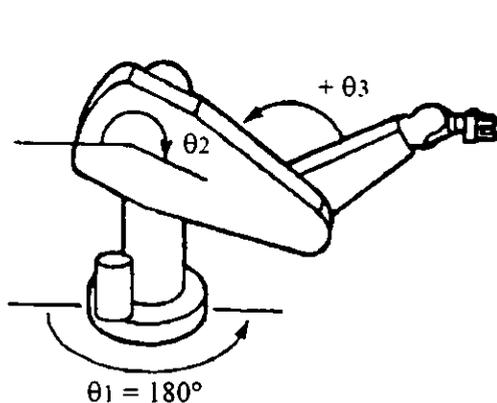


Fig. 3.3

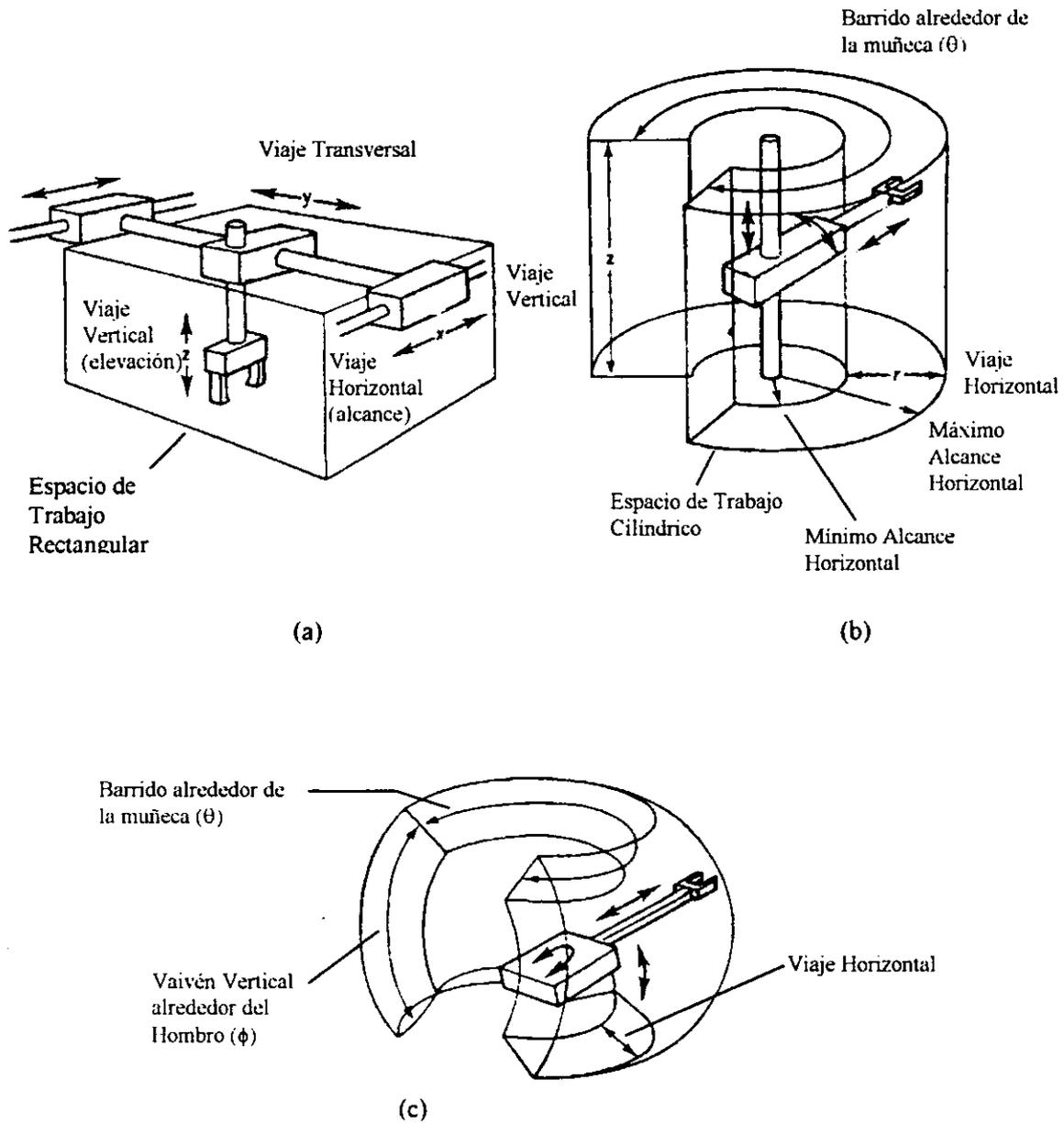
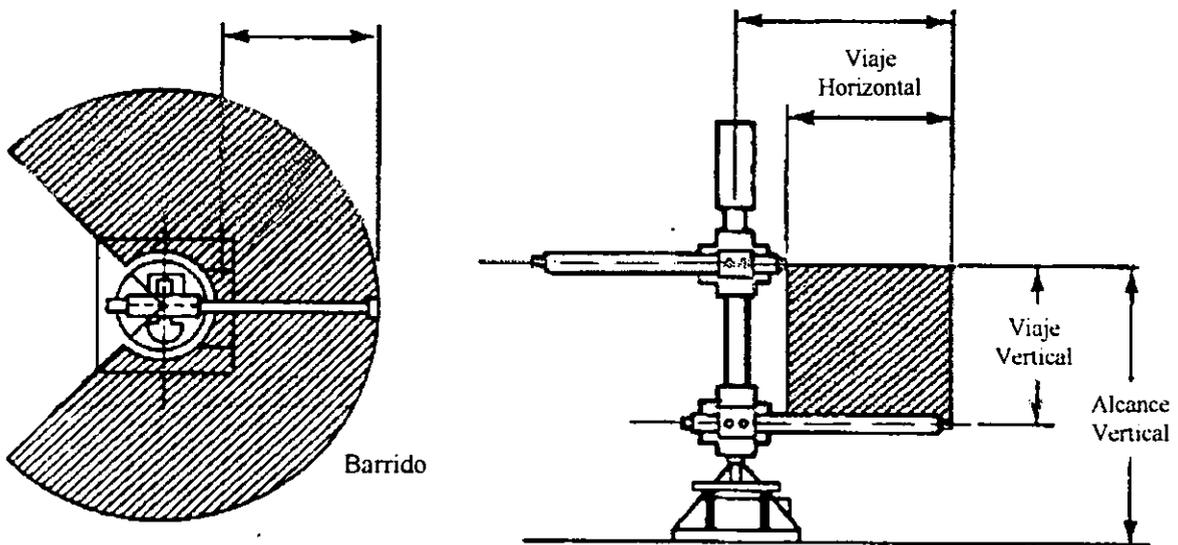


Fig. 3.4

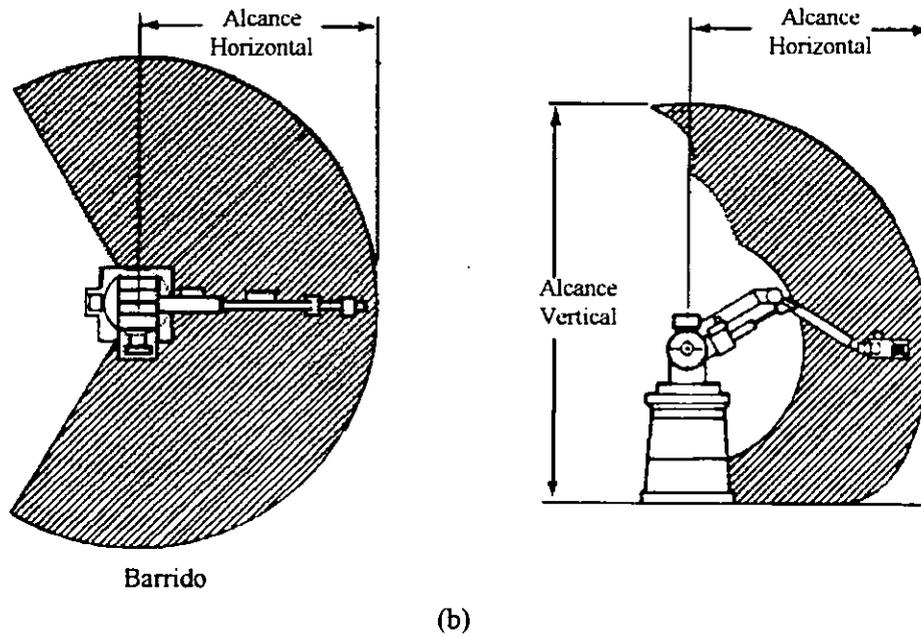
(a) Geometría Cartesiana. (b) Cilíndrica. (c) Esférica

No todas las aplicaciones requieren manipuladores con articulaciones o geometrías de revolución. Simples geometrías que requieren de articulaciones prismáticas o deslizantes son muchas de las veces adecuadas.

Los manipuladores se agrupan en diferentes clases de acuerdo a las combinaciones usadas en su construcción (figura 3.4). Una geometría cartesiana en un brazo, utiliza solamente articulaciones prismáticas y puede alcanzar cualquier posición dentro de su espacio de trabajo rectangular por medio del movimiento cartesiano ( $x, y, z$ ) de sus eslabones. Reemplazando la articulación de la cintura de un brazo de geometría cartesiana con una articulación de revolución, se obtiene un brazo de geometría cilíndrica. Este tipo de brazo puede alcanzar cualquier punto dentro de su geometría cilíndrica por una combinación de rotación y traslación. Si la articulación del hombro es substituida por una articulación rotacional, un brazo de geometría polar es obtenido. El espacio de trabajo de este tipo de brazo es la mitad de una esfera. Finalmente, reemplazando la articulación del codo con una articulación de revolución se tiene una geometría de revolución o brazo articulado (figura 3.5).



(a)



**Fig. 3.5**  
Cilíndrico (a), Polar (b)

A continuación se muestra una tabla que muestra las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de configuraciones en un robot.

**Tabla 3.1 Comparación de las configuraciones de un robot.**

Robot	Articulaciones		Coordenadas
			Ventajas
Cartesiano Fig. 3.4 (a)	Cintura prismática Hombro prismático Codo prismático	x y z	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimiento lineal en tres dimensiones</li> <li>• Modelo cinemática simple</li> <li>• Estructura rígida</li> <li>• Fácil de visualizar</li> <li>• Puede usar guías neumáticas económicas para operaciones de "pick and place"</li> </ul>
			Desventajas
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de un gran volumen de espacio en donde operar</li> <li>• El espacio de trabajo es menor al volumen del robot</li> <li>• No puede alcanzar áreas por debajo de objetos</li> <li>• Las superficies de las guías deben ser cubiertas para prevenir la entrada de polvo</li> </ul>

Tabla 3.1 Continúa:

Robot	Articulaciones		Coordenadas
			<b>Ventajas</b>
Cilindrico Fig. 3.4 (b)	Cintura de revolución Hombro prismático Codo prismático	$\theta$ $z$ $r$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo cinemático simple</li> <li>• Fácil de visualizar</li> <li>• Buen acceso en cavidades y aberturas de maquinas</li> <li>• Muy poderosos cuando guías hidráulicas son usadas</li> </ul>
			<b>Desventajas</b>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espacio de trabajo restringido</li> <li>• Guías prismáticas difíciles de sellar contra el polvo y líquidos</li> <li>• Rebotes del robot pueden afectar el volumen de trabajo del robot</li> </ul>
			<b>Ventajas</b>
Esférico Fig. 3.4 (c)	Cintura de revolución Hombro de revolución Codo prismático	$\theta$ $\phi$ $r$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cubre un gran volumen desde el soporte central</li> <li>• Puede doblarse para recoger objetos del suelo</li> </ul>
			<b>Desventajas</b>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo cinemático simple</li> <li>• Difícil de visualizar</li> </ul>
			<b>Ventajas</b>
Articulado Fig. 3.2, 3.3 Fig. 3.5 (b)	Cintura de revolución Hombro de revolución Codo de revolución	$\theta_1$ $\theta_2$ $\theta_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máxima flexibilidad</li> <li>• Cubre un gran espacio de trabajo relativo al volumen del robot</li> <li>• Articulaciones rotacionales fáciles de sellar</li> <li>• Trabaja bien con motores eléctricos</li> <li>• Puede alcanzar áreas por encima y debajo de objetos</li> </ul>
			<b>Desventajas</b>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinemática compleja</li> <li>• Difícil de visualizar</li> <li>• El control del movimiento lineal es problemático</li> <li>• A máximo alcance la estructura no es muy rígida</li> </ul>

## 3.2 IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS FUNCIONALES

Tanto Pahl & Beitz [5] como Ullman [6] proponen, a partir de un objetivo establecido, el planteamiento de una función general a partir de la cual se puedan desarrollar o generar las funciones básicas o acciones necesarias para cumplir con tal objetivo.

### 3.2.1 FUNCIÓN GENERAL

En un principio la Función General (FG) es como una caja negra, es sólo un enunciado que establece una relación entre lo que se tiene y lo que se quiere. Es en el interior de ésta donde se encuentran las funciones necesarias para pasar de un estado inicial (entradas) a un estado final (salidas). La Función General que se plantea para este trabajo es la siguiente:

“Diseñar un manipulador capaz de mover discos de silicio de una posición a otra dentro de un arreglo de contenedores, en el menor tiempo posible.”

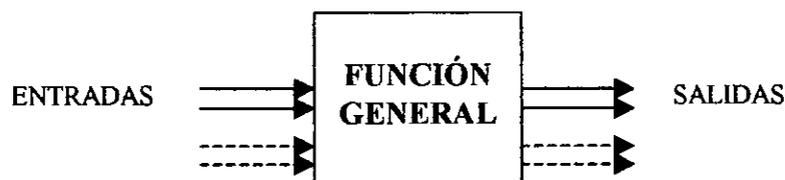


Fig. 3.6

Abrir la caja negra o descomponer la Función General o en varios niveles tiene las siguientes ventajas:

1. La descomposición obtenida al desarrollar la función da una guía en la búsqueda de soluciones. Ya que los conceptos se derivan de las

- funciones y los productos siguen a los conceptos. Es necesario entender completamente la función antes de generar soluciones para el problema.
2. La división en funciones más simples o subfunciones lleva a una mejor comprensión del problema.
  3. Descomponer las funciones del diseño permite descubrir la existencia de dispositivos o componentes que puedan satisfacer algunas de estas funciones.
  4. Por medio de las funciones es posible establecer flujos de material, de energía y de señales que permitan definir la secuencia que deberán seguir las entradas a lo largo de la función, para así obtener las salidas deseadas.

Conocer las entradas o estado inicial de la función, ayuda a visualizar las transformaciones necesarias de material, energía y señales que se habrán de realizar para obtener las salidas de la función. Éstas se establecen de acuerdo a las especificaciones:

**Tabla 3.2 Entradas y Salidas**

	<b>Flujo de Material</b>	<b>Flujo de Señales</b>	<b>Flujo de Energía</b>
<b>Entradas</b>	Los discos se encuentran en una casilla inicial.	Posición inicial de cada disco.	Cada disco tiene una energía potencial inicial.
	El órgano terminal esta localizado en una posición inicial de referencia o una posición inicial cualquiera.	Posición del órgano terminal.	El órgano terminal tiene una energía potencial inicial.
<b>Salidas</b>	Discos en la casilla requerida o posición final.	Posición final del disco transportado.	Cambio en energía potencial del disco transportado.
	Órgano Terminal en nueva posición.	Nueva localización del órgano terminal.	Cambio en la energía potencial del órgano terminal.

### 3.2.2 DESCOMPOSICIÓN FUNCIONAL

De acuerdo a Ullman [6], las funciones se definen con verbos que representan las acciones que se realizan en la FG. Analizando la definición de ésta última, se derivan tres funciones principales, que son: tomar el disco de una casilla, transportarlo y colocarlo en otra.

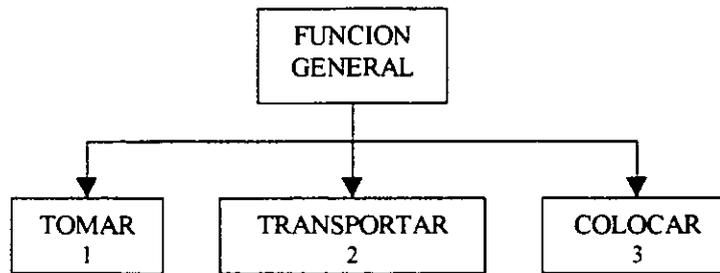


Fig. 3.7

A continuación se descomponen las tres funciones principales de tal manera que, cada subfunción corresponda a un nivel de descomposición; para tener un seguimiento de ésta, cada nivel se indica con un número consecutivo.

#### ➤ TOMAR

Partiendo de una situación general en la que el Organo Terminal (OT) está en una posición inicial de referencia y que el disco que se quiere mover está en otra posición inicial cualquiera (no necesariamente la posición del disco tiene que coincidir con la del órgano terminal) entonces, para tomar el disco es necesario posicionar el órgano terminal por debajo y frente a la casilla inmediata inferior a la inicial, entrar en ella y subir. Se posiciona por debajo de la casilla inicial pues, el disco descansa en el fondo de ésta, y ya que es restricción que no se tome el disco por su parte superior entonces, se debe entrar por debajo de él y luego subir para tomarlo. De acuerdo a esto, la función *Tomar* se descompone en las siguientes subfunciones:

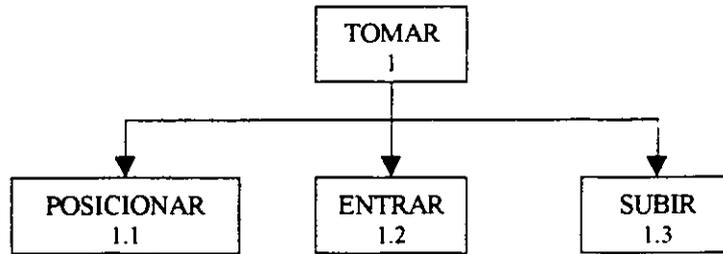


Fig. 3.8

De las especificaciones se plantea lo siguiente:

- El volumen de trabajo que se tiene al conformar un arreglo circular con los contenedores es un espacio cilíndrico.
- Un volumen de trabajo cilíndrico nos conduce a que el sistema de coordenado ideal, para visualizar el problema, es un sistema cilíndrico definido por  $(r, \theta, z)$ .

De lo anterior se derivan tres movimientos básicos para mover los discos:

- Desplazamiento vertical.
- Orientación en el plano.
- Desplazamiento radial.

De estos movimientos se descomponen las funciones *Posicionar* y *Entrar*.

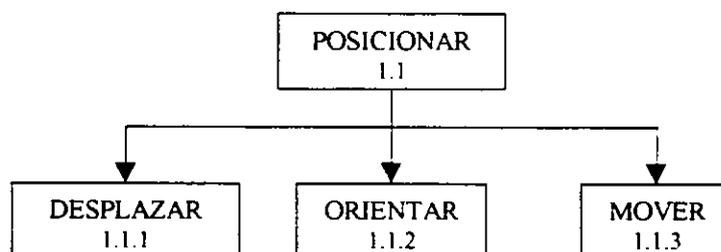


Fig. 3.9

Posicionar el disco para dejarlo en una casilla o posicionar el órgano terminal para tomar un disco, implica mover, a éste último, a las proximidades de la casilla de destino, orientarlo de manera que quede de frente a la casilla (movimiento 'b') y, desplazarlo al nivel de la misma (movimiento 'a'). Cabe mencionar, que el orden de los movimientos no necesariamente tiene que ser en el orden indicado. Para las funciones *Orientar* y *Desplazar* se necesita girar en el plano en el cual descansan los discos y guiar el órgano terminal respectivamente, de manera que se desplace a lo largo de la normal que define al plano de giro, entonces:

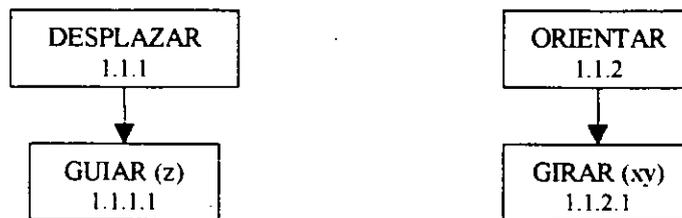


Fig. 3.10

Descomponer las funciones en subfunciones más abstractas significa establecer qué tipo de acción es necesaria para la función sin importar (en esta etapa) cómo se realicen (aunque no siempre se puede evitar pensar en ambas cosas para descomponer una función). Por tanto, existirán ocasiones en que algunas funciones no necesiten descomponerse tanto como otras, siendo el caso de la función *Mover*, cómo se realice este movimiento dependerá del concepto generado para ello. También, en ocasiones puede darse el caso de que algunas funciones se repitan en la FG.

Para entrar en la casilla, basta con desplazar hacia el interior de ésta (movimiento 'c') y al subir, se desplaza en forma vertical así, la función 1.2 se describe de la misma manera que la función 1.1.1, y la función 1.3 se describe también con un desplazamiento vertical:



Fig. 3.11



Fig. 3.12

La descomposición de funciones debe hacerse de manera que facilite en la medida de lo posible, encontrar principios o conceptos que las satisfagan, es por ello que las subfunciones *Desplazar* se descomponen aún en otro nivel (figura 3.12).

### ➤ TRANSPORTAR

Para transportar el disco, es necesario sacarlo de su casilla y llevarlo hasta las proximidades de otra casilla, es decir, posicionarlo, entonces:

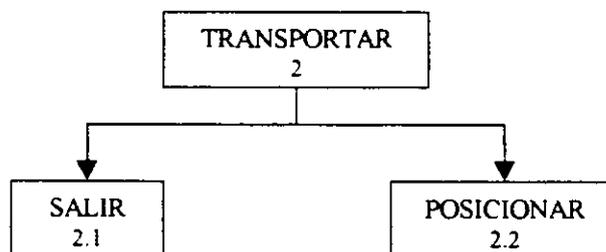
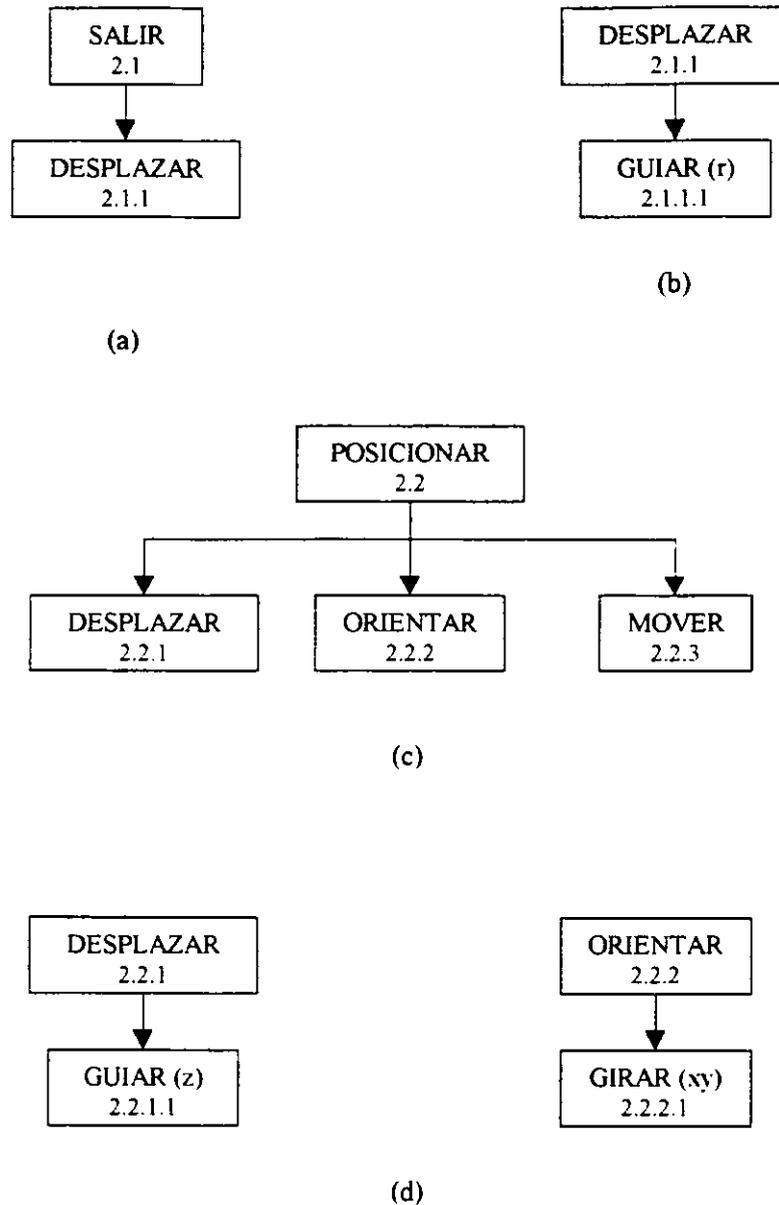


Fig. 3.13

La subfunción *Salir* requiere de un desplazamiento para realizarse y según se mencionó anteriormente, las funciones se pueden repetir, entonces, este desplazamiento y la subfunción *Posicionar* se descomponen de igual manera que en la función principal anterior (*Tomar*):



**Fig. 3.14**  
Salir (a). (b): Posicionar (c). (d)

➤ COLOCAR

La acción de colocar el disco en su casilla es inversa o complementaria a *Salir* y *Tomar* el disco, entonces, la función *Colocar* se descompone según la figura 3.15. Con las dos subfunciones 3.1 y 3.2 se satisface la FG dejando el disco en su casilla pero, el órgano terminal no ha salido de la casilla entonces, en la función *Colocar* se agrega la subfunción *Salir* (3.3). Al considerar al órgano terminal como un flujo es necesario saber su localización, por ello al agregar esta función se conoce la posición y estado final de éste, listo para realizar algún otro movimiento.

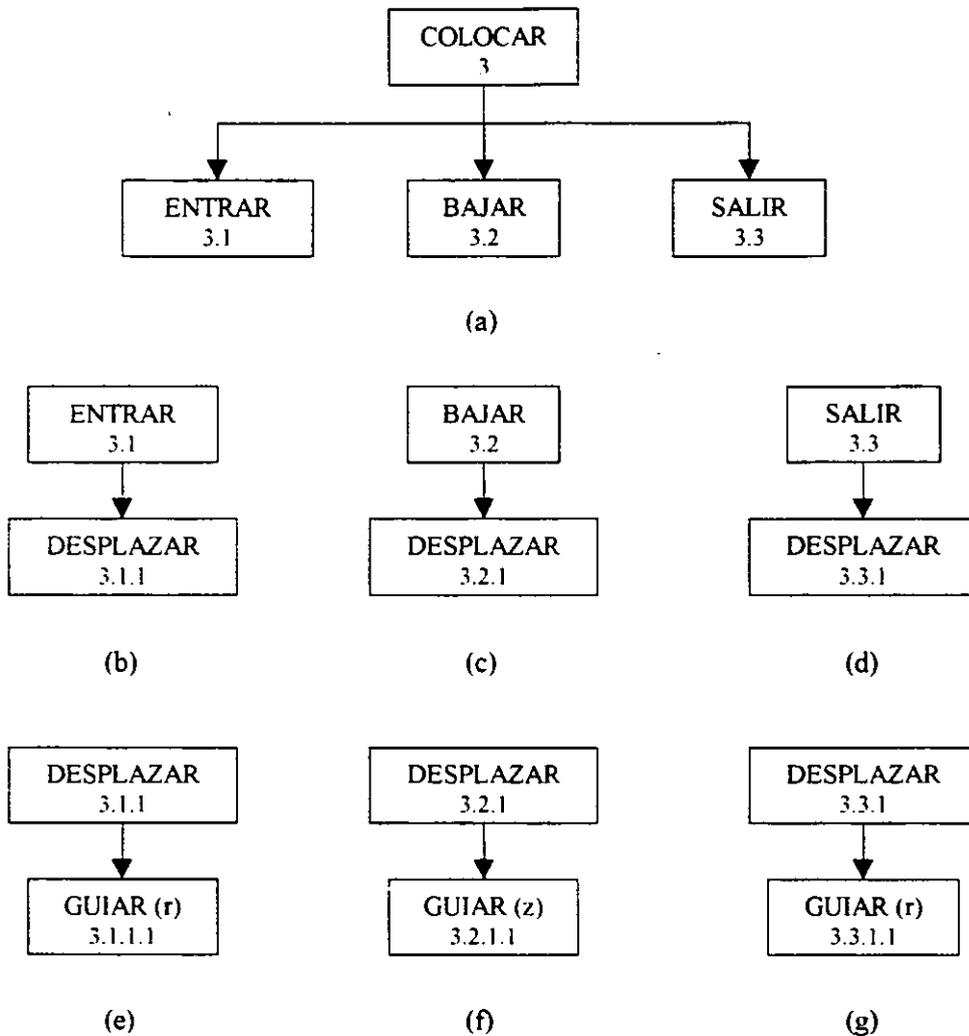


Fig. 3.15

### **3.2.3 MATERIAL, ENERGÍA Y SEÑALES**

La forma física de la materia es una fuente de información acerca del estado de ésta. El ser humano se encuentra rodeado de materia en diferentes formas, ya sean naturales o mismas que él ha plasmado en ella, con las cuales, se obtiene información sobre su uso y posibles aplicaciones. Por otro lado, la fuerza ha sido concebida como el medio por el cual la materia cambia su estado de movimiento. De esto se derivan tres conceptos de gran importancia para estructurar de la función general representativa de un sistema y son: materia, energía e información.

El término materia se puede substituir por el de material con sus mismas propiedades (tamaño, peso, color, etc.); la energía es caracterizada según el tipo de manifestación que ésta presente ( mecánica, térmica, eléctrica, etc.); la información puede ser expresada como una señal que es el medio físico por el cual la información es transmitida. Tanto los materiales, como la energía y las señales, pueden ser procesados, transformados o transportados de diferentes maneras: 1) la energía mecánica es convertida en energía eléctrica por medio de un generador, la energía hidráulica en energía mecánica y eléctrica, etc., 2) los materiales pueden ser transportados, empacados, formados, destruidos, etc. y, 3) las señales son transmitidas, combinadas, recibidas, procesadas, etc.

Las transformaciones de energía, se relacionan con la transformación de materiales y las conversiones de señales, asociadas a dichas transformaciones las cuales, son de gran importancia pues sirven o proporcionan un medio de control para el sistema o proceso analizado.

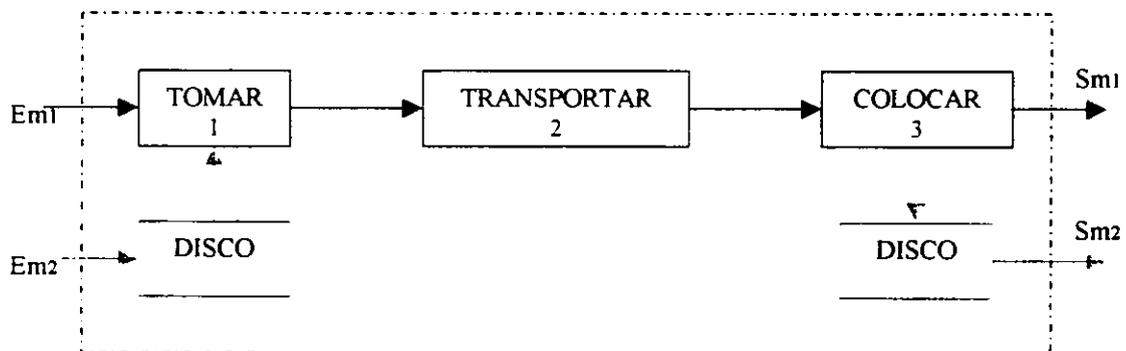
### 3.2.4 ESTRUCTURAS FUNCIONALES

Con el objeto de utilizar las funciones y subfunciones abstraídas en la sección 3.2.2, éstas serán estructuradas siguiendo un flujo de material, de señales y de energía [5] de tal manera que, se ordenen las acciones o funciones del sistema, se establezcan las señales necesaria para llevarlas al cabo y, se proporcione la energía requerida para ello.

Analizando la definición de la función general, se encuentran dos formas de flujo de material. El primer flujo corresponde a los discos que van de una posición a otra y, el segundo, corresponde al OT del manipulador el cual, al igual que los discos, va de una posición a otra pero, con la característica de que éste es quien describe la trayectoria requerida para mover los discos. Tomando esto en consideración, la estructuración de la FG será en términos del OT como flujo principal, y los discos como un flujo paralelo o secundario.

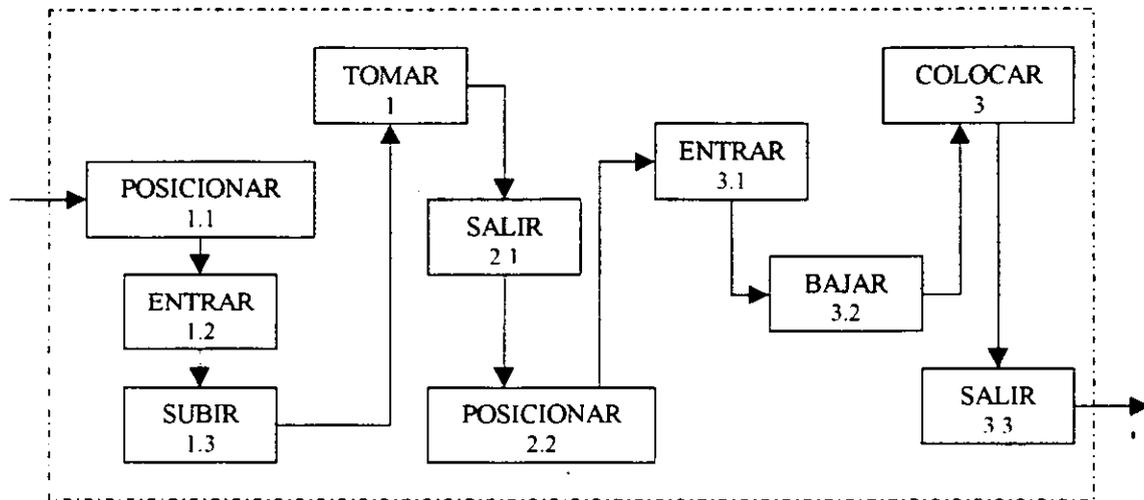
#### 3.2.4.1 FLUJO DE MATERIAL

De acuerdo a lo anterior, el flujo de material se representa en sus diferentes niveles de descomposición en los siguientes diagramas:



**Fig. 3.16**  
Diagrama de Flujo de Material (Nivel 1)

El sentido de las flechas indica el flujo que siguen las funciones; en las fronteras de la Función General están las entradas y salidas (tabla 3.2 y, 3.3.) tanto para el órgano terminal (OT) como para el disco. Substituyendo cada función principal por sus subfunciones correspondientes, se obtiene el diagrama de flujo Nivel 2 (figura 3.17), en éste se aprecia de una manera más clara el flujo de material debido al OT. Para tomar el disco es necesario que el OT se posicione en las proximidades de la casilla y después entre en ella para tomar el disco y es entonces, cuando el disco genera un segundo flujo de material. Es por ello que las subfunciones 1.1 y 1.2 se sitúan antes de tomar el disco.



