



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO DE UN ROBOT CAMINANTE ELECTRO-
HIDRÁULICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. HUGO ENRIQUE CALDERÓN LÓPEZ

ASESOR:

DR. IGNACIO JUÁREZ CAMPOS



MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO 2008

ÍNDICE

<i>Introducción</i>	1
<i>CAPÍTULO 1. Perspectiva Histórica</i>	2
<i>1.1 Antecedentes</i>	2
<i>1.1.1 Origen y Desarrollo De La Robótica</i>	3
<i>1.1.2 Clasificación De Los Robots</i>	4
<i>1.1.3 Robótica Móvil</i>	4
<i>1.1.4 Robótica Caminante</i>	6
<i>1.2 Justificación</i>	9
<i>1.3 Objetivo</i>	10
<i>1.3.1 Objetivos Específicos</i>	10
<i>1.4 Hipótesis</i>	10
<i>CAPÍTULO 2 . Morfología</i>	11
<i>2.1 Características Morfológicas</i>	11
<i>2.1.1 Grados De Libertad</i>	11
<i>2.1.2 Coordenadas De Los Movimientos</i>	12
<i>2.1.3 Articulaciones Entre Los Elementos Del Robot</i>	12
<i>2.2 Componentes Básicos De Un Robot</i>	14
<i>2.2.1 Estructura Mecánica Del Robot</i>	14

CAPÍTULO 3. Cinemática	20
3.1 Cinemática Directa	21
3.1.1 Solución Del Problema Cinemático Directo Mediante Matrices De Transformación Homogénea	21
3.1.2 Parámetros Denavit-Hartenberg Para Un Eslabón Giratorio	24
3.2 Cinemática Inversa	26
3.2.1 Resolución Del Problema Cinemático Inverso Por Métodos Geométricos	27
CAPÍTULO 4. Dinámica	34
4.1 Modelo Dinámico De La Estructura De Un Robot Rígido	35
4.2 Modelado Mediante La Formulación De Newton-Euler	36
4.2.1 Algoritmo Computacional Para El Modelo Dinámico De Newton-Euler	37
4.3 Determinación De Torques Experimentados Por Parte Media Del Robot	39
4.4 Determinación De Torques Experimentados Por Parte Extrema Del Robot	44
CAPÍTULO 5. Sistema de Actuación Hidráulico	49
5.1 Tipos De Actuadores	49
5.1.1 Actuadores Hidráulicos	49
5.2 Determinación De Las Fuerzas Necesarias En Los Eslabones De Las Patas	50
5.3 Diseño Del Actuador Lineal Utilizado En La Pata Del Robot	55
CAPÍTULO 6. Sistema de Bombeo	57
6.1 Principio De Pascal	59
6.2 Determinación De Las Fuerzas Aplicadas Por El Sistema De Bombeo	60
6.3 Diseño Del Actuador Lineal Utilizado En El Sistema De Bombeo	64
6.4 Cálculo Del Servomotor A Utilizar En El Sistema De Bombeo	65

<i>CAPÍTULO 7. Actuador Eléctrico</i>	70
<i>7.1 Motor Eléctrico</i>	70
<i>7.1.2 Motores De Corriente Continúa</i>	71
<i>7.2 Servomotor</i>	72
<i>7.3 Especificaciones Generales De Los Servomotores</i>	75
<i>CAPÍTULO 8. Análisis, Resultados y Discusiones</i>	77
<i>8.1 Parte Media Del Robot</i>	77
<i>8.1.1 Desplazamiento Frontal De La Parte Media Del Robot</i>	77
<i>8.1.1.1 Simulación Del Desplazamiento Frontal</i>	77
<i>8.1.1.2 Torques Experimentados Durante El Desplazamiento Frontal</i>	79
<i>8.1.1.3 Fuerzas Aplicadas A Los Eslabones Durante El Desplazamiento Frontal</i>	79
<i>8.1.1.4 Fuerza Aplicada Por El Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo</i>	80
<i>8.1.1.5 Calculó De Elemento Impulsor Del Sistema De Bombeo</i>	80
<i>8.1.2 Desplazamiento Lateral De La Parte Media Del Robot</i>	81
<i>8.1.2.1 Simulación Del Desplazamiento Lateral</i>	81
<i>8.1.2.2 Torques Experimentados Durante El Desplazamiento Lateral</i>	83
<i>8.1.2.3 Fuerzas Aplicadas A Los Eslabones Durante El Desplazamiento Lateral</i>	83
<i>8.1.2.4 Fuerza Aplicada Por El Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo</i>	84
<i>8.1.2.5 Calculó De Elemento Impulsor Del Sistema De Bombeo</i>	84
<i>8.1.3 Servomotores A Utilizar En El Sistema De Bombeo De La Parte Media</i>	85

8.2 <i>Parte Extrema Del Robot</i>	86
8.2.1 <i>Desplazamiento Frontal De La Parte Extrema Del Robot</i>	86
8.2.1.1 <i>Simulación Del Desplazamiento Frontal</i>	86
8.2.1.2 <i>Torques Experimentados Durante El Desplazamiento Frontal</i>	88
8.2.1.3 <i>Fuerzas Aplicadas A Los Eslabones Durante El Desplazamiento Frontal</i>	88
8.2.1.4 <i>Fuerza Aplicada Por El Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo</i>	89
8.2.1.5 <i>Calculo De Elemento Impulsor Del Sistema De Bombeo</i>	89
8.2.2 <i>Desplazamiento Lateral De La Parte Extrema Del Robot</i>	90
8.2.2.1 <i>Simulación Del Desplazamiento Lateral</i>	90
8.2.2.2 <i>Torques Experimentados Durante El Desplazamiento Lateral</i>	92
8.2.2.3 <i>Fuerzas Aplicadas A Los Eslabones Durante El Desplazamiento Lateral</i>	92
8.2.2.4 <i>Fuerza Aplicada Por El Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo</i>	93
8.2.2.5 <i>Calculo De Elemento Impulsor Del Sistema De Bombeo</i>	93
8.2.3 <i>Servomotores A Utilizar En El Sistema De Bombeo De La Parte Extrema</i>	94
8.3 <i>Diseño Del Actuador Hidráulico De Las Extremidades</i>	95
8.4 <i>Diseño Del Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo</i>	95
8.5 <i>Discusiones</i>	96
CAPÍTULO 9. Conclusiones	97
9.1 <i>Conclusiones Generales</i>	97
9.2 <i>Trabajos A Futuro</i>	98
<i>Referencias y Bibliografías</i>	99
<i>Apéndices</i>	101

Introducción

Hoy en día la robótica como disciplina ha crecido y existen una gran cantidad de robots, cada uno de un estilo totalmente diferente al otro. En la actualidad existe mucha información dentro del área de la robótica, se observa que las investigaciones dentro del área de robots caminantes parten desde hace varios años, en México es un área donde ya se ésta incursionando en la actualidad.

El desarrollo de la mayoría de estas máquinas caminantes ha concluido en máquinas muy grandes, pesadas y lentas como el AMBLER-CMU (figura 1.1) desarrollado en el Carnegie Mellon University, es un robot autónomo para la exploración de planetas, capaz de desplazarse con la ayuda externa mínima debido a sus características de peso y tamaño presentan problemas en aplicaciones prácticas. Por el contrario también se han diseñado máquinas muy pequeñas, las cuales presentan el inconveniente de que la carga útil que pueden soportar es muy pequeña como los robots insectos diseñados en el MIT. Por último se pueden encontrar máquinas de tamaño medio como el HAMLET desarrollado en la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda, los cuales pueden soportar una pequeña carga y no presentan el problema del tamaño.

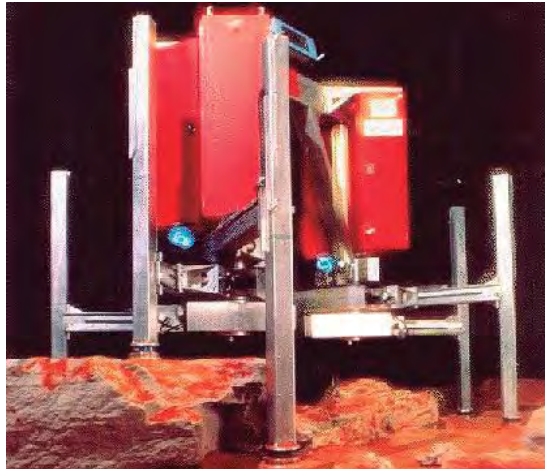


Figura 1.1 Robot AMBLER-CMU.

Una de las áreas de investigación en el desarrollo de los robots caminantes es el diseño mecánico, el cual interviene en el diseño de las patas y el diseño del cuerpo del robot. Para este caso se toman como ejemplos observaciones realizadas en la morfología de los insectos, con el fin de adquirir algunas de sus características (morfología, forma de desplazarse por terrenos irregulares, dimensiones, etc.).

Con el propósito de estudiar y adquirir experiencia en robots caminantes en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo se ésta trabajando en el desarrollo de robots caminantes el primero con el que se cuenta es un robot eléctrico desarrollado por un alumno de ingeniería en este trabajo se pretende profundizar en el estudio de los robots caminantes utilizando la hidráulica como parte del sistema motriz del mismo.

CAPÍTULO 1

1. Perspectiva Histórica

1.1 Antecedentes

A lo largo de toda la historia, el hombre se ha sentido fascinado por máquinas y dispositivos capaces de imitar las funciones y los movimientos de los seres vivos. Los griegos tenían una palabra específica para denominar a estas máquinas: automatos. De esta palabra deriva la actual autómatas: máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado.

La palabra **robot** fue usada por primera vez en el año 1921, cuando el escritor checo Karen Capek (1890-1938) estrenó en el teatro nacional de Praga su obra *Rossum's Universal Robot (R.U.R.)*. Su origen es la palabra eslava *robot*, que se refiere al trabajo realizado de manera forzada. Los robots de R.U.R. eran máquinas andróides fabricadas por un brillante científico llamado Rossum. Estos robots servían a sus jefes humanos desarrollando todos los trabajos físicos, hasta que finalmente se rebelan contra sus dueños, destruyendo toda la vida humana, a excepción de uno de sus creadores, con la frustrada esperanza de que les enseñe a reproducirse[1].

El término robot, posiblemente, hubiera caído en desuso si no hubiese sido por los escritores del género literario de la ciencia ficción, algunos de los cuales retomaron la palabra, e incluso el mensaje de la obra de Capek: la dominación de la especie humana por seres hechos a su propia imagen. Así, en 1926, Thea Von Harbou escribe *Metrópolis*, novela posteriormente llevada al cine por su marido Fritz Lang, en donde la masa obrera de una sociedad súper industrializada es manipulada por un líder androide llamado María.

En ciencia ficción las tres leyes de la robótica son un conjunto de normas escritas por Isaac Asimov, que la mayoría de los robots de sus novelas y cuentos están diseñados para cumplir. En ese universo, las leyes son "formulaciones matemáticas impresas en los senderos positrónicos del cerebro" de los robots (lo que hoy se llamaría ROM). Aparecidas por primera vez en el relato Runaround (1942), establecen lo siguiente [2]:

1. Un robot no debe dañar a un ser humano o, por su inacción, dejar que un ser humano sufra daño.
2. Un robot debe obedecer las órdenes que le son dadas por un ser humano, excepto si estas órdenes entran en conflicto con la Primera Ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, hasta donde esta protección no entre en conflicto con la Primera o la Segunda Ley.

Esta redacción de las leyes es la forma convencional en la que los humanos de las historias las enuncian; su forma real sería la de una serie de instrucciones equivalentes y mucho más complejas en el cerebro del robot.

1.1.1 Origen y Desarrollo De La Robótica

Los primeros dispositivos que responden al que hoy se conoce como robot, no adoptaron inicialmente esta denominación. Los predecesores más directos de los robots fueron los manipuladores teleoperados (Figura 1.2). En 1948 R. C. Goertz del *Argonne National Laboratory* desarrolló, con el objetivo de manejar elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer sistema de telemanipulación. Éste consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo. El manipulador maestro, situado en la zona segura, era movido directamente por el operador, mientras que el esclavo, situado en contacto con los elementos radioactivos y unido mecánicamente al maestro, reproducía fielmente los movimientos de éste. El operador además de poder observar a través de un grueso cristal el resultado de sus acciones, sentía a través del dispositivo maestro las fuerzas que el esclavo ejercía sobre el entorno.

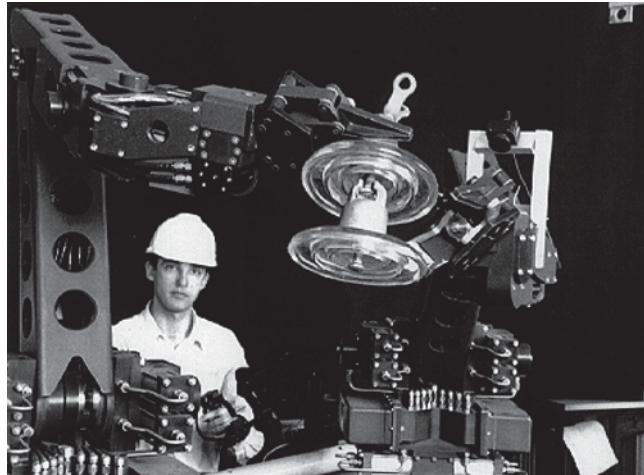


Figura 1.2 Sistema de telemanipulación bilateral.

Años más tarde, en 1954, Goertz hizo uso de la tecnología electrónica y del servocontrol sustituyendo la transmisión mecánica por otra eléctrica y desarrollando así el primer sistema de telemanipulación con servocontrol bilateral. Junto a la industria nuclear, a lo largo de los años sesenta la industria submarina comenzó a interesarse por el uso de los telemanipuladores. A este interés se sumó la industria espacial en los años setenta.

La sustitución del operador por un programa de ordenador que controlase los movimientos del manipulador dio paso al concepto de robot, espoleado por las necesidades de automatización de las cadenas de fabricación.

La primera patente de un dispositivo robótico fue solicitada en marzo de 1954 por el inventor británico C. W. Kenward. Dicha patente fue emitida en el Reino Unido en 1957 con el número 781.465. Sin embargo, fue George C. Devol, ingeniero norteamericano, inventor y autor de varias patentes, el que estableció las bases del robot industrial moderno.

1.1.2 Clasificación De Los Robots

Definición de robot:

Robot según el Diccionario de la Real Academia de la lengua Española: Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas sólo a las personas.

Clasificación de los robots:

Robot Industrial: Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

Robots de servicio: Un robot que opera de manera semi o totalmente autónoma para realizar servicios útiles a los humanos y equipos, excluidas las operaciones de manufactura.

Robot Teleoperado (ISO): Un robot que puede ser controlado remotamente por un operador humano, extendiendo las capacidades sensoriales y motoras de éste a localizaciones remotas.

Telerobot: cualquier robot cuya tarea pueda ser monitorizada y reprogramada a distancia por el humano.

Cobot: Dispositivo que manipula objetos en colaboración física directa con él.

Robot móvil: Robot que contiene todo lo necesario para su pilotaje y movimiento.

1.1.3 Robótica Móvil

En la actualidad los robots móviles se sirven de diferentes enfoques de locomoción, entre los que se pueden apreciar los siguientes:

Enfoque biológico: busca concebir un sistema locomotor basado en características propias de organismos vivos, aprovechando las ventajas que éstas puedan obtener de cada caso determinado. Un ejemplo de esto lo constituyen el trabajo de Kingsley en (cockroach-like robots, 2003) un robot tipo cucaracha entre tantos otros [3].

Enfoque aplicativo: trata de encontrar una solución efectiva, tratando de optimizar algún aspecto del diseño. Este enfoque es más común en aplicaciones industriales y comerciales. Algunos ejemplos son los desarrollos de la NASA en exploración planetaria, y la máquina caminante adelantada por Plustech [4], la cual se adapta satisfactoriamente al terreno selvático.

Enfoque inovativo: Éste enfoque está orientado a la investigación, trata de enriquecer las estrategias de locomoción explorando métodos poco convencionales.

Como resultado de los diferentes enfoques, en la actualidad existen una gran cantidad de aplicaciones robóticas móviles, que pueden agruparse de acuerdo con el tipo de mecanismo de locomoción que utilizan:

Patas: Son producto del enfoque biológico. Sus ventajas, entre otras, son la adaptabilidad al terreno y la posibilidad de omnidireccionalidad. Se encuentra una gran variedad de diseños y aplicaciones, comerciales (robot Aibo de Sony [5] y el robot bípedo de Honda Asimo [6]), industriales, exploratorias, entre otras. Debe ser destacado el robot Nao que será la nueva plataforma bípeda oficial de la RoboCup [7] (figura 1.3)



Figura 1.3 Robot Bípedo, Nao, 2008.

Ruedas: La rueda es un método altamente probado (figura 1.4), que presenta una gran cantidad de ventajas y es muy eficiente en superficies homogéneas poco inclinadas.



Figura 1.4 Robot con ruedas, Rover 400, 2007.

Híbridos: Algunos métodos utilizan combinaciones entre ruedas y patas como las del robot Roller-Walker (figura 1.5). Otros son adaptaciones que han resultado convenientes para algún tipo de terreno o alguna aplicación.



Figura 1.5 Robot Híbrido Roller-Walker.

Robots Voladores: se trata de un tipo especial ya que suelen ser robots teleoperados más orientados a la aeronáutica que a la robótica (figura 1.6).

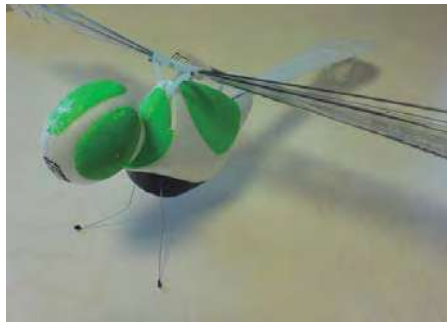


Figura 1.6 Robot volador tipo libélula.

1.1.4 Robótica Caminante

El primer documento de un mecanismo andador aparece sobre 1870 basado en mecanismos de cuatro barras y fue inventado por el Ruso P. L. Chebyshev en un intento por imitar un mecanismo andador de la naturaleza [8].

Basados en el número de patas que tiene el robot, serán bípedos como los humanos o los pájaros, cuadrúpedos como los reptiles y los mamíferos, hexápodos como los insectos y octópodos como las arañas. Robots con una pata [9] (Raibert's hopper 1986, MIT Leg Laboratory), con tres patas (OSU Triped 2005, Berns), con cinco patas (Hitachi hybrid robot 1985, Todd.), ocho patas (ReCUS 1983, Ishino et al.) o más patas (Zykov et al., 2004) es poco usual pero no imposible [8].

Los robots caminantes presentan las siguientes ventajas sobre los que utilizan orugas o ruedas:

Movilidad: Los robots con patas exhiben mayor movilidad que los que utilizan ruedas por que poseen intrínsecamente mecanismos de dirección omnidireccional. Esto significa que pueden cambiar de dirección sobre el eje principal del cuerpo tan sólo moviendo sus apoyos.

También pueden girar sobre los ejes de su cuerpo sin necesidad de levantar las patas apoyadas con sólo mover sus articulaciones, es decir puede rotar su cuerpo, inclinarlo y cambiar de posición (figura 1.7).

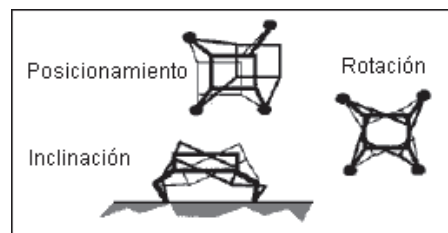


Figura 1.7 Movilidad.

Superación de obstáculos: Un robot con patas puede superar obstáculos que estén a baja altura en comparación con el tamaño del robot. Donde un robot con ruedas quedaría atascado si el tamaño del obstáculo fuera mayor que el radio de la rueda (figura 1.8).



Figura 1.8 Superación de obstáculos.

Suspensión activa: Intrínsecamente un robot con patas posee suspensión por adaptación mediante la variación de la altura de su cuerpo con la posición de sus patas a un terreno irregular. De esta manera su movimiento puede ser más suave que un robot con ruedas pues éste último siempre estará paralelo al suelo adoptando posiciones similares al relieve del terreno (figura 1.9).



Figura 1.9 Suspensión activa.

Eficiencia Energética: Se ha vertido mucha tinta respecto a este tema pero fue Bekker quien probó la teoría que un robot con patas sería más eficiente energéticamente que uno con ruedas en un terreno altamente irregular.

Terreno Natural o Terreno discontinuo: Los robots con ruedas requieren una superficie continua para desplazarse de manera eficiente (figura 1.10). En un principio los robots con patas no requieren un terreno continuo y pueden desplazarse por terrenos arenosos, fangoso, escarpado y liso.



Figura 1.10 Terreno discontinuo.

Deslizamientos: Una rueda se puede deslizar en una superficie por motivos de adherencia (figura 1.11), las patas de un robot suelen depositar el peso del robot de forma directa sobre el suelo y las posibilidades de que resbale son menores.

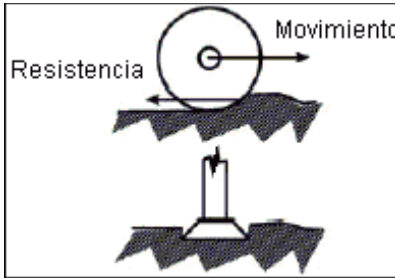


Figura 1.11 Deslizamientos.

Daño medioambiental: las ruedas erosionan la superficie de la tierra cuando derrapan y la dejan desprotegida. Los robots con patas no desgarran la tierra de este modo, ya que se posan sobre ésta de forma puntual y discreta.

Velocidad: Un robot con patas puede superar pequeños obstáculos manteniendo la velocidad del cuerpo constante con un movimiento uniforme y rectilíneo si fuera necesario (figura 1.12).

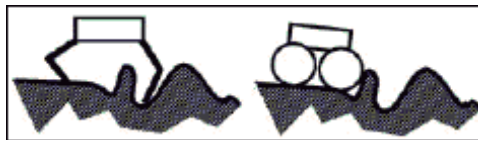


Figura 1.12 Velocidad.

Por supuesto los robots con patas no son la solución general a la locomoción robótica. Presentan una serie de problemas y desventajas que los han mantenido fuera de uso industrial y de servicios. El primer problema es la complejidad, los robots con patas son más complejos que los que utilizan ruedas sobre todo en lo referente a electrónica y control.

A continuación se describirán las desventajas:

Mecánica: La rueda es un mecanismo extremadamente sencillo sin embargo una pata consiste en varios enlaces y articulaciones. Una pata requiere al menos tres actuadores para proveerla de dirección y tracción, y permitir un movimiento completo. Un robot caminante con equilibrio estático requiere al menos cuatro patas, por lo tanto el número mínimo de actuadores para un robot caminante es de doce.

Electrónica: Cada articulación del robot está asociada a un controlador y debe ser controlada de manera individual. Por lo que los robots caminantes requieren más sensores que un robot con ruedas dado que las ruedas están en todo momento en contacto con el suelo esto significa que en los robots con patas se debe implementar algún mecanismo que permita determinar cuándo una pata está en contacto con el suelo.

Algoritmos de control: Un robot caminante debe coordinar la posición de todas sus articulaciones para realizar cualquier movimiento por lo que un robot caminante es sin duda más complejo que un robot con ruedas o con orugas.

Velocidad máxima: Un mecanismo de locomoción por ruedas en superficie terrestre puede alcanzar una velocidad máxima conocida de 1.228 Km/h alcanzada por el Thrust SSC, 1997 [10], que es por mucho más rápido que cualquier robot caminante.

Costo: el costo total de cualquier sistema suele ser siempre proporcional a su complejidad. Por tanto un sistema robótico de locomoción por patas será más caro que un sistema de locomoción por ruedas.

Una vez conocidas las ventajas y desventajas de los robots caminantes surge la siguiente cuestión, el número de patas.

Octópodos: son muy rápidos puesto que pueden mantener cuatro patas apoyadas mientras avanzan las otras cuatro. Son muy estables pues podrían mantener hasta siete patas apoyadas y realizar avances de una en una. Podrían cargar con más peso pues queda distribuido en muchas patas.

Desventajas, tantas patas son redundantes, se incrementa el consumo, la complejidad de los algoritmos y requieren más baterías. Todos estos factores confluyen en el mismo problema crítico, el incremento del costo.

Hexápodos: más rápidos que los cuadrúpedos y los bípedos pero menos que los octópodos. Presentan las mismas características que un octópodo pero con dos patas menos, con todo lo que ello conlleva en cuando a reducción de estabilidad y costos.

Cuadrúpedos: Son los más recomendables pues la estabilidad que presentan mientras caminan es muy superior a la de los bípedos y tan solo un poco inferior a la de los hexápodos y octópodos dado que utilizan tres patas como apoyo mientras realizan el avance de una de las patas. Su velocidad es muy inferior a la de estos dos pero su costo es más reducido.

Bípedos: presentan muy poca estabilidad dado que deben apoyar todo su peso sobre una sola pata mientras realizan el avance de la otra de este modo al cargar todo su peso sobre una sola pata se reduce notablemente su autonomía.

1.2 Justificación

La justificación del diseño de un robot caminante electro-hidráulico se basa en tres características principales:

Los robots de patas presentan mayor versatilidad a todo tipo de terreno a diferencia de los robots móviles dotados de ruedas u orugas.

La hidráulica presenta mayor potencia por unidad de peso de los actuadores a diferencia de los motores eléctricos, además debido a la incompresibilidad del fluido es fácilmente controlable la posición de las articulaciones no así con los cilindros neumáticos.

Se requiere el robot caminante electro-hidráulico como una herramienta para probar algoritmos y técnicas de control y navegación autónoma.

1.3 Objetivo

Diseñar un robot caminante con base en un mecanismo electro-hidráulico que pueda desplazarse de forma similar a un robot eléctrico.

1.3.1 Objetivos Específicos

- 1.- Diseñar una morfología que sea lo más compacta posible.
- 2.- Diseñar un sistema de actuación electro-hidráulica aplicable al accionamiento de las articulaciones de las extremidades de un robot caminante.
- 3.- Diseñar un robot caminante con al menos 4 patas implementando los sistemas de actuación mencionados.

1.4 Hipótesis

Es posible diseñar un robot caminante electro-hidráulico con al menos las mismas capacidades y virtudes de un robot eléctrico que pueda desplazarse por terrenos irregulares y un poco inclinados.

CAPÍTULO 2

2. Morfología

2.1 Características Morfológicas

A continuación se describen las principales características propias de los robots y se proporcionan valores concretos de las mismas, para determinados modelos y aplicaciones.

2.1.1 Grados De Libertad

Son los parámetros que se precisan para determinar la posición y la orientación de los elementos que conforman al robot para que éste pueda desplazarse. También se pueden definir los grados de libertad, como los posibles movimientos básicos (giratorios y de desplazamiento lineal) independientes.

El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento lineal, de giro, o de una combinación de ambos. Hace posible conseguir los seis diferentes tipos de articulaciones las cuales son: esférica, planar, tornillo, prismática, rotación y cilíndrica (figura 2.1). Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina grado de libertad.

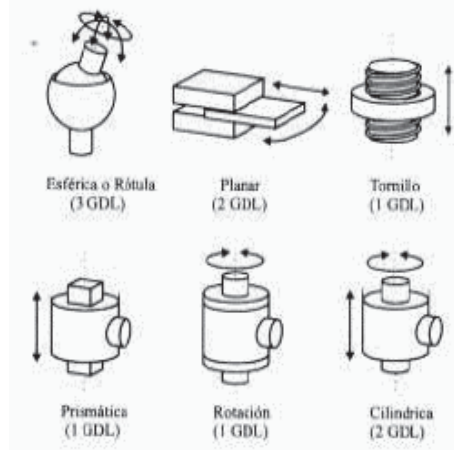


Figura 2.1 Tipos de articulaciones

El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen. Un mayor número de grados de libertad conlleva un aumento de la flexibilidad en el posicionamiento del robot. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio de 6 parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación, se precisara al menos de 6 grados de libertad [11].

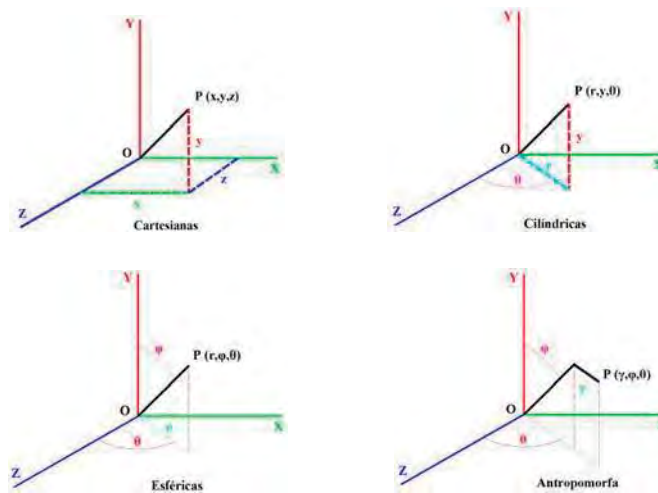
En la práctica, a pesar de ser necesarios los seis grados de libertad comentados para tener total libertad en el posicionado y orientación del extremo del robot, muchos robots industriales cuentan con sólo 4 ó 5 grados de libertad, por ser estos suficientes para llevar a cabo las tareas que se encomiendan.

Existen también casos opuestos, en los que se precisan más de 6 grados de libertad para que el robot pueda tener acceso a todos los puntos de su entorno. Así, si se trabaja en un entorno con obstáculos, el dotar al robot con más grados de libertad le permitirá acceder a posiciones y orientaciones de su extremo a las que, como consecuencia de los obstáculos, no hubieran llegado con 6 grados de libertad. Otra situación frecuente es dotar al robot de un grado de libertad adicional que le permita desplazarse a lo largo de un carril aumentando así el volumen de su espacio al que puede acceder.

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación.

2.1.2 Coordenadas De Los Movimientos

La estructura del robot y la relación entre sus elementos proporciona una configuración mecánica, que da origen al establecimiento de los parámetros que hay que conocer para definir la posición y orientación de los elementos que lo conforman durante el desplazamiento de éste. Fundamentalmente, existen cuatro estructuras clásicas que se relacionan con los correspondientes modelos de coordenadas en el espacio (figura 2.2).



2.2 Sistemas de Coordenadas

2.1.3 Articulaciones Entre Los Elementos Del Robot

Los tipos de la unión Típicos son:

Rotación - Unión rotatoria a menudo manejada por los motores eléctricos y cadena, ó por los cilindros hidráulicos y palancas.

Prismático - Unión del deslizador en que el eslabón se apoya en un deslizador lineal, y linealmente actúa por los tornillos de bolas y motores o cilindros.

Las configuraciones Básicas son (Figura 2.3):

Cartesiano / Rectilíneo - El posicionando se hace en el espacio de trabajo con las uniones prismáticas. Esta configuración se usa cuando un espacio de trabajo es grande.

Cilíndrico - El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una unión prismática para la altura, y una unión prismática para el radio. Este robot satisface bien a los espacios de trabajo redondos.

Esférico - Dos uniones de rotación y una unión prismática permiten al robot apuntar en muchas direcciones, y entonces extiende la mano a un poco de distancia radial.

Articulado / Articulado Esférico / Rotación - El robot usa 3 uniones de rotación para posicionar el robot. Generalmente el volumen de trabajo es esférico. Estos tipos de robots, la mayoría se parecen al brazo humano, con una cintura, el hombro, el codo, la muñeca.

Scara (el Brazo de Complacencia Selectivo para el ensamble) - Este robot conforma a las coordenadas cilíndricas, pero el radio y la rotación se obtiene por un o dos eslabones del planar con las uniones de rotación.

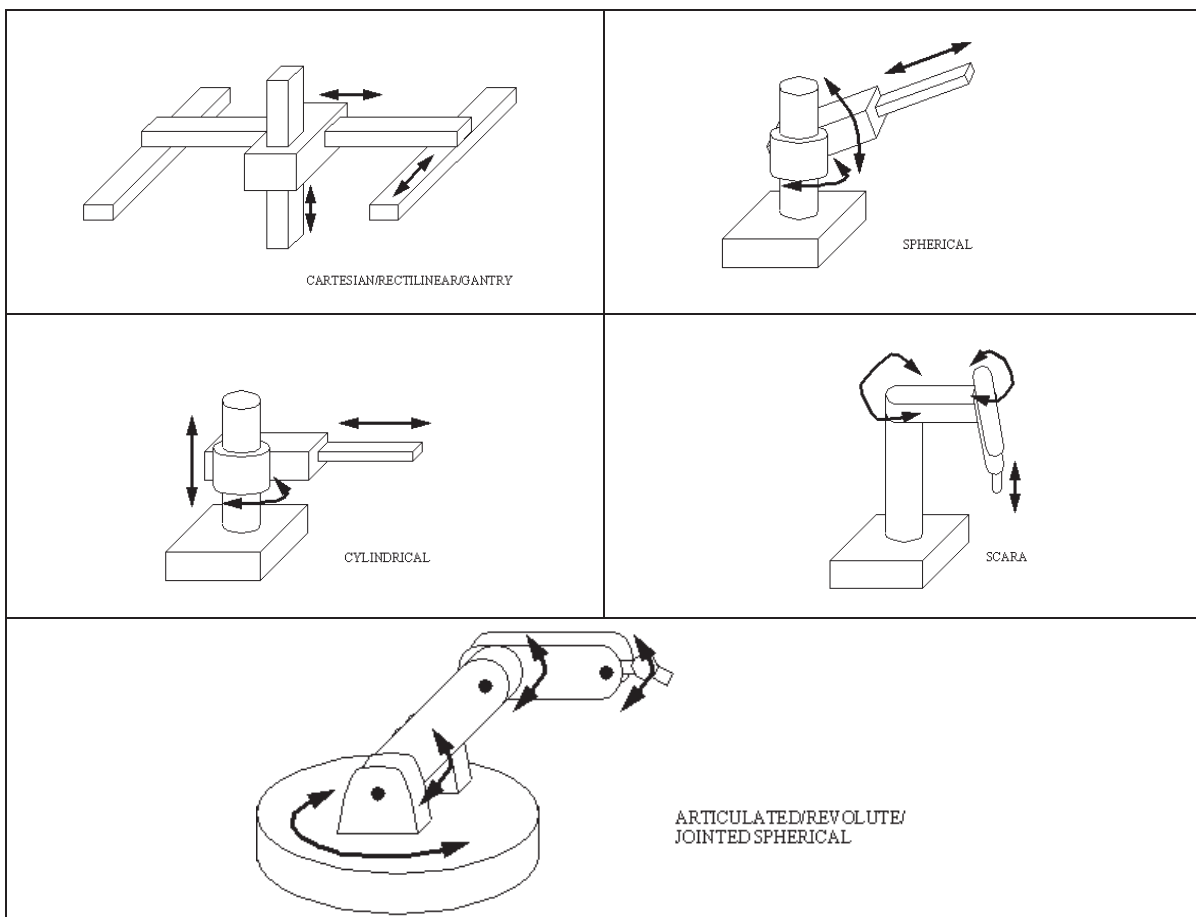


Figura 2.3 Configuraciones básicas de las uniones

2.2 Componentes Básicos De Un Robot

Los componentes básicos de un robot son:

La estructura - La estructura mecánica (los eslabones, base, etc.). Esto exige mucha masa, para proporcionar la rigidez estructural necesaria para asegurar la exactitud mínima bajo las cargas útiles variadas.

Actuadores - Los motores, los cilindros, etc., que permiten el movimiento de las uniones del robot. Esto también podría incluir los mecanismos para una transmisión.

Control - Éste permite la interacción entre el usuario y los actuadores del robot para una fácil manipulación de éste último.

2.2.1 Estructura Mecánica Del Robot

El robot que se planea diseñar cuenta con 21 eslabones y 20 grados de libertad como se muestra en la figura 2.4, esta dividido en tres secciones cada una individual, cuenta con un pistón hidráulico como sistema de accionamiento en cada una de las patas las cuales estarán fabricadas en aluminio y el cuerpo estará fabricado en policarbonato debido a sus características de peso y resistencia, el sistema de bombeo ésta compuesto por un servomotor conectado a un pistón hidráulico mediante un mecanismo biela-manivela.