**Fig. 3.17**  
Diagrama de Flujo de Material (Nivel 2)

En el diagrama Nivel 2 (figura 3.17), sólo la función *Transportar* es substituida por completo con sus subfunciones 2.1 y 2.2, a diferencia de las funciones *Tomar* y *Colocar* las cuales, a pesar de que sus subfunciones se incorporan al flujo, éstas no son remplazadas pues su función no está implícita en ellas. Esto es, las subfunciones 1.1 y 1.2 son necesarias para iniciar la función *Tomar*, mas éstas, no la realizan (lo mismo se aplica para la función *Colocar*) y con las subfunciones 2.1. y 2.2, la función *Transportar* sí se realiza al momento en que éstas se inician.

Los siguientes diagramas se desarrollan con las subfunciones correspondientes a cada función hasta obtener un diagrama de flujo con las subfunciones del último nivel (figuras 3.18 y 3.19). El diagrama de flujo Nivel 4, representa un flujo de material en la función general que indica un posible orden en el que se pueden llevar al cabo las funciones. Del diagrama se observan dos puntos importantes que son:

- 1) Durante el proceso de pasar de un estado inicial A, a un estado final B en la Función General, las funciones siguen una secuencia que se repite durante el proceso. Esto permite dividir el flujo de las funciones en dos partes (ciclos) y así simplificar la estructura de la FG.
- 2) El orden en que se realizan las funciones no es único. Por tanto, el orden utilizado en los diagramas anteriores no es el único con el cual se puede realizar la FG.

A continuación se hace referencia a las funciones por medio de letras para ampliar estos puntos:

**Tabla 3.3 Funciones**

A $\Rightarrow$ GUIAR(z) *	D $\Rightarrow$ GUIAR(r) †
B $\Rightarrow$ MOVER	E $\Rightarrow$ TOMAR
C $\Rightarrow$ GIRAR(xy) **	F $\Rightarrow$ COLOCAR
G $\Rightarrow$ DISCO	

\* En un eje vertical, † En dirección radial,

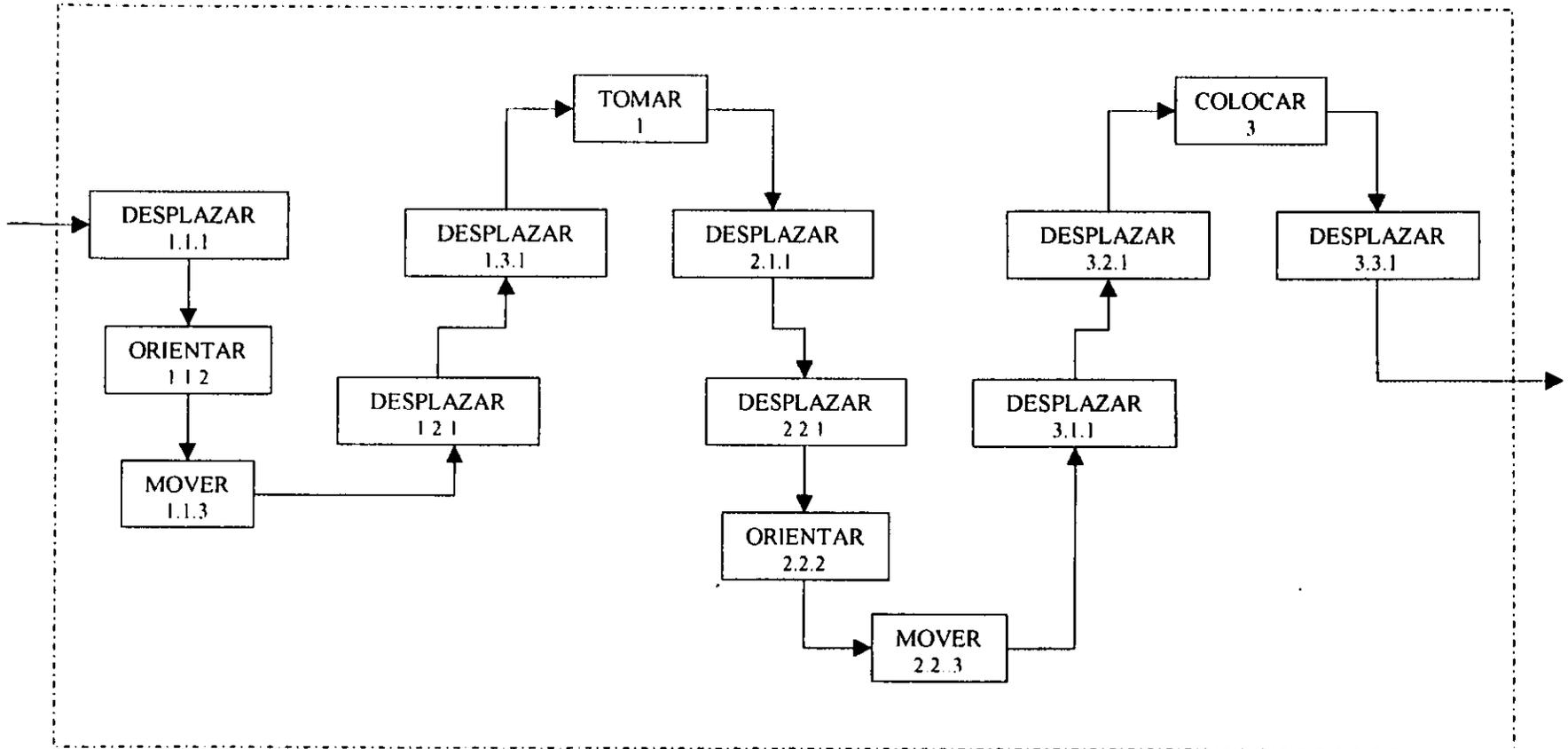
\*\* En un plano definido por una normal paralela al eje vertical.

Las funciones A, B, y C, corresponden a los movimientos para mover los discos, mencionados en la sección 3.2.2. En las figuras 3.20 y 3.21 se muestran los ciclos que se llevan al cabo durante la Función General.

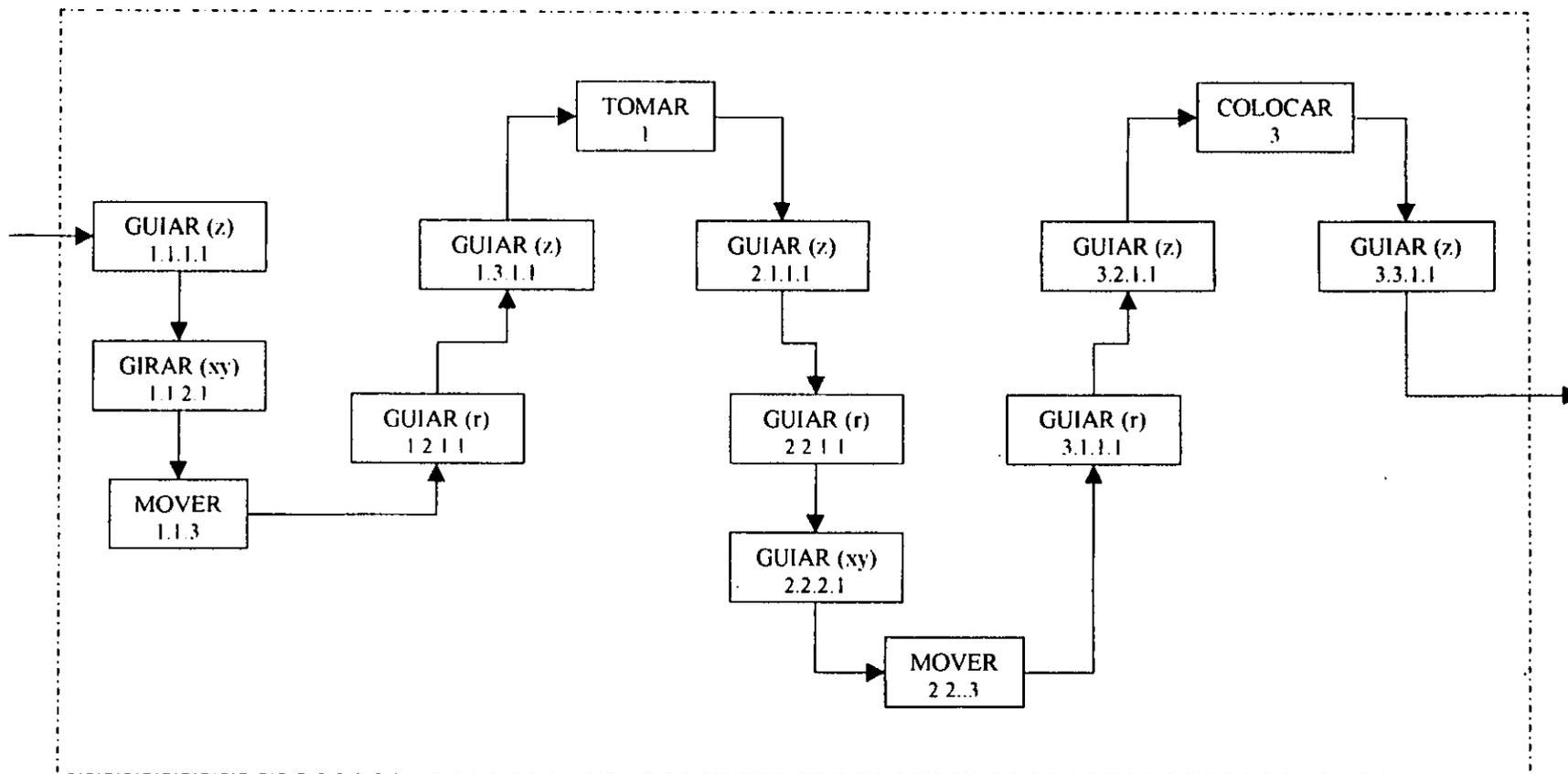
FALTA PAGINA

No.

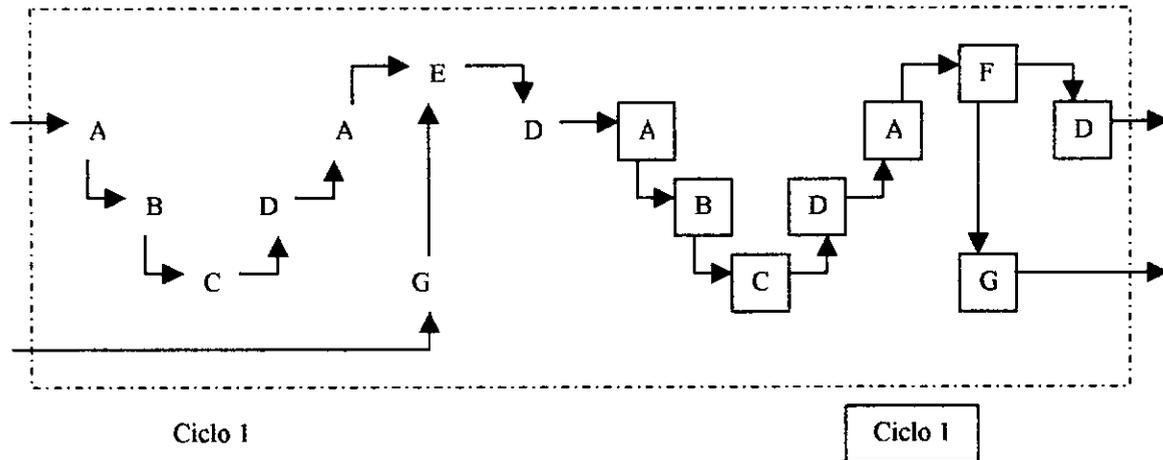
38



**Fig. 3.18**  
Diagrama de Flujo de Material (Nivel 3)



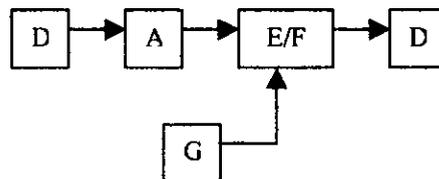
**Fig. 3.19**  
Diagrama de Flujo de Material (Nivel 4)



**Fig. 3.20**  
Ciclos de Operación

El primer ciclo es con el cual se posiciona el OT, se toma el disco y se saca de su casilla; en el segundo ciclo se lleva el OT a la posición final del disco y éste se deposita en la casilla. Como se puede ver, los ciclos son semejantes, la diferencia radica en la etapa en que se encuentre la FG y en las funciones E y F.

Analizando la FG se encuentra que se tienen movimientos secuenciados y simultáneos. En los ciclos mostrados, el orden seguido a partir de la función D, debe ser secuencial, esto se debe cumplir para tener al disco fuera o dentro de la casilla:



**Fig. 3.21**  
Secuencia Fija

El orden seguido por las funciones A, B y C no es único. En la tabla 3.4, se muestran tres conjuntos de estructuras para las funciones A, B y C, estos son: el conjunto S de estructuras secuenciales, el conjunto M de estructuras mixtas (tanto secuencial como simultánea), el conjunto U de estructuras simultáneas y, el

conjunto Z de estructuras fijas necesarias para tener al disco fuera o dentro de la casilla. La FG se forma uniendo una de las estructuras de cualquiera de los conjuntos U, S, o M, con alguna del conjunto Z; de esta manera se tienen 26 posibles estructuras, 12 por el conjunto S, 12 por el conjunto M y 2 por el conjunto U. Cuál de las diferentes secuencias de movimientos sea la adecuada, dependerá de los principios que se generen para satisfacer las funciones y de la estructura que mejor cumpla con las especificaciones. Para efectos del desarrollo de la FG, se tomará como ejemplo, la estructura  $EF_{S1Z1}$  que corresponde, a la unión de la estructura 1 del conjunto S con la estructura 1 del conjunto Z. Los términos simultáneo y secuencial, implican que cada función se realiza en un tiempo dado. En la figura 3.22, se representa por medio de una tabla de verdad, la estructura  $EF_{S1Z1}$ .

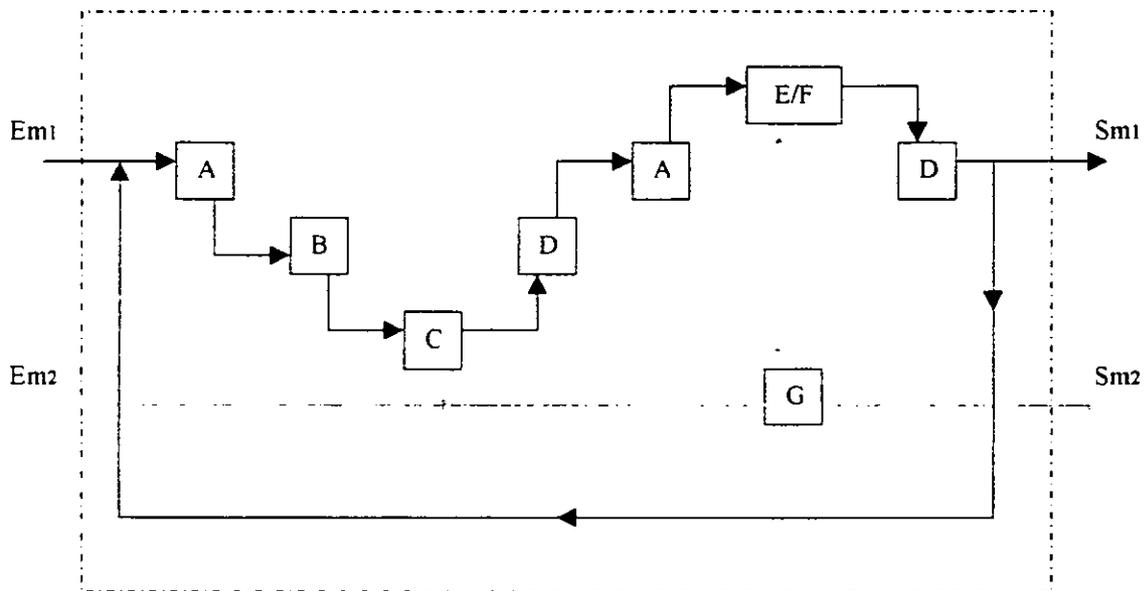
**Tabla 3.4 Estructura de Funciones.**

No.	S	M	U	Z
1	A,B,C	(AB).C	(ABC)	D,A,E/F,D
2	A,C,B	(AC).B		D,(A,E/F),D
3	B,A,C	(BC).A		
4	B,C,A	C,(AB)		
5	C,A,B	B,(AC)		
6	C,B,A	A,(BC)		

Ahora, juntando los ciclos establecidos y respetando las entradas y salidas de cada función, se simplifica la FG como se muestra en la figura 3.23. Con esta simplificación, el número de funciones en el flujo disminuye, y la tarea de completar la secuencia de movimientos para manipular los discos, depende ahora del flujo de señales. Una vez que la función D se ha realizado al final del Ciclo 1, el flujo regresa a la función A pero, ahora iniciando el Ciclo 2, y al realizarse la función D al final de éste, el flujo llega a su fin con las salidas correspondientes al disco y órgano terminal.

$EF_{S1Z1}$		Función					
		A	B	C	D	E	F
Tiempo	1	1	0	0	0	0	0
	2	0	1	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0
	4	0	0	0	1	0	0
	5	1	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	1	0
	7	0	0	0	1	0	0
	8	1	0	0	0	0	0
	9	0	1	0	0	0	0
	10	0	0	1	0	0	0
	11	0	0	0	1	0	0
	12	1	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	1
	14	0	0	0	1	0	0

**Fig. 3.22**  
Tabla de Verdad, Estructura secuencial de Funciones S1Z1



**Fig. 3.23**  
Ciclo Iterativo

### 3.2.4.2 FLUJO DE SEÑALES

El flujo de señales consiste en la transformación, transmisión, recepción, procesamiento, etc. de las señales que indican el inicio y final de una acción así como, el estado en que se encuentra el flujo de material y de energía. Para ello, es necesario un control para procesar todas las señales del sistema, en la figura 3.24 se muestra una función de control en donde convergen las señales tanto de entrada como de salida de ambos ciclos. Las señales de las funciones deben ser comparadas o verificadas para asegurar que la función se ha completado y entonces poder continuar con la siguiente.

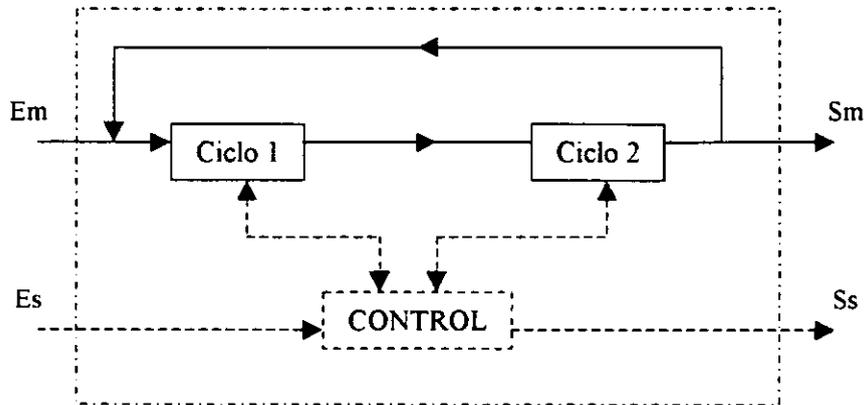


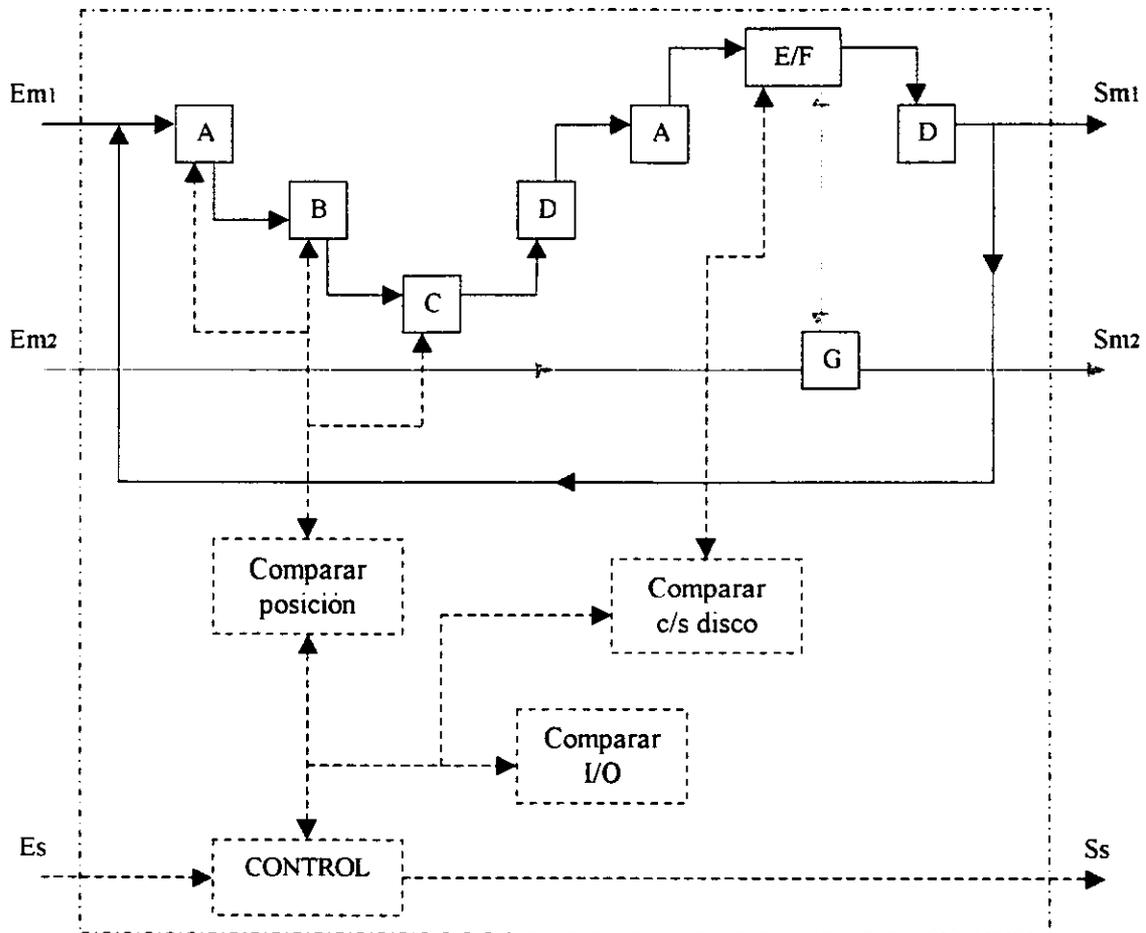
Fig. 3.24

De acuerdo al objetivo de cada función, las señales necesarias para controlar el flujo de la FG son las siguientes:

- 1) Para las funciones A, B y C, es necesario saber si éstas han alcanzado su posición final para entonces realizar la siguiente función.
- 2) Para la función D, lo que interesa es saber si el OT esta dentro o fuera de la casilla, es decir, determinar dos estados (1 y 0) para la posición de OT.

- 3) En las funciones E y F es necesario saber si el OT tiene un disco o no.
- 4) De acuerdo al flujo de material de la figura 3.24, se necesita indicar si la salida de la función D corresponde al Ciclo 1 o 2, para entonces dirigir el flujo nuevamente a la función A o bien, concluir el flujo de la FG.

En la figura 3.25 se agregan funciones auxiliares de control según las señales descritas. Todas estas señales pasan por la función de control para ser procesadas y transmitidas a las funciones correspondientes.



**Fig. 3.25**  
Diagrama de Flujo de Material y Señales

### 3.2.4.3 FLUJO DE ENERGÍA

La mayoría de las funciones desarrolladas hasta ahora, son funciones mecánicas, es decir, requieren de algún tipo de movimiento o energía mecánica para realizar su función. De acuerdo a lo anterior, el flujo de energía (figura 3.26) se estructura de la siguiente manera:

- 1) Partiendo de una energía inicial denominada Energía de Alimentación, se define una función que permita transformar esta Energía de Alimentación en Energía Mecánica.
- 2) La Energía Mecánica se encuentra en la naturaleza de dos formas, como movimiento o energía cinética (EK) y como energía de posición o energía potencial (EP).
- 3) La Energía Mecánica deberá ser almacenada o utilizada por cada función en la forma y cantidad que éstas lo requieran
- 4) La función *Girar* implica un movimiento angular lo cual requiere de energía cinética para ello.
- 5) Las funciones *Guiar* requieren tanto de energía cinética como de energía potencial según la etapa en que se encuentre el flujo de material.
- 6) Para las funciones *Tomar* y *Colocar* no se especifica el tipo de energía requerida, por lo mismo que las funciones aun no están completamente definidas como ya se explicó anteriormente, y sólo se denota algún tipo de transformación para la Energía de Alimentación.
- 7) Las funciones correspondientes al flujo de señales también requieren de energía para poder realizarse por lo cual, también se tiene energía de alimentación para las funciones de control.

Habiendo establecido por completo los flujos de material, de señales y de energía para las funciones, y de acuerdo a las entradas y a las salidas deseadas,

la estructura completa de la FG es la mostrada en la figura 3.26. Ahora, se deben generar los principios, conceptos, mecanismos, etc., que satisfagan a la FG en su estructura y funciones.

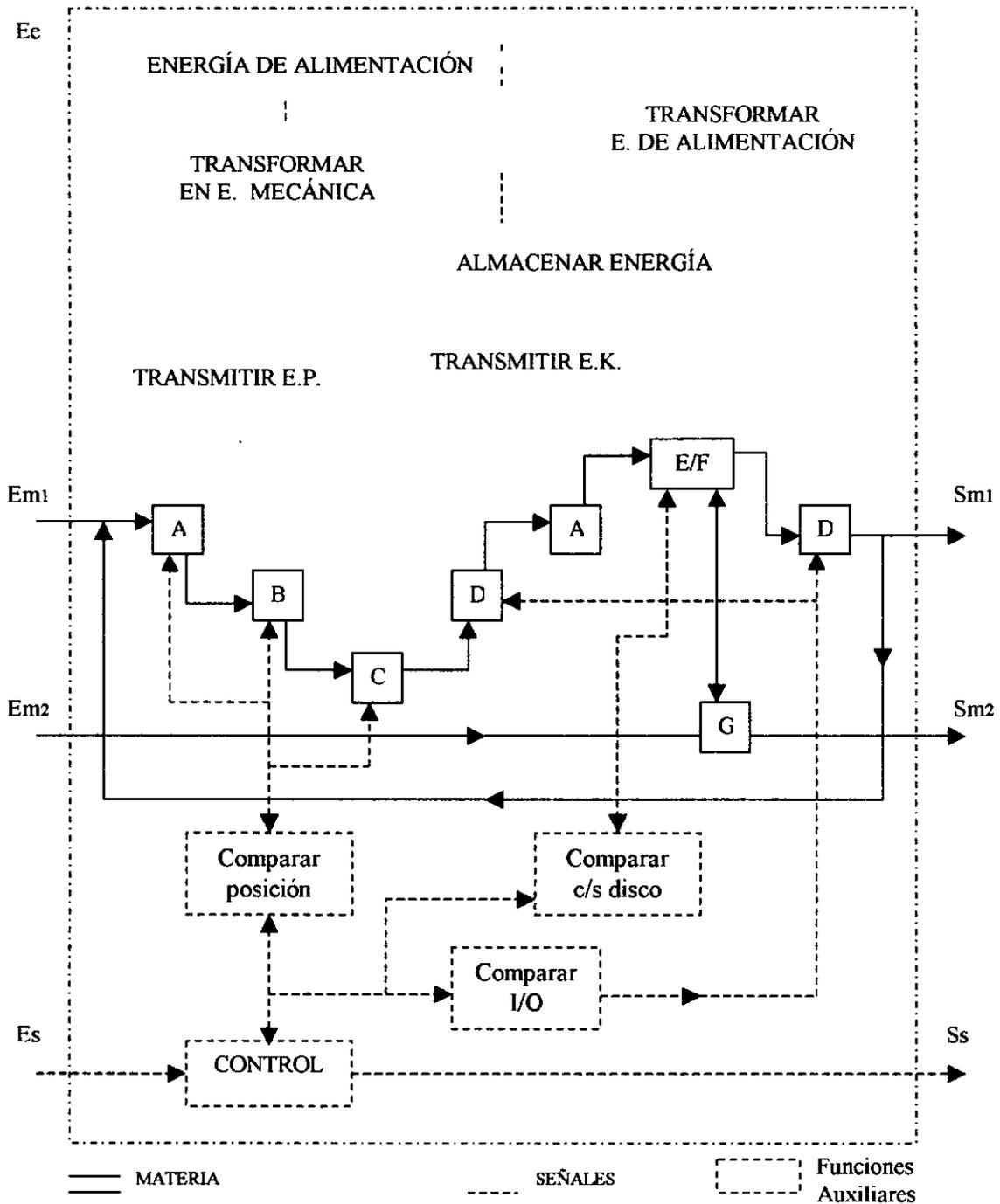


Fig. 3.26  
Diagrama de Flujo de la Función General

### **3.3 ESTABLECIMIENTO DE SISTEMAS**

Las funciones deben interactuar unas con otras, razón por la cual, es conveniente establecer sistemas que permitan ubicar a las funciones según su objetivo. De la estructura de la FG se establecen los siguientes sistemas:

- Sistema de Posicionamiento: A, B, C,
- Sistema de Sujeción: D, A, E, F.
- Sistema Auxiliar: funciones de Control y funciones de Energía.

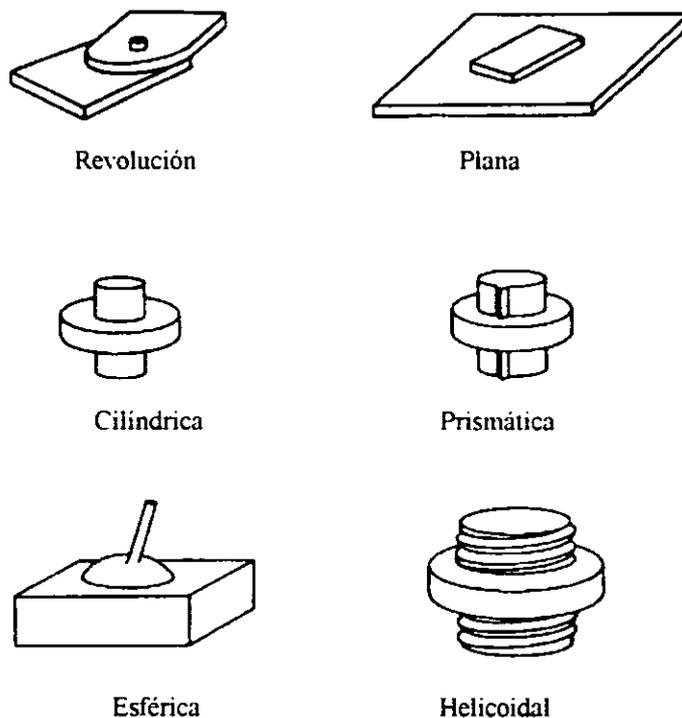
El Sistema de Posicionamiento (SP) contempla las funciones para posicionar en las proximidades de la casilla al OT; el Sistema de Sujeción (SS) contempla las funciones necesarias para entrar o salir de la casilla y tomar o colocar el disco; el Sistema Auxiliar (SA), comprende las funciones que integran a los flujos de energía y de señales los cuales, ayudan al flujo principal para realizar la FG.

### **3.4 GENERACIÓN DE CONCEPTOS**

En esta sección se establecen principios, conceptos o mecanismos de manera general con los cuales, se puedan realizar las funciones sin generar aún alguna alternativa. En la tabla 3.7, se muestra una matriz morfológica en cuyas columnas, se encuentran los diferentes conceptos que pueden satisfacer a las funciones, y en sus renglones, se encuentran los principios de los cuales se generan estos conceptos así como, las funciones.

Las funciones de los sistemas SP y SS (A, B, C y D), implican de alguna manera movimientos como traslaciones y/o rotaciones. Para estas funciones es necesario encontrar algún elemento mecánico que permita realizar el movimiento

de cada función. En Robótica, a estos elementos mecánicos se les conoce como articulaciones. Dentro de las articulaciones más comunes se encuentran: articulaciones de revolución y articulaciones prismáticas. A diferencia de las articulaciones de un brazo humano, las articulaciones en un robot normalmente están restringidas a un sólo grado de libertad para simplificar la mecánica, cinemática, y el control del manipulador. Las articulaciones de revolución (también rotacionales) permiten un grado de rotación; las articulaciones prismáticas (también llamadas deslizantes o correderas) permiten un grado de traslación. A partir de la combinación de ambos tipos de articulaciones, se han generado otras más como son: articulaciones cilíndricas, helicoidales, esféricas y planas.