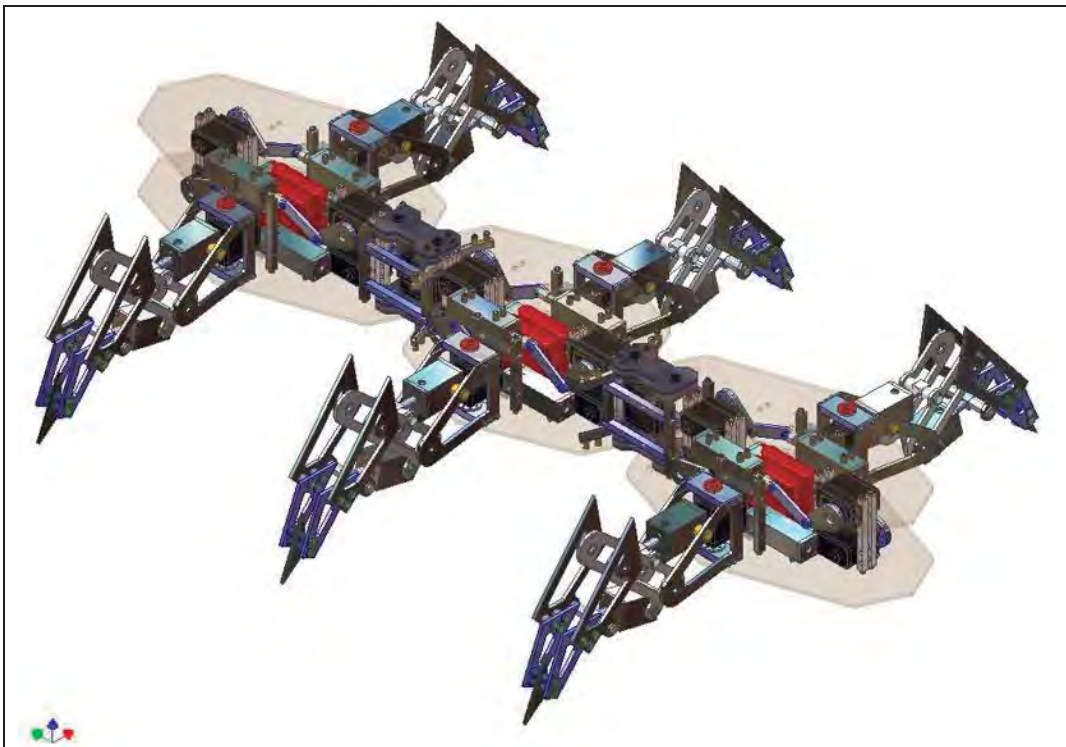
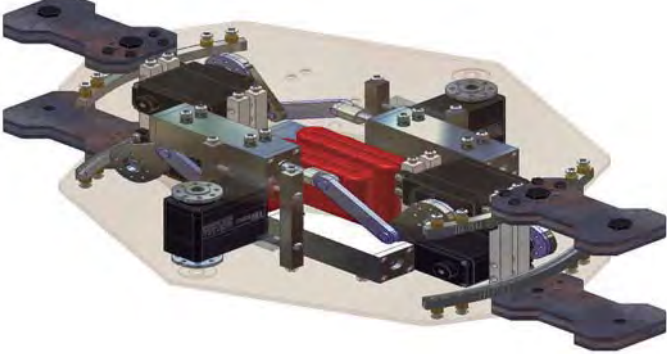
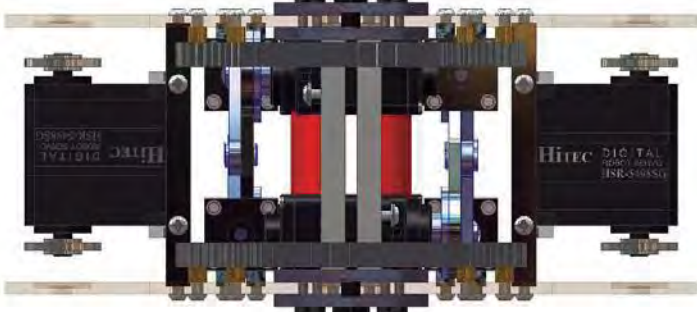
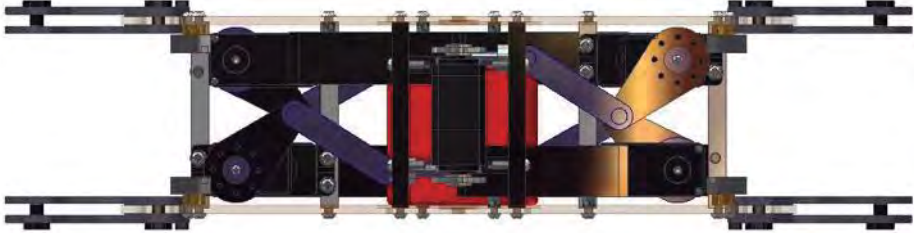
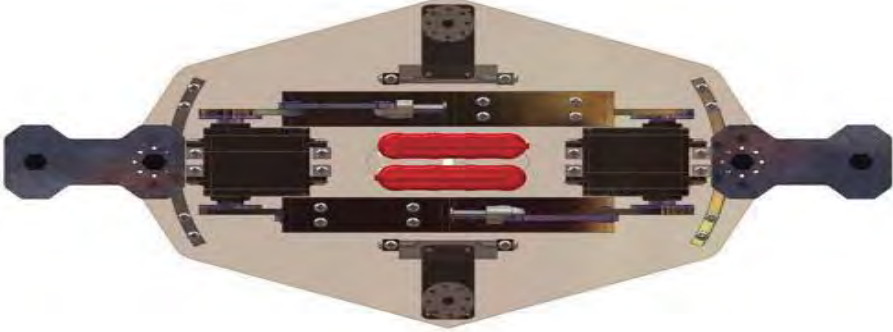


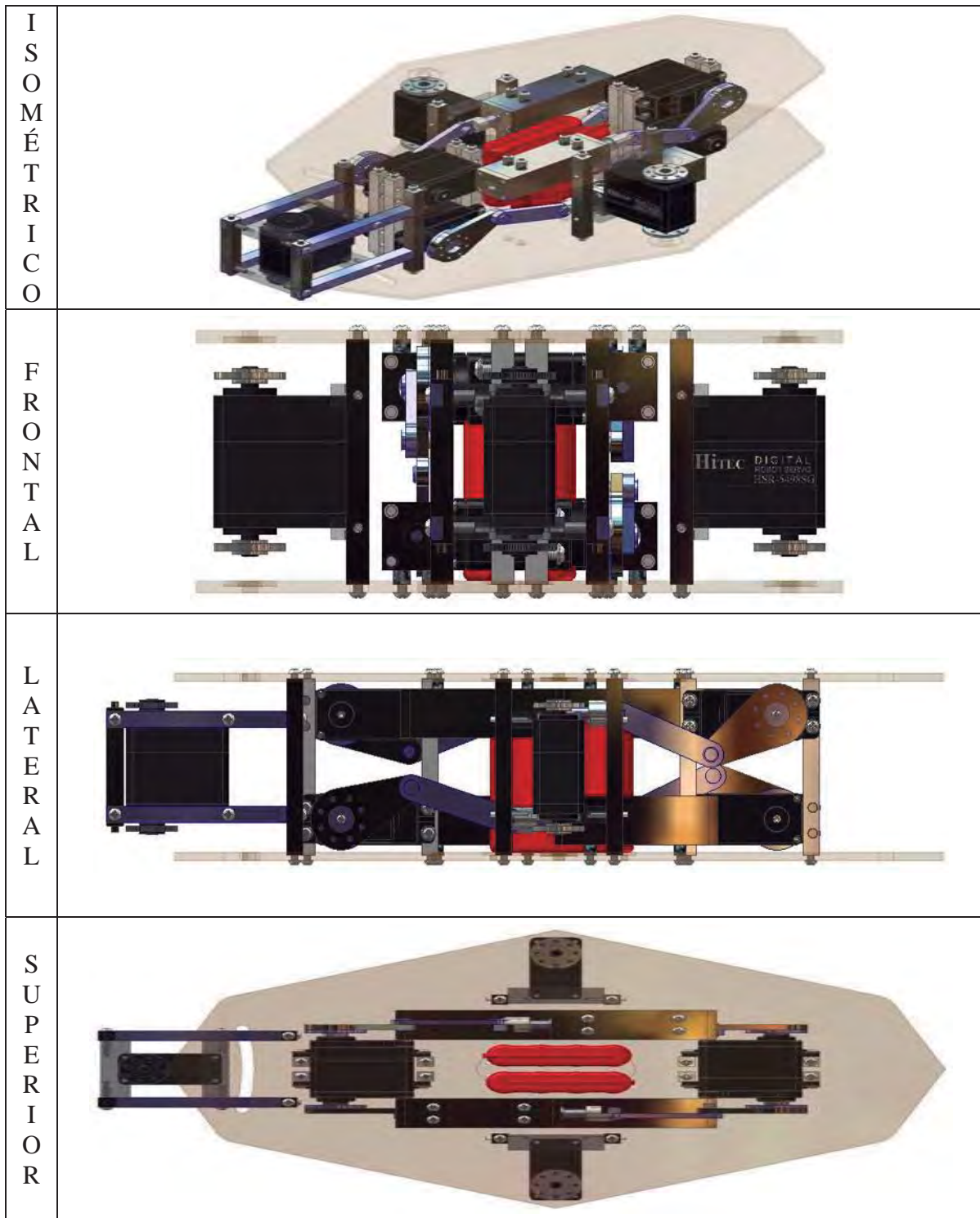
Figura 2.4 Robot caminante electro-hidráulico

A continuación se muestran la morfología de cada uno de los elementos que conforman al robot.


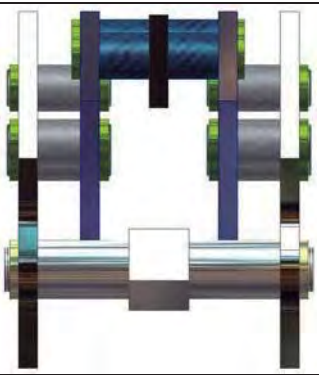

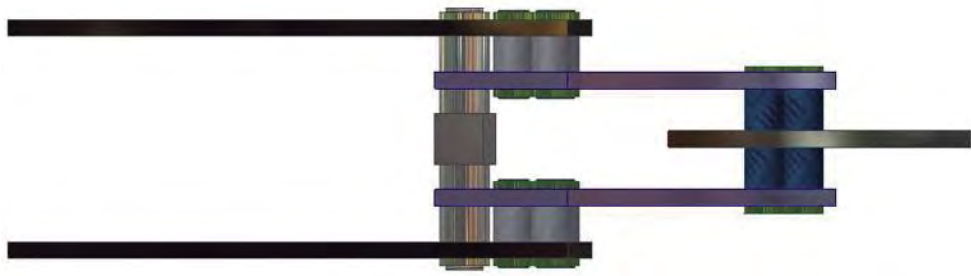
Eslabón medio del cuerpo del robot.

I S O M É T R I C O	 An isometric view of the middle robot body link assembly. It shows a central red component, likely a motor or actuator, mounted on a black metal frame. The assembly is supported by a light-colored, octagonal base plate. Various mechanical parts, including gears, bearings, and structural brackets, are visible, showing the complex internal structure of the link.
F R O N T A L	 A frontal view of the middle robot body link assembly. Two black Hitrc Digital Servo Motors (HSR-5055L) are prominently featured on either side of the central mechanism. The central part shows a red component and various mechanical linkages. The assembly is mounted on a light-colored base plate.
L A T E R A L	 A lateral view of the middle robot body link assembly. This view highlights the side profile of the mechanism, showing the arrangement of the two servo motors and the central red component. The light-colored base plate is visible at the bottom, and various structural elements and linkages are shown in detail.
S U P E R I O R	 A superior view of the middle robot body link assembly. This view shows the top-down layout of the mechanism, clearly displaying the two red components in the center. The black metal frame and the light-colored base plate are visible, along with the mounting points for the servo motors and other mechanical parts.

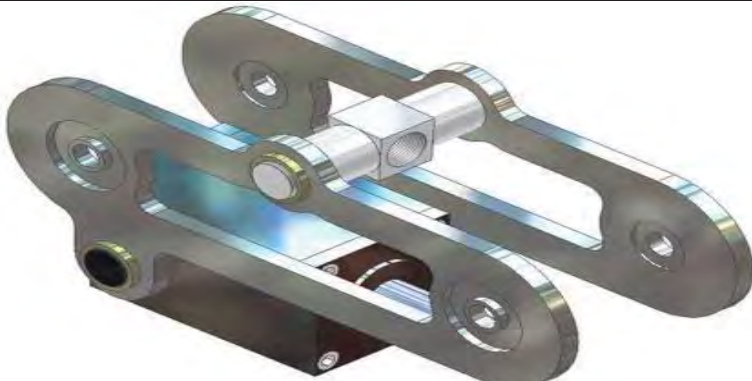
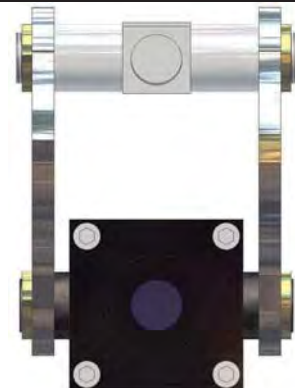
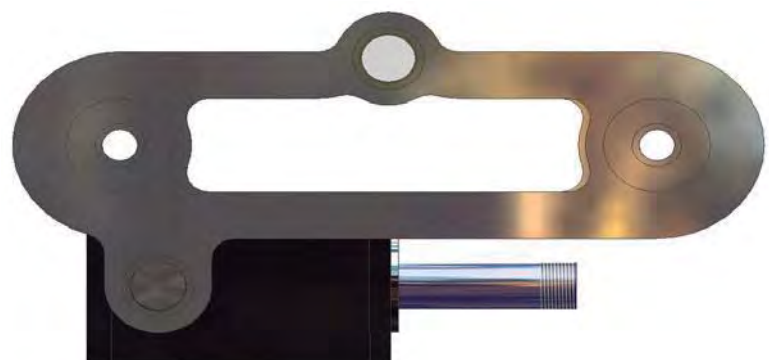
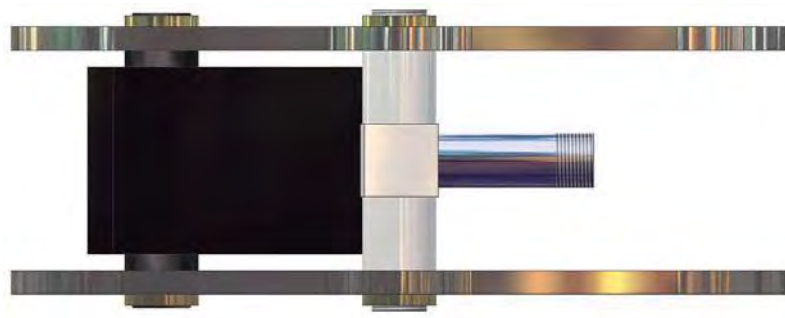
Eslabón extremo del cuerpo del robot.



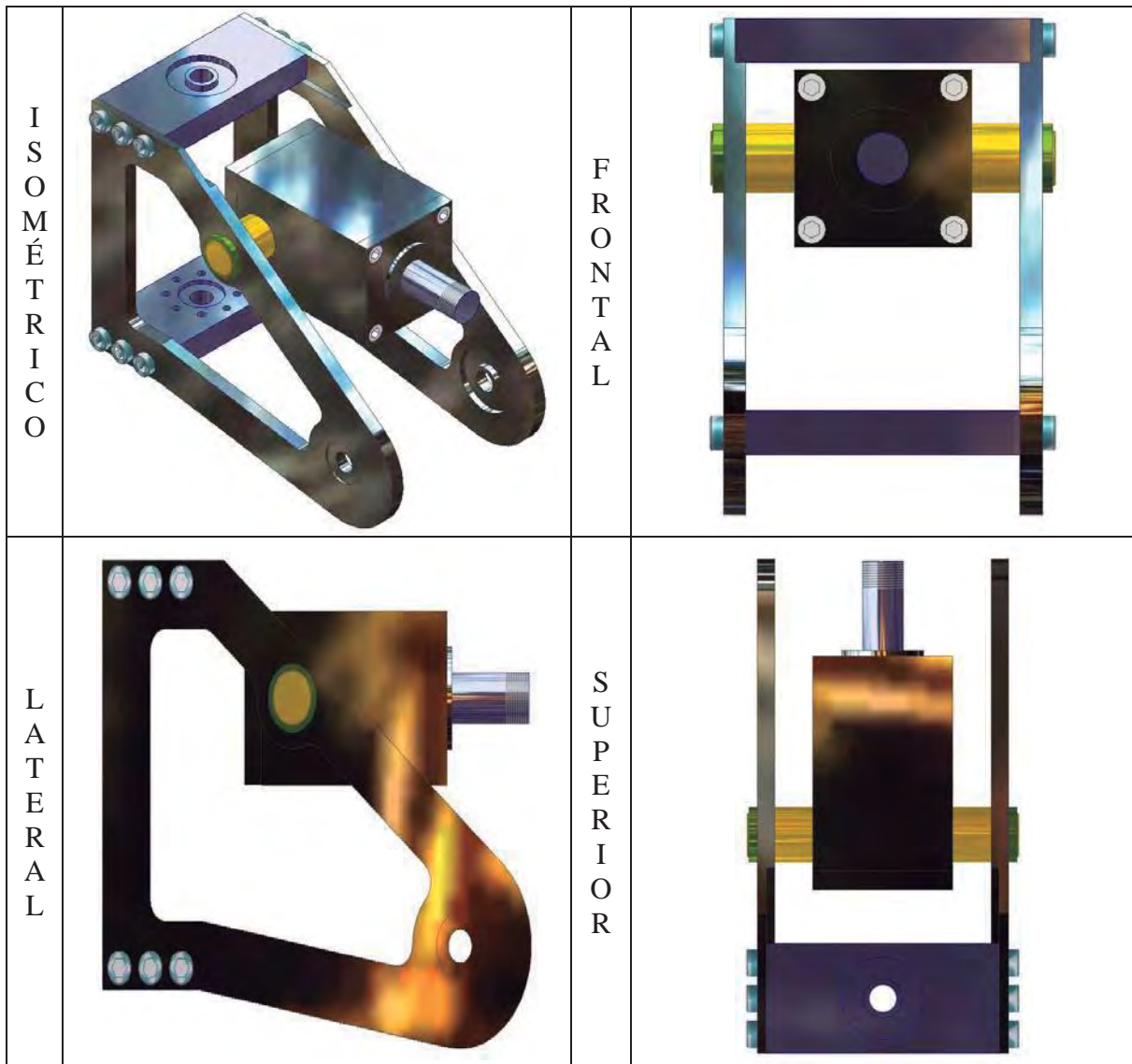
Eslabón Terminal o de apoyo de la pata.

I S O M É T R I C O	 An isometric view of a mechanical terminal link assembly. It consists of several interconnected metal plates and rods. The assembly is shown in a perspective view, highlighting its three-dimensional structure. The components are rendered in various colors: purple, blue, and grey, with some parts having a metallic sheen. The assembly appears to be a complex linkage mechanism, possibly part of a prosthetic or a specialized mechanical system.
F R O N T A L	 A frontal view of the mechanical terminal link assembly. This view shows the assembly from a perspective that emphasizes its vertical and horizontal dimensions. It reveals the arrangement of rods and plates, showing how they are connected and supported. The central part of the assembly is particularly prominent, showing a complex arrangement of components.
L A T E R A L	 A lateral view of the mechanical terminal link assembly. This view shows the assembly from the side, highlighting its profile and the arrangement of its components. The view shows a long, thin structure with several circular features, possibly joints or rollers, along its length. The overall shape is somewhat triangular, tapering towards one end.
S U P E R I O R	 A superior view of the mechanical terminal link assembly. This view shows the assembly from above, providing a clear view of its top surface and the arrangement of its components. The view shows a complex arrangement of rods and plates, with several circular features visible. The overall shape is somewhat rectangular, with a central section that is wider than the ends.

Eslabón medio de la pata.

I S O M É T R I C O	 An isometric 3D rendering of a mechanical assembly. It features a central cylindrical shaft with a square-sectioned component in the middle. Two metal links are attached to the shaft, each having a circular end with a hole. The links are positioned symmetrically around the central shaft.
F R O N T A L	 A frontal 2D view of the assembly. It shows the central shaft and square component at the top, with two vertical links extending downwards. At the bottom, a black square base is visible with four small circular features.
L A T E R A L	 A lateral 2D view of the assembly. It shows the profile of the links and the central shaft. The links have a curved, hook-like shape. A threaded shaft is visible extending from the bottom right.
S U P E R I O R	 A superior 2D view of the assembly. It shows the top-down layout of the links and the central shaft. The links are horizontal, and the central shaft is vertical. A threaded shaft is visible extending from the right side.

Eslabón inicial o de rotación de la pata.



CAPÍTULO 3

3. Cinemática

La cinemática estudia el movimiento de los cuerpos con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial de un cuerpo como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del cuerpo con los valores que toman sus coordenadas articulares (Figura 3.1). Existen dos problemas fundamentales para resolver la cinemática de un cuerpo, el primero de ellos se conoce como el problema cinemático directo, y consiste en determinar cual es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del cuerpo; el segundo denominado problema cinemático inverso resuelve la configuración que debe adoptar el cuerpo para una posición y orientación del extremo conocidas [11].

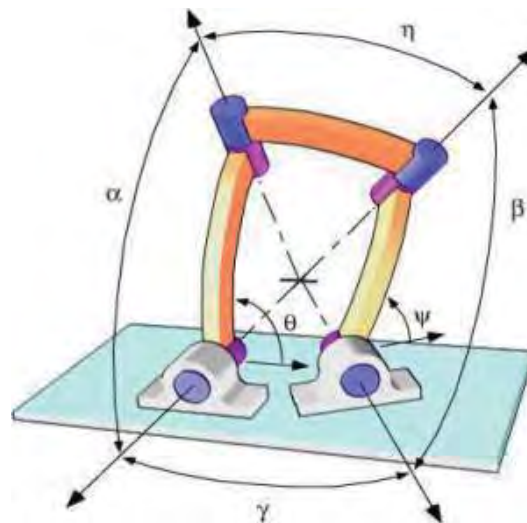


Figura 3.1 Posición y orientación de las coordenadas.

Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático para descubrir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza una matriz de transformación homogénea para descubrir la relación espacial entre dos elementos rígidos adyacentes, reduciéndose el problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea que relacione la localización espacial del robot con respecto al sistema de coordenadas de su base.

Diagrama entre cinemática directa e inversa.		
Valor de las coordenadas Articulares ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$)	Cinemática directa →	Posición y orientación del extremo del robot (x, y, z)
	← Cinemática inversa	

3.1 Cinemática Directa

Se utiliza fundamentalmente el álgebra vectorial y matricial para representar y describir la localización de un objeto en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo. Dado que un robot puede considerarse como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia. De esta forma, el problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación T que relacione la posición y orientación del extremo del robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo. Esta matriz T será función de las coordenadas articulares.

3.1.1 Solución Del Problema Cinemático Directo Mediante Matrices De Transformación Homogénea

La solución del problema cinemático directo consiste en encontrar las relaciones que permiten conocer la localización espacial del extremo del robot a partir de los valores de sus coordenadas articulares.

$$\{i\} = \{\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i\} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

En general, un robot de “ i ” grados de libertad está formado por “ j ” eslabones unidos por “ k ” articulaciones, de forma que cada par articulación-eslabón constituye un grado de libertad (figura 3.2). A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia solidario a él y utilizando las transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot.

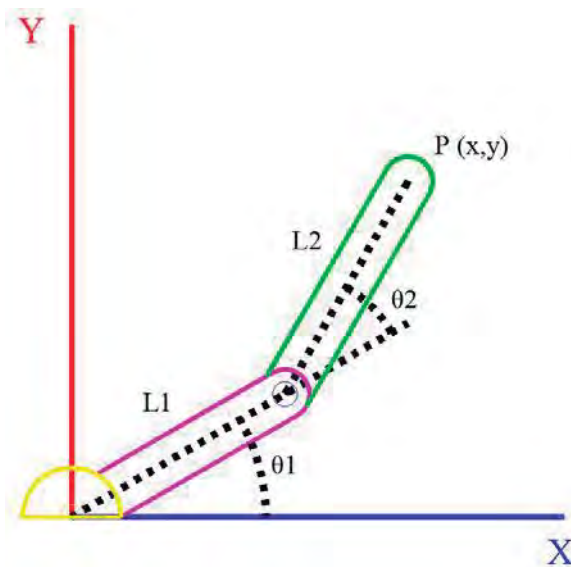


Figura 3.2 Robot planar de 2 grados de libertad.

Normalmente, la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos del robot se le suele denominar T^{i-1}_i .

$${}^{i-1}\{T\}_i = \{R^{i-1}_i, {}^{i-1}P_{org_i}\} \quad (3.1)$$

R^{i-1}_i es la orientación relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos.

${}^{i-1}P_{org_i}$ es la posición relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos.

$$R^{i-1}_i = ({}^{i-1}\hat{X}_i \quad {}^{i-1}\hat{Y}_i \quad {}^{i-1}\hat{Z}_i) = \begin{bmatrix} \hat{X}_i \bullet \hat{X}_{i-1} & \hat{Y}_i \bullet \hat{X}_{i-1} & \hat{Z}_i \bullet \hat{X}_{i-1} \\ \hat{X}_i \bullet \hat{Y}_{i-1} & \hat{Y}_i \bullet \hat{Y}_{i-1} & \hat{Z}_i \bullet \hat{Y}_{i-1} \\ \hat{X}_i \bullet \hat{Z}_{i-1} & \hat{Y}_i \bullet \hat{Z}_{i-1} & \hat{Z}_i \bullet \hat{Z}_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Así pues, T^0_1 describe la posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón con respecto al sistema de referencia solidario a la base, T^1_2 describe la posición y orientación del segundo eslabón respecto del primero, etc. Del mismo modo, denominando T^0_k a las matrices resultantes del producto de las matrices T^{i-1}_i con i desde 1 hasta k , se puede representar de forma total o parcial la cadena cinemática que forma el robot.

Cuando se consideran todos los grados de libertad, a la matriz T^0_n se le suele denominar T . Así, dado un robot de seis grados de libertad, se tiene que la posición y orientación del eslabón final vendrá dada por la matriz T :

$$T = T^0_n = (T^0_1)(T^1_2)(T^2_3)(T^3_4)(T^4_5)\dots(T^{n-1}_n) \quad (3.3)$$

Aunque para descubrir la relación que existe entre dos elementos contiguos se puede hacer uso de cualquier sistema de referencia ligado a cada elemento, la forma habitual que se suele utilizar en robótica es la representación de Denavit-Hartenberg.

Denavit-Hartenberg propusieron en 1955 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas (S_i) ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

Según la representación Denavit-Hartenberg, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados para cada eslabón, será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permitan relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema del elemento $i-1$. Las transformaciones en cuestión son las siguientes:

1. Rotación sin traslación alrededor del eje Z_i , $\|\theta_i\|$.
2. Traslación sin rotación a lo largo de d_i .
3. Traslación sin rotación a lo largo de a_{i-1} .
4. Rotación sin traslación alrededor del eje X_{i-1} , $\|\alpha_{i-1}\|$.

Dado que el producto de matrices no es conmutativo, las transformaciones se han de realizar en el orden indicado. De este modo se tiene que:

$$T_i^{i-1} = T(z_i, \theta_i) T(0,0,d_i) T(a_i,0,0) T(x_{i-1}, \alpha_{i-1}) \quad (3.4)$$

Y realizando el producto de matrices:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_{i-1} & -S\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & S\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_{i-1}S\theta_i & S\alpha_{i-1}S\theta_i & a_{i-1}C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_{i-1}C\theta_i & -S\alpha_{i-1}C\theta_i & a_{i-1}S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De este modo, basta con identificar los parámetros θ_i , a_{i-1} , d_i , α_{i-1} , para obtener matrices T y relacionar así todos y cada uno de los eslabones del robot.

Como se ha indicado, para que la matriz T_i^{i-1} , relacione los sistemas (S_i) y (S_{i-1}), es necesario que los sistemas se hayan escogido de acuerdo a unas determinadas normas. Éstas, junto con la definición de los 4 parámetros de Denavit-Hartenberg, conforman el siguiente algoritmo para la resolución del problema cinemático directo.

Estas normas son:

- Origen $i-1$.- Se coloca donde a_{i-1} corta al eje $i-1$.
- \hat{X}_i .- Se coloca en la misma dirección y sentido que a_{i-1} y su magnitud “que debe ser unitaria” se obtiene mediante la normalización de a_{i-1} .
- \hat{Z}_i .- Se coloca en la misma dirección y sentido de d_{i-1} y su magnitud “que debe ser unitaria” se obtiene mediante la normalización de d_{i-1} .
- \hat{Y}_i .- Se obtiene mediante la regla de la mano derecha entre el vector \hat{X}_i y el vector \hat{Z}_i .

Nota: los sistemas de referencia de los eslabones siempre permanecen fijos al eslabón.

3.1.2 Parámetros Denavit-Hartenberg Para Un Eslabón Giratorio

Los cuatro parámetros de Denavit-Hartenberg (θ_i , d_i , a_{i-1} , α_{i-1}) dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones, que le unen con el anterior y con el siguiente.

- a_{i-1} .- Es la longitud real del eslabón $i-1$, tiene como magnitud la distancia más corta comprendida entre el eje $i-1$ y el eje i . Su dirección va desde el eje $i-1$ al eje i .
- α_{i-1} .- Es un vector angular cuya magnitud es el ángulo comprendido entre el positivo del eje $i-1$ y el positivo del eje i , alrededor del parámetro a_{i-1} tomado como eje. El parámetro α_{i-1} define la rotación del eslabón.
- d_i .- Es un vector cuya magnitud es la distancia entre el corte del parámetro a_{i-1} con el eje i y el corte de a_i con el mismo eje. Su dirección y sentido va del corte del parámetro a_{i-1} con el eje i hacia el corte de a_i con el mismo eje.
- θ_i .- Es el ángulo entre el eslabón $i-1$ y el eslabón i , tiene la misma dirección y sentido que el parámetro d_i . Se obtiene llevando la línea de acción de a_{i-1} hacia a línea de acción de a_i que pasa por el punto de corte de a_{i-1} con el eje i .

Una vez obtenidos los parámetros Denavit-Hartenberg, el cálculo de las relaciones entre los eslabones consecutivos del robot es inmediato, ya que vienen dadas por las matrices T , que se calcula según la expresión general (3.3).

Las relaciones entre eslabones no consecutivos vienen dadas por las matrices T que se obtienen como producto de un conjunto de matrices T .

Obtenida la matriz T , ésta expresara la orientación (submatriz (3×3) de rotación) y posición (submatriz (3×1) de traslación) del extremo del robot en función de sus coordenadas articulares, con lo que quedará resuelto el problema cinemático directo.

Debido a la complejidad del robot se va a dividir el robot en tres partes independientes (figura 3.3), cada una con un funcionamiento similar para poder resolver el problema cinemático de una manera más sencilla y permitiendo además que el robot tenga la capacidad de desplazar 3 patas a la vez mientras es soportado por las otras 3 lo que permite que esté en equilibrio y no se caiga, con esto se logra que el robot pueda desplazarse más rápido que un robot de 4 patas ya que estos últimos necesitan desplazar una pata a la vez para poder equilibrarse, ya que este tipo de robot por lo regular tienden a caer cuando desplazan más de una pata a la vez debido a la localización de su centro de gravedad, además que con esto se tiene la ventaja de poder hacer que el robot gire sobre un eje de rotación situado en su centro de gravedad cosa que es muy difícil de hacer si el robot estuviera constituido en una sola parte.

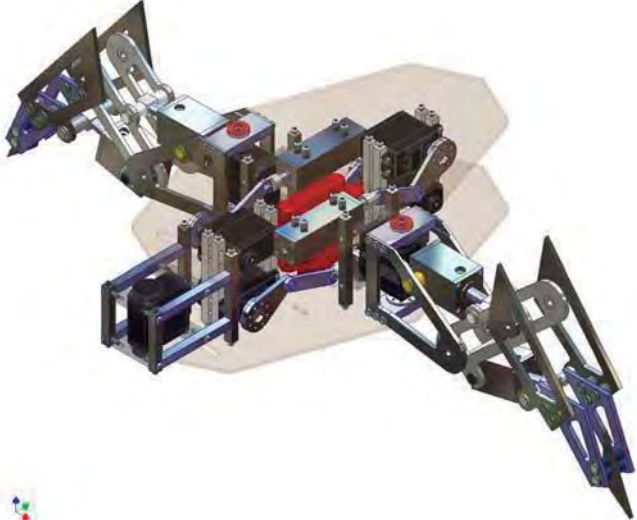
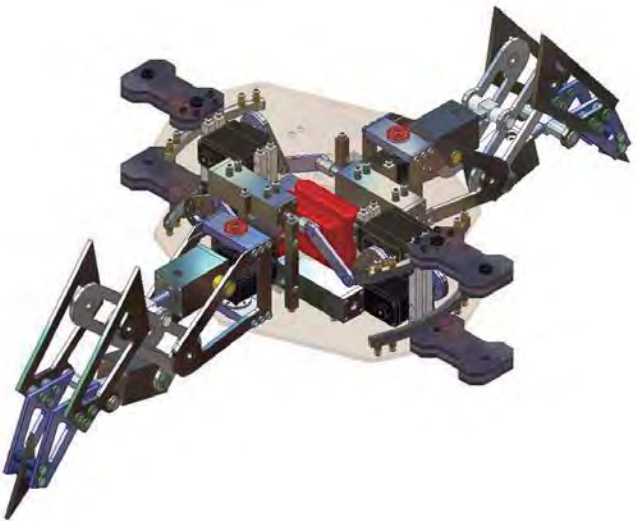
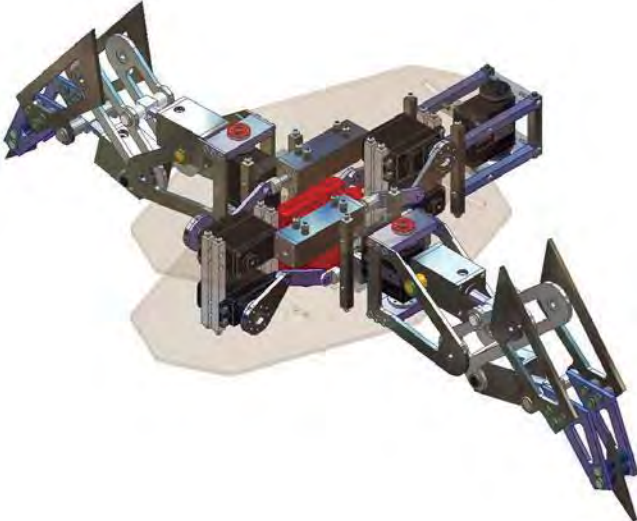
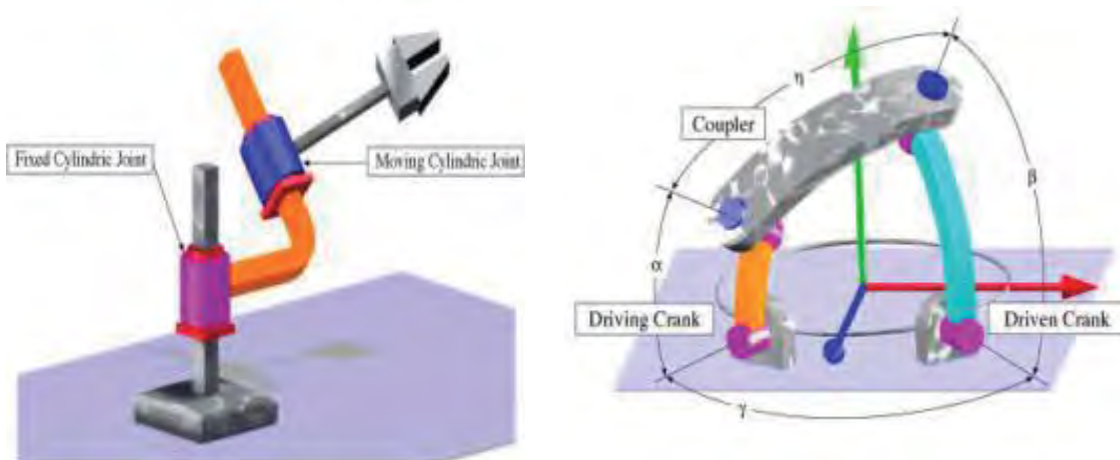
F P R A O R N T T E A L	
P M A E R D T I E A	
P O P S A T R E T R E I O R	

Figura 3.3 Partes del Robot.

3.2 Cinemática Inversa

El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial.

Así como es posible abordar el problema cinemático directo de una manera sistemática a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas, e independientemente de la configuración del robot, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso, siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot (figura 3.4) [11].



3.4 Configuración del Robot.

Se han desarrollado algunos procedimientos genéricos susceptibles de ser programados, de modo que un computador pueda, a partir del conocimiento de la cinemática del robot (con sus parámetros de Denavit-Hartenberg, por ejemplo) obtener la n-upla de valores articulares que posicionan y orientan su extremo. El inconveniente de estos procedimientos es que se trata de métodos numéricos iterativos, cuya velocidad de convergencia e incluso su convergencia en si, no está siempre garantizada.