**Fig. 3.27**  
Tipos de articulaciones.

La articulación cilíndrica permite dos grados de libertad ya que ésta puede rotar y trasladarse de manera independiente a lo largo de un eslabón. La articulación helicoidal en realidad es un mecanismo que por sus características similares a la cilíndrica, se ha considerado como articulación; al igual que la cilíndrica puede rotar y trasladarse al mismo tiempo pero no de manera independiente. Esto se debe a que el eslabón sobre el cual se desplaza la articulación es una barra con una cuerda (o tornillo) con lo cual, el desplazamiento obtenido depende del número de vueltas que se den como entrada, por tanto, permite un grado de libertad. La articulación esférica consta de tres articulaciones de revolución las cuales, permiten rotar en los tres ejes siendo así de tres grados de libertad. La articulación plana puede trasladarse en el plano y rotar sobre el mismo permitiendo tres grados de libertad.

Las funciones de energía (*Transformar en Energía Mecánica, Almacenar, Transmitir*) del Sistema Auxiliar, se pueden satisfacer de acuerdo a diferentes principios. Esto es, para transformar a energía mecánica o bien generar movimiento, se tienen diferentes medios según el tipo de energía de alimentación como puede ser: energía eléctrica, magnética, neumática, hidráulica, entre otras.

- Electromagnética en Mecánica (EM ↔ M): Servomotores, motores de pasos, solenoides, pistones magnéticos, etc.
- Mecánica en Mecánica (M ↔ M): Elementos precargados (resortes, etc.)
- Neumática en Mecánica (N ↔ M): pistones, bombas, compresores, etc.
- Hidráulica en Mecánica (H ↔ M): pistones, bombas, etc.

La mayoría de los mecanismos son generados a partir de principios de movimiento o bloques constitutivos básicos, es decir, identificando y entendiendo el propósito de cada uno de los bloques constitutivos, éstos ayudan a crear

nuevos mecanismos. Considerando que la mayor parte de los mecanismos de potencia o de actuación, son mecanismos que generan movimiento rotatorio o bien, de traslación, los conceptos generados se clasificarán de acuerdo al tipo de movimiento de entrada y salida como pueden ser: rotación ( R), traslación (T), helicoidal (H) o una combinación de estos. Así, estos bloques funcionales, permiten identificar o visualizar lo que se necesita lograr según el tipo de movimiento de entrada y salida que se tenga en cada función del Sistema de Posicionamiento. Entonces, para la función *Trasmitir* la energía transformada en movimiento, se tiene los siguientes principios:

- Rotación en Rotación ( $R \leftrightarrow R$ ).
- Traslación en Traslación ( $T \leftrightarrow T$ ).
- Rotación en Traslación ( $R \leftrightarrow T$ ).
- Helicoidal en Rotación ( $H \leftrightarrow R$ ).
- Helicoidal en Traslación ( $H \leftrightarrow T$ ).

En la tabla 3.7, estos conceptos se presenta agrupados como conceptos generales por razones de espacio, esto es, en la tabla 3.5 se tienen varios mecanismos por medio de engranes, seguidores y poleas entre otros, de manera que los mecanismos son agrupados bajo estos conceptos. Para almacenar la energía se tienen diferentes medios como son: mecánicos, eléctricos, fotoeléctricos, entre otros (tabla 3.6).

Es importante mencionar que, los conceptos mostrados para cada función no son exclusivos de éstas, es decir, una función pueden ser satisfecha por un solo concepto o bien, por la combinación de dos o más conceptos de la misma función así como, de diferentes funciones.

**Tabla 3.5 Conceptos: Transmitir Energía**

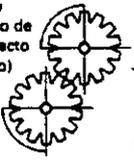
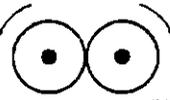
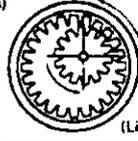
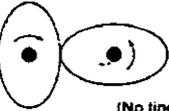
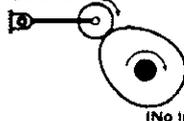
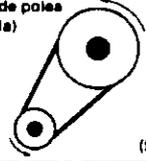
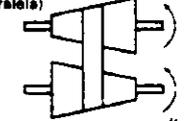
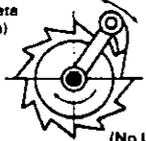
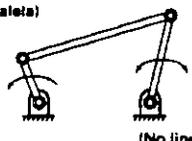
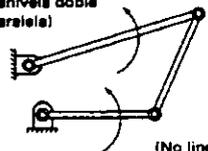
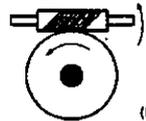
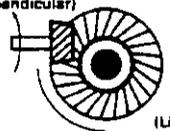
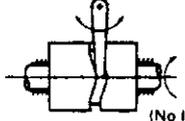
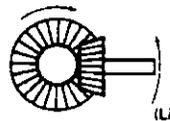
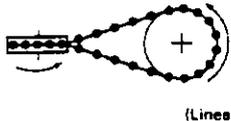
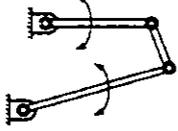
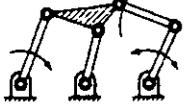
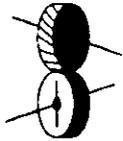
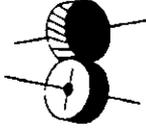
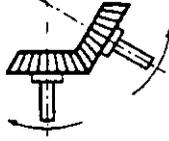
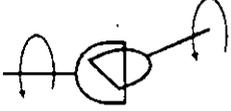
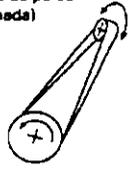
Rotación ← → Rotación		
<p>Engrane cilíndrico de diente recto (paralelo)</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Par de rodillos de fricción (paralelos)</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Par de engranes internos (paralelos)</p>  <p>(Lineal)</p>
<p>Engrane no circular (paralelo)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Rueda de Ginebra (paralela)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Seguidor de leva (paralelo)</p>  <p>(No lineal)</p>
<p>Banda de poleas (paralela)</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Rueda dentada y cadena (paralela)</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Banda cónica (paralela)</p>  <p>(Lineal)</p>
<p>Rueda dentada y trinqueta (paralela)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Manivela-oscilador (paralela)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Manivela doble (paralela)</p>  <p>(No lineal)</p>
<p>Tornillo sin fin (perpendicular)</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Engranaje hipoides (perpendicular)</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Banda de poleas (perpendicular)</p>  <p>(Lineal)</p>
<p>Seguidor de leva cilíndrica (perpendicular)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Engranaje cónico (perpendicular)</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Cadena articulada (perpendicular)</p>  <p>(Lineal)</p>
<p>Doble oscilador (paralelo)</p> 	<p>Eslabonamiento de seis barras con reposo (paralelo)</p> 	<p>Engrane helicoidal (perpendicular)</p> 
<p>Engrane helicoidal (inclinado)</p> 	<p>Engrane cónico (inclinado)</p> 	<p>Cadena articulada (inclinada)</p> 
<p>Junta universal (inclinada)</p> 	<p>Banda de poleas (inclinada)</p> 	<p>Rotación ← → Traducción</p> <p>Seguidor de leva acunada (perpendicular)</p> 

Tabla 3.5 Continua.

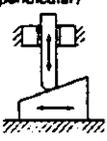
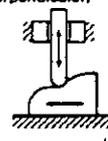
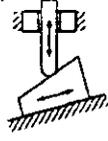
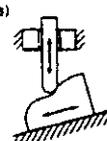
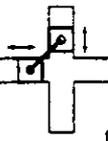
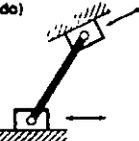
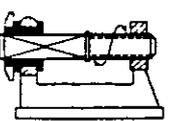
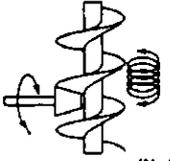
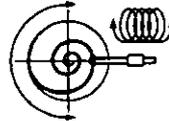
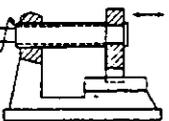
Traslación ← → Traslación		
<p>Seguidor de leva y cuña (perpendicular)</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Seguidor de leva y cuña (perpendicular)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Seguidor de leva y cuña (inclinada)</p>  <p>(Lineal)</p>
<p>Seguidor de leva y cuña (inclinada)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Corredora doble (perpendicular)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Deslizador doble (inclinado)</p>  <p>(No lineal)</p>
Helicoidal ← → Rotación		
<p>Mecanismo de tornillo</p>  <p>(Lineal)</p>	<p>Engranaje cónico de tornillo (perpendicular)</p>  <p>(No lineal)</p>	<p>Engranaje cónico de tornillo (perpendicular)</p>  <p>(No lineal)</p>
		<p>Mecanismo de tornillo (paralelo)</p>  <p>(Lineal)</p>

Tabla 3.6 Conceptos: Almacenar Energía

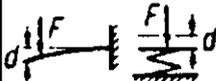
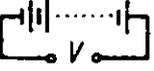
Mechanical energy			
<p>Flywheel</p> 	<p>Moving mass (transl.)</p> 	<p>Potential energy</p> 	<p>Strain</p> 
Electrical energy			
<p>Battery</p> 		<p>Capacitor (electr. field)</p> 	

Tabla 3.7 Matriz Morfológica.

		Conceptos								
		1	2	3	4	5	6	7		
1	I	A	Prismática	Rotacional	Cilíndrica	Helicoidal	Esférica	Plana		
2		B	Prismática	Rotacional	Cilíndrica	Helicoidal	Esférica	Plana		
3		C	Polar	Rectilíneo	Esférico					
4		D	Prismática	Rotacional	Cilíndrica	Helicoidal	Esférica	Plana		
5		II	E	Vacío	Magnetismo	Contención	Adhesión			
6			F	Vacío	Magnetismo	Contención	Adhesión			
7	Funciones	I	M→M	Elemento precargado						
8			EM→M	Motor de Pasos	Servomotor	Solenoide	Pistón Magnético			
9			N→M	Pistón						
10			H→M	Pistón						
11		III	J	R→R	Engranés	Poleas	Eslabones	Seguidores	Ruedas dentadas	Tornillos
12				T→T				Seguidores		Correderas
13				R→T			Eslabones	Seguidores		
14				H→T						Tornillos
15				H→R	Engranés					Tornillos
16		K	Mecánica	Volante de inercia	Masa en movimiento E.K.	Masa elevada E.P.	Resorte recto	Resorte espiral	Banda de hule	Flexión/ Deformación
17			Eléctrica	Batería	Capacitor					
18		L		Software	Rango	Presencia	Proximidad	Contacto		

A → GUIAR (z), B → MOVER, C → GIRAR (xy), D → GUIAR (r), E → TOMAR, F → COLOCAR, I → TRANSFORMAR EN E. MECÁNICA  
 J → TRANSMITIR, K → ALMACENAR, L → COMPARAR.

I → Sistema de Posicionamiento, II → Sistema de Sujeción, III → Sistema Auxiliar.

FALTA PAGINA

No.

55

En la tabla 3.8, se muestran conceptos funcionales generados a partir de la matriz morfológica para cada una de las funciones del Sistema de Posicionamiento y del Sistema de Sujeción, complementadas con conceptos de las funciones auxiliares de manera que, las propuestas, se formulen de acuerdo al flujo asociado a cada función según el diagrama de la figura 3.26. Ahora bien, las propuestas satisfacen a las funciones en forma individual por lo cual, ahora deben interactuar de tal forma que se generen alternativas de solución que satisfagan en su conjunto a la FG así como, a los requerimientos.

### **3.5 COMBINACIÓN DE CONCEPTOS FUNCIONALES Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

Al combinar los conceptos de la tabla 3.8, se genera un gran número de propuestas de solución, en específico, se obtienen 240, evaluar todas las propuestas puede ser un proceso largo y difícil. Para evitar lo anterior, es conveniente evaluar por medio de un análisis, que puede ser por simple inspección, gráfico, escrito, matemático, etc., cada una de las propuestas y sus posibles combinaciones de manera que, el número de alternativas de solución a ser evaluadas mediante una matriz de decisión sea menor.

De acuerdo a lo anterior, se comparan y analizan las diferentes propuestas de cada función y se descartan las menos viables de éstas, restando, las propuestas mostradas en la tabla 3.9. Combinando los conceptos de la tabla 3.9, se generan 8 propuestas de solución indicadas en la tabla 3.10. De estas, la propuesta 8 no sería viable pues, aún con la orientación C3, se tendría que recurrir al concepto C1 para orientar entre otro par de contenedores dentro de un arreglo circular de éstos, dando la combinación: A1-B5-C3,1-D4-EF2. Aquellas que contienen la combinación B1-C3 y B5-d1 no son compatibles físicamente. Las propuestas restantes, en principio, cumplen con las expectativas requeridas como

para ser consideradas propiamente, como alternativas de solución y ser evaluadas como tales; éstas se indican en la tabla 3.11. Las alternativas de solución 3 y 4, se consideran semejantes ya que, si se orienta con C1, ya implícitamente, se está transportando, por lo tanto, no importaría qué concepto B se usara para la función *Transportar*. Entonces, en la tabla 3.12, se indican las alternativas de solución finales, que serán evaluadas.

**Tabla 3.10 Combinación de Conceptos Funcionales.**

<b>No.</b>		<b>Combinaciones</b>
<b>Propuestas Funcionales</b>	1	A1-B1-C1-D1-EF2
	2	A1-B5-C1-D1-EF2
	3	A1-B1-C1-D4-EF2
	4	A1-B5-C1-D4-EF2
	5	A1-B1-C3-D1-EF2
	6	A1-B5-C3-D1-EF2
	7	A1-B1-C3-D4-EF2
	8	A1-B5-C3-D4-EF2

**Tabla 3.11 Alternativas de Solución.**

<b>No.</b>	<b>Combinaciones</b>
1	A1-B1-C1-D1-EF2
3	A1-B1-C1-D4-EF2
4	A1-B5-C1-D4-EF2

**Tabla 3.12 Alternativas Finales.**

<b>No.</b>	<b>Combinaciones</b>	
1	A1-BC1-D1-EF2	Fig. 3.29
3	A1-BC1-D4-EF2	Fig. 3.30

Tabla 3.8 *Propuestas Funcionales.*

	Función	Propuesta	Descripción
	A	1) H /Mot. Pasos /Tren-engranes + Helicoidal.	Se posiciona por medio de una articulación helicoidal, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos, se transmite por un tren de engranes y, la misma articulación helicoidal almacena la EP.
		2) P /Mot. Pasos / Tren-engranes /Poleas.	Se posiciona con una articulación prismática, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos, se transmite por un tren de engranes y por un sistema de poleas, la EP se almacena en la articulación.
I	B	1) R /Mot. Pasos / Tren-engranes /Eslabones. *	Se mueve por medio de una articulación rotacional, la energía alimentada se transforma en mecánica por medio de un motor de pasos, se transmite por conexiones de eslabones y, la EK se almacena en la articulación.
		2) H /Cuña /Solenoides / Mot. Pasos /Tren-engranes. *	Se mueve por una articulación helicoidal la cual, se convierte en rotacional, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos y un solenoide, se transmite con un tren de engranes y una cuña, que es acoplada por el solenoide a la tuerca de la articulación helicoidal con el tornillo de la misma de tal forma que, la tuerca ya no se desplaza sino que, gira junto con el tornillo y, la EK se almacena en la articulación con el movimiento.
		3) H /Mot. Pasos /Tren-engranes + Helicoidal. †	Se mueve en línea recta por una articulación helicoidal, la energía de alimentación se transforma en energía mecánica por medio de un motor de pasos, se transmite por un tren de engranes y, la articulación almacena la EK.
		4) P /Mot. Pasos / Tren-engranes /Poleas. †	Se mueve en línea recta por una articulación prismática, la energía de alimentación se transforma en energía mecánica por medio de un motor de pasos, se transmite por un tren de engranes y por un juego de poleas, la EK se almacena la articulación con el movimiento.
		5) P/Bobina-iman/Repulsión/Resorte.	Se posiciona por una articulación prismática, la energía alimentada es transformada en mecánica y transmitida por repulsión magnética entre una bobina y un imán ubicado en la articulación, la energía la almacena la articulación y un resorte colocado en el eje de la misma.

\* Describen un Movimiento Angular.

† Describen un Movimiento Rectilíneo.

Tabla 3.8 Continua:

I	C	1) R /Mot. Pasos / Tren-engranes /Eslabones.	Se orienta por una articulación rotacional, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos, se transmite por conexiones de Eslabones, la EK se almacena con el movimiento angular.
		2) H /Cuña /Solenoides /Mot. Pasos /Tren-engranes.	Se mueve por una articulación helicoidal la cual, se convierte en rotacional, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos y un solenoide, se transmite con un tren de engranes y una cuña, que es acoplada por el solenoide a la tuerca de la articulación helicoidal con el tornillo de la misma, de tal forma que, la tuerca ya no se desplaza sino que gira junto con el tornillo y, la EK se almacena en la articulación con el movimiento
		3) R / Seguidor-rotacional.	Se orienta por medio de una articulación rotacional la cual, gira al ser empuja por dos seguidores que se encuentran a lo largo de la línea que se establezca para mover linealmente (B3 o B4) el OT.
	D	1) H /Mot. Pasos /Tren-engranes + Helicoidal.	Se posiciona dentro de la casilla por una articulación helicoidal, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos, se transmite con un tren de engranes y, la EK se almacena en la articulación.
		2) P /Mot. Pasos /Tren-engranes+Poleas /Resorte.	Se posiciona dentro de la casilla por una articulación prismática, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos, se transmite con un tren de engranes y un juego de poleas que jala al OT, la energía la almacena la articulación y un resorte ubicado en el eje de la misma.
		3) P /Pistón Magnético /Pistón Magnético.	Se posiciona por medio de una articulación prismática, la energía alimentada es transformada en energía mecánica y transmitida por el mismo pistón y, la EK es almacenada en la articulación.
		4) P /Bobina+iman /Repulsión /Resorte.	Se posiciona por una articulación prismática, la energía alimentada es transformada en mecánica y transmitida por repulsión magnética entre una bobina y un imán ubicado en la articulación, la energía la almacena la articulación y un resorte colocado en el eje de la misma.
II	E/F	1) Gravedad /Paleta.	Se sujeta el disco por una paleta que lo contiene al momento en que es levantado por medio de A1 o A2.
		2)Vacio/ Paleta.	Se sujeta el disco por succión al crear un vacío entre la paleta y el disco al momento en que éste es levantado por medio de A1 o A2.

Tabla 3.9 *Propuestas Funcionales restantes.*

	Función	Propuesta	Descripción
I	A	1) H /Mot. Pasos /Tren-engranes + Helicoidal.	Se posiciona por medio de una articulación helicoidal, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos, se transmite por un tren de engranes y, la misma articulación helicoidal almacena la EP.
	B	1) R /Mot. Pasos / Tren-engranes /Eslabones. *	Se mueve por medio de una articulación rotacional, la energía de alimentación se transforma en mecánica por medio de un motor de pasos, se transmite por conexiones de eslabones y, la EK se almacena en la articulación.
		5) P/Bobina-iman/Repulsión/Resorte. †	Se mueve por una articulación prismática, la energía alimentada es transformada en mecánica y transmitida por repulsión magnética entre una bobina y un imán ubicado en la articulación, la energía la almacena la articulación y un resorte colocado en el eje de la misma.
	C	1) R /Mot. Pasos / Tren-engranes /Eslabones.	Se orienta por una articulación rotacional, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos, se transmite por conexiones de eslabones; la EK se almacena con el movimiento angular.
		3) R / Seguidor-rotacional.	Se orienta por medio de una articulación rotacional la cual, gira al ser empuja por dos seguidores que se encuentran a lo largo de la línea que se establezca para mover linealmente (B3 o B4) el OT.
	D	1) H /Mot. Pasos /Tren-engranes + Helicoidal.	Se posiciona dentro de la casilla por una articulación helicoidal, la energía de alimentación se transforma en mecánica por un motor de pasos, se transmite con un tren de engranes y, la EK la almacena la articulación.
		4) P /Bobina+iman /Repulsión /Resorte.	Se posiciona por una articulación prismática, la energía alimentada es transformada en mecánica y transmitida por repulsión magnética entre una bobina y un imán ubicado en la articulación, la energía la almacena la articulación y un resorte colocado en el eje de la misma.
		2)Vacio/ Pala.	Se sujeta el disco por succión al crear un vacío entre la paleta y el disco.

\*Describe un Movimiento Angular

† Describen un Movimiento Rectilíneo.

### 3.6 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

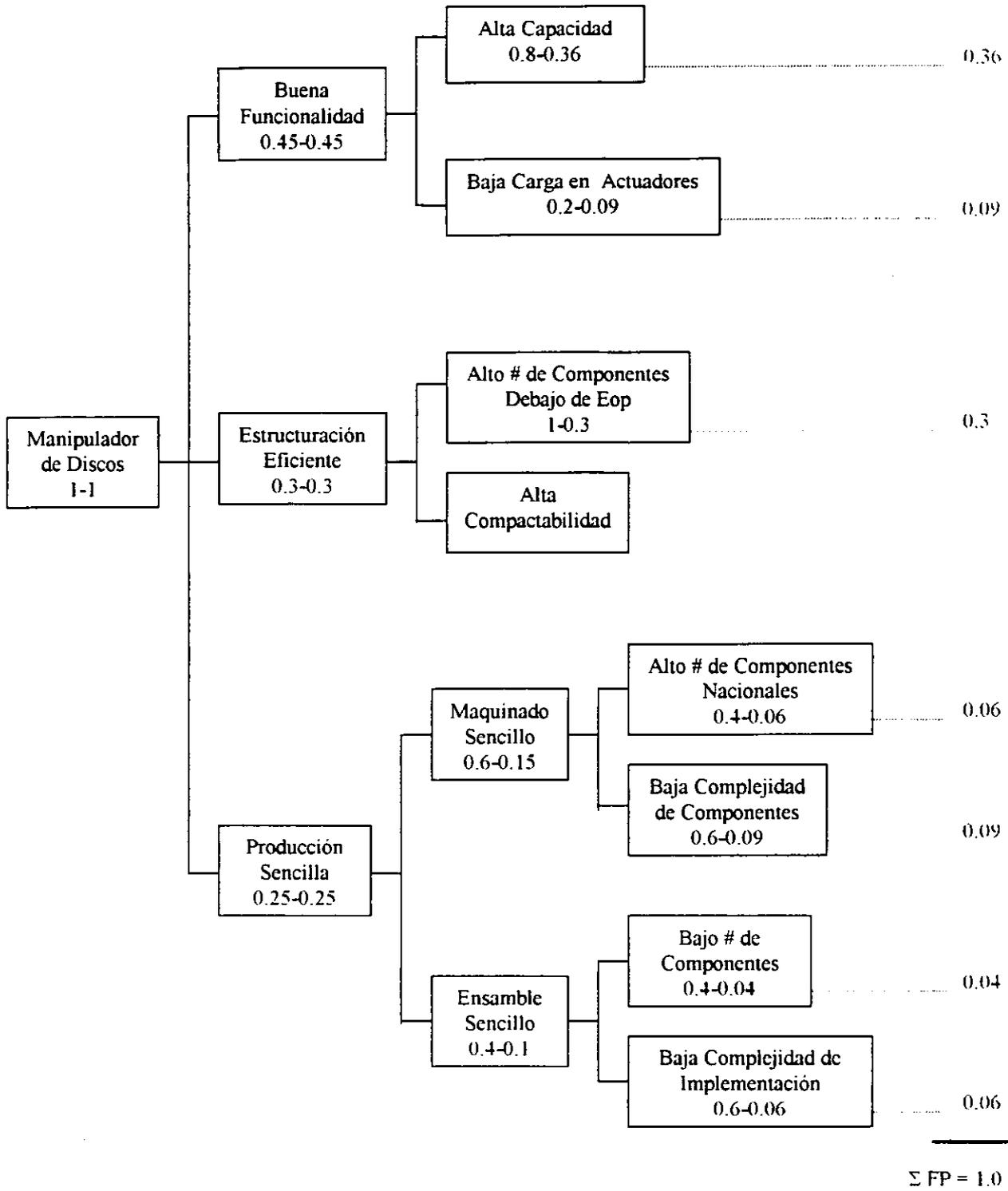
El proceso de diseño es muchas de las veces un proceso iterativo, esto se debe a que durante alguna etapa del diseño, se tiene la necesidad de modificar o agregar aspectos que en la etapas previas no se habían contemplado. Se ha considerado incluir en el diagrama de la figura 2.1, dos aspectos más para la evaluación, éstos son: la carga aproximada que los actuadores tuvieran que manejar debido al número de componentes y, la dificultad para implementar estos últimos en una función. En la figura 3.28 y tabla 3.13 se muestra estas modificaciones.

**Tabla 3.13 Magnitudes de Requerimientos (modificada).**

No	1		2	3	4	5	6	7	8
Esca	Alta Capacidad de Discos $t_{op}$ [s] * - discos/h		Baja carga en actuadores	Alto # de componentes debajo del Eop +	Alta compactabilidad	Alto # de componentes nacionales	Baja complejidad de componentes	Bajo # de componentes	Baja complejidad de implementación
0	7.5	475	No Satisfactoria	Muy Pocos		$33 < \# < \infty$	No	$140 < \# < \infty$	No
1	7.2	500				$30 < \# \leq 33$	Satisfactoria	$130 < \# \leq 140$	Satisfactoria
2	6	600	Admisible	Pocos		$27 < \# \leq 30$	Admisible	$120 < \# \leq 130$	Admisible
3	5.7	625				$24 < \# \leq 27$		$110 < \# \leq 120$	
4	5.5	650	Adecuada	Algunos		$21 < \# \leq 24$	Adecuada	$100 < \# \leq 110$	Adecuada
5	5.3	675				$15 < \# \leq 21$		$90 < \# \leq 100$	
6	5.1	700				$12 < \# \leq 15$		$80 < \# \leq 90$	
7	4.9	725	Buena	Muchos		$9 < \# \leq 12$	Buena	$70 < \# \leq 80$	Buena
8	4.8	750				$6 < \# \leq 9$		$60 < \# \leq 70$	
9	4.6	775	Muy Buena	Todos		$3 < \# \leq 6$	Muy Buena	$50 < \# \leq 60$	Muy Buena
10	4.5	800			$0 < \# \leq 3$	$40 < \# \leq 50$			

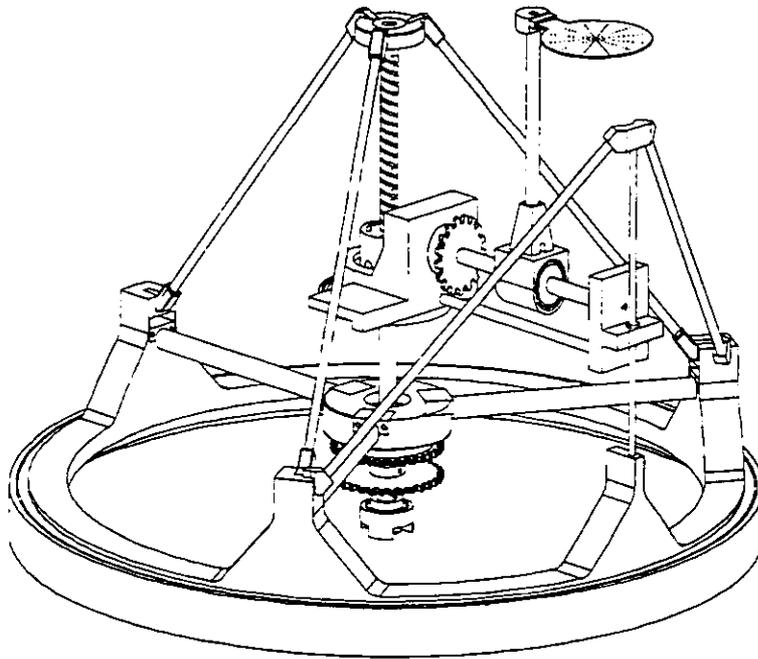
\*  $t_{op}$  = tiempo de operación del durante la Trayectoria.

+ Eop = espacio de operación del órgano terminal.



**Fig. 3.28**  
Diagrama de Requerimientos y Factor de Peso

En la tabla 3.14 se muestra la evaluación de las alternativas indicadas en la tabla 3.12. La evaluación contiene lo siguientes elementos: los requerimientos, su correspondiente factor de peso (F.P.), los parámetros con los que éstos se miden y sus unidades. Luego, para cada alternativa  $AS_i$ , se indican la magnitud que ésta tiene en cada requerimiento, la calificación que alcanza de acuerdo a la escala establecida (tabla 3.13) y, el porcentaje de calificación (P.C.) obtenido de multiplicar la calificación por el factor de peso. Una vez obtenidos los porcentajes de calificación para cada requerimiento, éstos se suman y se obtiene así, la calificación final para la alternativa en cuestión.



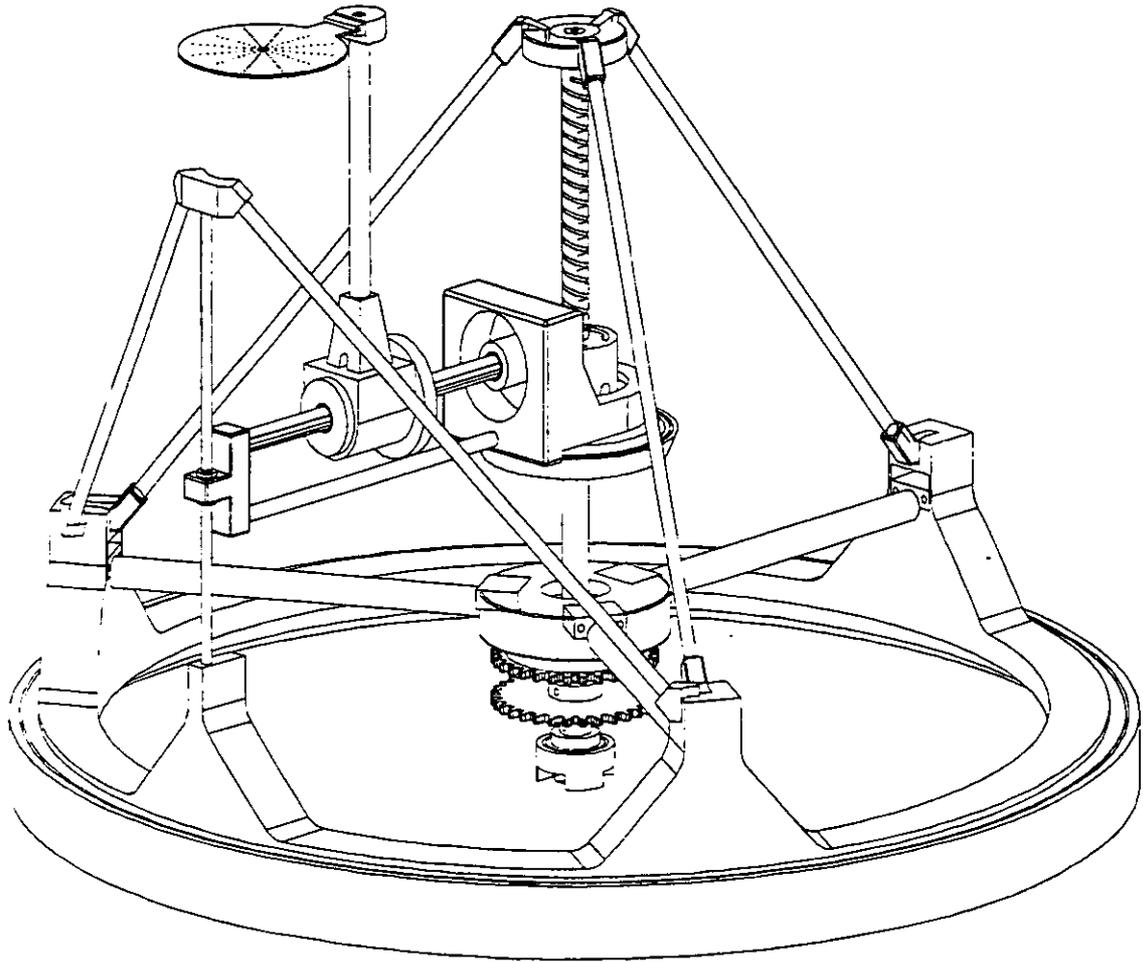
**Fig. 3.29**  
Alternativa de Solución 1(AS1)

Tabla 3.14 Evaluación.

No	Requerimiento	F.P	Parámetro		AS1			AS3		
			Unidad		Magn.	Calif.	P.C.	Magn.	Calif.	P.C.
1	Alta capacidad	0.36	top*	s	5.1	6	2.16	4.9	7	2.52
2	Baja carga en Sist. I, II	0.09	Carga en Sistema I	*	Buena	7	0.63	Buena	8	0.72
3	Alto # de componentes debajo de Eop *	0.3	# de componentes	*	Todos	9	2.7	Todos	9	2.7
4	Alta compactabilidad	---	Compactabilidad	m <sup>3</sup>	---	---	---	---	---	---
5	Alto # de componentes nacionales	0.06	# de componentes nacionales	*	12 < # ≤ 15	6	0.36	9 < # ≤ 12	7	0.42
6	Baja complejidad de componentes	0.09	Complejidad de componentes	*	Baja	8	0.72	Muy Buena	9	0.81
7	Bajo # de componentes	0.04	# de componentes	*	60 < # ≤ 70	8	0.32	60 < # ≤ 70	8	0.32
8	Baja complejidad de implementación	0.06	Complejidad de implementación	*	Buena	8	0.48	Muy Buena	9	0.54
<b>Total</b>		<b>1</b>			<b>Total</b>	<b>52</b>	<b>7.37</b>	<b>Total</b>	<b>58</b>	<b>8.03</b>

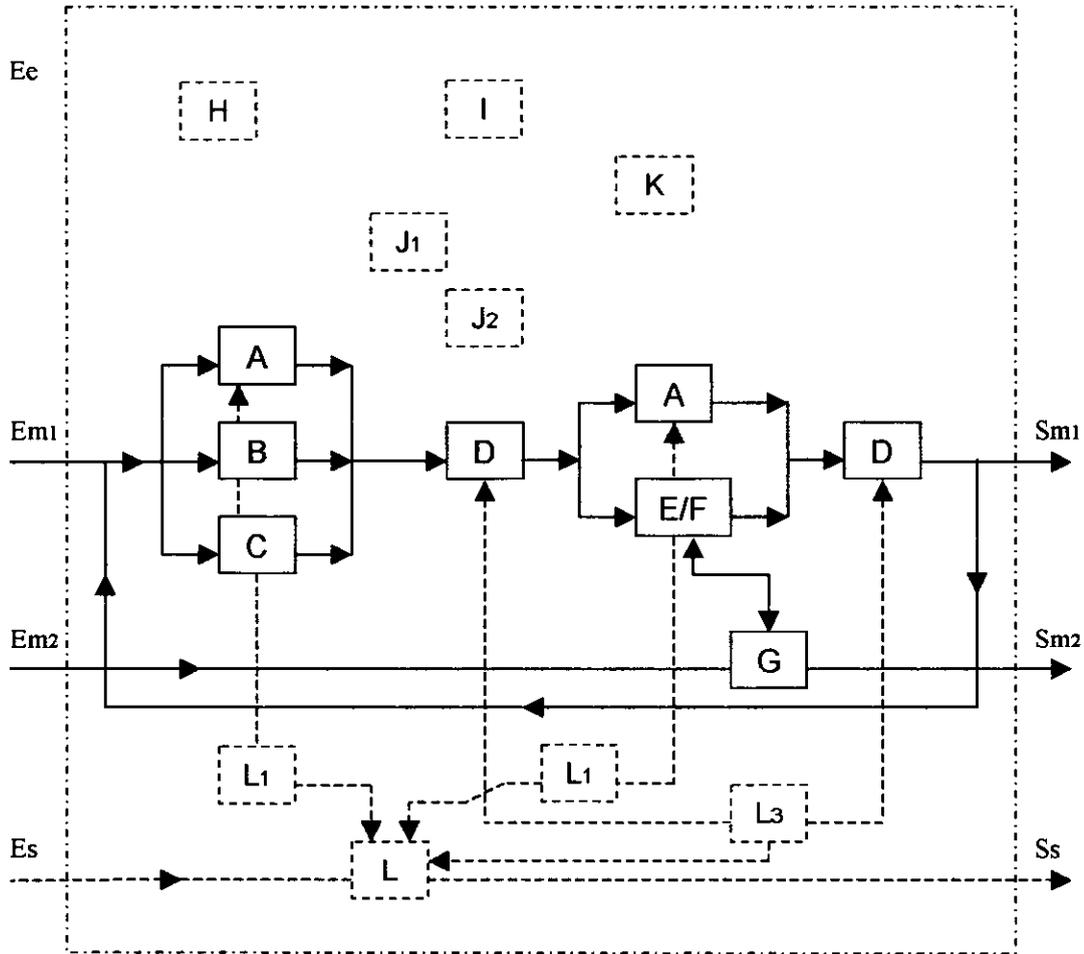
\* top = tiempo de operación del durante la Trayectoria.

\* Eop = espacio de operación del órgano terminal



**Fig. 3.30**  
Alternativa de Solución 3(AS3)

De acuerdo a la evaluación, la alternativa AS<sub>3</sub> (figura 3.30) tiene mayor calificación, por lo tanto **ASF = AS<sub>3</sub>**.



**Fig. 3.31**  
Diagrama de Flujo de la Función General ASF (CFU122)

==== MATERIA                      - - - - SEÑALES                      [ - - - ] Funciones Auxiliares

- |               |                                |                         |
|---------------|--------------------------------|-------------------------|
| A ⇒ GUIAR(z)  | E ⇒ TOMAR                      | J2 ⇒ TRANSMITIR E.K.    |
| B ⇒ MOVER     | F ⇒ COLOCAR                    | K ⇒ ALMACENAR ENERGÍA   |
| C ⇒ GIRAR(xy) | H ⇒ ALIMENTAR ENERGÍA          | L1 ⇒ COMPARAR POSICIÓN  |
| G ⇒ DISCO     | I ⇒ TRANSFORMAR EN E. MECÁNICA | L1 ⇒ COMPARAR c/s DISCO |
| D ⇒ GUIAR( r) | J1 ⇒ TRANSMITIR E.POTENCIAL    | L3 ⇒ COMPARAR I/O       |

En la figura 3.31, se muestra el diagrama de flujo general de la alternativa de solución seleccionada. Las funciones auxiliares de control *Comparar Posición* y *Comparar c/s disco*, se satisfacen por medio de software ya que, las funciones A, B, C y E/F utilizan en sus funciones auxiliares de energía motores de pasos lo cual, permite tener un control directo del desplazamiento obtenido por medio de software. La función de control *Comparar I/O* permite saber cuando el OT esta totalmente fuera o dentro de la casilla, para ello, se utilizan dos sensores de presencia colocados al inicio y final del recorrido de la articulación (función D). Para la función auxiliar H (*Alimentar Energía*) se utiliza un conmutador (ubicado en la base) para alimentar a la bobina permitiendo así que se pueda girar libremente. La alimentación para generar el vacío en el OT, se hace por medio de una manguera que va desde la base, pasando por el interior del tornillo, hasta salir de éste y conectarse al OT.

Cabe mencionar que, las evaluaciones anteriores, corresponden a una primera etapa de evaluación, pues en esta última, se busca obtener una propuesta para ser desarrollada y no, una solución final inmediata. Las alternativas fueron seleccionadas basándose en los conceptos que satisfacen a las funciones, esto es, en la alternativa de solución seleccionada (figura 3.30) se encuentran los conceptos colocados de una manera arbitraria; es en la siguiente etapa del proceso de diseño (figura 1) que, la colocación o configuración de los componentes será definida. Una vez desarrollada e implementada la propuesta de solución, se habrá de realizar una segunda evaluación (o las necesarias) en la cual, se verifique que aún se cumpla con las especificaciones, y se detecten defectos y mejoras para el diseño. Esto se basa en el hecho de que las etapas en un proceso de diseño son iterativas y no necesariamente definitivas (figura 1).

## **CAPÍTULO 4**

### **DISEÑO DE CONFIGURACIÓN**

En esta etapa del diseño, se busca consolidar o definir de una manera más concreta la forma, características y configuración de los componentes que integran la alternativa de solución generada. Para ello, es necesario identificar las funciones cuyos componentes determinan la forma y características del resto, identificar los parámetros que permitan seleccionar aquellos componentes considerados como comerciales (entiéndase por comerciales a aquellos que se seleccionen directamente de catálogos o bien, se manden manufacturar bajo especificaciones con algún fabricante) y, definir la forma y características de los que pudieran ser fabricados en las propias instalaciones (entiéndase por propias instalaciones, como un espacio con un conjunto de máquinas herramientas convencionales o de CNC). Lo anterior, debe hacerse tomando en cuenta conceptos que se consideran importantes dentro del diseño de configuración. Estos son: *claridad, simplicidad y unidad* [5].

#### **4.1 CONFIGURACIÓN**

En el capítulo anterior se generaron conceptos sin enfocarse estrictamente en sus dimensiones, pues el objetivo se concentra básicamente en generar alternativas de solución y no, en definir una propuesta final. Ahora bien, según se estableció en el capítulo 2, el requerimiento de *compactabilidad* se aplicaría para evaluar que las dimensiones generales de la alternativa seleccionada, fueran

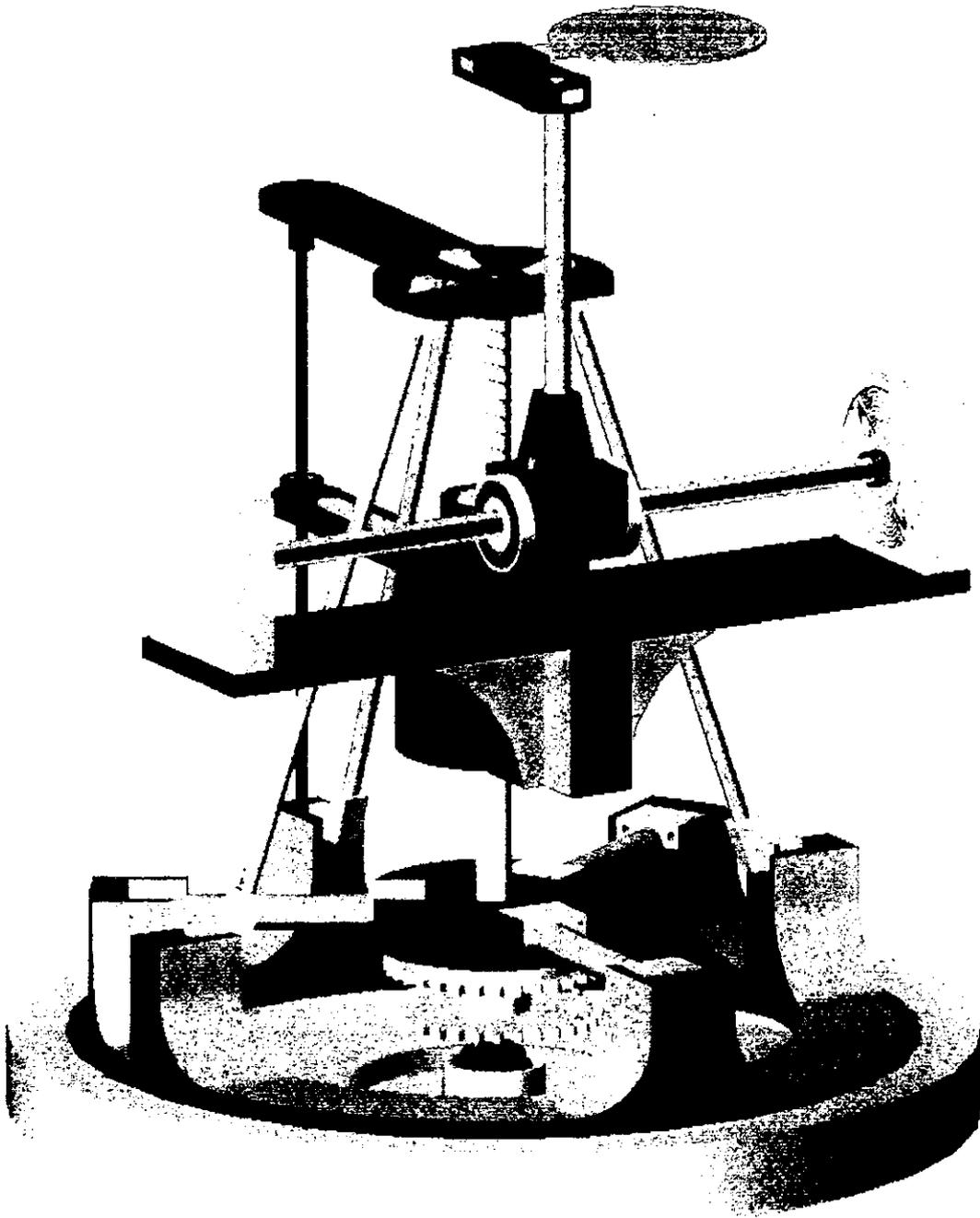
razonables en comparación con otros manipuladores similares y evitar así, generar una propuesta no viable en cuanto a tamaño.

Las funciones que determinan las dimensiones generales del manipulador son las funciones D y A. Basándose en las especificaciones (Secc. 2.2) y en una selección preliminar de las articulaciones requeridas para las funciones, en la tabla 4.1 se muestran las dimensiones generales que tendría la alternativa seleccionada así como, un *factor de compactabilidad* el cual, se obtiene en relación con el manipulador de menor volumen. Como se puede observar, el diámetro obtenido en la alternativa seleccionada (HRP), es considerablemente mayor en comparación con los otros manipuladores; esto en consecuencia genera un gran volumen ocupado.

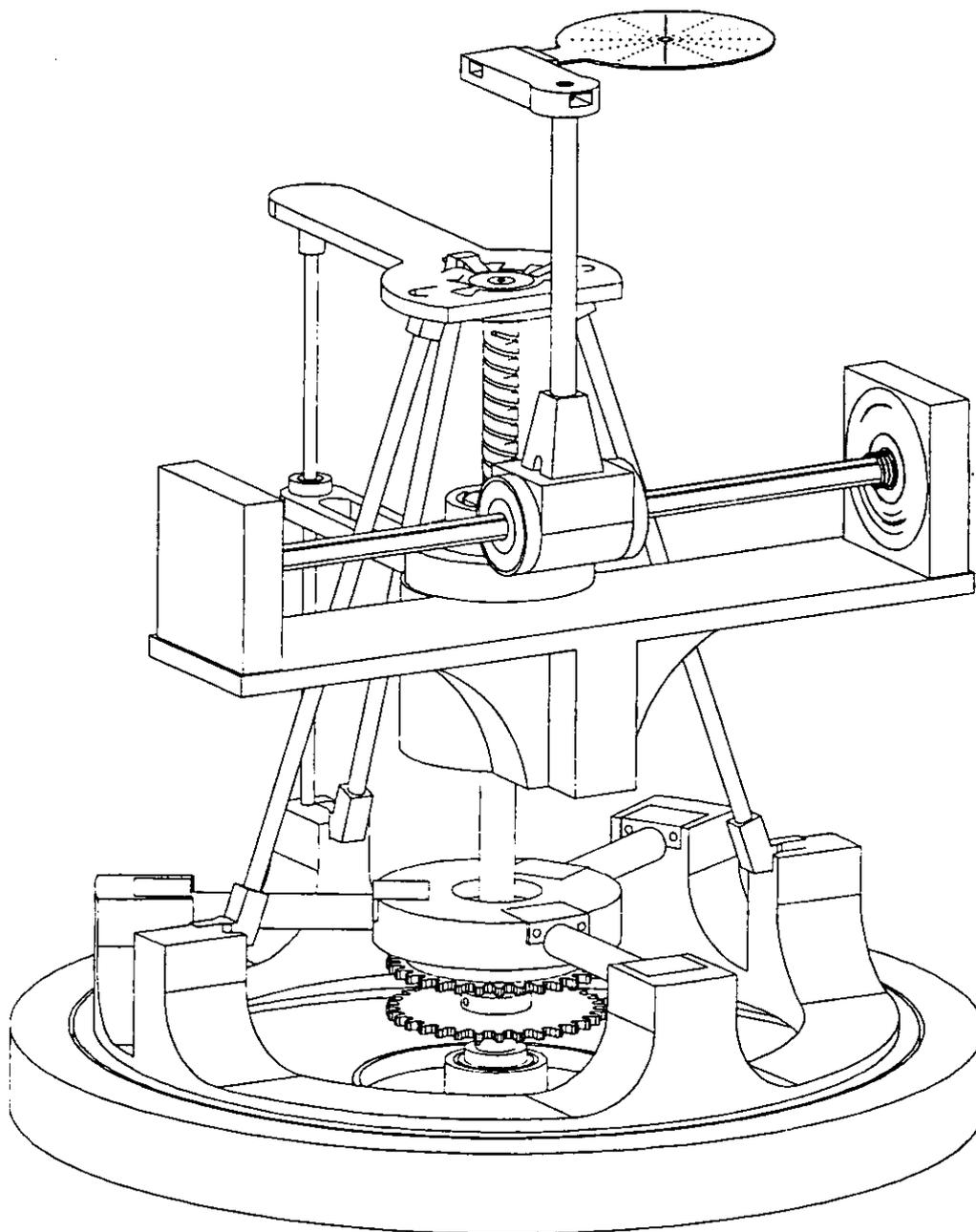
**Tabla 4.1 Factor de Compactabilidad**

<b>Manipulador</b>	<b>Ø [mm] x Altura [mm]</b>	<b>Volumen [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>F. C.</b>
Linear Arm	310 x 412	31.10964 E6	1.24
Frog Leg	(228 x 273) x 400	24.9848 E6	1
Jointed Arm	152 x 358	25.9848 E6	1.04
RZθ	316 x 458	35.9194 E6	1.44
HRP	539 x 327	74.6130 E6	2.99

La alternativa de solución obtenida cumple con los requerimientos de acuerdo a la evaluación hecha en el capítulo anterior, sin embargo, su configuración, es decir, la relación que guardan los componentes unos con otros, da como resultado un factor de compactabilidad muy grande, es por ello que se optó por generar otra configuración (figura 4.1). Cabe hacer notar que, los conceptos que satisfacen a las funciones siguen siendo los mismos tan sólo, se han configurado o acomodado de otra manera con el fin de obtener un factor de compactabilidad mas bajo.



**Fig. 4.1**  
Manipulador HRP. Propuesta de solución (reconfiguración de ASF).



**Fig. 4.1**  
Manipulador HRP. Propuesta de solución (reconfiguración de ASF).

Esta reconfiguración de la alternativa seleccionada, permite disminuir considerablemente el diámetro, el volumen, y el factor de compactabilidad (tabla 4.2). Además, permite manejar discos tanto de 50 y 100 milímetros de diámetro como de 200 [mm] en un menor volumen.

**Tabla 4.2 Factor de Compactabilidad (reconfiguración).**

<i>Manipulador</i>	<i>Ø [mm] x Altura [mm]</i>	<i>Volumen [mm<sup>3</sup>]</i>	<i>F. C.</i>
Linear Arm	310 x 412	31.10964 E6	1.24
Frog Leg	(228 x 273) x 400	24.9848 E6	1
Jointed Arm	152 x 358	25.9848 E6	1.04
RZθ	316 x 458	35.9194 E6	1.44
HRP	353 x 334	32.6877 E6	1.31

## 4.2 COMPONENTES

Con el objeto de ilustrar esta etapa del proceso de diseño, a continuación se presenta una lista (tabla 4.3) con los componentes que integran la propuesta de solución. En esta lista se indica el número de componente asignado (figura 4.2), su nombre, cantidad, una breve descripción, y una referencia al apéndice donde se muestra cada uno de ellos. Los planos mostrados en los apéndices, no son “planos de fabricación” como tal, sólo son dibujos ilustrativos para mostrar la forma, características y dimensiones generales de los componentes.

En el Apéndice B, se muestran algunos de los componentes comerciales. La información referente a éstos, no es definitiva, es decir, ni las características ni la marca del componente es necesariamente la indicada, pues sólo se busca proporcionar una idea de los parámetros de selección. Para una selección definitiva se requiere aún de un análisis dinámico del manipulador, lo cual, no se contempla en este trabajo. Sin embargo, tomando en cuenta que el proceso de

diseño es iterativo, los componentes seleccionados basándose en la descripción del resto de éstos, en los datos obtenidos en el capítulo 5 y, asumiendo que hasta el momento, la propuesta es funcional, dan una idea más amplia de la magnitud de los parámetros de selección para ellos. Una selección definitiva de componentes ya sean comerciales o no, se puede realizar una vez recabada más información acerca del comportamiento del manipulador, esto es, como ya se dijo, un modelo dinámico de éste además de pruebas en algunos conceptos (ej. Sistema de Sujeción) que permitan una mayor aproximación a la realidad.

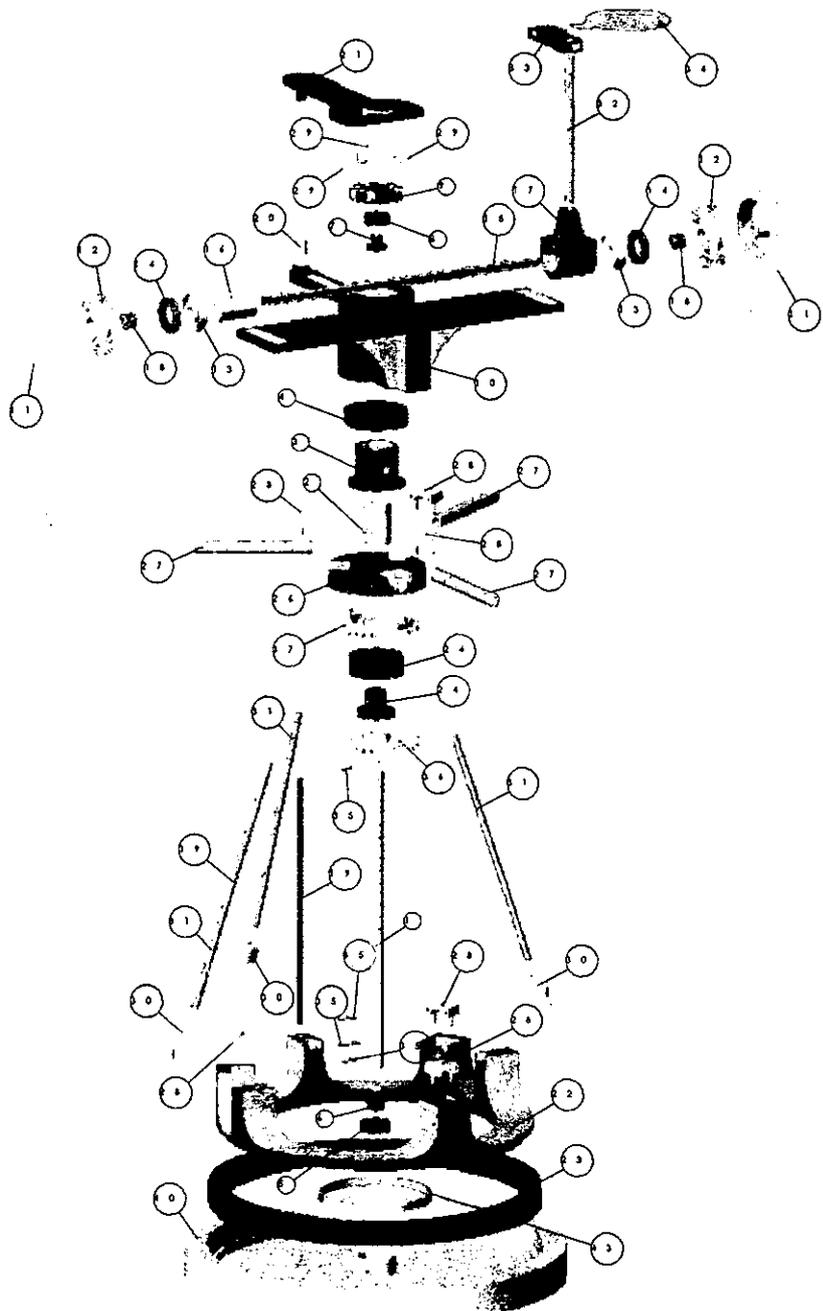
**Tabla 4.3 Lista de Componentes.**

<b>No.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ref.</b>
1	Tornillo.	1	Comercial	B-1
2	Tuerca.	1	Comercial	B-1
3	Base de tuerca.	1	Nylamid maquinado	A-1
4	Rodamiento 3.	1	Comercial, contacto angular	*
5	Rodamiento 1.	1	Comercial, axial de bolas	*
6	Cople de rodamiento 1.	1	Nylamid maquinado	A-2
7	Base de rodamiento 2.	1	Nylamid maquinado	A-3
8	Rodamiento 2.	1	Comercial, contacto angular	*
9	Cople rodamiento 2.	1	Nylamid maquinado	A-4
10	Base FD	1	Nylamid maquinado	A-5
11	Base de bobina.	2	Nylamid maquinado	A-6
12	Bobina.	2	C/M	B-4
13	Base de imán.	2	Nylamid maquinado	A-7
14	Imán.	2	Comercial	B-4
15	Eje articulación P1.	1	Comercial	B-2
16	Corredera P1.	1	Comercial	B-2
17	Base de corredera P1.	1	Nylamid maquinado	A-8
18	Resorte	2	C/M	A-5
19	Eje de articulación P2.	1	Comercial	B-3
20	Corredera P2.	1	Comercial	B-3
21	Soporte P2.	1	Nylamid maquinado	A-9

Tabla 4.3 *Continúa*:

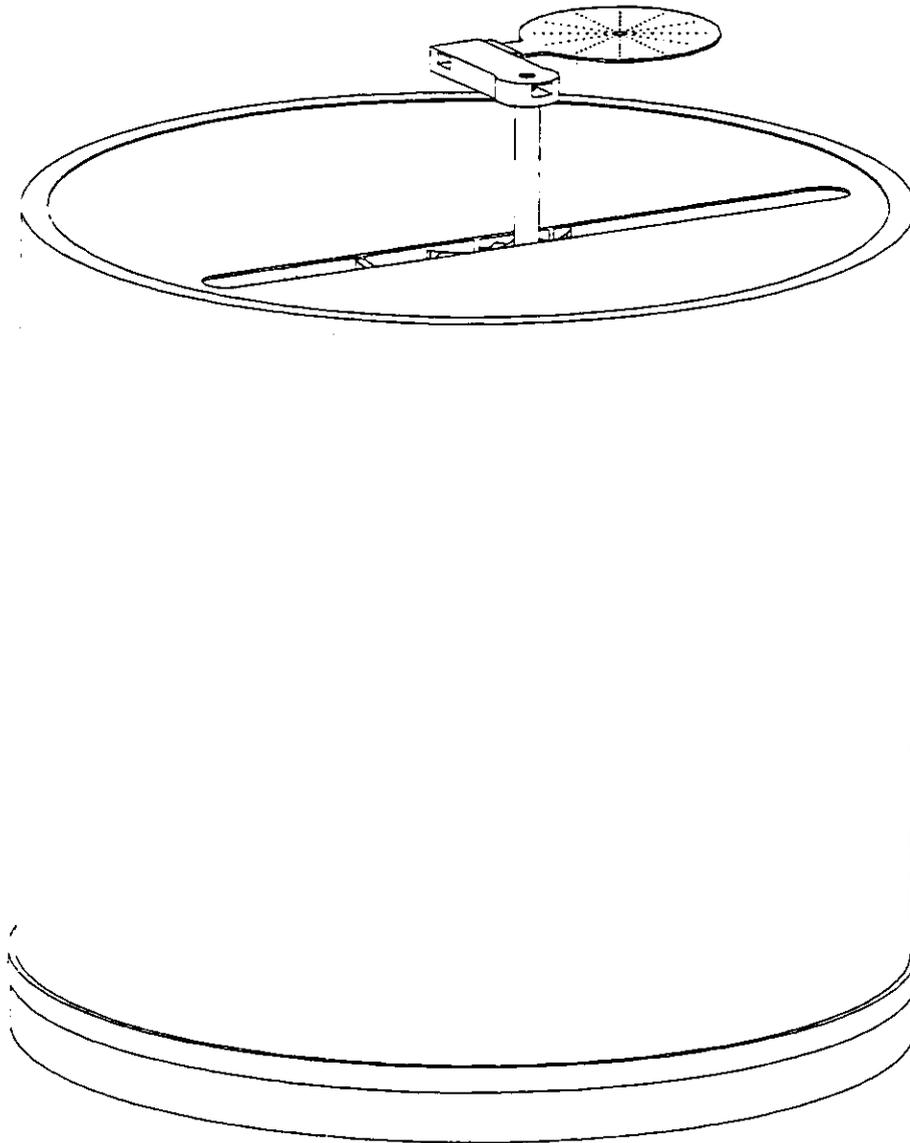
<b>No.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ref.</b>
22	Base de rodamiento 5.	1	Nylamid maquinado	A-10
23	Rodamiento 5.	1	Comercial, contacto angular	*
24	Base de rodamiento 4.	1	Nylamid maquinado	A-11
25	Rodamiento 4.	1	Comercial, contacto angular	*
26	Cople de rodamiento 4.	1	Nylamid maquinado	A-12
27	Rayos.	3	Nylamid maquinado	A-13
28	Cople de rayo.	6	Nylamid maquinado	A-14
29	Cople superior de columna.	3	Nylamid maquinado	A-15
30	Cople inferior de columna.	3	Nylamid maquinado	A-16
31	Columna.	3	Nylamid maquinado	A-17
32	Antebrazo.	1	Nylamid maquinado	A-18
33	Base de Organo Terminal.	1	Nylamid maquinado	*
34	Organo Terminal.	1	C/M	*
35	Pemos.	4	Acero CR	A-19
36	Transmisión de motor 1.	1	Nylamid maquinado	B-4
37	Transmisión de motor 2.	1	Nylamid maquinado	B-4
38	Motor 1.	1	Comercial	B-4
39	Motor 2.	1	Comercial	B-4
40	Plataforma.	1	Acero CR	A-20
41	Cubierta superior.	1	Lámina de plástico	A-21
42	Cubierta exterior.	1	Lámina de plástico	A-22
43	Conmutador.	1	C/M	*
44	Dispositivo de vacío.	1	C/M	*

Los componentes se han diseñado de manera que se puedan ensamblar a presión [22]; el material indicado en la columna de *descripción* (tabla 4.3), se ha propuesto con el fin de que los componentes sean ligeros, así como, factibles de manufacturar con máquinas herramientas convencionales o de CNC.



**Fig. 4.2**  
Propuesta de solución (conjunto explosivo).

En la figura 4.3, se muestra al manipulador con las cubiertas exterior y superior. Esta última está acoplada al soporte P2 en la parte superior de la articulación helicoidal de tal forma que, gira al par de la articulación rotacional. Esto permite que los mecanismos del manipulador siempre estén lo más aislado posible del espacio de operación.



**Fig. 4.3**  
Propuesta de solución con cubiertas.

## CAPÍTULO 5

### MODELACIÓN

En este capítulo, se busca modelar la operación del manipulador desde el punto de vista cinemático, esto es, encontrar un conjunto de ecuaciones para modelar la posición, velocidad y aceleración del Organo Terminal (OT) además de, caracterizar y determinar los tiempos de operación.

#### 5.1 CINEMÁTICA DIRECTA

Dados los valores de las variables articulares ( $d_1, \theta_2, d_3$ ), se requiere conocer la localización ( $x, y, z, p$ ) del OT respecto a un sistema de referencia  $O_{xyz}$  (base ortonormal). Colocando una base ortonormal en cada articulación como se muestra en la figura 5.1, y suponiendo que la base {OT} esta originalmente localizada en el origen de la base {O}, se aplican a ésta una serie de transformaciones para obtener su localización respecto a la base {O}. Estas transformaciones son las siguientes: 1) la base {OT} es rotada  $90^\circ$  alrededor del eje X; 2) el origen de la base {OT} es trasladado  $d_1$  en la dirección Z; 3) es trasladado  $l_2$  unidades en dirección X y  $d_3$  unidades en Y (dirección radial en el plano XY); 4) es trasladado  $l_4$  unidades en Z y  $l_2$  unidades en la dirección negativa del eje X; y finalmente 5) la base {OT} es rotada  $\theta_2^\circ$  alrededor de Z. Premultiplicando estas transformaciones de derecha a izquierda, como se indica en la ecuación (5.1), se obtiene una matriz de transformación de la base {OT} respecto a la base {O} . para localizar al OT en el sistema coordenado  $O_{xyz}$ .

$${}^0T_{OT} = \text{Tras}((X, -l_2), (Z, l_4)) \text{Rot}(Z, \theta_2) \text{Tras}((X, l_2), (Y, d_3)) \text{Tras}(Z, d_1 + b) \text{Rot}(X, -90) \quad (5.1)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b+l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1+b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1+b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & -1 & 0 & d_1+b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & -1 & 0 & d_1+b+l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 & -d_3s\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & d_3c\theta_2 \\ 0 & -1 & 1 & d_1+b+l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para localizar cualquier punto del Organo Terminal respecto a la base  $\{O\}$ , basta con multiplicar el vector de posición del punto en la base  $\{OT\}$ , por la matriz resultante de la ecuación (5.1), que representa una transformación lineal que va del espacio generado por la base  $\{OT\}$ , al espacio generado por la base  $\{O\}$ .