A la hora de resolver el problema cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una solución cerrada. Esto es, encontrar una relación matemática explícita de la forma:

$$\theta_k = F_k(x, y, z)$$

$$K = 1 \dots n \text{ (grados de libertad)}$$

Este tipo de solución presenta, entre otras, las siguientes ventajas:

1. En muchas aplicaciones, el problema cinemático inverso ha de resolverse en tiempo real (por ejemplo, en el seguimiento de una determinada trayectoria). Una solución de tipo iterativo no garantiza tener la solución en el momento adecuado.

2. Al contrario de lo que ocurría en el problema cinemático directo, con cierta frecuencia la solución del problema cinemático inverso no es única; existiendo diferentes n-uplas ($\theta_1, \dots, \theta_n$) que posicionan y orientan el extremo del robot de mismo modo. En estos casos una solución cerrada permite incluir determinadas reglas o restricciones que aseguren que la solución obtenida sea la más adecuada posible.

No obstante, a pesar de las dificultades comentadas, la mayor parte de los robots poseen cinemáticas relativamente simples que facilitan en cierta medida la resolución de su problema cinemático inverso.

Por ejemplo si se consideran sólo los tres primeros grados de libertad de muchos robots, estos tienen una estructura planar, esto es, los tres primeros elementos quedan contenidos en un plano. Esta circunstancia facilita la resolución del problema. Asimismo, en muchos robots se da la circunstancia de que los tres grados de libertad últimos, dedicados fundamentalmente a orientar el extremo del robot, correspondan a giros sobre los ejes que se cortan en un punto.

De nuevo esta situación facilita el cálculo de la n-upla ($\theta_1, \dots, \theta_n$) T correspondiente a la posición y orientación deseadas. Por lo tanto, para los casos citados y otros, es posible establecer ciertas pautas generales que permitan plantear y resolver el problema cinemático inverso de una manera sistemática.

Los métodos geométricos permiten tener normalmente los valores de las primeras variables articulares, que son las que consiguen posicionar el robot. Para ello utilizan relaciones trigonométricas y geométricas sobre los elementos del robot. Se suele recurrir a la resolución de triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot.

Por último, si se consideran robots con capacidad de posicionar y orientar su extremo en el espacio, esto es, robots con 6 grados de libertad, el método de desacoplamiento cinemático permite, para determinados tipos de robots, resolver los primeros grados de libertad, dedicados al posicionamiento, de una manera independiente a la resolución de los últimos grados de libertad, dedicados a la orientación. Cada uno de estos dos problemas simples podrá ser tratado y resuelto por cualquier procedimiento.

3.2.1 Resolución Del Problema Cinemático Inverso Por Métodos Geométricos

Como se ha indicado, este procedimiento es adecuado para robots de pocos grados de libertad o para el caso de que se consideren sólo los primeros grados de libertad, dedicados a posicionar el extremo.

El procedimiento en si se basa en encontrar suficiente número de relaciones geométricas en las que intervendrán las coordenadas del extremo del robot, sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos.

Para poder resolver la cinemática del robot y poder trazar una trayectoria para el desplazamiento del mismo se utilizará este procedimiento. El dato de partida son las coordenadas (X, Y, Z) referidas a (S₀) en las que se requiere posicionar su extremo. La pata del robot posee una estructura planar en el plano X₁-Z₁ (figura 3.5).

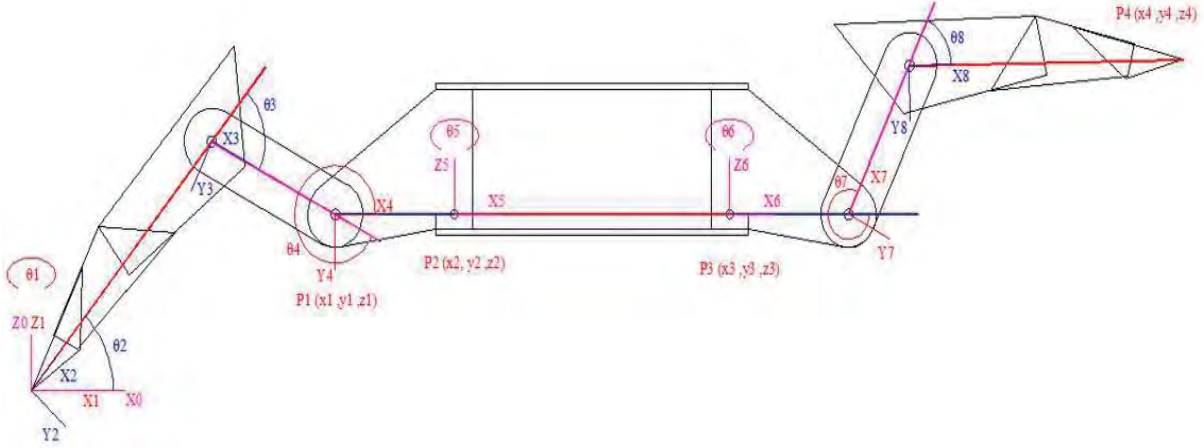


Figura 3.5 Plano X₁-Z₁.

Se deben determinar los valores de θ_2 , θ_3 , θ_4 , θ_7 y θ_8 :

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{Z_1}{X_1}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + X_1^2 + Z_1^2 - L_3^2}{2L_2\sqrt{X_1^2 + Z_1^2}}\right) \quad (3.5)$$

$$\theta_3 = 180^\circ + \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - X_1^2 - Z_1^2}{2L_2L_3}\right) \quad (3.6)$$

$$\theta_4 = 180^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - X_1^2 - Z_1^2}{2L_2L_3}\right) - \theta_2 + \tan^{-1}\left(\frac{Z_2 - Z_1}{X_2 - X_1}\right) \quad (3.7)$$

$$L_a = \sqrt{(Z_4 - Z_3 - L_6 \sin \theta_4)^2 + (X_4 - X_3 - L_6 \cos \theta_4)^2} \quad (3.8)$$

$$\theta_7 = \tan^{-1}\left(\frac{Z_4 - Z_3 - L_6 \sin \theta_4}{X_4 - X_3 - L_6 \cos \theta_4}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{L_7^2 + L_a^2 - L_8^2}{2L_7L_a}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{Z_3 - Z_2}{X_3 - X_2}\right) \quad (3.9)$$

$$\theta_8 = 180^\circ + \cos^{-1}\left(\frac{L_7^2 + L_8^2 - L_b^2}{2L_7L_8}\right) \quad (3.10)$$

Considerando ahora que este robot posee una estructura planar en el plano X_1-Y_1 , se obtienen las variables faltantes θ_1 , θ_5 y θ_6 (figura 3.6).

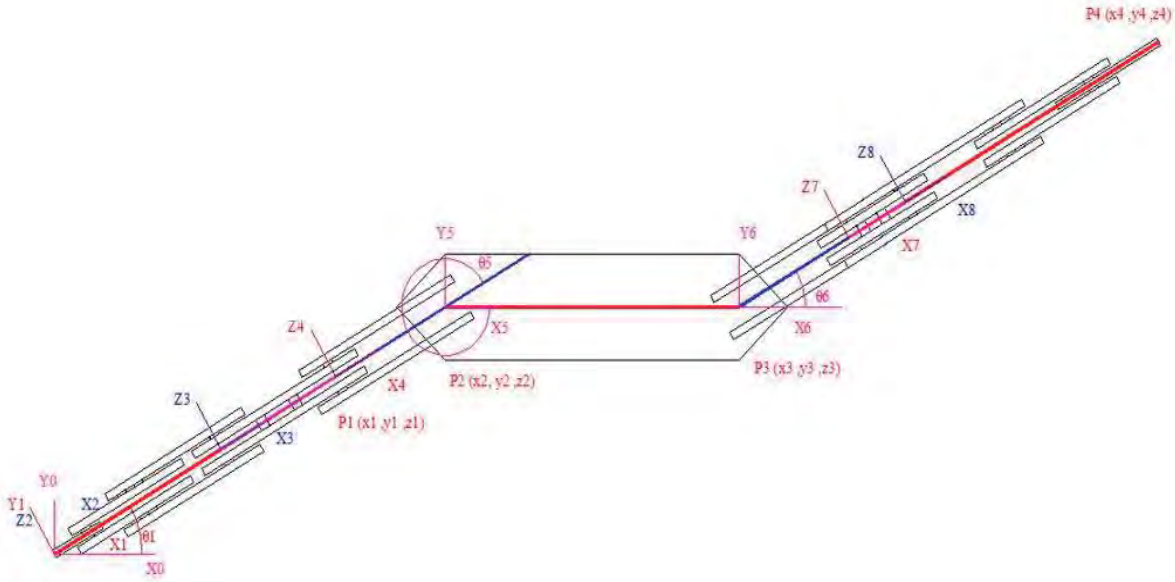


Figura 3.6 Plano X_1-Y_1 .

$$\theta_1 = \text{Tan}^{-1} \frac{Y_1}{X_1} \quad (3.11)$$

$$\theta_5 = \theta_1 + \text{Tan}^{-1} \frac{Y_3 - Y_2}{X_3 - X_2} \quad (3.12)$$

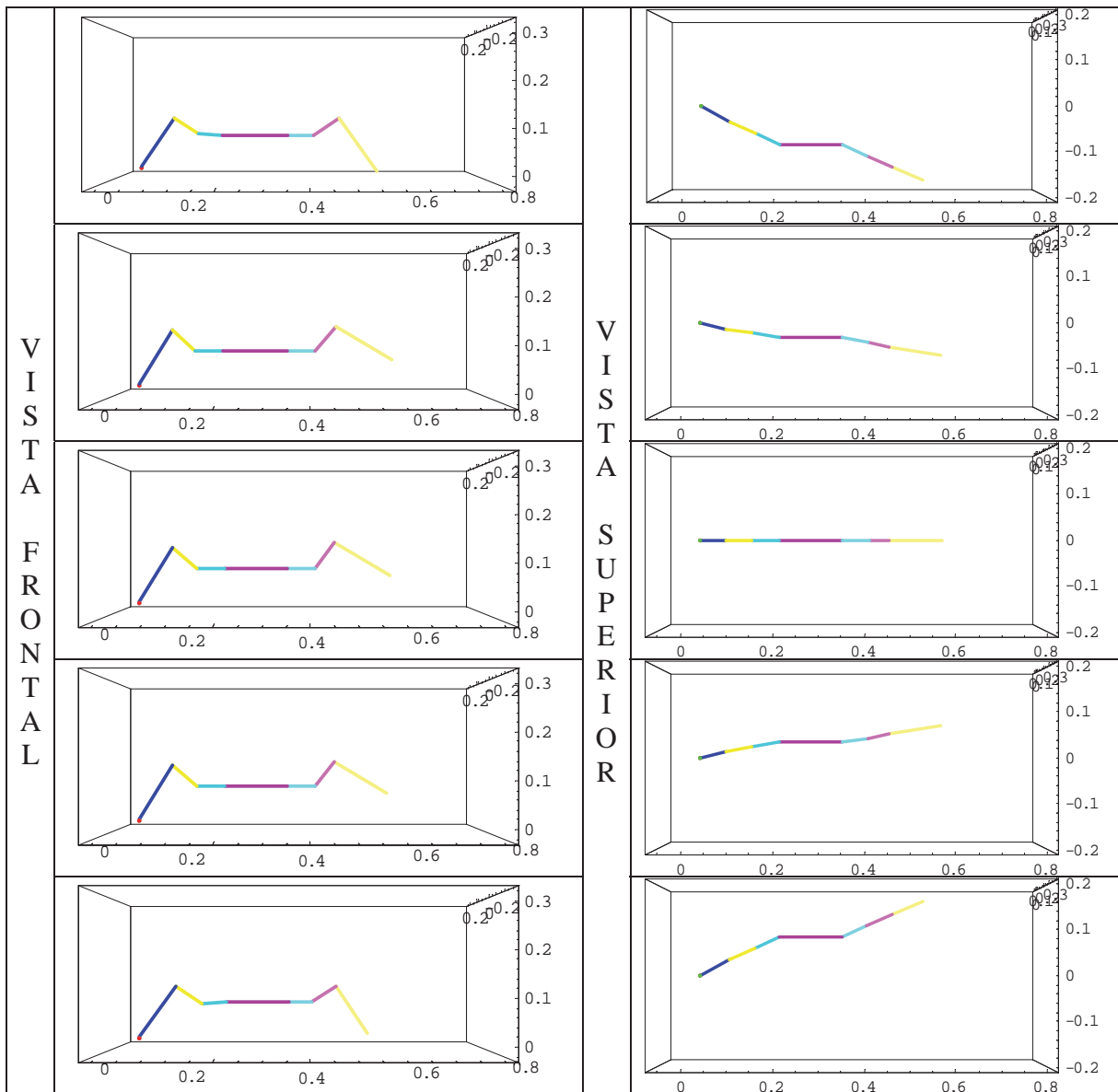
$$\theta_6 = \text{Tan}^{-1} \frac{Y_4 - Y_3}{X_4 - X_3} - \text{Tan}^{-1} \frac{Y_3 - Y_2}{X_3 - X_2} \quad (3.13)$$

Donde:

- X_i , Y_i , Z_i son los puntos de la trayectoria del robot durante su desplazamiento.
- L_i son las longitudes reales de los eslabones del robot.
- θ_i son los ángulos de la posición de los eslabones durante la trayectoria.

Con anterior se describe una trayectoria para la pata del robot indicándole los puntos en los que debe de posicionarse en un determinado tiempo, debido a que cualquier trayectoria requiere muchos puntos en el espacio en los cuales cada eslabón estaría en una posición específica, se hará uso de un software el cual simulará la trayectoria y obtendrá algunos datos necesarios para el análisis cinético del robot. Éste robot tiene dos trayectorias con las cuales se logra hacer que el robot se desplace de la manera deseada.

La primer trayectoria a analizar es un desplazamiento llamado frontal (figura 3.7) con el cual se determinan los valores necesarios para que el robot pueda desplazarse hacia delante o atrás según se deseé, considerando que el robot tiene las siguientes características físicas una longitud de 15 cm. en los eslabones de apoyo, una longitud de 7.5 cm. en los eslabones medios, una longitud de 6.5 cm. en los eslabones de rotación y una longitud de 15 cm. en la parte media del robot, éste desplazara la extremidad 18.33 cm. en forma longitudinal, elevándola 6.5 cm. sobre el suelo, el desplazamiento se realizará en 1 seg., con esto datos se pueden conocer la posición angular (figura 3.8) de cada uno de los eslabones. Éste dato es necesario para determinar las velocidades angulares y las aceleraciones angulares del robot que ayudarán a determinar los pares motor experimentados durante el desplazamiento.



* Nota: Las líneas en la simulación simbolizan cada uno de los eslabones.

Figura 3.7 Simulación del desplazamiento frontal.

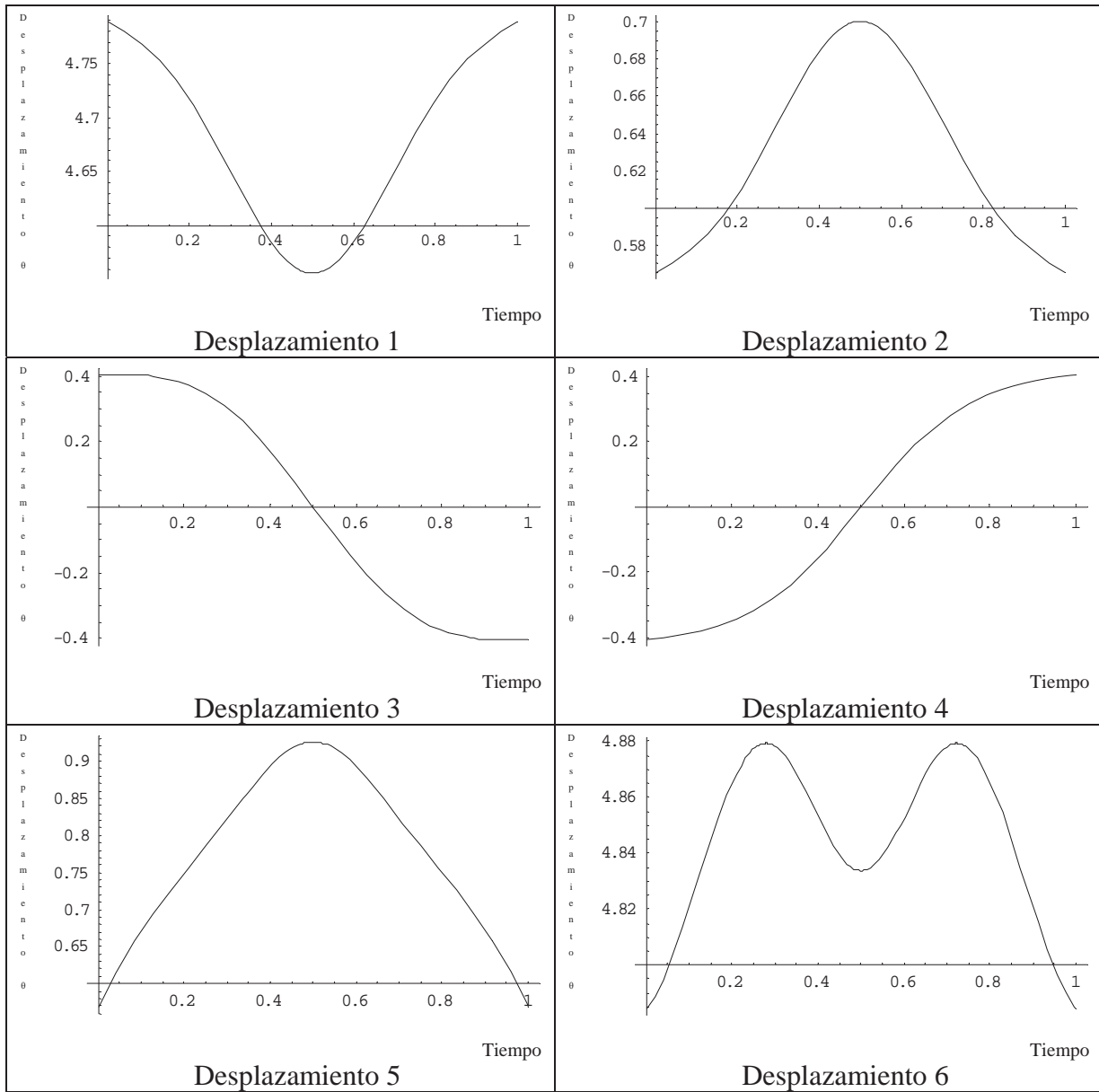
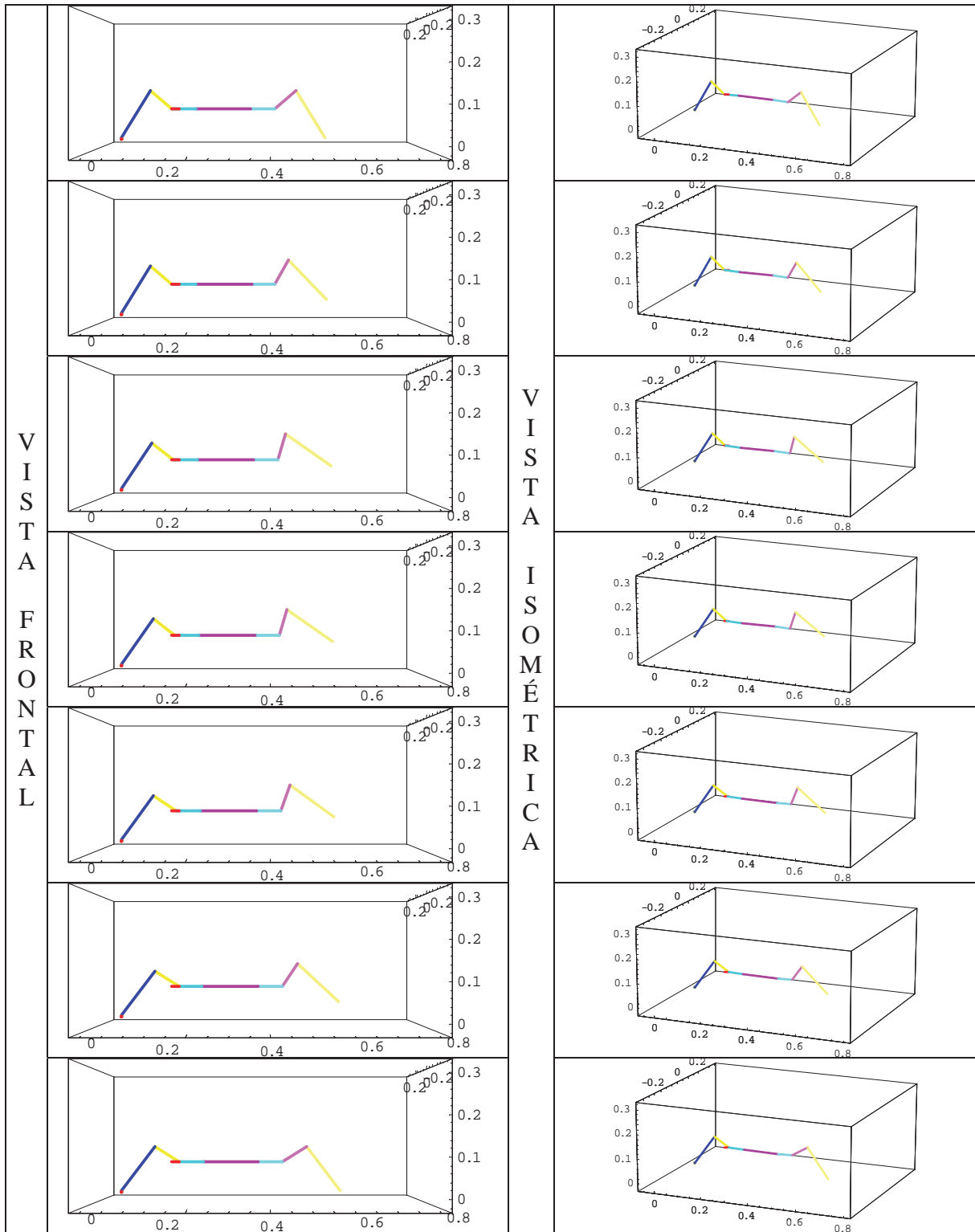