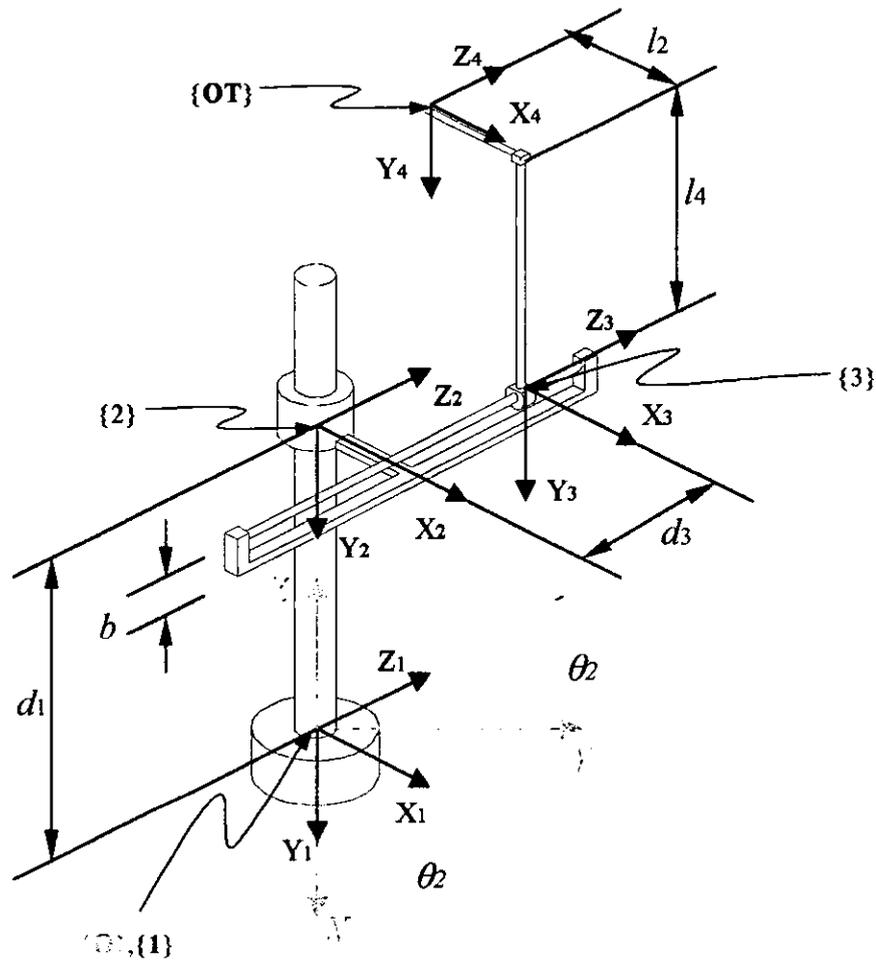


Fig. 5.1

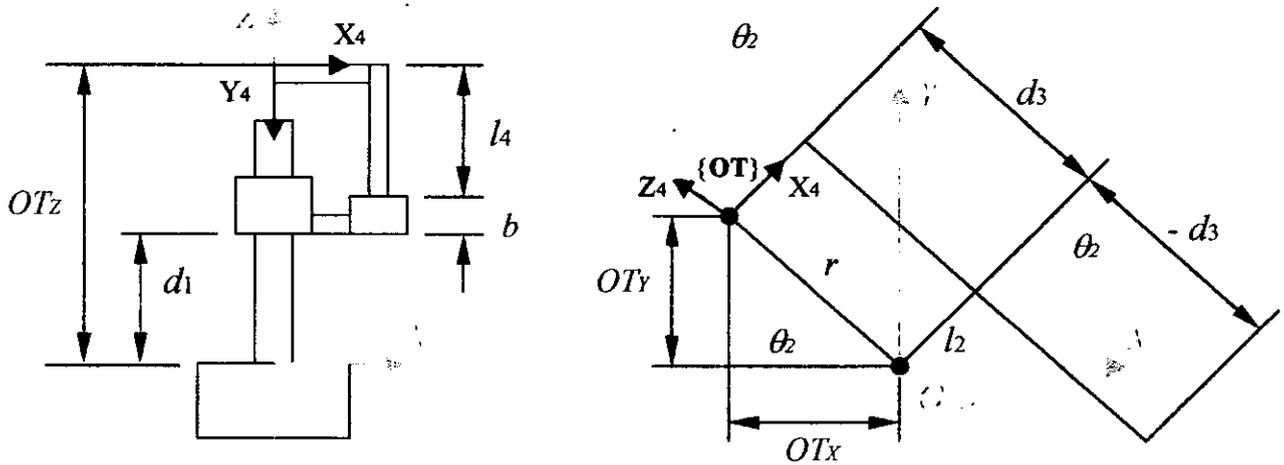


Fig. 5.2

Particionando la matriz de transformación se obtienen dos submatrices que más adelante serán de interés, éstas son: la matriz de rotación (ec. 5.3) y la matriz o vector de posición (ec. 5.4) de la base  $\{OT\}$ , ambas, respecto a la base  $\{O\}$ .

$$T_{OT}^O = \left[ \begin{array}{ccc|c} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 & -d_3s\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & d_3c\theta_2 \\ 0 & -1 & 0 & (d_1+b+l_4) \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (5.2)$$

$$R_{OT}^O = \left[ \begin{array}{ccc} c\theta_2 & & -s\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 + \beta \\ 0 & -1 & 0 \end{array} \right] \quad (5.3)$$

$${}^O P_{OT} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^O OT_X \\ {}^O OT_Y \\ {}^O OT_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_3s\theta_2 \\ d_3c\theta_2 \\ (d_1+b+l_4) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Si se derivan parcialmente los elementos de la ecuación (5.4) respecto a las variables articulares,  $\Theta = [d_1 \quad \theta_2 \quad d_3]^T$  y se ordenan en forma matricial, se obtiene una matriz llamada el *Jacobiano*, que representa una transformación lineal que va del espacio de velocidades articulares, al espacio de velocidades cartesianas del Organo Terminal. Entonces,

$${}^O J = \frac{\partial {}^O P_{OT}}{\partial \Theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial d_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial d_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial d_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial d_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial d_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_3}{\partial d_3} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$${}^O J = \begin{bmatrix} 0 & -d_3c\theta_2 & -s\theta_2 \\ 0 & -d_3s\theta_2 & c\theta_2 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$V_{OT} = {}^0J \dot{\Theta} \quad (5.7a)$$

$$\begin{bmatrix} V_{OTx} \\ V_{OTy} \\ V_{OTz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -d_3 c \theta_2 & -s \theta_2 \\ 0 & -d_3 s \theta_2 & c \theta_2 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} \quad (5.7b)$$

De la ecuación anterior, se definen las velocidades cartesianas del Organó Terminal como:

$$V_{OTx} = \dot{OT}_x = -\dot{\theta}_2 d_3 c \theta_2 - \dot{d}_3 s \theta_2 \quad (5.8)$$

$$V_{OTy} = \dot{OT}_y = -\dot{\theta}_2 d_3 s \theta_2 + \dot{d}_3 c \theta_2 \quad (5.9)$$

$$V_{OTz} = \dot{OT}_z = \dot{d}_1 \quad (4.10)$$

Derivando totalmente respecto al tiempo las ecuaciones anteriores, se definen las aceleraciones cartesianas del Organó Terminal como:

$$\ddot{OT}_x = s \theta_2 \left( \dot{\theta}_2^2 d_3 - \ddot{d}_3 \right) - c \theta_2 \left( \ddot{\theta}_2 d_3 + \dot{\theta}_2 \left( \ddot{d}_3 + \dot{d}_3 \right) \right) \quad (5.11)$$

$$\ddot{OT}_y = c \theta_2 \left( \ddot{d}_3 - \dot{\theta}_2^2 d_3 \right) - s \theta_2 \left( \ddot{\theta}_2 d_3 + \dot{\theta}_2 \left( \ddot{d}_3 + \dot{d}_3 \right) \right) \quad (5.12)$$

$$\ddot{OT}_z = \ddot{d}_1 \quad (5.13)$$

## 5.2 CINEMÁTICA INVERSA

Dada la posición  ${}^o P_{OT}$  del Organo Terminal, se requiere conocer el valor de las variables articulares ( $d_1, \theta_2, d_3$ ). Entonces, de la ecuación (5.4) y la figura 5.2:

$$OT_x = -d_3 \operatorname{sen} \theta_2 \quad (5.14)$$

$$OT_y = d_3 \cos \theta_2 \quad (5.15)$$

$$OT_z = d_1 + b + l_4 \quad (5.16)$$

luego,

$$d_1 = OT_z - b - l_4 \quad (5.17)$$

$$\theta_2 = \operatorname{angtan} \left( \frac{OT_x}{OT_y} \right) \quad (5.18)$$

$$r = d_3 = \left( OT_x^2 + OT_y^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.19)$$

Por lo tanto, las ecuaciones (5.17), (5.18) y (5.19) definen a las variables articulares ( $d_1, \theta_2, d_3$ ), respectivamente.

La variable articular  $d_1$ , es el desplazamiento o avance producto de la transformación de un movimiento R  $\rightarrow$  T en una articulación helicoidal. Una articulación de este tipo, consta de un cilindro roscado o tornillo, y de una tuerca o cuerpo que se desplaza a lo largo del tornillo. Entonces, por cada vuelta que da el tornillo, se obtiene un avance, esto es, el avance  $L$  es proporcional al número de vueltas o revoluciones dadas:

$$L \approx n \quad (5.20)$$

Introduciendo el paso  $p$  del tornillo en la expresión anterior, se tiene:

$$d_1 = L = pn \quad (5.21)$$

La ecuación (5.21) indica que por cada vuelta, se avanza una distancia igual al paso del tornillo. Substituyendo esta ecuación en la ecuación (5.16) se obtiene:

$$OT_z = pn + b + l_s \quad (5.22)$$

Si el tornillo es de una sola entrada, entonces el avance es igual al paso de éste, si es de dos entradas, el avance es el doble, si es de tres entradas, será el triple; esta relación se cumple sin importar el número de vueltas dadas, entonces si se define a  $e$ , como el número de entradas del tornillo, se tiene:

$$d_1 = L = nep \quad (5.23)$$

y substituyendo en la ecuación (5.22):

$$OT_z = nep + b + l_s \quad (5.24)$$

El número de vueltas  $n$  se puede interpretar como la posición angular de algún punto localizado en el tornillo, y puede ser entero o una fracción de vuelta, entonces:

$$n = \frac{\theta_1}{360} = \frac{\theta_1}{2\pi} \quad (5.25)$$

donde  $\theta_1$  es el desplazamiento angular del tornillo. Substituyendo ésta última ecuación en (5.23) y (5.24) se tiene:

$$d_1 = \frac{\theta_1}{2\pi} ep \quad (5.26)$$

$$OT_z = \frac{\theta_1}{2\pi} ep + b + l_s \quad (5.27)$$

Las ecuaciones anteriores permiten expresar a la variable articular  $d_1$ , y en consecuencia a  $OT_z$ , en función de la variable  $\theta_1$ . Luego  $\theta_1$  es igual a:

$$\theta_1 = (OT_z - b - l_4) \frac{2\pi}{ep} \quad (5.28)$$

Ahora bien, ya que se utiliza un motor de pasos en las articulaciones helicoidal y rotacional (conceptos A1, BC1), el desplazamiento angular en éstas es proporcional al número de pulsos o pasos dados por el motor. Entonces, sean  $S_u$  y  $S_\theta$  los pulsos por vuelta del motor y los pulsos necesarios para un desplazamiento angular  $\theta$ , respectivamente, luego,

$$S_\theta = nS_u = \frac{\theta}{2\pi} S_u \quad (5.29)$$

por lo tanto, los pulsos requeridos por los motores para obtener el desplazamiento  $d_1$  y el desplazamiento angular  $\theta_2$ , respectivamente, son:

$$S_{d_1} = \frac{d_1}{L} S_{u_1} = \frac{d_1}{nep} S_{u_1} \quad (5.30a)$$

$$S_{\theta_1} = n_1 S_{u_1} = \frac{\theta_1}{2\pi} S_{u_1} \quad (5.30b)$$

$$S_{\theta_2} = n_2 S_{u_2} = \frac{\theta_2}{2\pi} S_{u_2} \quad (5.31)$$

La variable articular  $d_3$  es el desplazamiento producto de la aplicación de una fuerza magnética  $F_m$  para vencer la fuerza de fricción que se opone al movimiento de la corredera en la articulación, entonces:

$$F_m = F_f = \mu_k N = \mu_k W_D \quad (5.32)$$

donde  $W_D$  es el peso de la corredera y de lo que ésta mueva. Luego, esta fuerza magnética es el resultado de la atracción o repulsión entre una bobina (en ella se induce, por la circulación de una corriente eléctrica, un campo magnético  $B$ ) y un imán colocado frente a ésta (concepto D4). Entonces, la fuerza  $F_m$  es proporcional al campo magnético inducido en la bobina, esto es:

$$F_m \propto B \quad (5.33)$$

Introduciendo en la expresión anterior, una constante de fuerza magnética  $K_m$  (evaluada experimentalmente), la fuerza magnética se define como:

$$F_m = K_m B \quad (5.34)$$

El campo magnético, localizado en algún punto sobre el eje de una bobina (figura 5.3), inducido por la circulación de una corriente  $i$  en ésta y cuya longitud es  $l$ , radio medio  $r_m$  y de  $N$  número de vueltas, se puede expresar de la siguiente forma:

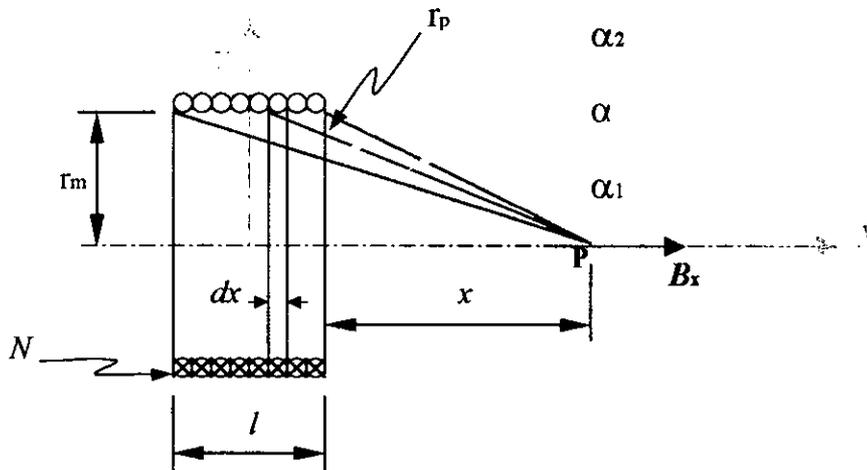


Fig. 5.3

$$B_x = \frac{\mu_0 i_b N}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (5.35)$$

Substituyendo la ecuación (5.35) en (5.34), la fuerza magnética se escribe como:

$$F_m = K_m \frac{\mu_0 i_b N}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (5.36)$$

Expresando a la corriente de la bobina en función del voltaje de alimentación y de la resistencia del embobinado (ec. (5.37)), y a esta última según la ec. (5.38), la ecuación (5.36) se reescribe como sigue:

$$i_b = \frac{V_b}{R_b} \quad (5.37)$$

$$R_b = \rho \frac{L_{cond}}{A_{cond}} \quad (5.38)$$

$$F_m = K_m \frac{\mu_0 A_{cond} N}{2\rho L_{cond}} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \cdot V_b \quad (5.39)$$

Ahora bien, según se mencionó previamente, el desplazamiento  $d_3$  es provocado por la fuerza  $F_m$ , por lo tanto, esta fuerza se puede definir como:

$$F_m = m_D \ddot{d}_3 \quad (5.40)$$

Igualando las ecuaciones (5.39) y (5.40), se obtiene una ecuación diferencial de segundo orden con coeficientes constantes:

$$\ddot{d}_3(t) = \frac{K_m K_b}{m_D} \cdot V(t) \quad (5.41)$$

donde,

$$K_b = \frac{\mu_0 A_{cond} N}{2\rho L_{cond}} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (5.42)$$

La solución de la ecuación diferencial planteada, permitirá expresar a la variable articular  $d_3$  en función de las constantes  $K_m$ ,  $K_b$ , de la masa correspondiente a  $W_D$  y del voltaje de alimentación en la bobina, que representa la función de excitación. Dicha solución se obtendrá más adelante.

### 5.3 VELOCIDAD DE VARIABLES ARTICULARES

La transformación lineal definida por la ecuación (5.7), induce la existencia de una matriz de transformación inversa que permite obtener las velocidades articulares,  $\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 & \dot{\theta}_2 & \dot{d}_3 \end{bmatrix}^T$ . Entonces, obteniendo la inversa de la matriz de transformación (Jacobiano), de la ecuación (5.6):

$${}^o J^{-1} = \frac{Adj {}^o J}{\det {}^o J} = \frac{\begin{bmatrix} 0 & 0 & -d_3 \\ c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 \\ -d_3 s\theta_2 & d_3 c\theta_2 & 0 \end{bmatrix}}{-d_3} \quad (5.43)$$

$${}^o J^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\frac{c\theta_2}{d_3} & -\frac{s\theta_2}{d_3} & 0 \\ s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

$$\dot{\Theta} = {}^o J^{-1} \dot{V}_{OT} \quad (5.45)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\frac{c\theta_2}{d_3} & -\frac{s\theta_2}{d_3} & 0 \\ s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{OTx} \\ \dot{V}_{OTy} \\ \dot{V}_{OTz} \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

De la ecuación (5.46) se definen las velocidades articulares como:

- Velocidad de la primera variable articular ( $d_1$ ):

$$\dot{d}_1 = \dot{OT}_z \quad (5.47)$$

y derivando la ecuación (5.28),

$$\dot{\theta}_1 = \dot{OT}_z \frac{2\pi}{ep} \quad (5.48)$$

- Velocidad de la segunda variable articular ( $\theta_2$ ):

$$\dot{\theta}_2 = - \left( \frac{\dot{OT}_x c\theta_2 + \dot{OT}_y s\theta_2}{d_3} \right) \quad (5.49a)$$

multiplicando y dividiendo por  $d_3$ ,

$$\dot{\theta}_2 = - \left( \frac{\dot{OT}_x OT_y + \dot{OT}_y OT_x}{OT_x^2 + OT_y^2} \right) \quad (5.49b)$$

- Velocidad de la segunda variable articular ( $d_3$ ):

$$\dot{d}_3 = \dot{OT}_x s\theta_2 - \dot{OT}_y c\theta_2 \quad (5.50a)$$

multiplicando y dividiendo por  $d_3$ ,

$$\dot{d}_3 = \frac{\dot{OT}_x OT_x - \dot{OT}_y OT_y}{(OT_x^2 + OT_y^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.50b)$$

### 5.4 ACELERACIÓN DE VARIABLES ARTICULARES

Derivando las ecuaciones (5.47), (5.49) y (5.50), se obtienen las aceleraciones articulares,  $\ddot{\Theta} = \begin{bmatrix} \ddot{d}_1 & \ddot{\theta}_2 & \ddot{d}_3 \end{bmatrix}^T$ .

- Aceleración de la primera variable articular ( $d_1$ ):

$$\ddot{d}_1 = \ddot{OT}_z \quad (5.51)$$

y derivando la ecuación (5.48),

$$\ddot{\theta}_1 = \ddot{OT}_z \frac{2\pi}{ep} \quad (5.52)$$

- Aceleración de la segunda variable articular ( $\theta_2$ ):

$$\ddot{\theta}_2 = \left[ \frac{\dot{\theta}_2 \left( \dot{OT}_Y d_3 c\theta_2 - \dot{OT}_X d_3 s\theta_2 \right) + \ddot{OT}_X d_3 c\theta_2 + \ddot{OT}_Y d_3 s\theta_2 + \dot{d}_3 \left( \dot{OT}_X c\theta_2 + \dot{OT}_Y s\theta_2 \right)}{d_3^2} \right] \quad (5.53a)$$

multiplicando y dividiendo por  $d_3$ ,

$$\ddot{\theta}_2 = \left[ \frac{\dot{\theta}_2 \left( \dot{OT}_Y OT_Y - \dot{OT}_X OT_X \right) + \ddot{OT}_X OT_Y + \ddot{OT}_Y OT_X}{OT_X^2 + OT_Y^2} + \frac{\dot{d}_3 \left( \dot{OT}_X OT_Y + \dot{OT}_Y OT_X \right)}{\left( OT_X^2 + OT_Y^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (5.53b)$$

- Aceleración de la tercera variable articular ( $d_3$ ):

$$\ddot{d}_3 = \dot{\theta}_2 \left( \dot{O}T_x c\theta_2 + \dot{O}T_y s\theta_2 \right) + \ddot{O}T_x s\theta_2 - \ddot{O}T_y c\theta_2 \quad (5.54a)$$

multiplicando y dividiendo por  $d_3$ ,

$$\ddot{d}_3 = \frac{\dot{\theta}_2 \left( \dot{O}T_x O T_y + \dot{O}T_y O T_x \right) + \ddot{O}T_x O T_x - \ddot{O}T_y O T_y}{\left( O T_x^2 + O T_y^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.54b)$$

## 5.5 PERFIL DE TRAYECTORIA

La velocidad con la que el OT va de una posición a otra, deberá alcanzar su máximo valor a la mitad del recorrido. Trazando las gráficas correspondientes a la posición, velocidad y aceleración del OT, desde un tiempo  $t_0$  hasta un tiempo final  $t_f$ , para un recorrido  $P_f$ , se obtiene el perfil mostrado en la figura 5.4a. Cuando se va realizar un recorrido, se debe procurar que tanto al inicio como al final de éste, no existan impulsos ni frenados súbitos, ya que, son perjudiciales para los actuadores. Para evitarlo, se busca suavizar el perfil de la trayectoria por medio de una representación polinomial del recorrido.

$$P(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i \quad (5.55)$$

Un perfil polinomial permite que la velocidad y aceleración se incrementen gradualmente (figura 5.4b), la curvatura o suavidad del perfil depende del grado del polinomio, mientras mayor sea éste, mayor será la suavidad del perfil. El grado del polinomio dependerá del número de condiciones iniciales que se utilicen (ej. si se utilizan 6 condiciones iniciales, se obtiene un polinomio de 5° grado).

Para el siguiente desarrollo se utilizará un polinomio de 8° grado el cual, tiene características de gran utilidad, como es el índice de control, que permite variar el perfil según convenga, además, el perfil utiliza 9 condiciones iniciales de las cuales, la velocidad del OT es de gran interés. El desarrollo del perfil octal, esta más allá del alcance de esta tesis por lo cual, sólo se aplicará el polinomio, sin justificar su obtención [21].

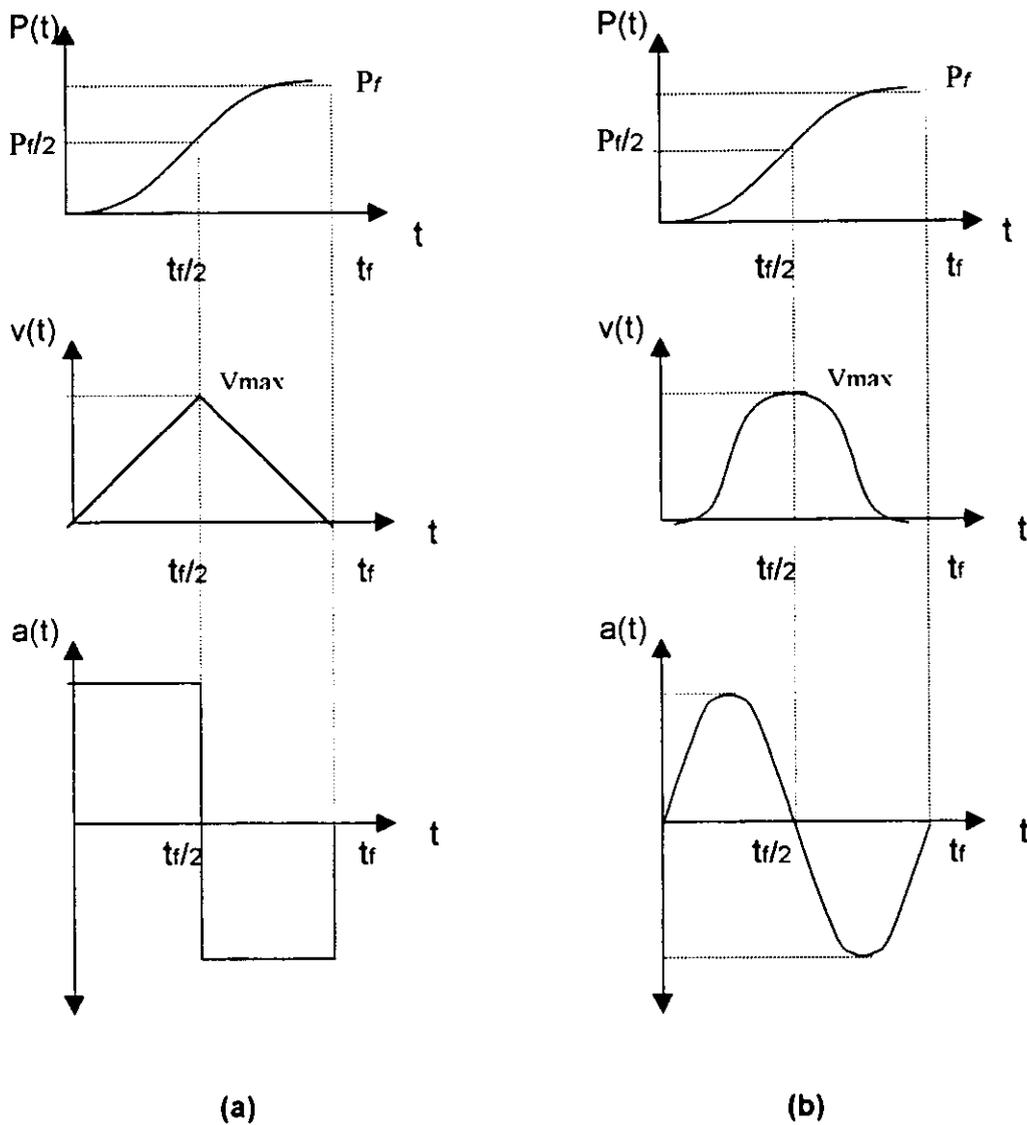


Fig. 5.4

De acuerdo a la figura 5.4b, se tienen las siguientes condiciones iniciales, con las cuales, se obtiene el polinomio mostrado en la ecuación (5.56):

**Tabla 5.1 Condiciones Iniciales.**

	$t=0$	$t=t_f/2$	$t=t_f$
$P(t)$	$P(t) = 0$	$P_m = \frac{P_f}{2}$	$P(t) = P_f$
$v(t)$	$v(t) = 0$	$v(t) = v_{max}$	$v(t) = 0$
$a(t)$	$a(t) = 0$	$a(t) = 0$	$a(t) = 0$

$$\begin{aligned}
 P(t) = P_f \left\{ \left( \frac{70}{t_f^3} \right) t^3 + \left( \frac{-315}{t_f^4} \right) t^4 + \left( \frac{546}{t_f^5} \right) t^5 + \left( \frac{-420}{t_f^6} \right) t^6 + \left( \frac{120}{t_f^7} \right) t^7 \right\} + \\
 + v_{max} \left\{ \left( \frac{-32}{t_f^2} \right) t^2 + \left( \frac{160}{t_f^3} \right) t^3 + \left( \frac{-288}{t_f^4} \right) t^4 + \left( \frac{224}{t_f^5} \right) t^5 + \left( \frac{-64}{t_f^6} \right) t^6 \right\}
 \end{aligned} \tag{5.56}$$

$$v_{max} = m \frac{P_f}{t_f} \quad \forall \quad 1.458 \leq m \leq 2.1875 \tag{5.57}$$

donde  $m$ , es el índice de control. Derivando dos veces el polinomio anterior:

$$\begin{aligned}
 v(t) = \dot{P}(t) = P_f \left\{ \left( \frac{210}{t_f^3} \right) t^2 + \left( \frac{-1260}{t_f^4} \right) t^3 + \left( \frac{2730}{t_f^5} \right) t^4 + \left( \frac{-2520}{t_f^6} \right) t^5 + \left( \frac{840}{t_f^7} \right) t^6 \right\} + \\
 + v_{max} \left\{ \left( \frac{-96}{t_f^2} \right) t^2 + \left( \frac{640}{t_f^3} \right) t^3 + \left( \frac{-1140}{t_f^4} \right) t^4 + \left( \frac{1344}{t_f^5} \right) t^5 + \left( \frac{-448}{t_f^6} \right) t^6 \right\}
 \end{aligned} \tag{5.58}$$

$$\begin{aligned}
 a(t) = \ddot{P}(t) = P_f \left\{ \left( \frac{420}{t_f^3} \right) t + \left( \frac{-3780}{t_f^4} \right) t^2 + \left( \frac{10920}{t_f^5} \right) t^3 + \left( \frac{-12600}{t_f^6} \right) t^4 + \left( \frac{5040}{t_f^7} \right) t^5 \right\} + \\
 + v_{max} \left\{ \left( \frac{-192}{t_f^2} \right) t + \left( \frac{1920}{t_f^3} \right) t^2 + \left( \frac{-5760}{t_f^4} \right) t^3 + \left( \frac{6720}{t_f^5} \right) t^4 + \left( \frac{-2688}{t_f^6} \right) t^5 \right\}
 \end{aligned} \tag{5.59}$$

Hasta ahora, la ecuación (5.56) y sus derivadas, representan el perfil que seguiría el OT durante su evolución en el tiempo mas no, el lugar geométrico de la trayectoria. Este último, es el recorrido que sigue la base {OT}, es decir, el lugar geométrico de la trayectoria esta representado por la matriz de transformación:

$${}^oT_{OT} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & (l_2 + d_3)c\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & (l_2 + d_3)s\theta_2 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & (d_1 + b + l_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^o x_{OT} & {}^o y_{OT} & {}^o z_{OT} & {}^o p_{OT} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.60}$$

Entonces, con las ecuaciones (5.60), (5.56), (5.58) y (5.59), se tiene caracterizado todo el perfil de la trayectoria. Luego, representando la operación del manipulador, con el perfil de trayectoria generado, se tiene a la ecuación (5.61) y por ende a las variables articulares y a la posición del OT, en función del tiempo:

$${}^oT_{OT} = \begin{bmatrix} c\theta_2(t) & -s\theta_2(t) & 0 & (l_2 + d_3(t))c\theta_2(t) \\ 0 & 0 & 1 & (l_2 + d_3(t))s\theta_2(t) \\ -s\theta_2(t) & -c\theta_2(t) & 0 & (d_1(t) + b + l_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^o x_{OT} & {}^o y_{OT} & {}^o z_{OT} & {}^o p_{OT} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.61}$$

### 5.5.1 PERFIL DE POSICIÓN

Para obtener a las variables ( $d_1$ ,  $\theta_2$ ,  $d_3$ ) en función del tiempo, de acuerdo a las ecuaciones (5.17), (5.18) y (5.19), es necesario que  $OT_x$ ,  $OT_y$  y  $OT_z$ , se representen con el perfil de la ecuación (5.56), entonces:

$$OT_x(t) = OT_y(t) = d_{3f} \left\{ \left( \frac{70}{t_f^3} \right) t^3 + \left( \frac{-315}{t_f^4} \right) t^4 + \left( \frac{546}{t_f^5} \right) t^5 + \left( \frac{-420}{t_f^6} \right) t^6 + \left( \frac{120}{t_f^7} \right) t^7 \right\} +$$

$$+ v_{max} \left\{ \left( \frac{-32}{t_f^2} \right) t^3 + \left( \frac{160}{t_f^3} \right) t^4 + \left( \frac{-288}{t_f^4} \right) t^5 + \left( \frac{224}{t_f^5} \right) t^6 + \left( \frac{-64}{t_f^6} \right) t^7 \right\}$$
(5.62)

$$OT_z(t) = d_{1f} \left\{ \left( \frac{70}{t_f^3} \right) t^3 + \left( \frac{-315}{t_f^4} \right) t^4 + \left( \frac{546}{t_f^5} \right) t^5 + \left( \frac{-420}{t_f^6} \right) t^6 + \left( \frac{120}{t_f^7} \right) t^7 \right\} +$$

$$+ v_{max} \left\{ \left( \frac{-32}{t_f^2} \right) t^3 + \left( \frac{160}{t_f^3} \right) t^4 + \left( \frac{-288}{t_f^4} \right) t^5 + \left( \frac{224}{t_f^5} \right) t^6 + \left( \frac{-64}{t_f^6} \right) t^7 \right\}$$
(5.63)

luego entonces,

$$d_1(t) = OT_z(t) - b - l_4$$
(5.64)

$$\theta_1(t) = (OT_z(t) - b - l_4) \frac{2\pi}{ep}$$
(5.65)

$$\theta_2(t) = \text{angtan} \left( \frac{OT_y(t)}{OT_x(t)} \right)$$
(5.66)

$$d_3(t) = (OT_x(t)^2 + OT_y(t)^2)^{\frac{1}{2}}$$
(5.67a)

Resolviendo la ecuación diferencial (5.41) con el voltaje de excitación expresado según el perfil de la ecuación (5.56), se obtiene la siguiente solución para  $d_3$ :

$$d_3(t) = \frac{K_m K_b}{m_D} \left[ \begin{aligned} & V_{b_j} \left\{ \left( \frac{35}{t_j^3} \right) t^5 - \left( \frac{10.5}{t_j^4} \right) t^6 + \left( \frac{13}{t_j^5} \right) t^7 - \left( \frac{7.5}{t_j^6} \right) t^8 + \left( \frac{1.66}{t_j^7} \right) t^9 \right\} + \\ & + V_{b_{mn}} \left\{ \left( \frac{-1.6}{t_j^2} \right) t^5 + \left( \frac{5.3}{t_j^3} \right) t^6 - \left( \frac{6.85}{t_j^4} \right) t^7 + \left( \frac{4}{t_j^5} \right) t^8 - \left( \frac{0.88}{t_j^6} \right) t^9 \right\} \end{aligned} \right] \quad (5.67b)$$

### 5.5.2 PERFILES DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN

Procediendo de manera similar a la sección anterior, para expresar a las velocidades articulares (ecuaciones (5.47), (5.48), (5.49) y (5.50)) en función del tiempo, se requiere que tanto  $OT_x$ ,  $OT_y$  y  $OT_z$  como sus respectivas velocidades, se representen con el perfil de la ecuación (5.58). Conforme a esto se tiene que:

$$\dot{d}_1(t) = \dot{OT}_z(t) \quad (5.68)$$

$$\dot{\theta}_1(t) = \dot{OT}_z(t) \frac{2\pi}{ep} \quad (5.69)$$

$$\dot{\theta}_2(t) = - \left( \frac{\dot{OT}_x(t) c\theta_2(t) + \dot{OT}_y(t) s\theta_2(t)}{d_3(t)} \right) \quad (5.70a)$$

$$\dot{\theta}_2(t) = - \left( \frac{\dot{OT}_x(t) OT_y(t) + \dot{OT}_y(t) OT_x(t)}{OT_x(t)^2 + OT_y(t)^2} \right) \quad (5.70b)$$

$$\dot{d}_3(t) = \dot{OT}_x(t) s\theta_2(t) - \dot{OT}_y(t) c\theta_2(t) \quad (5.71a)$$

$$\dot{d}_3(t) = \frac{\dot{OT}_x(t) OT_x(t) - \dot{OT}_y(t) OT_y(t)}{(OT_x(t)^2 + OT_y(t)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.71b)$$

Derivando la ecuación (5.67b):

$$\dot{d}_3(t) = \frac{K_m K_b}{m_D} \left[ \begin{aligned} & V_{b_f} \left\{ \left( \frac{17.5}{t_f^3} \right) t^4 - \left( \frac{63}{t_f^4} \right) t^5 + \left( \frac{91}{t_f^5} \right) t^6 - \left( \frac{60}{t_f^6} \right) t^7 + \left( \frac{14.94}{t_f^7} \right) t^8 \right\} + \\ & + V_{b_m} \left\{ \left( \frac{-8}{t_f^2} \right) t^4 + \left( \frac{31.8}{t_f^3} \right) t^5 - \left( \frac{47.95}{t_f^4} \right) t^6 + \left( \frac{32}{t_f^5} \right) t^7 - \left( \frac{7.92}{t_f^6} \right) t^8 \right\} \end{aligned} \right] \quad (5.71c)$$

Las aceleraciones articulares (ecuaciones (5.51), (5.52), (5.53) y (5.54)) se expresan en función del tiempo a través del perfil de aceleración en la ecuación (5.59). Entonces:

$$\ddot{d}_1(t) = \ddot{O}T_2(t) \quad (5.72)$$

$$\ddot{\theta}_1(t) = \ddot{O}T_2(t) \frac{2\pi}{ep} \quad (5.73)$$

$$\ddot{\theta}_2(t) = \left[ \frac{\dot{\theta}_2(t) \left( \dot{O}T_x(t) d_3(t) c\theta_2(t) - \dot{O}T_x(t) d_3(t) s\theta_2(t) \right) + \ddot{O}T_x(t) d_3(t) c\theta_2(t) + \ddot{O}T_y(t) d_3(t) s\theta_2(t) + \dot{d}_3(t) \left( \dot{O}T_x(t) c\theta_2(t) + \dot{O}T_y(t) s\theta_2(t) \right)}{d_3(t)^2} \right] \quad (5.74a)$$

$$\ddot{\theta}_2(t) = \left[ \frac{\dot{\theta}_2(t) \left( \dot{O}T_x(t) O T_y(t) - \dot{O}T_x(t) O T_x(t) \right) + \ddot{O}T_x(t) O T_y(t) + \ddot{O}T_y(t) O T_x(t)}{O T_x(t)^2 + O T_y(t)^2} + \frac{\dot{d}_3(t) \left( \dot{O}T_x(t) O T_y(t) + \dot{O}T_y(t) O T_x(t) \right)}{\left( O T_x(t)^2 + O T_y(t)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (5.74b)$$

$$\ddot{d}_3(t) = \dot{\theta}_2(t) \left( O T_x(t) c\theta_2(t) + O T_y(t) s\theta_2(t) \right) + \ddot{O}T_x(t) s\theta_2(t) - \ddot{O}T_y(t) c\theta_2(t) \quad (5.75a)$$

$$\ddot{d}_3(t) = \frac{\dot{\theta}_2(t) \left( \dot{O}T_x(t) O T_y(t) + \dot{O}T_y(t) O T_x(t) \right) + \ddot{O}T_x(t) O T_x(t) - \ddot{O}T_y(t) O T_y(t)}{\left( O T_x(t)^2 + O T_y(t)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.75b)$$

$$\ddot{d}_3(t) = \frac{K_m K_b}{m_D} \left[ V_{bf} \left\{ \left( \frac{70}{t_f^3} \right) t^3 + \left( \frac{-315}{t_f^4} \right) t^4 + \left( \frac{546}{t_f^5} \right) t^5 + \left( \frac{-420}{t_f^6} \right) t^6 + \left( \frac{120}{t_f^7} \right) t^7 \right\} + \right. \\ \left. + V_{bmax} \left\{ \left( \frac{-32}{t_f^2} \right) t^3 + \left( \frac{160}{t_f^3} \right) t^4 + \left( \frac{-288}{t_f^4} \right) t^5 + \left( \frac{224}{t_f^5} \right) t^6 + \left( \frac{-64}{t_f^6} \right) t^7 \right\} \right] \quad (5.75c)$$

## 5.6 CARACTERIZACIÓN

Los movimientos del OT se pueden considerar como movimientos discretos, esto es, éstos corresponden a desplazamientos fijos definidos por la posición de las casillas, es decir, su altura y orientación. En esta sección se caracterizarán (tablas 5.2 y 5.3) los movimientos del OT para los sistemas SP y SS y así, establecer el rango de movimiento de cada uno de ellos. Los valores en estas tablas, se obtienen a partir de las ecuaciones (5.30) y (5.31), respectivamente.

### ➤ Sistema de Posicionamiento (SP).

1. El OT realiza un movimiento (función A) en el eje Z, que va desde cero hasta, la altura ( $h_e$ ) en la que el OT entra en la casilla, y éste se define, ya sea la casilla inicial o final, como:

$$h_{ei} = h_i - 1 [u] \quad (5.76)$$

$$h_{ef} = h_i + 1 [u] \quad (5.77)$$

2. El OT realiza un movimiento angular (funciones B y C) en el plano XY, que va desde cero hasta, la posición angular ( $\theta$ ) del contenedor en el que se encuentra la casilla (inicial o final).

➤ Sistema de Sujeción (SS).

1. El OT realiza un movimiento en dirección radial (función D) para entrar en la casilla, que va desde cero hasta, la distancia total ( $d_{3f}$ ) que recorre la articulación, la cual, será igual al diámetro del disco que se esté manipulando.

$$d_{3f} = \phi_{Disco} [u] \quad (5.78)$$

2. El OT realiza un movimiento en dirección del eje Z (función A), que va desde la altura de entrada ( $h_e$ ) de la casilla hasta, la altura de salida ( $h_d$ ). La diferencia entre  $h_e$  y  $h_d$  es constante, y es la distancia que recorre el OT para tomar (función E) o colocar (función F) el disco.

$$h_{cd} = h_{e1} + a_0 [u] \quad (\text{función E}) \quad (5.79)$$

$$h_{sd} = h_{e1} - a_0 [u] \quad (\text{función F}) \quad (5.80)$$

$$a_0 = 1.5 [u] \quad (5.81)$$

3. El OT realiza un movimiento en dirección radial (función D) para salir de la casilla, que va desde la distancia total ( $d_{3f}$ ), hasta cero.

El lugar geométrico descrito por la ecuación (5.60), es una espiral de radio y altura variable para el caso general de una configuración simultanea. Ahora bien, como se indicó anteriormente, la estructura de la alternativa ASF es del tipo **EFu1zz** (Secc. 3.6.1) la cual, se puede generalizar a una estructura secuencial (tabla 5.4) de los sistemas de Posicionamiento y de Sujeción, esto es, el primero de éstos, generará una espiral de radio constante y altura variable, y el segundo, una recta en el plano XY y una recta en el eje Z. Así, la operación del manipulador, se reduce a operar los sistemas SP y SS con el perfil de trayectoria generado, bajo la trayectoria especificada (Secc. 2.2).

Tabla 5.2 Desplazamientos en Z @  $p = 12.7$  [mm],  $e = 2$ ,  $Su1 = 180$  [pulsos / rev].

No Casilla	$h_i, h_f$ [mm]	$S1i, S1f$	$h_{ei}$ [mm]	$S1ei$	$h_{ef}$ [mm]	$S1ef$	$a_0$ [mm]	$S1a_0$	$h_{cd}$ [mm]	$S1cd$	$h_{sd}$ [mm]	$S1sd$
1	1	8	0	0	2	15	1.5	11	1.5	11	0.5	4
2	5.8	42	4.8	35	6.8	49	1.5	11	6.3	45	5.3	38
3	10.6	76	9.6	69	11.6	83	1.5	11	11.1	79	10.1	72
4	15.4	110	14.4	103	16.4	117	1.5	11	15.9	113	14.9	106
5	20.2	144	19.2	137	21.2	151	1.5	11	20.7	147	19.7	140
6	25	178	24	171	26	185	1.5	11	25.5	181	24.5	174
7	29.8	212	28.8	205	30.8	219	1.5	11	30.3	215	29.3	208
8	34.6	246	33.6	239	35.6	253	1.5	11	35.1	249	34.1	242
9	39.4	280	38.4	273	40.4	287	1.5	11	39.9	283	38.9	276
10	44.2	314	43.2	307	45.2	321	1.5	11	44.7	317	43.7	310
11	49	348	48	341	50	355	1.5	11	49.5	351	48.5	344
12	53.8	382	52.8	375	54.8	389	1.5	11	54.3	385	53.3	378
13	58.6	416	57.6	409	59.6	423	1.5	11	59.1	419	58.1	412
14	63.4	450	62.4	443	64.4	457	1.5	11	63.9	453	62.9	446
15	68.2	484	67.2	477	69.2	491	1.5	11	68.7	487	67.7	480
16	73	518	72	511	74	525	1.5	11	73.5	521	72.5	514
17	77.8	552	76.8	545	78.8	559	1.5	11	78.3	555	77.3	548
18	82.6	586	81.6	579	83.6	593	1.5	11	83.1	589	82.1	582
19	87.4	620	86.4	613	88.4	627	1.5	11	87.9	623	86.9	616
20	92.2	654	91.2	647	93.2	661	1.5	11	92.7	657	91.7	650
21	97	688	96	681	98	695	1.5	11	97.5	691	96.5	684
22	101.8	722	100.8	715	102.8	729	1.5	11	102.3	725	101.3	718
23	106.6	756	105.6	749	107.6	763	1.5	11	107.1	759	106.1	752
24	111.4	790	110.4	783	112.4	797	1.5	11	111.9	793	110.9	786
25	116.2	824	115.2	817	117.2	831	1.5	11	116.7	828	115.7	820

$S_i, S_f \rightarrow$  Pulsos correspondientes a  $h_i, h_f$ ,  $S_{ei}, S_{ef} \rightarrow$  Pulsos correspondientes a  $h_{ei}, h_{ef}$ .

$S_{cd}, S_{sd} \rightarrow$  Pulsos correspondientes a  $h_{cd}, h_{sd}$ ,  $S_{a0} \rightarrow$  Pulsos correspondientes a  $a_0$ .

$p \rightarrow$  Paso del tornillo  $e \rightarrow$  Entradas del tornillo  $S_{u1} \rightarrow$  Pulsos/rev del motor 1

Tabla 5.3 Desplazamiento angular en  $\pi_{xy}$  @  $S_{u2} = S_{u1}$ .

No. Contenedor	$\theta_2$ [grados]	$S_2$
0	0	0
1	45	23
2	90	45
3	135	68
4	180	90
5	225	113
6	270	135
7	315	158
8	360	180

**Tabla 5.4 Estructura Secuencial de los sistemas SP y SS (código binario).**

Tiempo		Sensores y Funciones										
		L1a	L1b	L1ef	L3d1	L3d2	A	B	C	D	E	F
Tiempo	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	1	0	0	0	0	0	0		0	0
	3	0	0	0	0	1		0	0	0		0
	4	0	0	1	0	0	0	0	0		0	0
	5	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
	6	1	1	0	0	0	0	0	0		0	0
	7	0	0	0	0	1		0	0	0	0	
	8	0	0	1	0	0	0	0	0		0	0

■ Sistema Auxiliar de Control    ■ Sistema de Posicionamiento    □ Sistema de Sujeción

L1a → Señal de posicionamiento (software), función A.

L1b → Señal de posicionamiento (software), funciones B y C.

L1ef → Señal de posicionamiento (software), función A y E/F.

L3d1 → Señal de posicionamiento 0 (sensor), función D.

L3d2 → Señal de posicionamiento I (sensor), función D.

En el capítulo anterior (Secc. 3.2.4), se estableció un ciclo completo de operación (ciclo 1 y ciclo2) para la FG el cual, se realiza en dos etapas o periodos. Durante estos periodos, los sistemas SP y SS operan una vez cada uno según el estado de las variables articulares, es decir, éstos operan en distintos tiempos como se muestra en la tabla 5.4. En esta última, se indican los sensores que, al momento en que están encendidos, activan las funciones requeridas. Entonces, a partir de la caracterización y de las tablas 5.2 y 5.3, se definen los intervalos de tiempo y de desplazamiento (tabla 5.5) durante los cuales operan los sistemas. También, se indican las magnitudes que, de acuerdo a los intervalos, adquieren las variables articulares, así como, el estado de éstas donde, un 0 significa que permanece constante en el intervalo y un 1, que es variable.

### 5.6.1 TIEMPOS

En el capítulo 3 (Secc. 3.6.1) se propuso un tiempo de operación general para la trayectoria establecida, de 4.9 segundos. En esta sección se asignarán los tiempos de operación a cada función para entonces, definir los intervalos de la tabla 5.5. Esta asignación es arbitraria, pues inicialmente, no hay restricción alguna para dicha asignación. A continuación, se establece un procedimiento para ello:

1. Se propone arbitrariamente un tiempo de operación ( $t_{SP}$ ) para cuando el Sistema de Posicionamiento (SP), realiza el recorrido más largo. De acuerdo a las tablas 5.2 y 5.3, el recorrido más largo que el sistema SP puede realizar para posicionar el OT es: de la posición de entrada de la casilla inicial hasta, la posición de entrada de la casilla final, es decir, 117.2 mm en el eje Z y 180° en el plano XY. Luego,

$$t_{SP} = t_A = t_B = t_C \quad (5.82)$$

2. Se define el tiempo de operación ( $t_{SS}$ ) para el sistema de sujeción (SS) como: la diferencia entre el tiempo de operación general ( $t_{op}$ ) y el tiempo de operación del sistema SP.

$$t_{SS} = t_{op} - t_{SP} \quad (5.83)$$

3. Se define el tiempo ( $t_{AE}$ ) requerido par tomar o dejar el disco (funciones AE y AF del sistema SS) como: el tiempo calculado (por medio de la ecuación (5.65)) para cuando el sistema SP recorre la distancia  $a_0$  igual a 1.5 mm, la distancia total de recorrido es de 117.2 mm y, el tiempo final es igual al  $t_{SP}$ .

Tabla 5.5 Intervalos de Operación.

Ciclo	Sistema	Periodo	Funciones	V. Articular	Magnitud	Estado	Intervalos	
							Desplazamiento	Tiempo
1	SP	1er	ABC	$d_1$	$hei$	0	$0 \leq d_1 \leq d_{1f} *$	0
				$\theta_1$	$\theta_1$	0	$0 \leq \theta_1 \leq \pi$	
				$d_3$	0	0	$0 \leq d_3 \leq d_{3f} **$	
	SS	1er	D	$d_1$	$hei$	0	$0 \leq d_1 \leq d_{1f}$	$0 \leq t \leq t_2$
				$\theta_1$	$\theta_1$	0	$0 \leq \theta_1 \leq \pi$	
				$d_3$	$d_{3f}$	1	$-d_{3f} \leq d_3 \leq d_{3f}$	
			AE	$d_1$	$hcd$	1	$a0$	$t_2 \leq t \leq t_3$
				$\theta_1$	$\theta_1$	0	$0 \leq \theta_1 \leq \pi$	
				$d_3$	$d_{3f}$	0	$-d_{3f} \leq d_3 \leq d_{3f}$	
			D	$d_1$	$hcd$	0	$0 \leq d_1 \leq d_{1f}$	$t_3 \leq t \leq t_4$
				$\theta_1$	$\theta_1$	0	$0 \leq \theta_1 \leq \pi$	
				$d_3$	0	1	$-d_{3f} \leq d_3 \leq d_{3f}$	
2	SP	2o	ABC	$d_1$	$hef$	1	$0 \leq d_1 \leq d_{1f}$	$t_4 \leq t \leq t_5$
				$\theta_2$	$\theta_2$	1	$0 \leq \theta_2 \leq \pi$	
				$d_3$	0	0	$-d_{3f} \leq d_3 \leq d_{3f}$	
	SS	2o	D	$d_1$	$hef$	0	$0 \leq d_1 \leq d_{1f}$	$t_5 \leq t \leq t_6$
				$\theta_2$	$\theta_2$	0	$0 \leq \theta_2 \leq \pi$	
				$d_3$	$d_{3f}$	1	$-d_{3f} \leq d_3 \leq d_{3f}$	
			AF	$d_1$	$hsd$	1	$a0$	$t_6 \leq t \leq t_7$
				$\theta_2$	$\theta_2$	0	$0 \leq \theta_2 \leq \pi$	
				$d_3$	$d_{3f}$	0	$-d_{3f} \leq d_3 \leq d_{3f}$	
			D	$d_1$	$hsd$	0	$0 \leq d_1 \leq d_{1f}$	$t_7 \leq t \leq t_8$
				$\theta_2$	$\theta_2$	0	$0 \leq \theta_2 \leq \pi$	
				$d_3$	0	1	$-d_{3f} \leq d_3 \leq d_{3f}$	

\*  $d_{1f} = 117.2 \text{ mm}$     \*\*  $d_{3f} = 200 \text{ mm}$

4. Se define el tiempo ( $t_D$ ) requerido para entrar y salir de una casilla (función D del sistema SS) como: la diferencia del tiempo  $t_{SS}$  y dos veces el tiempo  $t_{AE}$ , dividida entre 4.

$$t_D = \frac{t_{SS} - 2t_{AE}}{4} \quad (5.84)$$

De acuerdo al procedimiento descrito y a la consigna de que, la asignación de tiempos es arbitraria, a continuación, se tiene los siguientes tiempos:

- $t_{op} = 4.9 \text{ s}$
- $t_{SP} = 1.3 \text{ s}$
- $t_{SS} = 3.6 \text{ s}$
- $t_{AE} = t_{AF} = 0.118 \text{ s}$  @  $\begin{cases} OT_2(t) = a_0 = 1.5 \text{ mm} \\ df_1 = 117.2 \text{ mm} \\ t_f = t_{SP} = 1.3 \text{ s} \end{cases}$
- $t_D = 0.84 \text{ s}$

Entonces, a partir de los tiempos obtenidos:

**Tabla 5.6** *Tiempos de Operación.*

Intervalo [s]		Tiempo [s]	
$0 \leq t \leq t_2$	0.84	$t_2 = t_D$	0.84
$t_2 \leq t \leq t_3$	0.118	$t_3 = t_2 + t_{AE}$	0.958
$t_3 \leq t \leq t_4$	0.84	$t_4 = t_3 + t_D$	1.798
$t_4 \leq t \leq t_5$	1.3	$t_5 = t_4 + t_{SP}$	3.098
$t_5 \leq t \leq t_6$	0.84	$t_6 = t_5 + t_D$	3.938
$t_6 \leq t \leq t_7$	0.118	$t_7 = t_6 + t_{AF}$	4.056
$t_7 \leq t \leq t_8$	0.84	$t_8 = t_7 + t_D$	4.9

Cada intervalo de la tabla anterior, corresponde al tiempo de operación de las funciones activas (ver tabla 5.5) en dicho intervalo y, el tiempo al final de éste, corresponde al tiempo transcurrido desde el inicio del ciclo de operación. Como se puede observar, al tiempo  $t_3$ , se completan los 4.9 segundos del ciclo de operación.

Ahora bien, los tiempos calculados corresponden a la trayectoria de operación propuesta que, como se mencionó en el capítulo 2, es la trayectoria más larga, lo cual, significa que la capacidad de discos que se puede manejar con estos tiempos es la mínima, es decir, cualquier otra trayectoria podría efectuarse en menor tiempo y por ende manejarse más discos. El tiempo de operación para cualquier otra trayectoria (comprendida en un arreglo de contenedores como el mostrado en la figura 2.4) respecto a la trayectoria de operación más larga, se puede obtener a través de las tablas 5.7 y 5.8. En éstas se indica el tiempo, que de seguir la trayectoria más larga, tardaría el OT en pasar por cada casilla y contenedor al momento de operar el SP.

En el capítulo 3, se estableció que las funciones del SS operan bajo una secuencia fija (figura 3.22), de lo cual se infiere que, el tiempo de operación de este sistema permanece constante para cualquier posición del OT (casilla y contenedor), ya que los desplazamientos en estas funciones no cambian. Por el contrario, las funciones del SP operan bajo una secuencia simultanea mas no fija por lo cual, los desplazamientos de las funciones del SP varían según el número de casilla y de contenedor (tablas 5.2 y 5.3).

Entonces, del párrafo anterior se deduce que, el tiempo de operación para cualquier otra trayectoria será, el tiempo requerido por el mayor numero de pulsos que, ya sea la función A o las funciones BC, tengan entre las posiciones inicial y final de la trayectoria. A continuación se presentan las tablas 5.7 y 5.8 en las cuales, se indica el tiempo que se requiere para dar el número de pulsos correspondientes a cada casilla (inicial o final) y contenedor.

Tabla 5.7 *Tiempos del SP, función A.*

No Casilla	hei [mm]	S1ei	t1ei [s]	hef [mm]	S1ef	t1ef [s]
1	0	0	0	2	15	0.06
2	4.8	35	0.18	6.8	49	0.21
3	9.6	69	0.25	11.6	83	0.27
4	14.4	103	0.29	16.4	117	0.31
5	19.2	137	0.34	21.2	151	0.35
6	24	171	0.38	26	185	0.39
7	28.8	205	0.42	30.8	219	0.43
8	33.6	239	0.45	35.6	253	0.47
9	38.4	273	0.49	40.4	287	0.51
10	43.2	307	0.53	45.2	321	0.54
11	48	341	0.57	50	355	0.58
12	52.8	375	0.60	54.8	389	0.62
13	57.6	409	0.64	59.6	423	0.65
14	62.4	443	0.67	64.4	457	0.69
15	67.2	477	0.71	69.2	491	0.73
16	72	511	0.75	74	525	0.76
17	76.8	545	0.78	78.8	559	0.80
18	81.6	579	0.82	83.6	593	0.84
19	86.4	613	0.86	88.4	627	0.87
20	91.2	647	0.90	93.2	661	0.91
21	96	681	0.94	98	695	0.95
22	100.8	715	0.98	102.8	729	1.00
23	105.6	749	1.03	107.6	763	1.05
24	110.4	783	1.08	112.4	797	1.11
25	115.2	817	1.16	117.2	831	1.3

Tabla 5.8 *Tiempos del SP, funciones BC.*

No. Contenedor	$\theta_2$ [grados]	S2	t [s]
0	0	0	0
1	45	23	0.15
2	90	45	0.20
3	135	68	0.24
4	180	90	0.28
5	225	113	0.31
6	270	135	0.34
7	315	158	0.36
8	360	180	0.39

### 5.6.2 VELOCIDADES Y ACELERACIONES MÁXIMAS

De acuerdo a la ecuación (5.57), a las ecuaciones (5.51), (5.53), (5.54) y (5.59), respectivamente, la velocidad y aceleración máxima para los sistemas de Posicionamiento (SP) y de Sujeción (SS), son las indicadas en la tabla 5.9 las cuales, corresponden a  $h_{ef}=117.2 [mm]$  y  $\theta_2=360^\circ=2\pi [rad]$ .

**Tabla 5.9 Velocidades y Aceleraciones Máximas @  $h_{ef}=117.2 [mm]$  y  $\theta_2=360^\circ=2\pi [rad]$ .**

		<b>Velocidad</b>		<b>Aceleración</b>	
<b>SP</b>	<b>A</b>	131.44 [mm·s]	932 [pulsos·s]	±451.33 [mm·s <sup>2</sup> ]	3199 [pulsos·s <sup>2</sup> ]
	<b>BC</b>	7.04 [rad·s]	202 [pulsos·s]	24.19 [rad·s <sup>2</sup> ]	172 [pulsos·s <sup>2</sup> ]
<b>SS</b>	<b>D</b>	347.14 [mm·s]		1844.69 [mm·s <sup>2</sup> ]	
	<b>AE/F</b>	18.53 [mm·s]	132 [pulsos·s]	701.10 [mm·s <sup>2</sup> ]	4969 [pulsos·s <sup>2</sup> ]

Los datos de la tabla 5.9 servirán para realizar una selección preliminar (a reserva de un análisis dinámico del manipulador) de las articulaciones y sus respectivos actuadores. Esta selección se encuentra en los apéndices indicados como referencia en la lista de componentes (tabla 4.3).

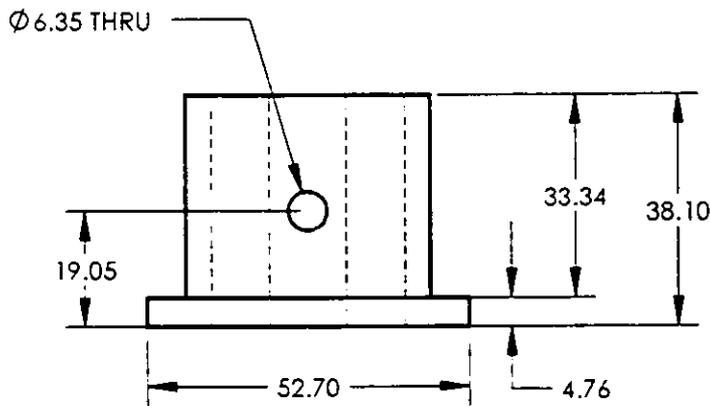
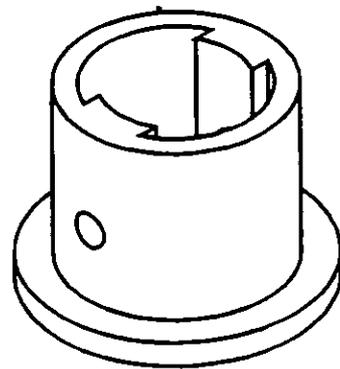
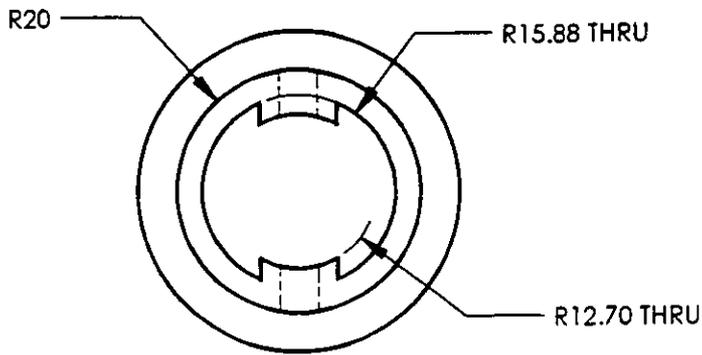
# APÉNDICE A

---

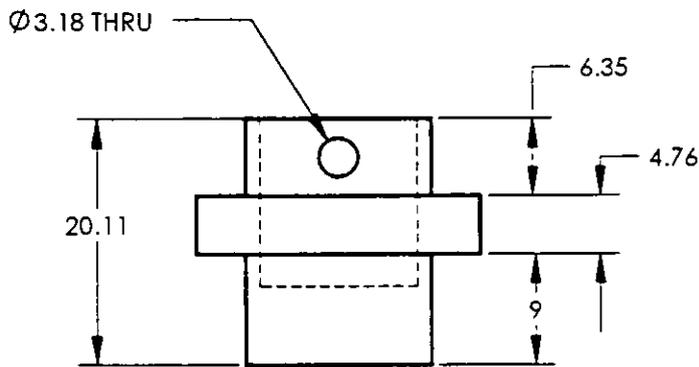
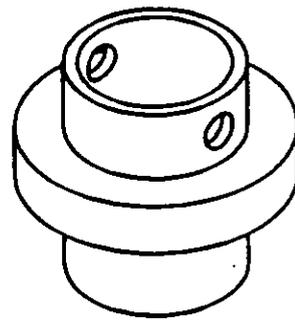
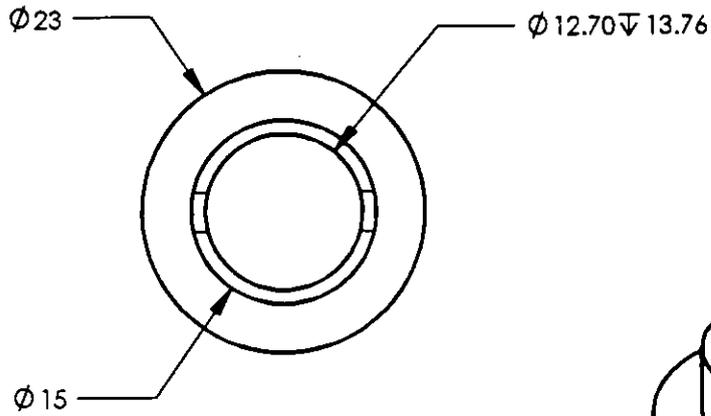
**COMPONENTES**

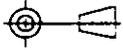
**MANUFACTURADOS**

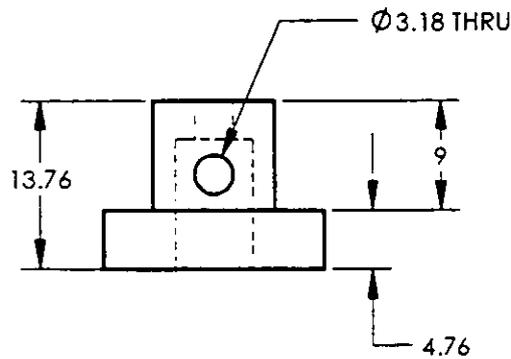
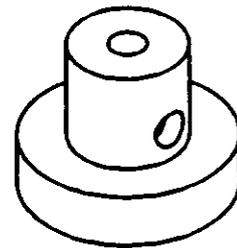
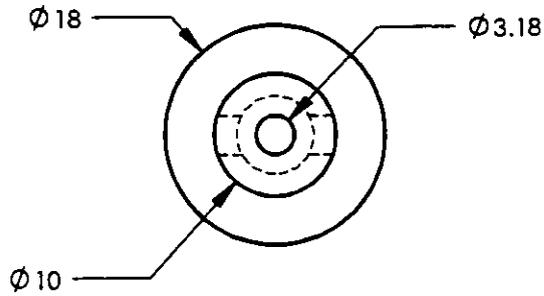
---

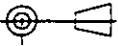


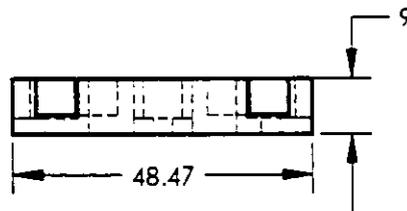
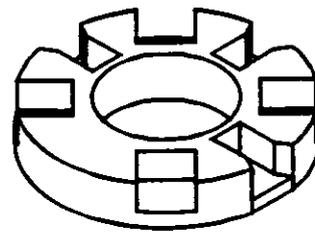
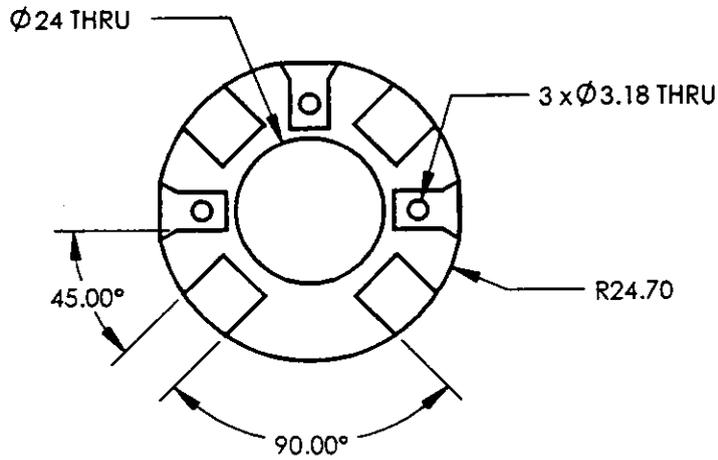
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA		BASE DE TUERCA	
Material: Nylamid	Esc: s/e		
	Acot: mm		
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:
			Pza: 3



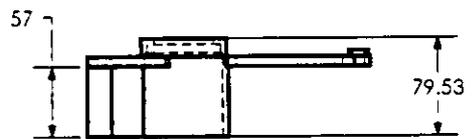
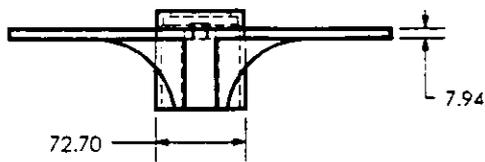
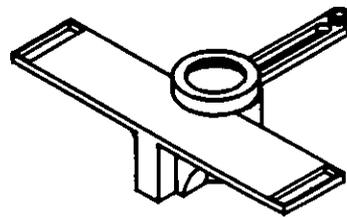
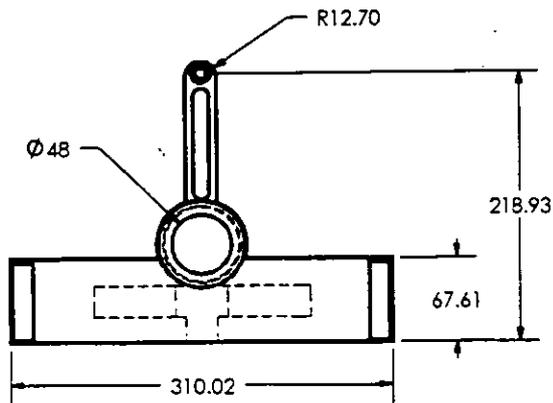
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA		TRABAJO DE TESIS	
Material: Nylamid	Esc: s/e	COPE DE RODAMIENTO 1	
	Acot: mm		
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:
			Pza: 6