Figura 3.8 Desplazamiento durante la trayectoria frontal.

La segunda trayectoria a analizar es un desplazamiento llamada lateral (figura 3.9) con la cual se obtienen los valores necesarios para que el robot pueda desplazarse hacia la derecha o la izquierda según se desee, considerando que el robot se desplazara 4 cm. en forma longitudinal, elevándola 6.5 cm. sobre el suelo, el desplazamiento se realizará en 1 seg., con esto datos se puede conocer la posición angular (figura 3.10) durante este desplazamiento.



* Nota: Las líneas en la simulación simbolizan cada uno de los eslabones.

Figura 3.9 Simulación del desplazamiento lateral.

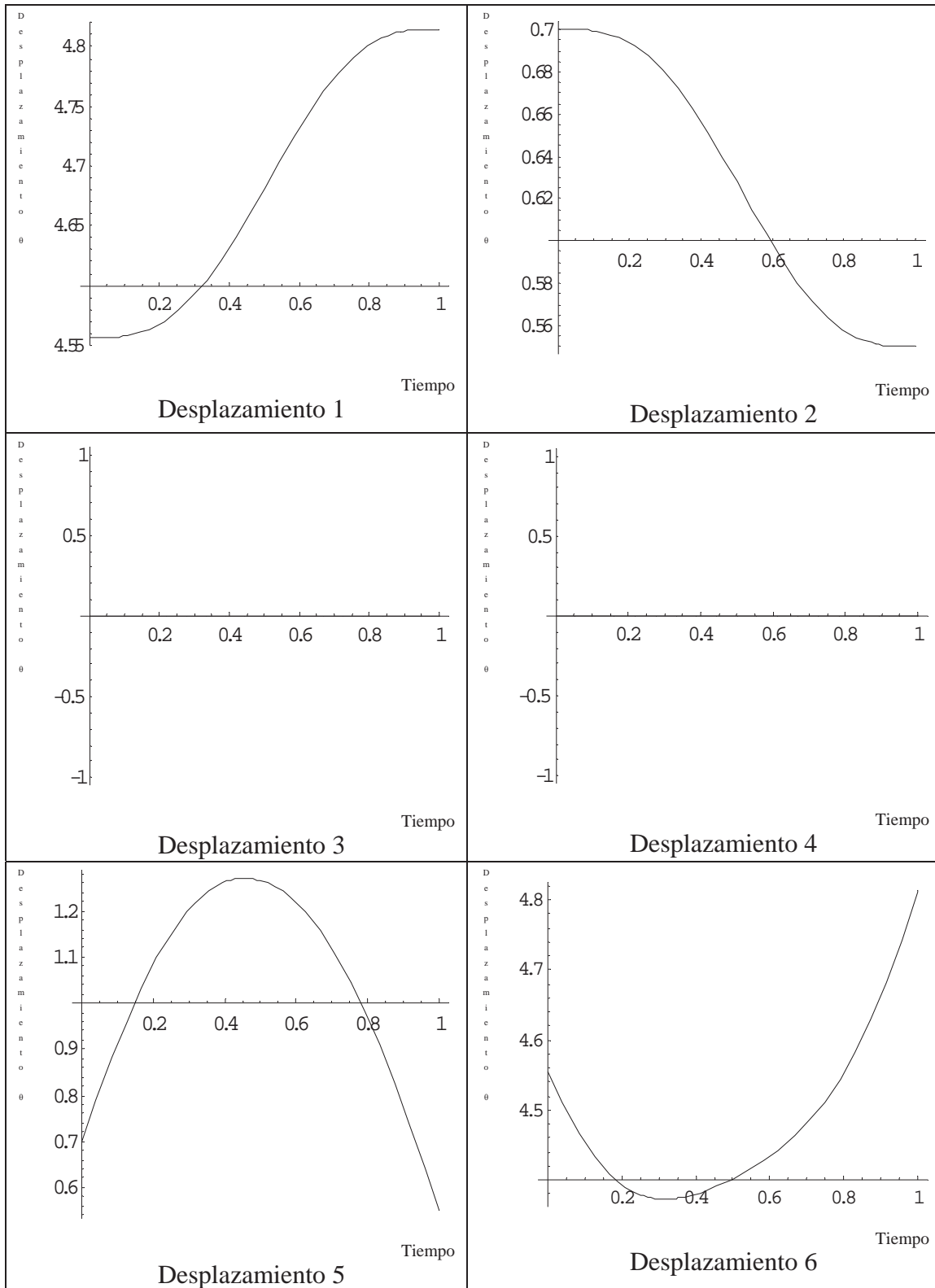


Figura 3.10 Graficas de desplazamiento durante la trayectoria lateral.

CAPÍTULO 4

4. Dinámica

La dinámica se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina. Por lo tanto, el modelo dinámico de un robot tiene por objeto conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo.

Esta relación se obtiene mediante el denominado modelo dinámico (figura 4.1), que relaciona matemáticamente:

- La localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración.
- Las fuerzas pares aplicados en las articulaciones (o en el extremo del robot).
- Los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masa e inercias de sus elementos.

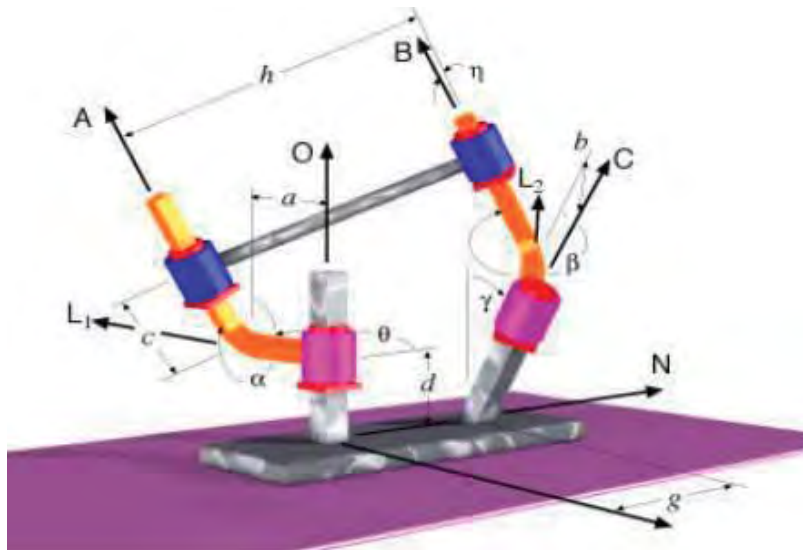


Figura 4.1. Modelo dinámico.

La obtención de este modelo para mecanismos de uno o dos grados de libertad no es excesivamente compleja, pero a medida que el número de grados de libertad aumenta, el planteamiento y obtención del modelo se complica enormemente. Por este motivo no siempre es posible obtener un modelo dinámico expresado de una forma cerrada, esto es, mediante una serie de ecuaciones, normalmente del tipo diferencial de segundo orden, cuya integración permita conocer que el movimiento surge al aplicar unas fuerzas o que fuerzas hay que aplicar para obtener un movimiento determinado [11].

El modelo dinámico debe ser resuelto entonces de manera iterativa mediante la utilización de un procedimiento numérico.

El problema de la obtención del modelo dinámico de un robot es, por lo tanto, uno de los aspectos más complejos de la robótica. Sin embargo, el modelo dinámico es imprescindible para conseguir los siguientes fines:

- Simulación del movimiento del robot.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot.
- Dimensionamiento de los actuadores.
- Diseño y evaluación del control dinámico del robot.

Este último fin es de gran importancia, pues de la calidad del control dinámico del robot depende la precisión y velocidad de sus movimientos. La gran complejidad ya comentada existente en la obtención del modelo dinámico del robot, ha motivado que se realicen ciertas simplificaciones, de manera que así pueda ser utilizado en el diseño del controlador.

Es importante hacer notar que el modelo dinámico completo de un robot debe incluir no sólo la dinámica de sus elementos (barras o eslabones) sino también la propia de sus sistemas de transmisión, de los actuadores y sus equipos electrónicos de mando. Estos elementos incorporan al modelo dinámico nuevas inercias, rozamientos, saturaciones de los circuitos electrónicos, etc. aumentando aun más su complejidad.

Por último, es preciso señalar que si bien en la mayor parte de las aplicaciones reales de robótica, las cargas e inercias manejadas no son suficientes como para originar deformaciones en los eslabones del robot, en determinadas ocasiones no ocurre así, siendo preciso considerar al robot como un conjunto de eslabones no rígidos. Aplicaciones de este tipo pueden encontrarse en la robótica espacial o en robots de grandes dimensiones.

4.1 Modelo Dinámico De La Estructura De Un Robot Rígido

La obtención del modelo dinámico de un mecanismo (figura 4.2), y en particular de un robot, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton, o su equivalente para movimientos de rotación, la denominada ley de Euler.

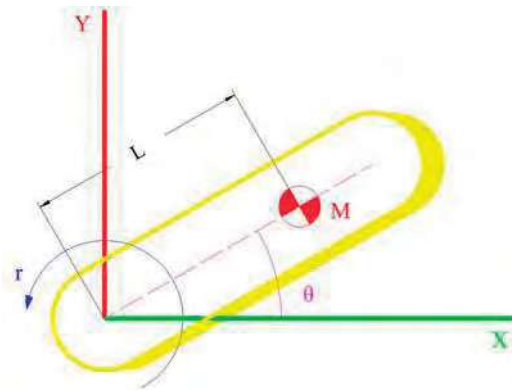


Figura 4.2 Modelo de eslabón con masa concentrada.

Así, en el caso simple de un robot monoarticular como el representado en la figura 4.2, el equilibrio de fuerzas-pares daría como resultado la ecuación:

$$\tau = I (d^2\theta/ dt^2) + MgL \cos \theta = ML^2 d^2\theta + MgL \cos\theta \quad (4.1)$$

En donde se ha supuesto que toda la masa se encuentre concentrada en el centro de la gravedad del elemento, que no existe rozamiento alguno y que no se manipula ninguna carga.

Para un par motor τ determinado, la integración de la ecuación anterior, daría lugar a la expresión de $\theta(t)$ y de sus derivadas $d\theta(t)$ y $d^2\theta(t)$, con lo que sería posible conocer la evolución de la coordenada articular del robot y de su velocidad y aceleración.

De forma inversa, si se pretende que $\theta(t)$ evolucione según una determinada función del tiempo, sustituyendo en la ecuación anterior, podría obtenerse el par $\tau(t)$ que sería necesario aplicar. Si el robot tuviese que ejercer alguna fuerza en su extremo, ya sea al manipular una carga o por ejemplo, realizar un proceso sobre alguna pieza, bastaría con incluir esta condición en la mencionada ecuación y proceder del mismo modo.

Se tiene así que del planteamiento del equilibrio de fuerzas y pares que intervienen sobre el robot se obtienen los denominados modelos dinámicos directo e inverso:

Modelo dinámico directo: expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen.

Modelo dinámico inverso: expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas.

El planteamiento del equilibrio de fuerzas en un robot real de 5 o 6 grados de libertad, es mucho más complicado. Debe tenerse en cuenta que junto con las fuerzas de inercia y gravedad, aparecen fuerzas de Coriolis debidas al movimiento relativo existente entre los diversos elementos, así como de fuerzas centrípetas que dependen de la configuración instantánea del manipulador.

4.2 Modelado Mediante La Formulación De Newton-Euler

La formulación de Newton-Euler parte del equilibrio de fuerzas y pares:

$$\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a} \quad (\text{Ley de Newton 4.2})$$

$$\Sigma \mathbf{N} = \mathbf{I}\alpha + \omega (\mathbf{I}\omega) \quad (\text{Ley de Euler 4.3})$$

Un adecuado desarrollo de estas ecuaciones conduce a una formulación recursiva en la que se obtienen la posición, velocidad y aceleración del eslabón i referida a la base del robot a partir de los correspondientes del eslabón $i-1$ y del movimiento relativo de la articulación i . De este modo, partiendo del eslabón i se llega al eslabón n . Con estos datos se procede a obtener las fuerzas y pares actuantes sobre el eslabón i referida a la base del

robot a partir de los correspondientes al eslabón $i+1$, recorriéndose de esta forma todos los eslabones desde el eslabón n al eslabón i .

El algoritmo se basa en operaciones vectoriales (con productos escalares y vectoriales entre magnitudes vectoriales, y productos de matrices con vectores) siendo más eficiente en comparación con las operaciones matriciales asociadas a la formulación Lagrangiana. De hecho, el orden de complejidad computacional de la formulación recursiva de Newton-Euler es $O(n)$ lo que indica que depende directamente del número de grados de libertad (Figura 4.3).



Figura 4.3 Grados de libertad a analizar.

4.2.1 Algoritmo Computacional Para El Modelo Dinámico De Newton-Euler

Asignar a cada eslabón un sistema de referencia de acuerdo a las normas de Denavit-Hartenberg. Obtener las matrices de rotación R^{i-1}_i y sus inversas R^i_{i-1} .

Establecer las condiciones iniciales $i = 0$.

- ${}^i\omega_i$: Velocidad angular.
- ${}^i\alpha_i$: Aceleración angular.
- ${}^i a_i$: Aceleración lineal.
- ${}^i a_{Cgi}$: Aceleración lineal del centro de gravedad.
- ${}^i I_i$: Matriz de inercia del eslabón i respecto de su centro de masas en S_i .
- m_i : Masa del eslabón i .
- ${}^i F_i$: Fuerza de Newton en el eslabón i .
- ${}^i N_i$: Momento de Euler en el eslabón i .

Para $i = 1 \dots n$ realizar los siguientes pasos.

Obtener la velocidad angular del sistema Si.

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = R_i^{i+1} {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (4.4)$$

Obtener la aceleración angular del sistema Si.

$${}^{i+1}\alpha_{i+1} = R_i^{i+1} {}^i\alpha_i + R_i^{i+1} {}^i\omega_i \otimes \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (4.5)$$

Obtener la aceleración lineal del sistema i:

$${}^{i+1}a_{i+1} = R_i^{i+1} [{}^i\alpha_i \otimes {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \otimes ({}^i\omega_i \otimes {}^iP_{i+1}) + {}^ia_i] \quad (4.6)$$

Obtener la aceleración lineal del centro de gravedad del eslabón i:

$${}^{i+1}a_{CGi+1} = {}^{i+1}\omega_{i+1} \otimes {}^{i+1}P_{CGi+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \otimes ({}^{i+1}\omega_{i+1} \otimes {}^{i+1}P_{CGi+1}) + {}^{i+1}a_{i+1} \quad (4.7)$$

Obtener la fuerza de Newton ejercida sobre el eslabón i:

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}a_{CGi+1} \quad (4.8)$$

Obtener el momento de Euler ejercido sobre el eslabón i:

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{i+1}I_{i+1} {}^{i+1}\alpha_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \otimes {}^{i+1}I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (4.9)$$

Obtener la fuerza ejercida sobre el eslabón i:

$${}^if_i = R_{i+1}^i {}^{i+1}f_{i+1} + {}^iF_i \quad (4.10)$$

Obtener el par ejercido sobre el eslabón i:

$${}^in_i = {}^iN_i + R_{i+1}^i {}^{i+1}n_{i+1} + {}^iP_{CGi} \otimes {}^iF_i + {}^iP_{i+1} \otimes R_{i+1}^i {}^{i+1}f_{i+1} \quad (4.11)$$

Obtener la fuerza o par aplicado a la articulación i.

$$\tau_i = {}^in_i^T {}^i\hat{Z}_i \quad (4.12)$$

Donde τ es el par motor en la articulación.