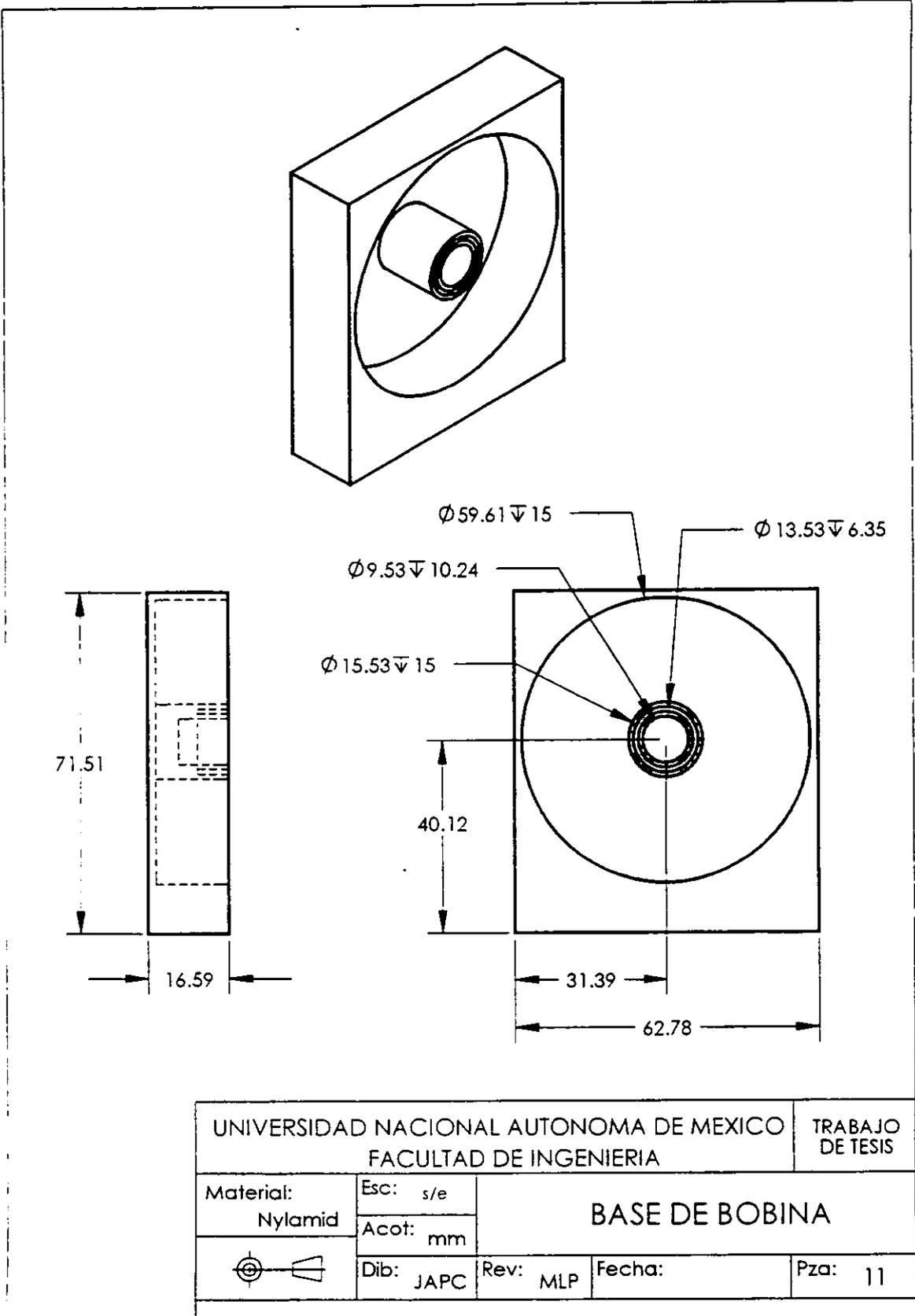
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA			TRABAJO DE TESIS	
Material: Nylamid	Esc: s/e	BASE DE RODAMIENTO 2		
	Acot: mm			
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:	Pza: 7

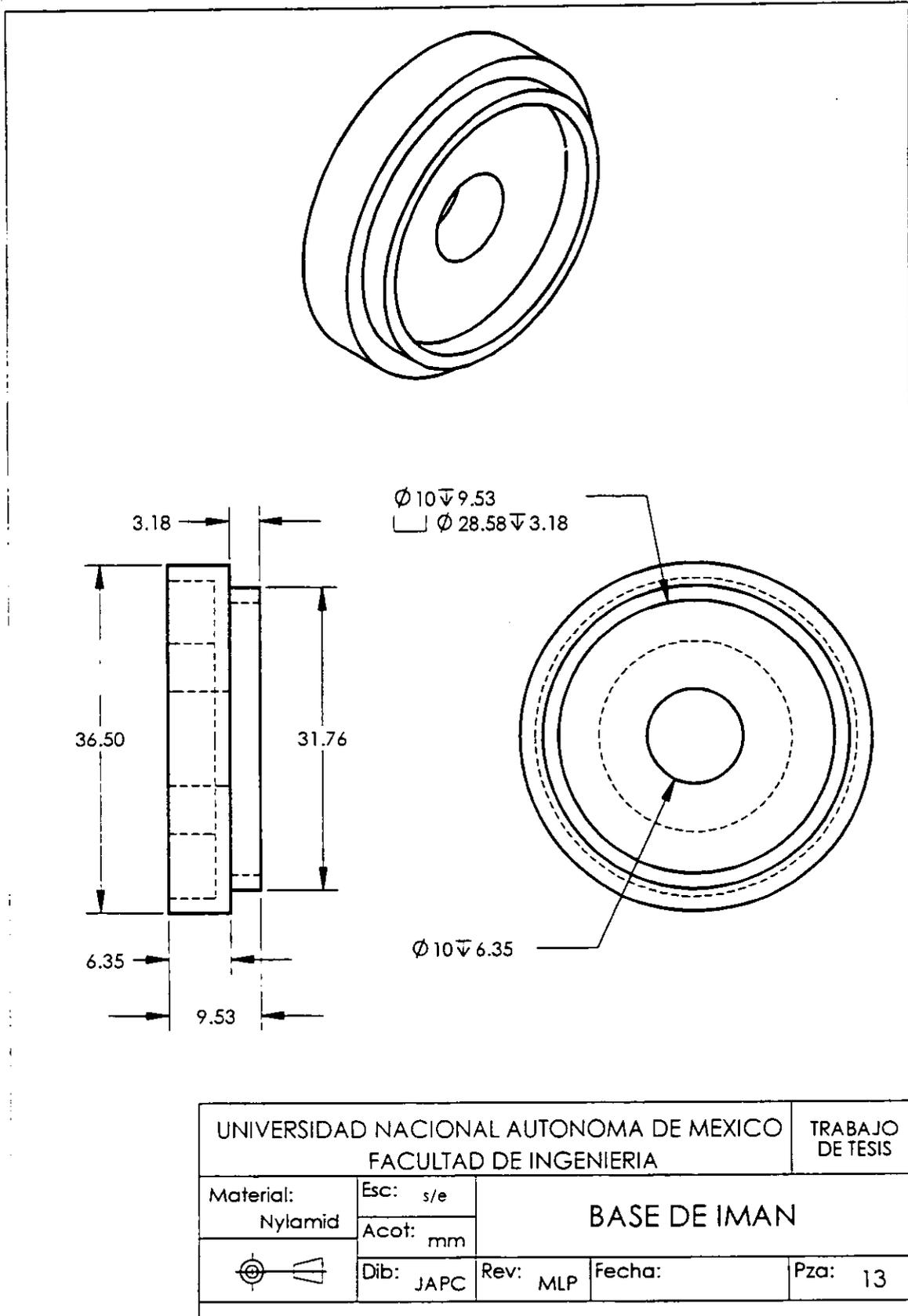


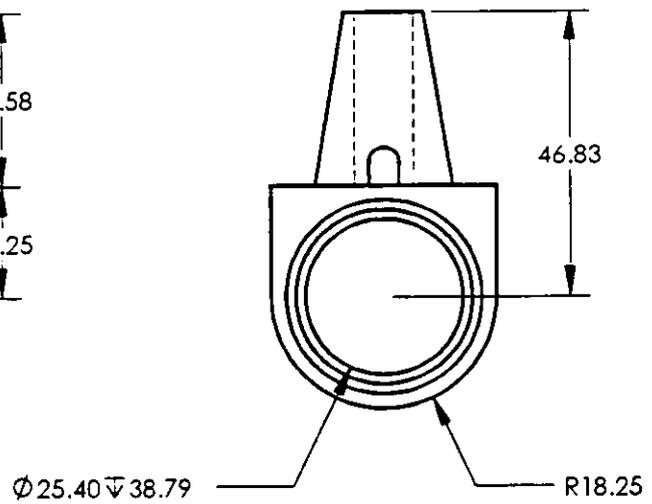
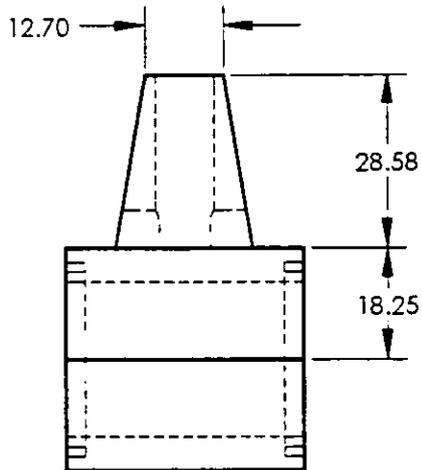
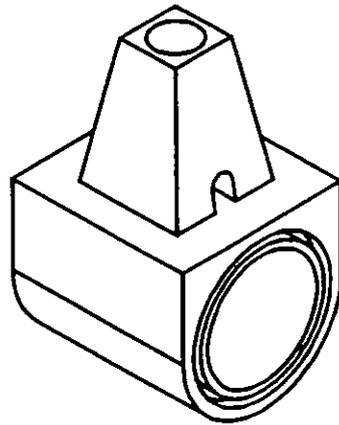
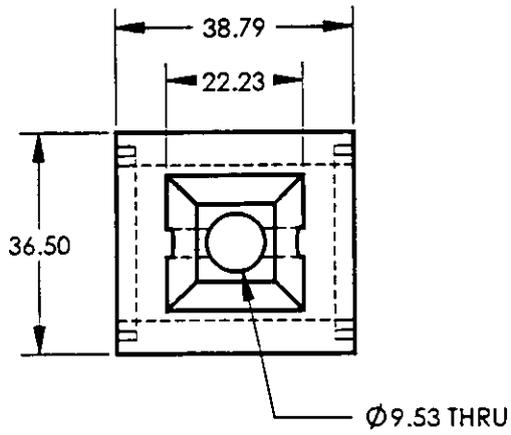
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA				
Material:	Esc:	COPLE DE RODAMIENTO 2		
Nylamid	s/e			
	Acot:			
	mm			
	Dib:	JAPC	Rev:	MLP
	Fecha:		Pza:	9



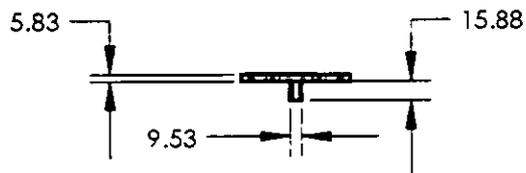
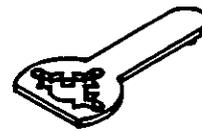
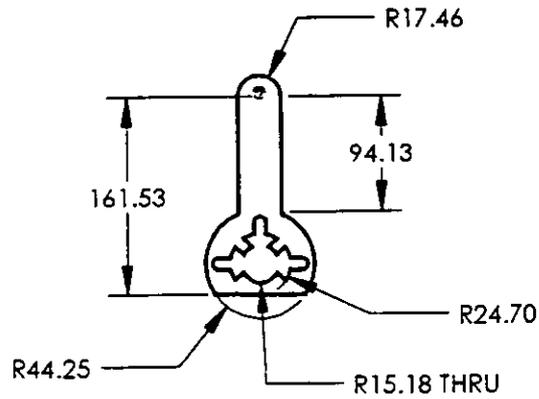
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA			TRABAJO DE TESIS	
Material: Nylamid	Esc: s/e	BASE DE TUERCA		
	Acot: mm			
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:	Pza: 10

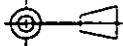


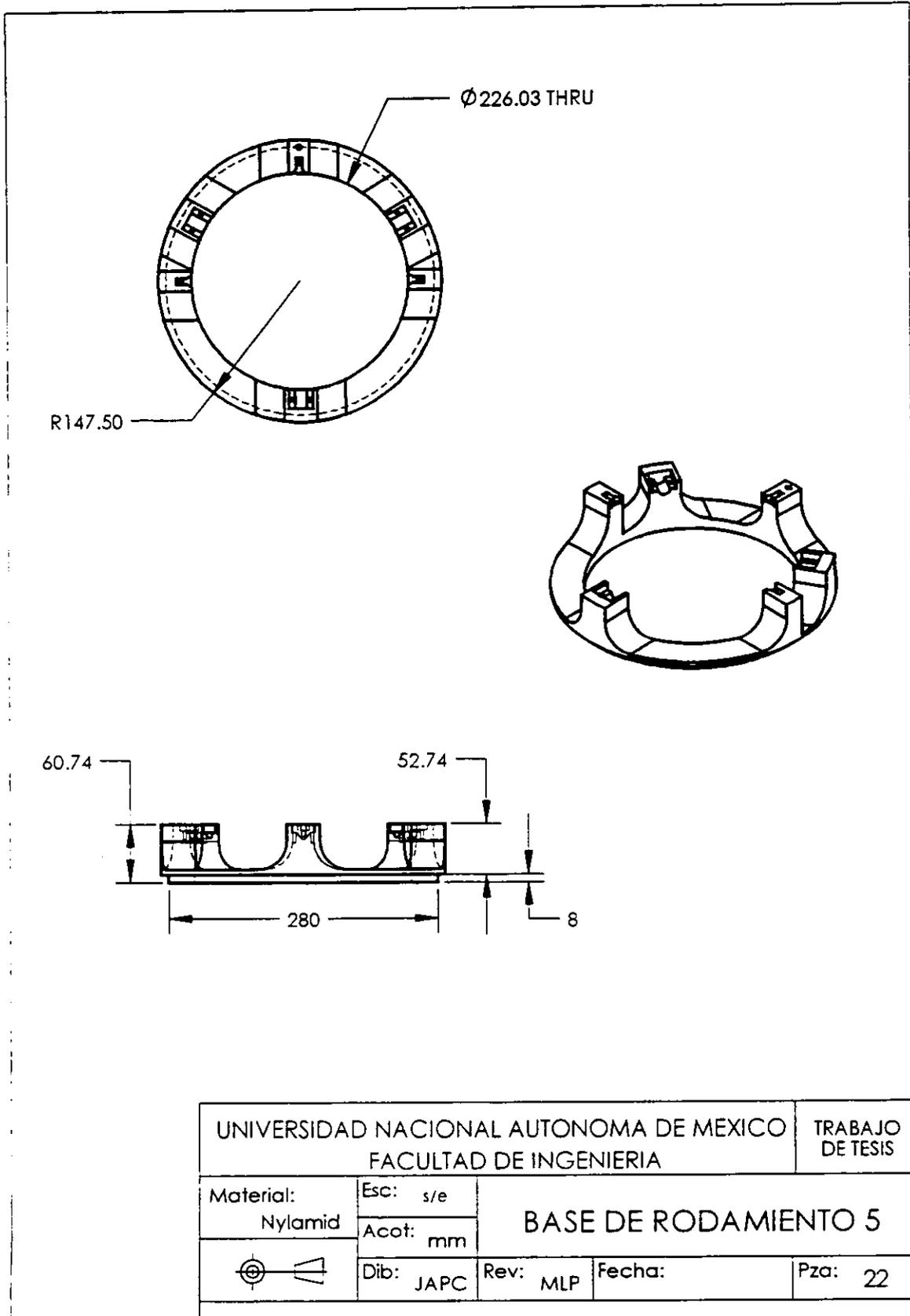


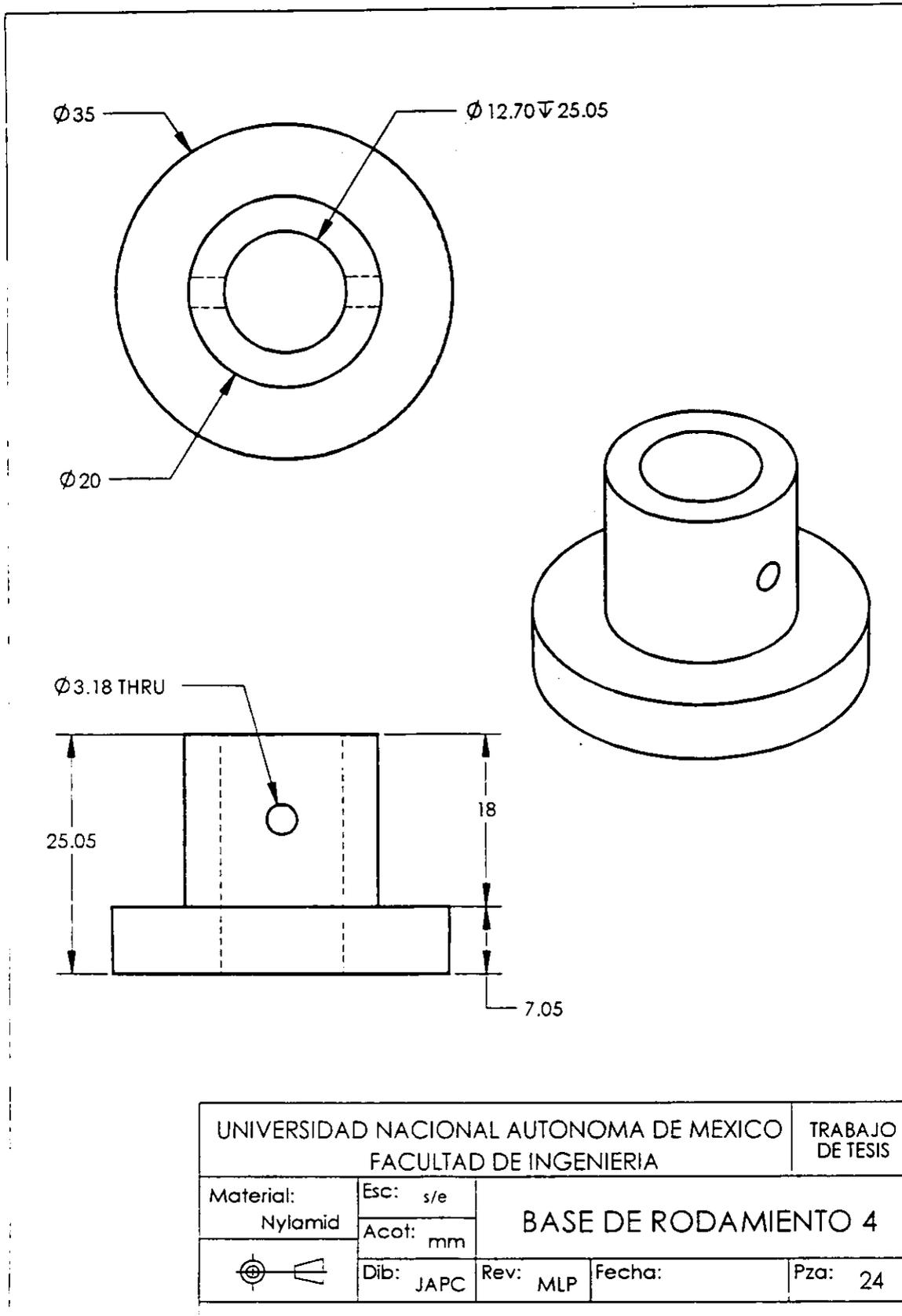


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA		BASE DE CORREDERA P1	
Material: Nylamid	Esc: s/e		
	Acot: mm		
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:
			Pza: 17

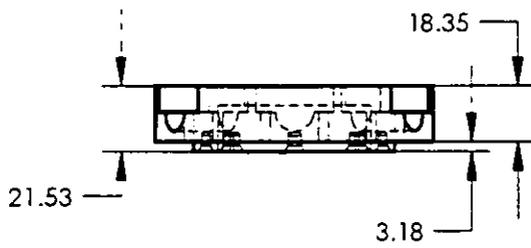
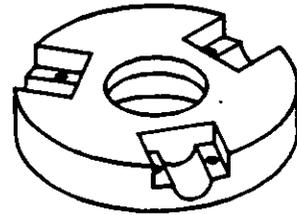
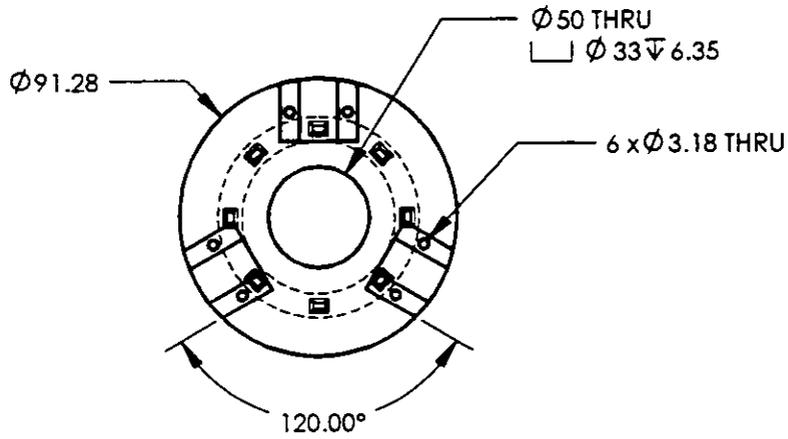


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA		TRABAJO DE TESIS	
Material: Nylamid	Esc: s/e	SOPORTE P2	
	Acot: mm		
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:
			Pza: 21

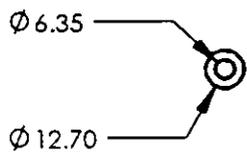
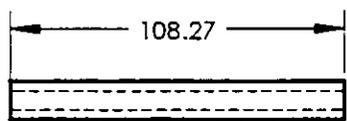
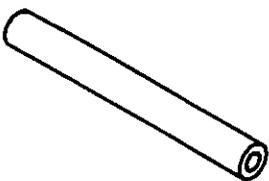




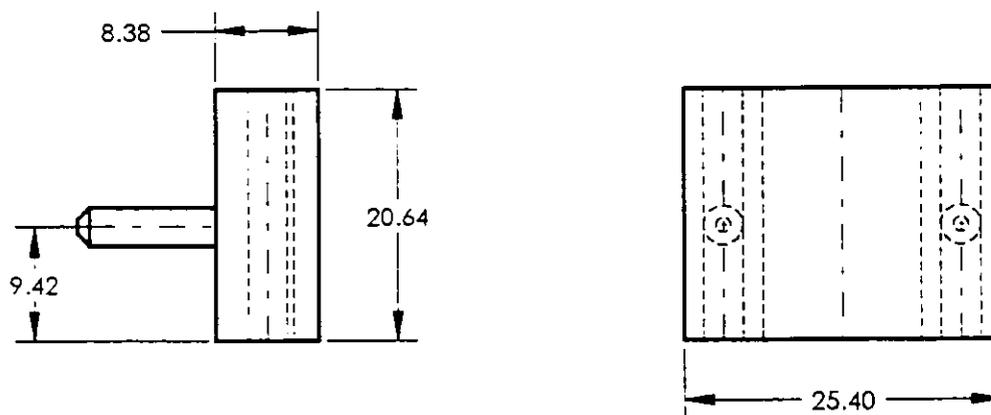
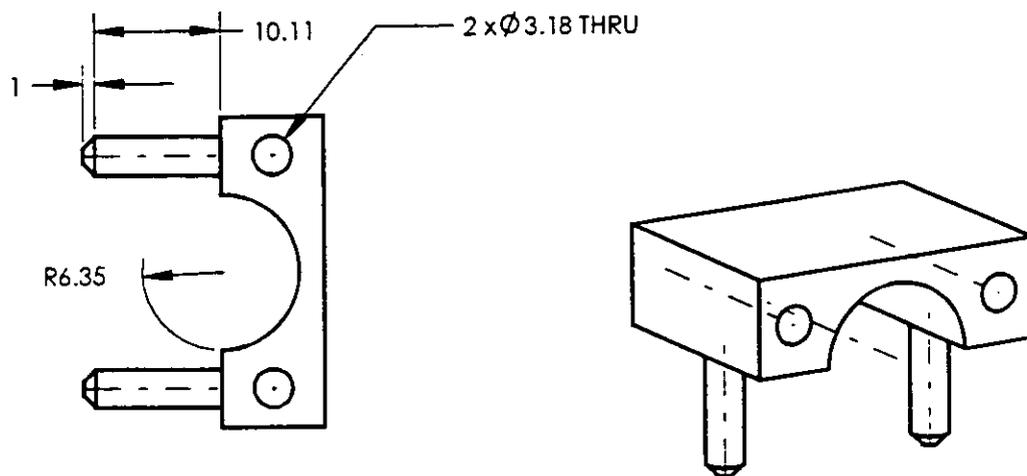
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA		BASE DE RODAMIENTO 4	
Material: Nylamid	Esc: s/e		
	Acot: mm		
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:
			Pza: 24

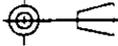


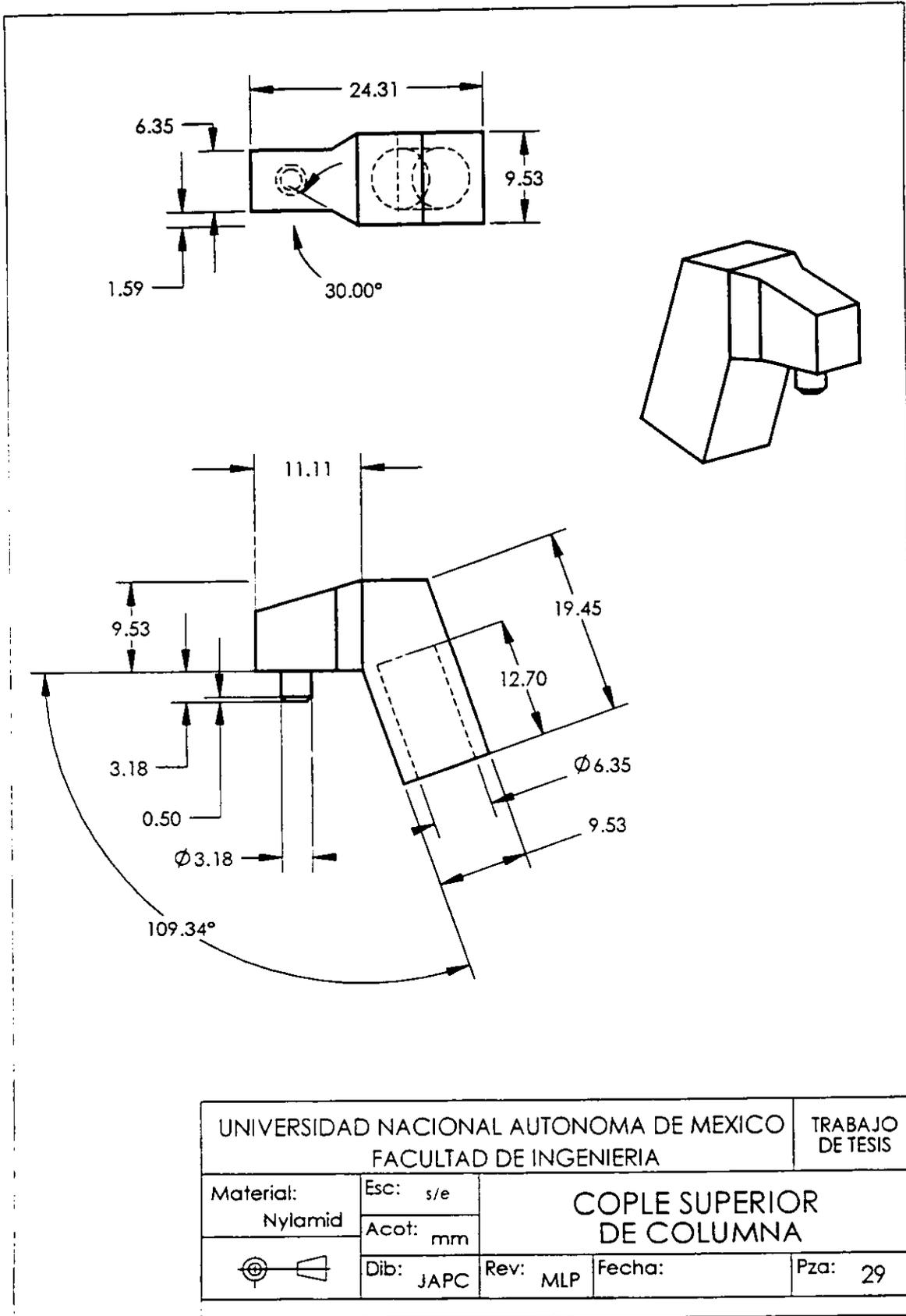
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA			COPLÉ DE RODAMIENTO 4	
Material:	Esc: s/e			
Nylamid	Acot: mm			
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:	Pza: 26

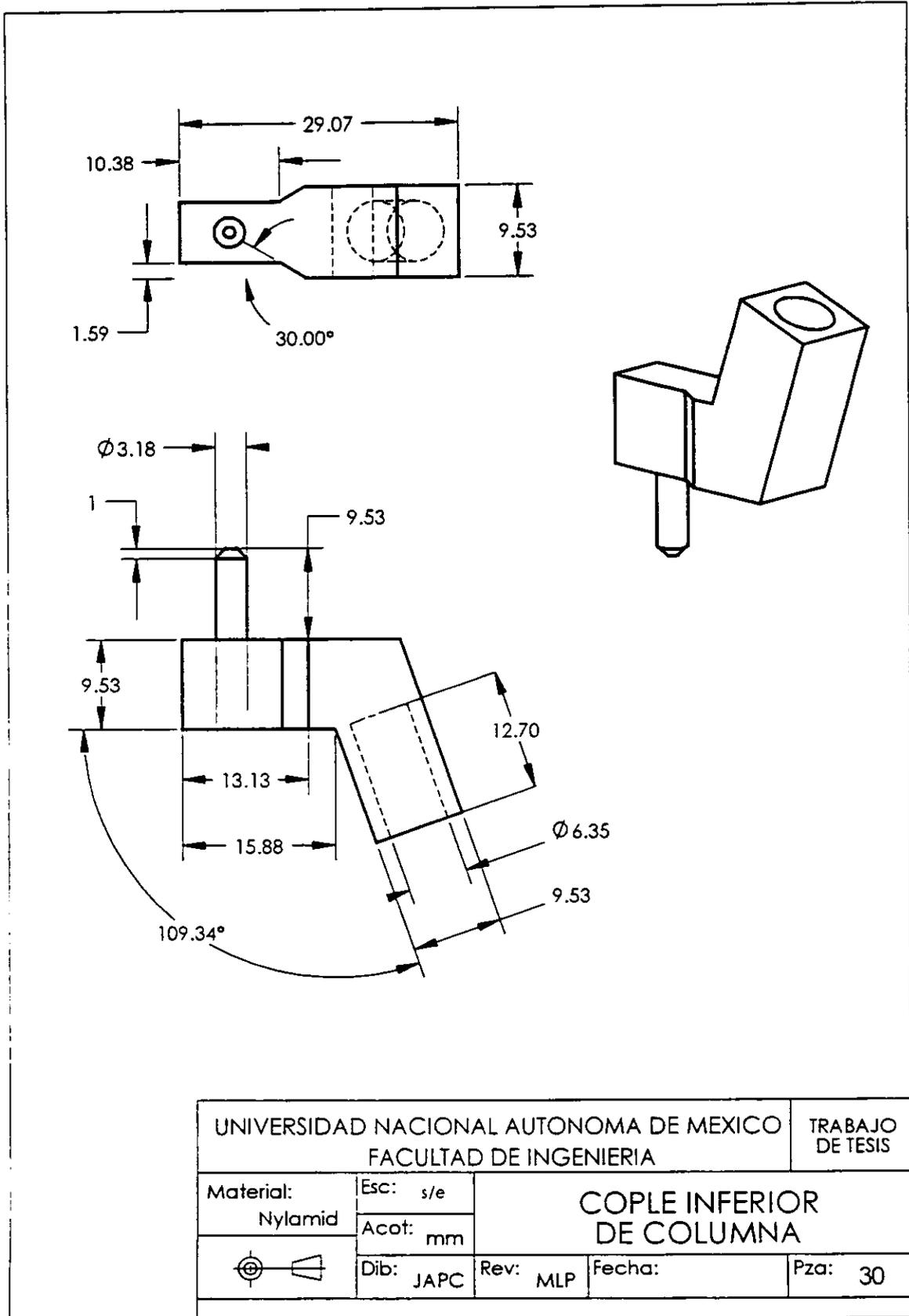


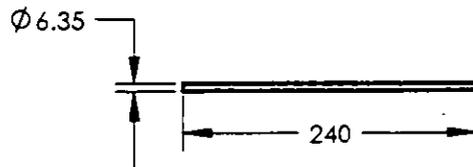
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA				
Material:	Esc: s/e	RAYO		
Nylamid	Acot: mm			
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:	Pza: 27



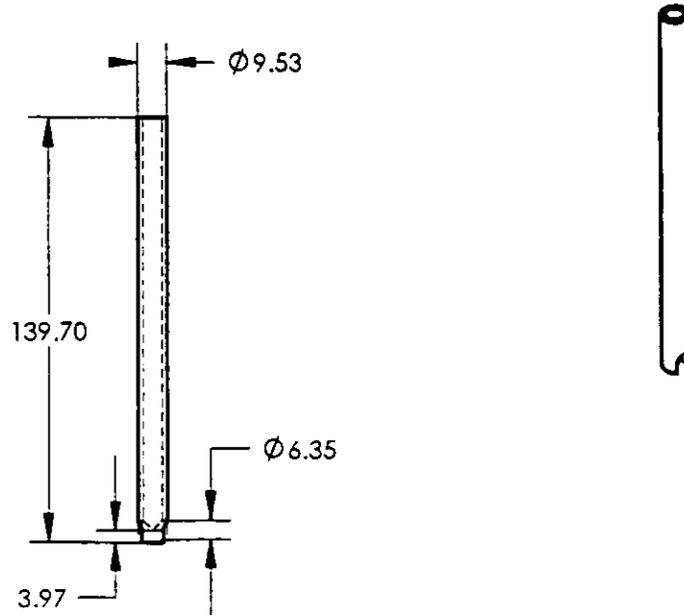
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA				
Material: Nylamid	Esc: s/e	COPLE DE RAYOS		
	Acot: mm			
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:	Pza: 28



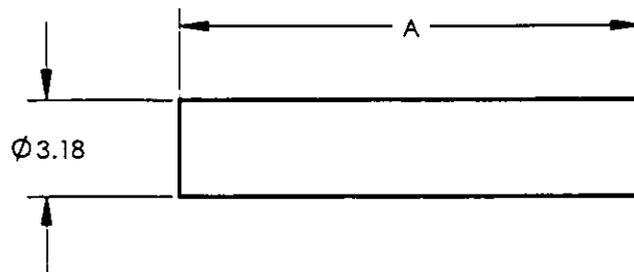
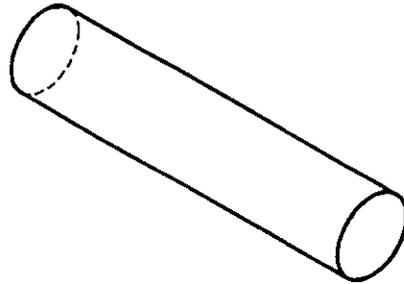




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA		COLUMNA	
Material: Nylamid	Esc: s/e		
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:
			Pza: 31

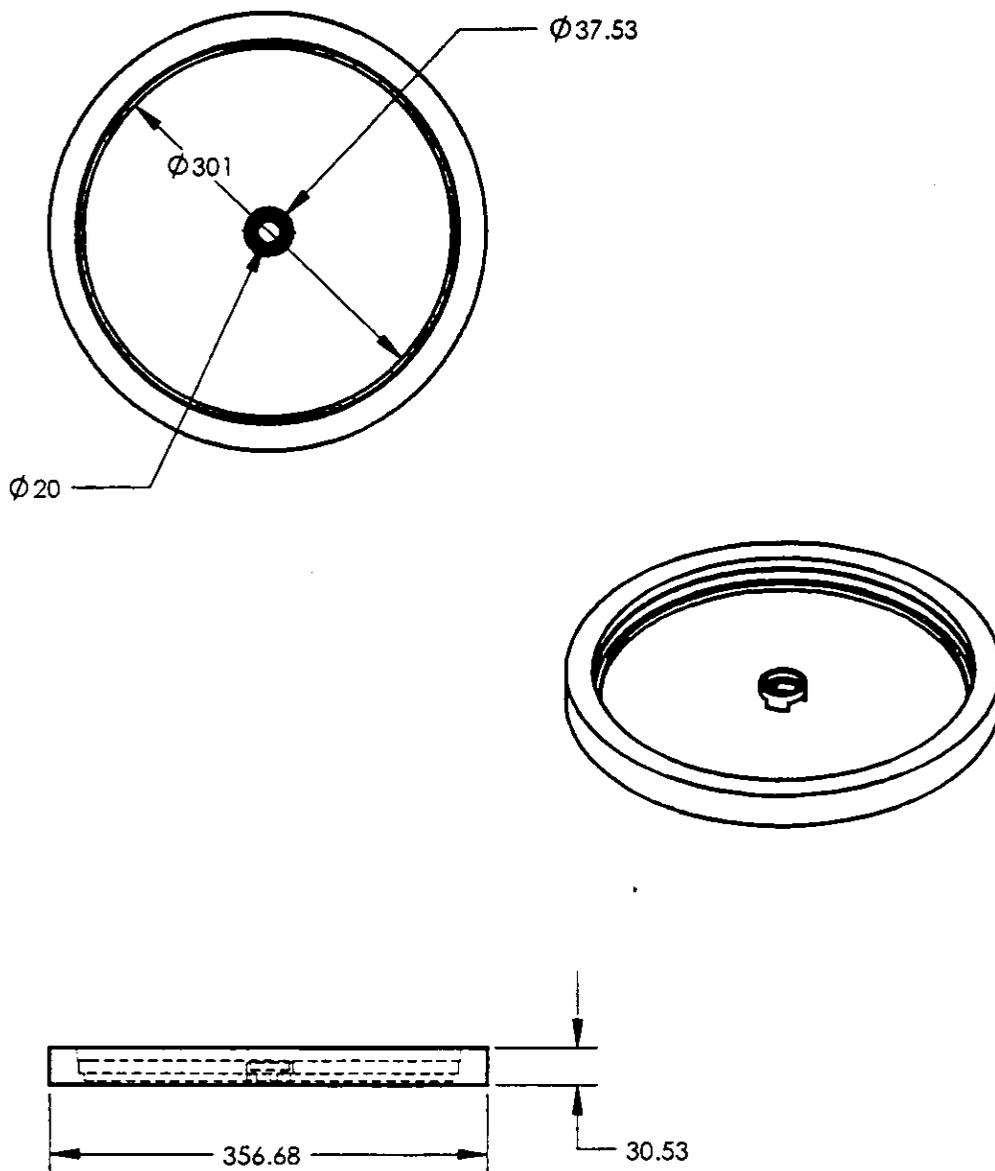


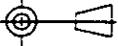
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA		ANTEBRAZO	
Material: Nylamid	Esc: s/e		
	Acot: mm		
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:
			Pza: 32

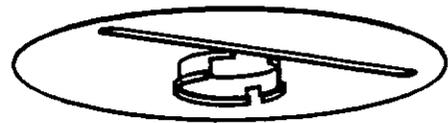
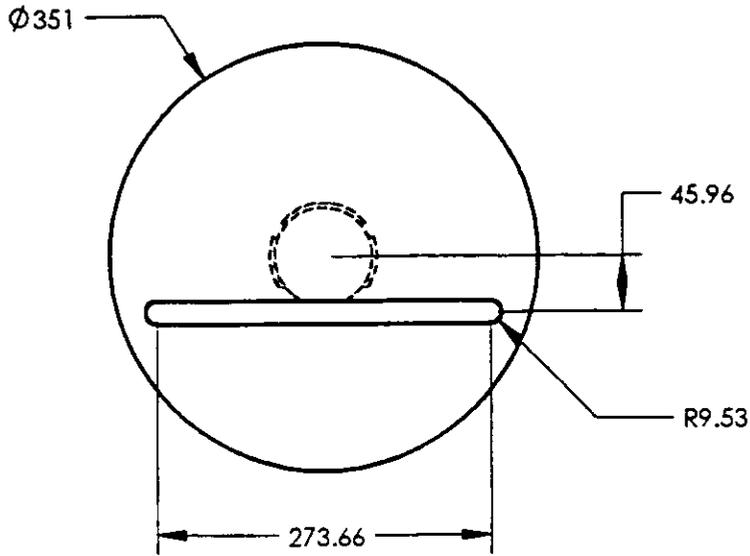


A	10
	15
	20
	25.4

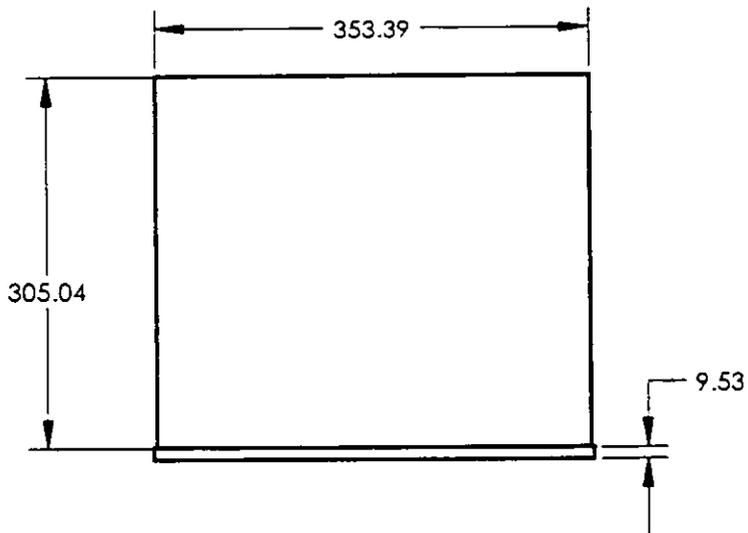
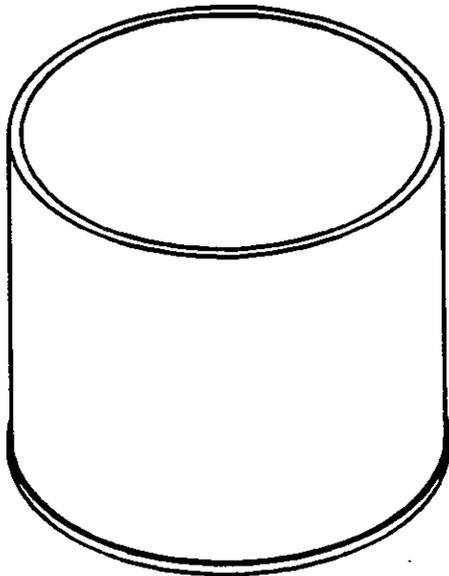
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA			TRABAJO DE TESIS	
Material: Acero CR	Esc: s/e	PERNO		
	Acot: mm			
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:	Pza: 35



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA		PLATAFORMA	
Material: Acero CR	Esc: s/e		
	Acot: mm	Fecha:	Pza: 40



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA				
Material: Lámina de plástico	Esc: s/e	CUBIERTA SUPERIOR		
	Acot: mm			
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:	Pza: 41



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA				
Material: Lámina de plástico	Esc: s/e	CUBIERTA EXTERIOR		
	Acot: mm			
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha:	Pza: 42

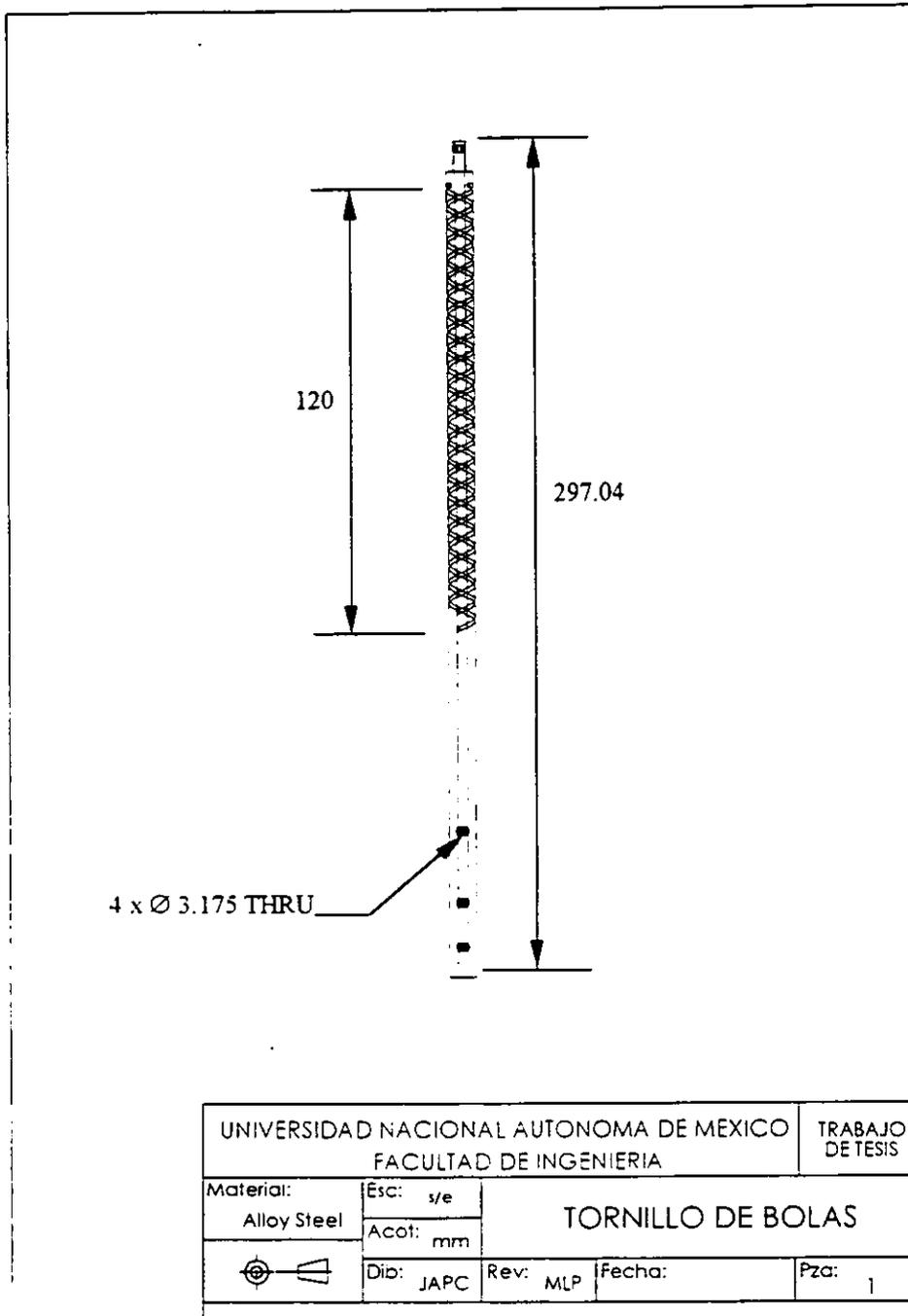
## APÉNDICE B

---

**COMPONENTES**

**COMERCIALES**

---



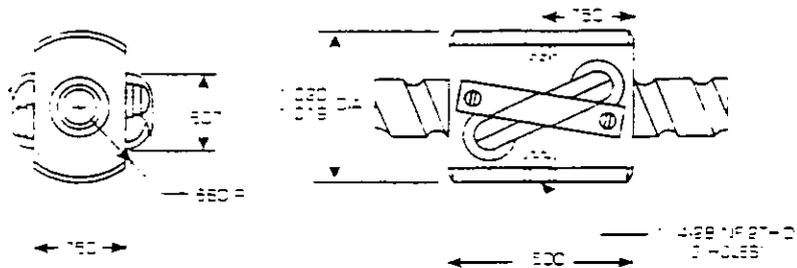
# 0500-0500 SRT

**.500** BALL CIRCLE DIAMETER  
**.500** LEAD • DOUBLE START SCREW THREAD  
**.360** ROOT DIAMETER  
 ALLOY OF STAINLESS STEEL

STANDARD SCREW LENGTHS				
	2FT	4FT	8FT	WT/FT
0500	SRT 6738	SRT 6742	SRT 6744	50 LBS
RHSS	SRT 6700	SRT 6704	SRT 6846	50 LBS

UNDEF. LENGTHS AVAILABLE - CONTACT FACTORY - SEE BELOW FOR MOUNTING BLOCK

DOUBLE CIRCUIT NUT - 1/25 DIA. BALL - 60 PER NUT



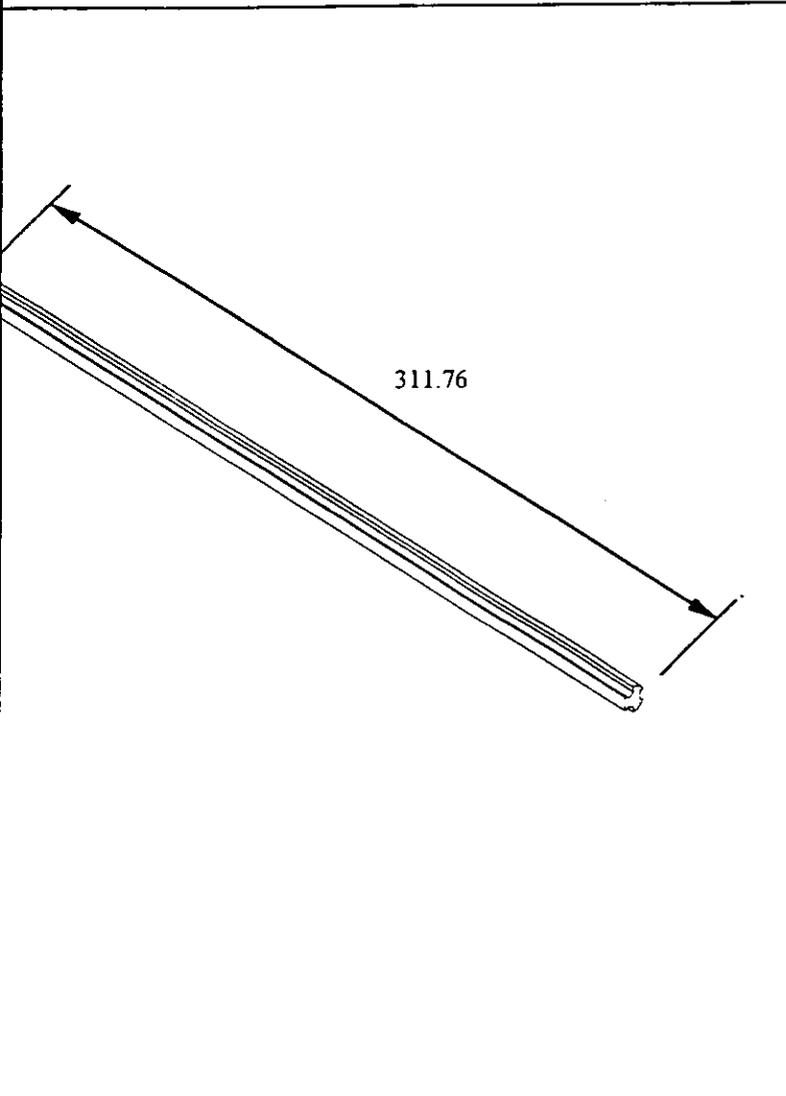
BALL NUT NO	DYNAMIC	STATIC	TORQUE TO RAISE * LB	3N WT
0500	766 LBS	4731 LBS	288 IN *B	26 LBS
RHSS	141 LBS	740 LBS	288 IN *B	26 LBS

FALTAN PAGINAS

132  
133

De la:

A la:



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		TRABAJO DE TESIS	
FACULTAD DE INGENIERIA			
Material: Alloy Steel	Esc: s/e Acot: mm	EJE RANURADO DE ARTPI	
	Dib: JAPC	Rev: MLP	Fecha: Pza: 15

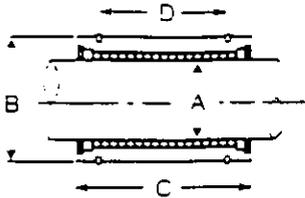


**PRECISION SERIES**

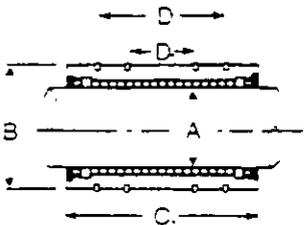
*Precision manufactured for general purpose applications requiring smooth, accurate, rigid, low friction linear motion.*



**PRECISION**



**PRECISION SEALED**



**PRECISION LINEAR BEARINGS**

BORE A	PART NO.	DIAMETER B	LENGTH C	SNAP-RING D	MAX SHAFT DIAMETER	BALL DIA.	WT. IN LBS.
.2500	LBB-250	.5000	.750	.437	.2495	7/16	.02
.3750	LBB-375	.6250	.875	.562	.3745	7/16	.04
.5000	LBB-500	.8750	1.250	.675	.4995	5/64	.11
.6250	LBB-625	1.2500	1.500	1.000	.6245	7/64	.22
.7500	LBB-750	1.2500	1.625	1.062	.7495	7/64	.26
1.0000	LBB-1000	1.5625	2.250	1.625	.9995	1/8	.50
1.2500	LBB-1250	2.0000	2.625	1.875	.2495	3/16	.91
1.5000	LBB-1500	2.3750	3.000	2.250	.4994	7/32	1.44
2.0000	LBB-2000	3.0000	4.000	3.000	.9994	1/4	2.76
2.5000	LBB-2500	3.7500	5.000	3.750	2.4993	5/16	5.44
3.0000	LBB-3000	4.5000	6.000	4.500	3.9992	3/8	9.01
4.0000	LBB-4000	6.0000	8.000	6.000	3.9988	1/2	21.93

**INTEGRALLY SEALED PRECISION LINEAR BEARINGS**

BORE A	PART NO.	DIAMETER B	LENGTH C	SNAP RING D <sub>1</sub>	MAX SHAFT DIAMETER	BALL DIA.	WT. IN LBS.
.5000	LBB-500PP	.8750	1.438	.531	.4995	5/64	.12
.6250	LBB-625PP	1.2500	1.688	—	.6245	7/64	.24
.7500	LBB-750PP	1.2500	1.875	.687	.7495	7/64	.29
1.0000	LBB-1000PP	1.5625	2.600	.844	.9995	1/8	.52
1.2500	LBB-1250PP	2.0000	3.125	1.031	.2495	3/16	1.12
1.5000	LBB-1500PP	2.3750	3.438	1.219	.4994	7/32	1.62
2.0000	LBB-2000PP	3.0000	4.750	1.631	.9994	1/4	3.08

**STANDARD TOLERANCES**

	DIMENSIONS	TOLERANCES
<b>A</b>	.2500 - 1.0000	±.0000 to ±.0005
	1.2500 - 1.5000	±.0000 to ±.0006
	2.0000	±.0000 to ±.0008
	2.5000	±.0000 to ±.0010
	3.0000	±.0000 to ±.0012
<b>B</b>	4.0000	±.0000 to ±.0020
	5.0000 - 1.5625	±.0000 to ±.0004
	2.0000 - 2.3750	±.0000 to ±.0005
	3.0000	±.0000 to ±.0006
	3.7500	±.0000 to ±.0008
<b>C</b>	4.5000	±.0000 to ±.0010
	5.0000	±.0000 to ±.0012
	.750 - 2.250	±.000 to ±.015
	2.525 - 4.000	±.000 to ±.020
	5.000	±.000 to ±.025
<b>D</b>	6.000	±.000 to ±.030
	8.000	±.000 to ±.040
	1.438 - 2.500	±.000 to ±.015
	3.125 - 4.750	±.000 to ±.020
	5.750	±.000 to ±.025
<b>D<sub>1</sub></b>	7.000	±.000 to ±.030
	8.000	±.000 to ±.040
	.437 - 1.625	±.010
<b>D<sub>2</sub></b>	1.875 - 4.500	±.015
	5.000	±.020
	5.31 - 8.44	±.010
	7.031 - 1.531	±.015

**LOAD DATA:** Load ratings are based on 2,000,000" of travel and a shaft hardness of Rockwell 60c. See Engineering Data, page ptx-20.

BASIC BEARING NUMBER	ROLLING LOAD IN POUNDS	
	NORMAL	MAXIMUM
250	25	35
375	31	43
500	40	55
625	50	70
750	60	85
1000	80	110
1250	100	140
1500	120	170
2000	160	220
2500	200	280
3000	240	340
4000	320	450

**Ball Circuits:** all sizes have six circuits except LBB250, which has five.

#### ♦ Motor de Pasos 1 (Función A)

En la función A se utiliza una articulación helicoidal formada por un tornillo de bolas. Los parámetros necesarios para seleccionar un motor de pasos son: el torque y la velocidad de operación en  $[N \cdot cm]$  y pasos por segundo [pps]. El torque requerido por el tornillo de bolas es el siguiente:

$$T = 0.177F \cdot L \quad (\text{B- 4.1})$$

donde  $F$  es la carga levantada por el tornillo y  $L$  su avance por revolución. El avance del tornillo de acuerdo al apéndice B-1 y a la ecuación (5.23) es:

$$L = nep = (1)(2)(12.7) [mm] = 25.4 [mm] \quad (5.23)$$

La carga aproximada en el tornillo es de:  $F \approx 2 [Kg] \approx 20 [N]$ . Por lo tanto, el torque requerido por el tornillo de bolas es de:

$$T = 0.177(20)(25.4) [N \cdot mm] = 89.91 [N \cdot mm] \approx 9 [N \cdot cm]$$

La velocidad requerida en la función A, de acuerdo a la tabla 5.9, es de 932 [pps].

Estos valores de torque y velocidad serán considerados como los parámetros de salida en la transmisión del motor, esto es:

$$\begin{aligned} T_s &\approx 9 [N \cdot cm] \\ \omega_{\text{Pris}} = \omega_s &= 932 [pps] \end{aligned} \quad (\text{B- 4.2})$$

Para definir la transmisión del motor 1, se tiene lo siguiente:

$$\omega_E r_1 = \omega_S r_2 \quad (\text{B- 4.3})$$

$$r_2 + 2r_1 = 60 \quad (\text{B- 4.4})$$

$$\frac{\omega_E}{\omega_S} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{N_1}{N_2} = \text{Relacion de Velocidad} = R.V. \quad (\text{B- 4.5})$$

De (B- 4.5):

$$r_2 = r_1 \frac{\omega_E}{\omega_S} = r_1 \cdot R.V. \quad (\text{B- 4.6})$$

Sustituyendo (B- 4.6) en (B- 4.4):

$$r_1 = \frac{60}{(R.V.+2)} \quad (\text{B- 4.7})$$

Para una relación de velocidad de  $VR=2$  se tiene que:

$$r_1 = \frac{60}{(2.+2)} = 15 \quad \therefore r_1 = 15 \text{ [mm]}$$

$$r_2 = r_1 \cdot 2 = 30 \quad \therefore r_2 = 30 \text{ [mm]}$$

$$\omega_E = \omega_S \cdot 2 = (932)(2) \quad \therefore \omega_E = 1864 \text{ [pps]}$$

$$T_E = \frac{T_S}{2} = \frac{9}{2} \quad \therefore T_E \approx 4.5 \text{ [N} \cdot \text{cm]}$$

Entonces, los parámetros de selección para el motor (con un 25% arriba de los valores obtenidos) son:

$$\begin{aligned} T_E &\approx 5.625 \text{ [N} \cdot \text{cm]} \\ \omega_E &= 2330 \text{ [pps]} \end{aligned} \quad (\text{B- 4.8})$$

### ◆ Motor de Pasos 2 (Función BC)

De acuerdo a la tabla 5.9, la velocidad necesaria en la función BC es de 202 [pps]. El torque requerido es:

$$T = I \cdot \alpha_2 \quad (\text{B- 4.9})$$

donde  $I$  es el momento de inercia que se opone en la articulación rotacional y  $\alpha$  aceleración angular. El momento de inercia aproximado es de:  $I = 97.504 \times 10^{-3} \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$  y la velocidad angular, según la tabla 5.9, es:  $\alpha_2 = 24.19 \text{ [rad/s}^2]$ . Por lo tanto el torque es:

$$T = I \cdot \alpha_2 = (97.504 \times 10^{-3})(24.19) \text{ [N} \cdot \text{m}] = 2.3586 \text{ [N} \cdot \text{m}] = 235.86 \text{ [N} \cdot \text{cm}]$$

Al igual que para el motor 1, estos valores se considerarán como los parámetros de salida en la transmisión del motor 2, esto es:

$$\begin{aligned} T_s &\approx 235.86 \text{ [N} \cdot \text{cm}] \\ \omega_{Rot} &= \omega_s = 202 \text{ [pps]} \end{aligned} \quad (\text{B- 4.10})$$

Aplicando las mismas ecuaciones que para el motor 1, con una relación de velocidad de  $VR=4$  se tienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{75}{(4+2)} = 12.5 & \therefore r_1 &= 12.5 \text{ [mm]} \\ r_2 &= r_1 \cdot 4 = 50 & \therefore r_2 &= 50 \text{ [mm]} \\ \omega_E &= \omega_s \cdot 2 = (202)(4) & \therefore \omega_E &= 808 \text{ [pps]} \end{aligned}$$

$$T_E = \frac{T_S}{4} = \frac{235.86}{4} \quad \therefore T_E \approx 58.96 \text{ [N} \cdot \text{cm]}$$

Entonces, los parámetros de selección para el motor 2 (con un 25% arriba de los valores obtenidos) son:

$$\begin{aligned} T_E &\approx 73.70 \text{ [N} \cdot \text{cm]} \\ \omega_E &= 1010 \text{ [pps]} \end{aligned} \quad \text{(B- 4.11)}$$

#### ◆ Bobina (Función D)

Para obtener los parámetros de selección de las bobinas, es necesario realizar experimentos con el concepto D4 para determinar el valor de la constante de fuerza magnética  $K_m$  (ecuación (5.34)). Una vez encontrada esta constante, será posible determinar los valores para las dimensiones de la bobina y del imán correspondiente, así como, del voltaje de alimentación. Los parámetros de la bobina planteada inicialmente, son los siguientes:

$$r_m \hat{=} \text{radio medio del embobinado} = 22 \text{ [mm]}$$

$$l \hat{=} \text{longitud} = 15 \text{ [mm]}$$

$$N \hat{=} \text{número de vueltas} = 1200$$

$$\varnothing_{cond} \hat{=} \text{diámetro del conductor} = 0.460 \text{ [mm]}$$

$$r_{int} \hat{=} \text{radio interior del núcleo} = 7.762 \text{ [mm]}$$

$$\text{Espesor del núcleo} = 5 \text{ [mm]}$$

## CONCLUSIONES

La etapa más importante en un proceso de diseño, se considera que es la *Elaboración de Especificaciones* pues, es en esta etapa, en la que se define *qué* se quiere que haga el diseño, *qué* se quiere que tenga éste, y *cómo* se quiere que se lleve al cabo. En el capítulo 2, se generó un conjunto de especificaciones de manera que se abarcaran estas cuestiones, siendo así, la base para el desarrollo de las demás etapas. Esta etapa del proceso de diseño puede, en muchas ocasiones, ser tedioso, sin embargo, una vez conjuntada toda la información necesaria, el resto del proceso es mucho más fluido.

Aún cuando la *Elaboración de Especificaciones* sea la base para desarrollar un diseño, es mi opinión y experiencia después de haber realizado este trabajo que, la etapa crucial es la conceptual, en este caso en particular, la *Descomposición Funcional* pues, es en esta etapa, en la que se genera un modelo abstracto y funcional de la solución al problema planteado; esto permite tener un control sobre los *qué* y los *cómo* del diseño en un nivel de abstracción tal que, se pueden hacer modificaciones sin alterar todo el proceso y aún obtener de manera casi inmediata una alternativa de solución. Esto es, la estructura de funciones que se obtiene en esta etapa siempre va a ser la misma, son los conceptos para satisfacer las funciones, los que van a cambiar; y aún en el caso contrario, cuando se requiera alterar la estructura en la Función General, los conceptos pueden no variar y generar así, otra alternativa sin necesidad de empezar de cero. Por esto, considero a la *Descomposición Funcional*, un método altamente eficaz en la solución de problemas en general.

El *Diseño de Configuración* es como la parte artística de una obra. Es en esta etapa, cuando se trabaja sobre los detalles del diseño, donde la experiencia y creatividad del diseñador juegan un papel importante pues, es a través de éstas

que, la alternativa de solución es pulida y perfeccionada buscando alcanzar los conceptos de *claridad, simplicidad y unidad* [5]. Una parte importante de la propuesta generada, proviene de esta etapa, pues en ella se trató de optimizar la alternativa de solución ya que, si bien cumplía con las especificaciones, el diseño podía ser mejorado (esto no implica que el resultado obtenido sea perfecto y esté exento de más modificaciones). Por tanto, aún cuando la propuesta de solución obtenida, está sujeta a experimentación, considero que ésta es una solución suficientemente viable para el problema planteado.

La importancia de plantear modelos matemáticos radica en que, con éstos se puede determinar tanto el camino que sigue un fenómeno como los resultados arrojados por éste sin tener que reproducirlo físicamente. Esto, aunado a las herramientas computacionales, proporcionan, al diseñador en general, un mayor dominio y una visión más clara de cualquier problema. Por lo anterior, se buscó, a través del Modelo Cinématico, desarrollar un modelo para representar, en la medida de lo posible, el comportamiento del manipulador. En particular, para los problemas que involucran a la Robótica o la Automatización y Control, desarrollar estos modelos es de gran importancia ya que pueden ser programados, haciéndolos más versátiles.

Finalmente, este trabajo me ha permitido desarrollar algo del conocimiento adquirido durante la Licenciatura, en particular, respecto del Diseño, la Robótica y las Matemáticas. También me llevó a comprobar la importancia de seguir una metodología al momento de diseñar además de, constatar el papel tan importante que juegan las Matemáticas y las computadoras, tanto como una herramienta auxiliar del Diseño como parte de la formación de un Ingeniero.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Phillip John McKerrow  
*"Introduction to Robotics"*  
Addison & Wesley, 1991
  
2. Koran  
*"Robotics for Engineering"*  
McGraw-Hill, 1985
  
3. Craig  
*"Introduction to Robotics"*  
Addison & Wesley  
Segunda Edición
  
4. Fu K.S., González R.C., Lee C.S.G.  
*"Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence"*  
McGraw-Hill, 1987
  
5. G. Pahl, W Beitz  
*"Engineering Design, A Systematic Approach"*  
The Design Council, 1988
  
6. David G. Ullman  
*"The Mechanical Design Process"*  
McGraw-Hill, 1992

7. Ricardo Aparicio C., Bernardo A. Pérez Contreras

*"Ingeniería de Diseño"*

Facultad de Ingeniería

Tesis de Licenciatura

UNAM, 1990

8. Stuart Pugh

*"Total Design"*

9. George Dieter

*"Engineering Design, A Materials and Processing Approach"*

McGraw-Hill, 1983

10. Joseph E. Shigley, Larcy D. Mitchell

*"Diseño en Ingeniería Mecánica"*

McGraw-Hill

Cuarta Edición

(Tercera en español)

11. Erik Oberg, F.D. Jones

*"Machinery's Handbook"*

The Industrial Press

17ª Edición

12. Robert L. Mott

*"Machine Elements in Mechanical Design"*

Maxwell McMillan International Editions

Segunda Edición

13. Robert C. Junivall, Kurt M. Marshek  
*"Fundamentals of Machine Component Design"*  
John Wiley & Sons  
Segunda Edición
  
14. Aaron D. Deutschman, Walter J. Michels, Charles E. Wilson  
*"Machine Design, Theory and Practice"*  
McMillan Publishing Co. Inc, 1975
  
15. Robert H. Creamer  
*"Machine Design"*  
Adison & Wesley  
Segunda Edición
  
16. Antty J. Koivo  
*"Fundamentals for Control of Robotics Manipulators"*  
John Wiley & Sons, 1989
  
17. Francois L'Hote, Jean-Marie Kauffmann, Pierre André and Jean-Pierre Taillard  
*"Robot Components and Systems Technology, Volume 4"*  
Prentice-Hall, 1983
  
18. Gordon McComb  
*"The Robot Builder's Bonanza, 99 Inexpensive Robotics Projects"*  
McGraw-Hill, 1987
  
19. Ben-Zion Sandler  
*"Robotics, Designing the Mechanisms for Automated Machinery"*  
Prentice-Hall, 1991