4.3 Determinación De Torques Experimentados Por Parte Media Del Robot

Se ha simplificado el análisis partiendo al robot en 3 partes de las cuales los extremos tienen las mismas características por lo que conociendo los valores de uno se conocerán los valores del otro. A continuación se determinarán los torques necesarios en cada una de las articulaciones del robot para que se desplace en alguna de las formas mencionadas en la cinemática, para esto se hará uso del algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler y de un software matemático para resolver éste.

Primeramente se determinan los torques necesarios para que la parte media del robot se desplace en la trayectoria frontal teniendo en cuenta los siguientes datos:

Eslabón 0.

Longitud 0 = 0.15 m

Masa 0 = 0.1111 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_0 = \begin{bmatrix} 0.0995249 \\ 0.0050203 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{0CG0} = \begin{bmatrix} 0.00005302 & -0.00003932 & -0.00000005037 \\ -0.00003932 & 0.000199 & -0.00000001363 \\ -0.00000005037 & -0.00000001363 & 0.0001824 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 1.

Longitud 1 = 0.075 m

Masa 1 = 0.1302 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_1 = \begin{bmatrix} 0.0242562 \\ -0.0036691 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{1CG1} = \begin{bmatrix} 0.00003709 & -0.000006437 & 0.00000000001073 \\ -0.000006437 & 0.00008495 & 0.00000000003573 \\ 0.00000000001073 & 0.00000000003573 & 0.00008403 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 2.

Longitud 2 = 0.065 m

Masa 2 = 0.175 kg.

$$\text{Centro de gravedad 22} = \begin{bmatrix} 0.0304624 \\ 0 \\ 0.0149165 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{2CG2} = \begin{bmatrix} 0.0001863 & -0.000000009267 & -0.000000002694 \\ -0.000000009267 & 0.0001009 & -0.00003166 \\ -0.000000002694 & -0.00003166 & 0.0001734 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 3.

Longitud 3 = 0.15 m

Masa 3 = 1.539 kg.

$$\text{Centro de gravedad 33} = \begin{bmatrix} 0.075 \\ 0 \\ 0.025 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{3CG3} = \begin{bmatrix} 0.01259 & -0.0000022 & -0.000007755 \\ -0.0000022 & 0.002615 & -0.0000001563 \\ -0.000007755 & -0.0000001563 & 0.01316 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 4.

Longitud 4 = 0.065 m

Masa 4 = 0.175 kg.

$$\text{Centro de gravedad 44} = \begin{bmatrix} 0.0345376 \\ 0 \\ 0.0149165 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{4CG4} = \begin{bmatrix} 0.0001863 & -0.000000009267 & -0.000000002694 \\ -0.000000009267 & 0.0001009 & -0.00003166 \\ -0.000000002694 & -0.00003166 & 0.0001734 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 5.

Longitud 5 = 0.075 m

Masa 5 = 0.1302 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_{55} = \begin{bmatrix} 0.0507438 \\ -0.0036691 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{5CG5} = \begin{bmatrix} 0.00003709 & -0.000006437 & 0.0000000001073 \\ -0.000006437 & 0.00008495 & 0.0000000003573 \\ 0.0000000001073 & 0.0000000003573 & 0.00008403 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 6.

Longitud 6 = 0.15 m

Masa 6 = 0.1111 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_{66} = \begin{bmatrix} 0.0500278 \\ 0.0020015 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{6CG6} = \begin{bmatrix} 0.00005302 & -0.00003932 & -0.00000005037 \\ -0.00003932 & 0.000199 & -0.00000001363 \\ -0.00000005037 & -0.00000001363 & 0.0001824 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

$$\text{Aceleración de la gravedad} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9.81 \end{bmatrix} \text{ (m/s}^2\text{)}$$

Introduciendo estos datos en el algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler y con el desplazamiento de la trayectoria frontal (figura 4.4), se obtienen las siguientes gráficas de la figura 4.5, las cuales indican los torque que se tienen durante el desplazamiento frontal de la parte media del cuerpo del robot.



Figura 4.4 Desplazamiento de la parte media del robot en la trayectoria frontal.

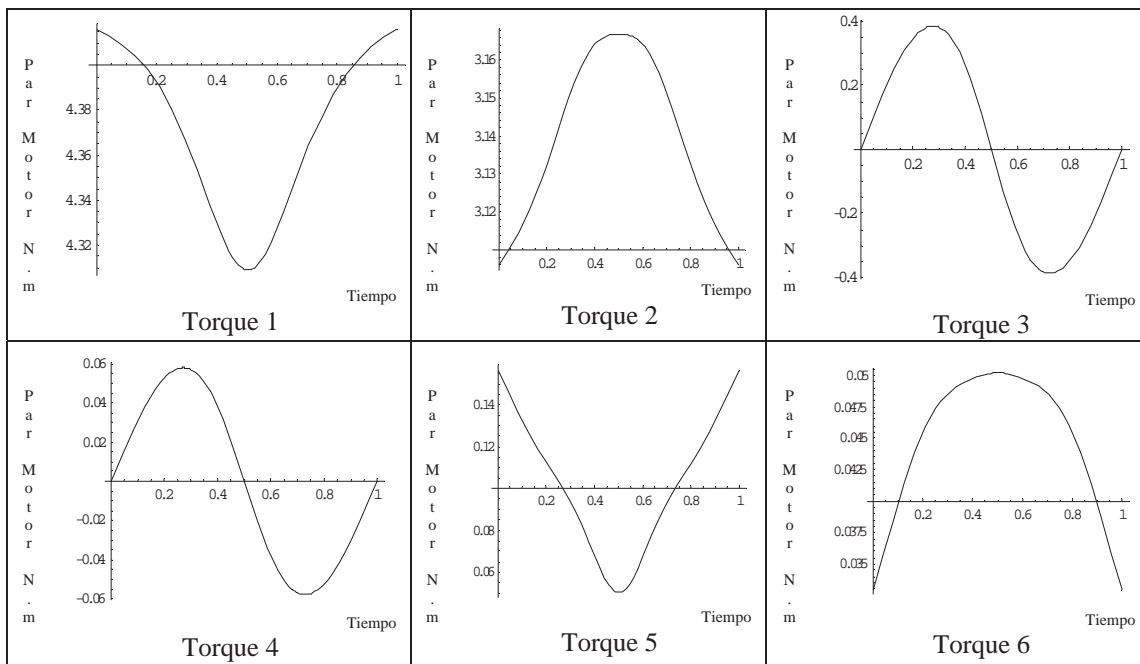


Figura 4.5 Torques descritos en la parte media del robot en la trayectoria frontal.

Introduciendo estos mismos datos en el algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler y con el desplazamiento de la trayectoria lateral (figura 4.6), se obtienen las gráficas de la figura 4.7, las cuales indican los torque que se tienen durante el desplazamiento lateral de la parte media del cuerpo del robot.

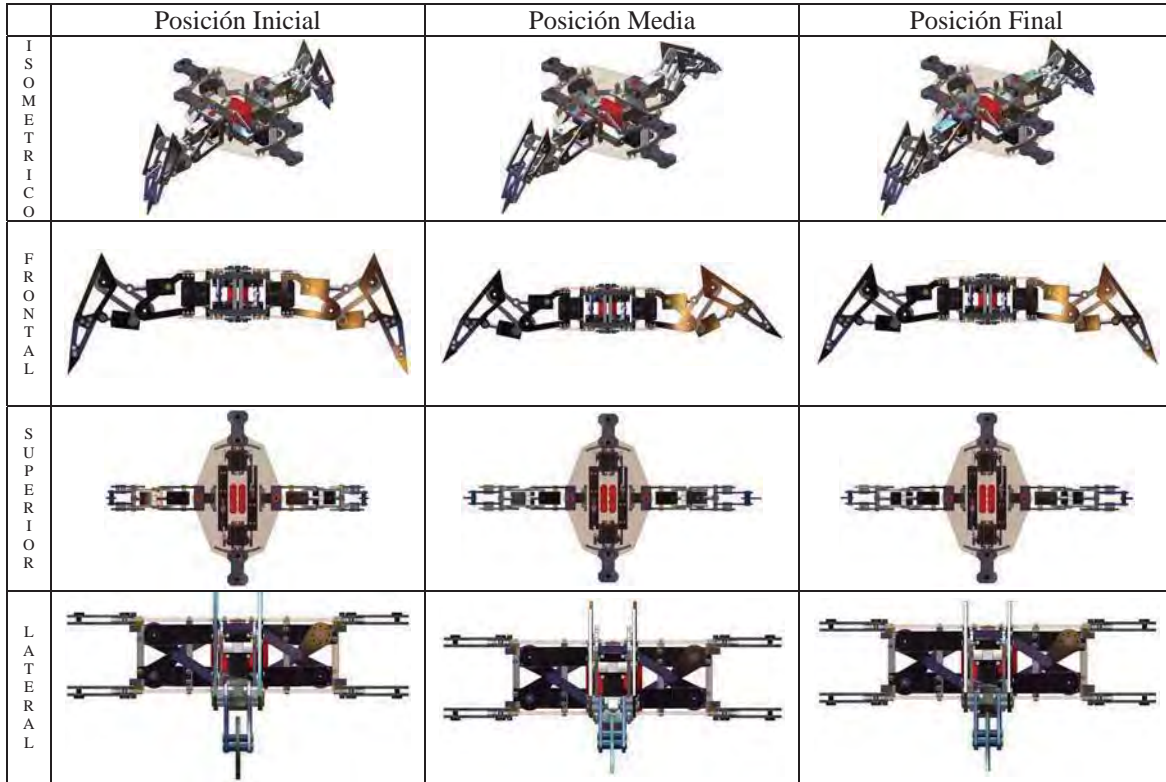


Figura 4.6 Desplazamiento de la parte media del robot en la trayectoria lateral.

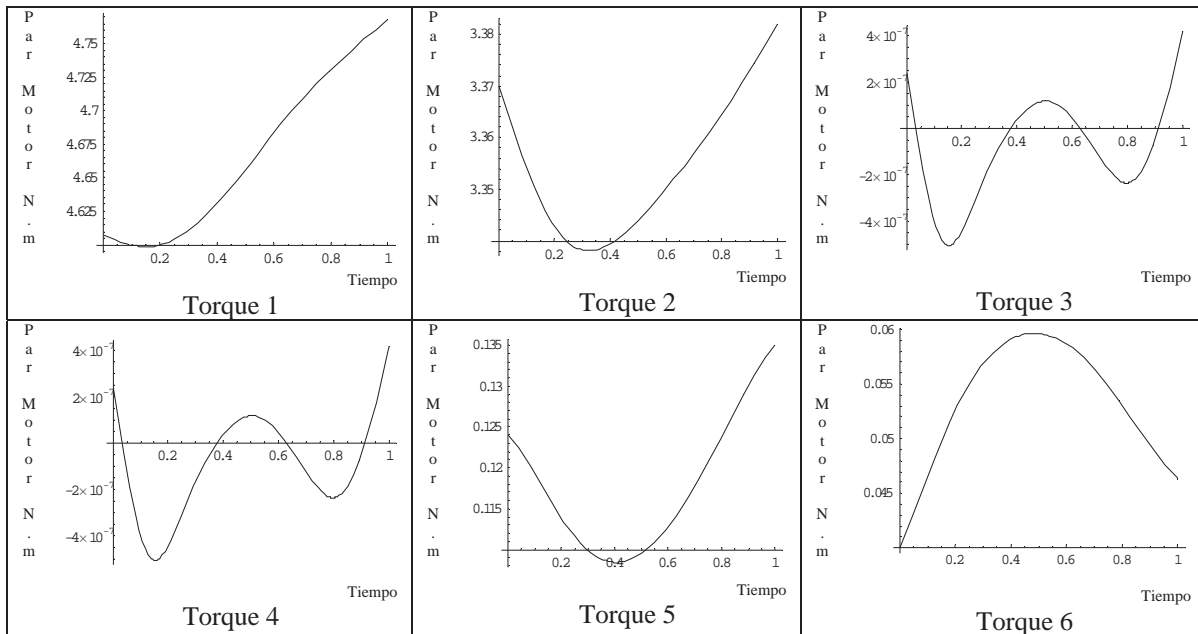


Figura 4.7 Torques descritos en la parte media del robot en la trayectoria lateral.

4.4 Determinación De Torques Experimentados Por Parte Extrema Del Robot

Ahora se determinan los torques necesarios para que la parte extrema del robot se desplacé en la trayectoria frontal teniendo en cuenta los siguientes datos:

Eslabón 0.

Longitud 0 = 0.15 m

Masa 0 = 0.1111 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_0 = \begin{bmatrix} 0.0995249 \\ 0.0050203 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{0CG0} = \begin{bmatrix} 0.00005302 & -0.00003932 & -0.00000005037 \\ -0.00003932 & 0.000199 & -0.00000001363 \\ -0.00000005037 & -0.00000001363 & 0.0001824 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 1.

Longitud 1 = 0.075 m

Masa 1 = 0.1302 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_1 = \begin{bmatrix} 0.0242562 \\ -0.0036691 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{1CG1} = \begin{bmatrix} 0.00003709 & -0.000006437 & 0.00000000001073 \\ -0.000006437 & 0.00008495 & 0.00000000003573 \\ 0.00000000001073 & 0.00000000003573 & 0.00008403 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 2.

Longitud 2 = 0.065 m

Masa 2 = 0.175 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_{22} = \begin{bmatrix} 0.0304624 \\ 0 \\ 0.0149165 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{2CG2} = \begin{bmatrix} 0.0001863 & -0.000000009267 & -0.000000002694 \\ -0.000000009267 & 0.0001009 & -0.00003166 \\ -0.000000002694 & -0.00003166 & 0.0001734 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 3.

Longitud 3 = 0.15 m

Masa 3 = 1.545 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_{33} = \begin{bmatrix} 0.075 \\ 0.01265 \\ 0.025 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{3CG3} = \begin{bmatrix} 0.005114 & -0.000001944 & 0.0000002015 \\ -0.000001944 & 0.002325 & 0.00000001268 \\ 0.0000002015 & 0.00000001268 & 0.005853 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 4.

Longitud 4 = 0.065 m

Masa 4 = 0.175 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_{44} = \begin{bmatrix} 0.0345376 \\ 0 \\ 0.0149165 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{4CG4} = \begin{bmatrix} 0.0001863 & -0.000000009267 & -0.000000002694 \\ -0.000000009267 & 0.0001009 & -0.00003166 \\ -0.000000002694 & -0.00003166 & 0.0001734 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 5.

Longitud 5 = 0.075 m

Masa 5 = 0.1302 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_{55} = \begin{bmatrix} 0.0507438 \\ -0.0036691 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{5CG5} = \begin{bmatrix} 0.00003709 & -0.000006437 & 0.00000000001073 \\ -0.000006437 & 0.00008495 & 0.00000000003573 \\ 0.00000000001073 & 0.00000000003573 & 0.00008403 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Eslabón 6.

Longitud 6 = 0.15 m

Masa 6 = 0.1111 kg.

$$\text{Centro de gravedad}_{66} = \begin{bmatrix} 0.0500278 \\ 0.0020015 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (en metros)}$$

$$I_{6CG6} = \begin{bmatrix} 0.00005302 & -0.00003932 & -0.00000005037 \\ -0.00003932 & 0.000199 & -0.00000001363 \\ -0.00000005037 & -0.00000001363 & 0.0001824 \end{bmatrix} \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

$$\text{Aceleración de la gravedad} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9.81 \end{bmatrix} \text{ (m/s}^2\text{)}$$

Introduciendo estos datos en el algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler y con el desplazamiento de la trayectoria frontal (figura 4.8), se obtienen las gráficas de la figura 4.9, las cuales indican los torque que se tienen durante el desplazamiento frontal de las partes extremas del cuerpo del robot.

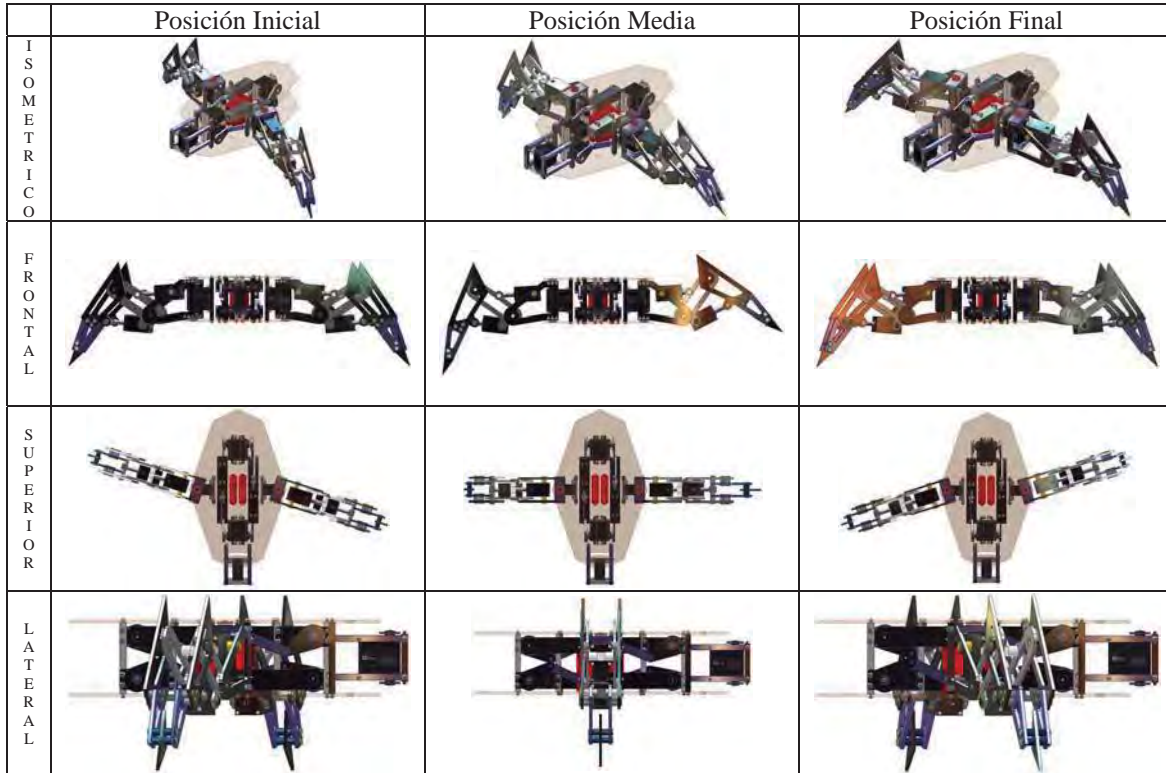


Figura 4.8 Desplazamiento de la parte extrema del robot en la trayectoria frontal.

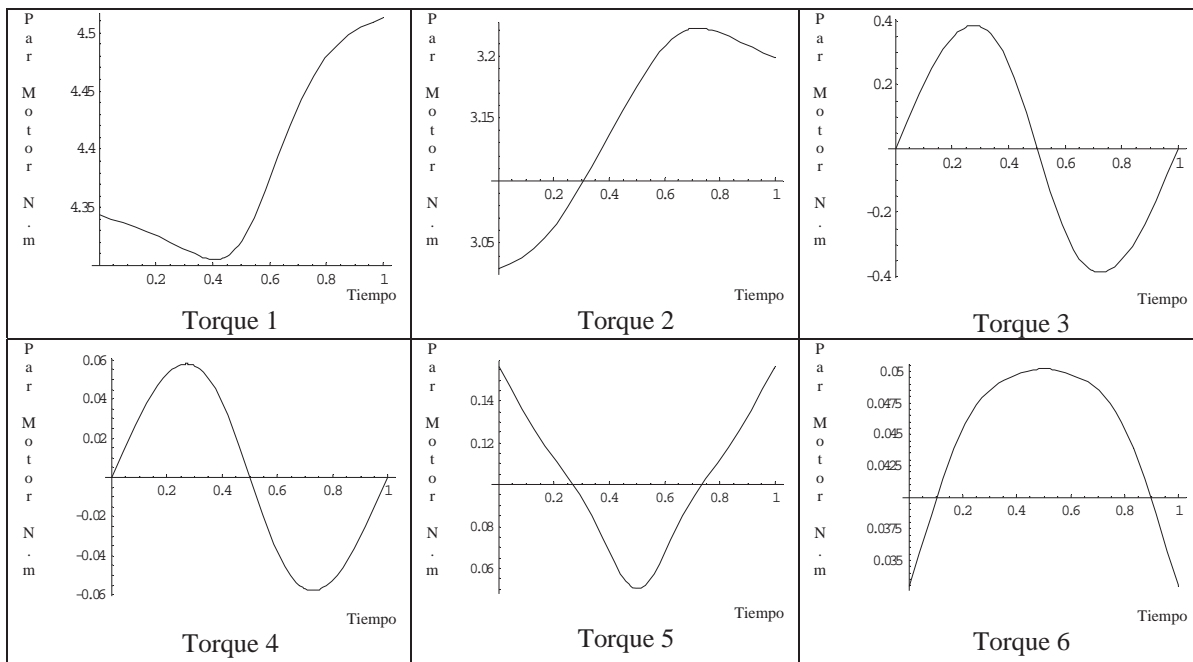


Figura 4.9 Torques descritos por la parte extrema del robot en la trayectoria frontal.

Introduciendo estos mismos datos en el algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler y con el desplazamiento de la trayectoria lateral (figura 4.10), se obtienen las gráficas de la figura 4.11, las cuales indican los torque que se tienen durante el desplazamiento lateral de las partes extremas del cuerpo del robot.

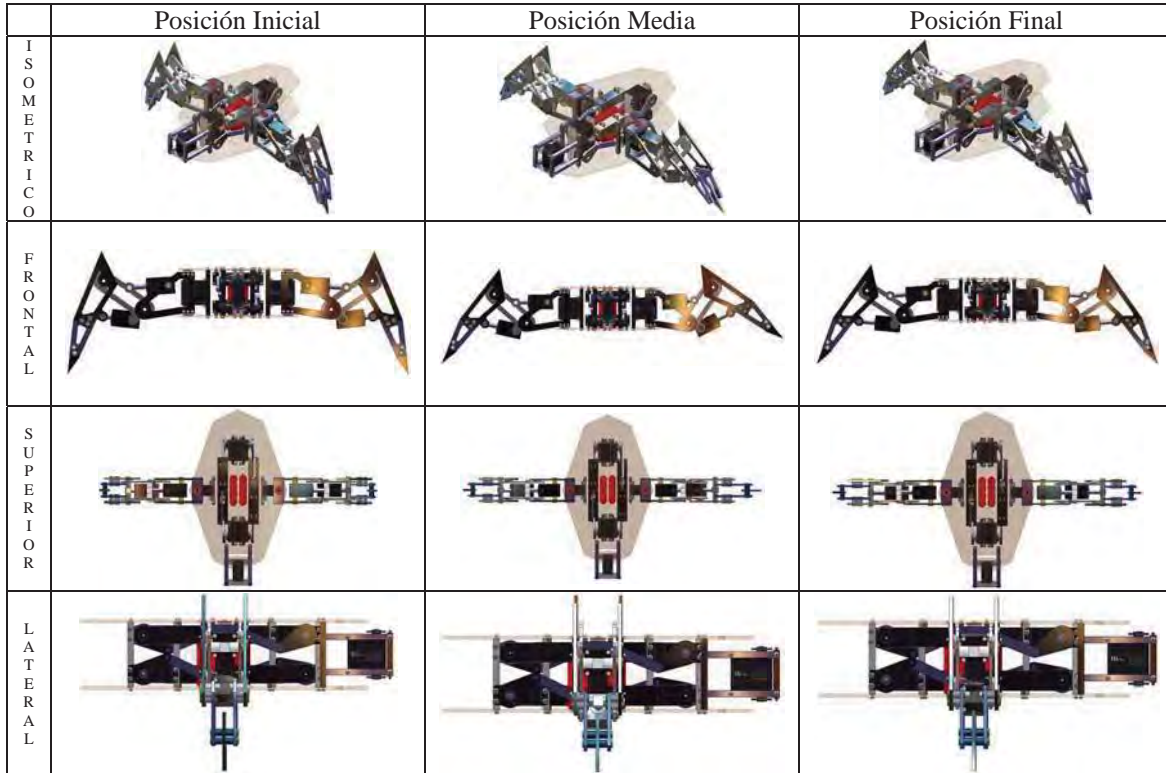


Figura 4.10 Desplazamiento de la parte extrema del robot en la trayectoria lateral.

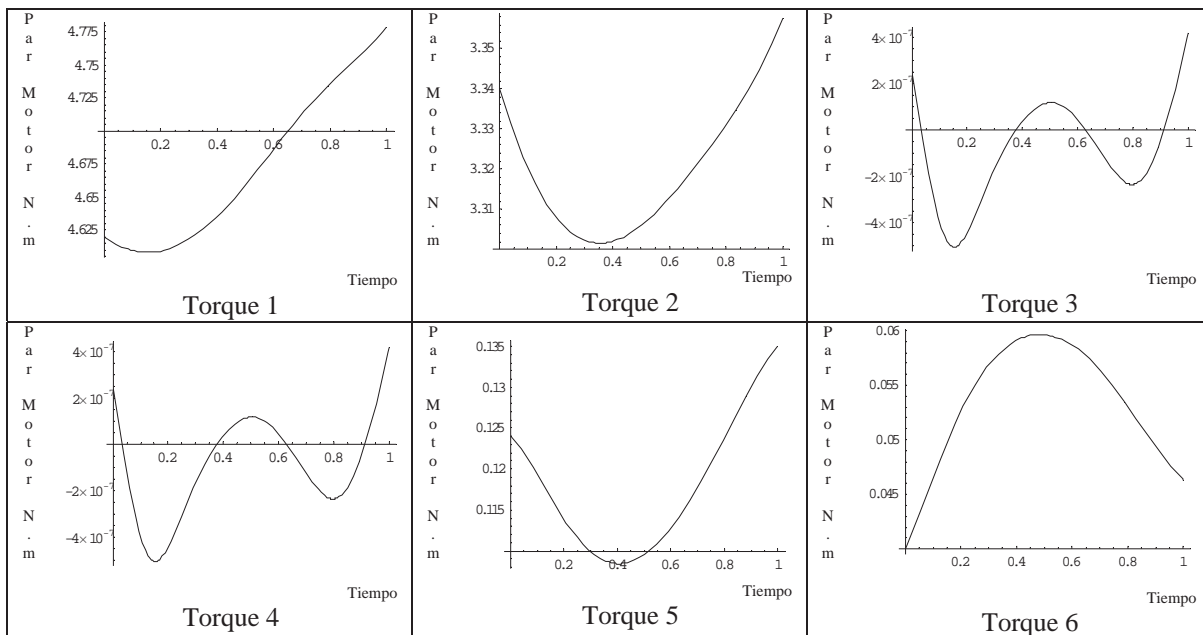


Figura 4.11 Torques descritos por la parte extrema del robot en la trayectoria lateral.

CAPÍTULO 5

5. Sistema de Actuación Hidráulico

El sistema de actuación hidráulico transmite la fuerza necesaria para que el robot pueda desplazarse. Está compuesto por unos pistones colocados en de las patas del robot.

5.1 Tipos De Actuadores

Los elementos que generan el movimiento de las articulaciones pueden ser, según la energía que consuman, de tipo hidráulico, neumático o eléctrico.

Los actuadores de tipo hidráulico se destinan a tareas que requieren una gran potencia y grandes capacidades de carga. Dado el tipo de energía que emplean, se construyen con mecánica de precisión y su costo es elevado.

La energía neumática dota a sus actuadores de una gran velocidad de respuesta, junto a un bajo costo, pero su empleo está siendo sustituido por elementos eléctricos.

Los actuadores eléctricos, que cubren la gama de media y baja potencia, acaparan el campo de la robótica, por su gran precisión en el control de su movimiento y las ventajas inherentes a la energía eléctrica que consumen.

5.1.1 Actuadores Hidráulicos

Se clasifican en Actuadores Lineales, llamados Cilindros y actuadores rotativos en general denominados motores hidráulicos. Los actuadores son alimentados con fluido a presión y se obtiene un movimiento con una determinada fuerza, velocidad angular y momento a partir de la pérdida de presión de un determinado caudal del fluido en cuestión.

$$Potencia\ de\ Entrada = Presión \times Caudal \quad (5.1)$$

$$Potencia\ Entregada\ en\ el\ Actuador = Variación\ de\ Presión \times Caudal \quad (5.2)$$

Esta variación de presión deberá determinarse entre la entrada y la salida del actuador. En estas expresiones no consideramos las pérdidas por rozamiento que existen y no se debe dejar de tenerlas en cuenta para las realizaciones prácticas [12].

La potencia mecánica de salida estará dada en los actuadores lineales por:

$$Potencia\ de\ Salida = Fuerza \times Velocidad \quad (5.3)$$

Y en los actuadores rotativos por:

$$Potencia\ de\ Salida = Momento\ Motor\ (Torque) \times Velocidad\ Angular \quad (5.4)$$

5.2 Determinación De Las Fuerzas Necesarias En Los Eslabones De Las Patas

Estos actuadores son utilizados para proporcionar la fuerza que se necesita en cada una de las articulaciones del robot para que éste pueda moverse. Cuando se aplica una fuerza en algún punto de un cuerpo rígido, éste tiende a realizar un movimiento de rotación en torno a algún eje. La propiedad de la fuerza para hacer girar al cuerpo se mide con una magnitud física que llamaremos **torque** o **momento de la fuerza**. La formula para conocer el torque de una fuerza aplicada en un punto del cuerpo rígido es:

$$\tau = F r \quad (5.5)$$

Donde:

τ es el torque necesario para hacer girar el eslabón.

F es la fuerza proporcionada por el actuador.

r es la distancia a la que se va aplicar la fuerza (brazo de palanca).

La fuerza necesaria depende de la posición del cilindro con respecto a la articulación y del torque requerido para que los eslabones giren y permitan el movimiento del robot (figura 5.1).

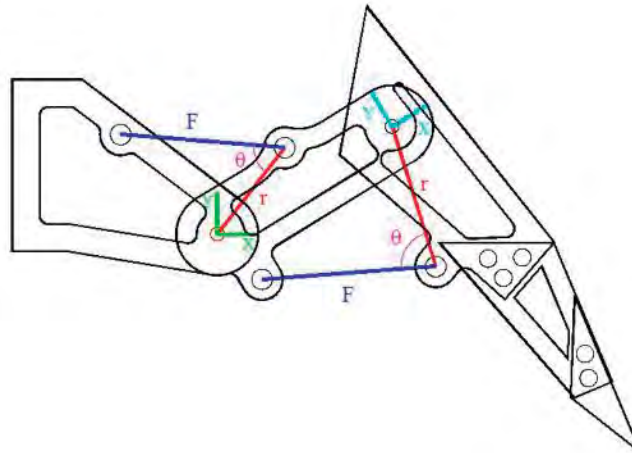


Figura 5.1 Fuerzas en las articulaciones del robot.

Tomando en consideración que se conoce el torque necesario para que cada eslabón se mueva y se conoce la distancia a la que está aplicada la fuerza sólo falta encontrar dicha fuerza, esto se logra teniendo en cuenta las posiciones del eslabón y del pistón que es el que proporciona la fuerza, por lo que para el análisis se obtuvo la siguiente fórmula la cual proporciona los parámetros a considerar.

$$F = \frac{\tau}{r \text{ Sen}(\theta)} \quad (5.6)$$

Donde:

θ es el ángulo que existe entre la fuerza y el brazo de palanca.

A continuación se analizan algunos puntos críticos que se encuentran en los diferentes desplazamientos que son en la posición inicial y final del desplazamiento, en las articulaciones 3 y 4 que conectan las patas con el cuerpo del robot no existen actuadores hidráulicos por lo que no se calcularan los valores en éstas, por razones de simplicidad de los cálculos se han convertido a Kgf-cm los torques obtenidos y se han aumentado un 25 % los torque considerando las perdidas por fricción y peso del sistema de control.

Desplazamiento frontal parte media.

Articulación 1

$$F_{1\max} = \frac{56.32 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen}(76.7837^\circ)} = 10.8135 \text{ kg}$$

$$F_{1\min} = \frac{54.791 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen}(90^\circ)} = 10.5718 \text{ kg}$$

Articulación 2

$$F_{2\max} = \frac{40.3925 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen}(61.9859^\circ)} = 11.4383 \text{ kg}$$

$$F_{2\min} = \frac{39.5 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen}(56.4261^\circ)} = 11.8524 \text{ kg}$$

Articulación 5

$$F_{5\max} = \frac{1.975 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen}(56.4261^\circ)} = 0.592621 \text{ kg}$$

$$F_{5\min} = \frac{0.764526 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen}(70.6346^\circ)} = 0.202594 \text{ kg}$$

Articulación 6

$$F_{6\max} = \frac{0.6371 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen}(75.6367^\circ)} = 0.122927 \text{ kg}$$

$$F_{6\min} = \frac{0.414118 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen}(76.7837^\circ)} = 0.07951 \text{ kg}$$

Desplazamiento lateral parte media.

Articulación 1

$$F_{1\max} = \frac{69.5719 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (76.7837^\circ)} = 13.3579 \text{ kg}$$

$$F_{1\min} = \frac{64.73 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (90^\circ)} = 12.1 \text{ kg}$$

Articulación 2

$$F_{2\max} = \frac{47.528 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (56.4261^\circ)} = 14.2611 \text{ kg}$$

$$F_{2\min} = \frac{47.3369 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (61.9859^\circ)} = 13.4048 \text{ kg}$$

Articulación 5

$$F_{5\max} = \frac{2.03874 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (56.4261^\circ)} = 0.611738 \text{ kg}$$

$$F_{5\min} = \frac{1.78389 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (61.9859^\circ)} = 0.505162 \text{ kg}$$

Articulación 6

$$F_{6\max} = \frac{0.643476 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (75.6367^\circ)} = 0.124157 \text{ kg}$$

$$F_{6\min} = \frac{0.617992 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (90^\circ)} = 0.115512 \text{ kg}$$

Desplazamiento frontal parte extrema.

Articulación 1

$$F_{1\max} = \frac{57.3394 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (76.7837^\circ)} = 11.0092 \text{ kg}$$

$$F_{1\min} = \frac{55.4281 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (90^\circ)} = 10.36 \text{ kg}$$

Articulación 2

$$F_{2\max} = \frac{41.0296 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (56.4261^\circ)} = 12.3112 \text{ kg}$$

$$F_{2\min} = \frac{38.6086 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (61.9859^\circ)} = 10.9332 \text{ kg}$$

Articulación 5

$$F_{5\max} = \frac{1.975 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (56.4261^\circ)} = 0.592621 \text{ kg}$$

$$F_{5\min} = \frac{0.764526 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (70.6346^\circ)} = 0.202594 \text{ kg}$$

Articulación 6

$$F_{6\max} = \frac{0.6371 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (75.6367^\circ)} = 0.122927 \text{ kg}$$

$$F_{6\min} = \frac{0.414118 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (76.7837^\circ)} = 0.07951 \text{ kg}$$

Desplazamiento lateral parte extrema.

Articulación 1

$$F_{1\max} = \frac{57.9766 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (76.7837^\circ)} = 11.1316 \text{ kg}$$

$$F_{1\min} = \frac{54.1539 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (90^\circ)} = 10.1222 \text{ kg}$$

Articulación 2

$$F_{2\max} = \frac{40 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (56.4261^\circ)} = 12 \text{ kg}$$

$$F_{2\min} = \frac{39.8191 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (61.9859^\circ)} = 11.2759 \text{ kg}$$

Articulación 5

$$F_{5\max} = \frac{2.03874 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (56.4261^\circ)} = 0.611738 \text{ kg}$$

$$F_{5\min} = \frac{1.78389 \text{ kg.cm}}{4 \text{ cm Sen } (61.9859^\circ)} = 0.505162 \text{ kg}$$

Articulación 6

$$F_{6\max} = \frac{0.643476 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (75.6367^\circ)} = 0.124157 \text{ kg}$$

$$F_{6\min} = \frac{0.617992 \text{ kg.cm}}{5.35 \text{ cm Sen } (90^\circ)} = 0.115512 \text{ kg}$$

5.3 Diseño Del Actuador Lineal Utilizado En La Pata Del Robot

Una vez que conocida la fuerza se analiza al pistón para determinar si éste puede soportar las condiciones de carga a que va a ser expuesto. Para esto se supone una presión de diseño que debe ser 10 % mayor que la presión de operación. Después se calcula el espesor del cilindro considerando al pistón como un recipiente a presión y utilizando las siguientes fórmulas propuestas en el código ASME [13] para el cálculo de recipientes a presión.

$$\text{Cilindro:} \quad t = \frac{P_D R}{SE - 0.6P_D} \quad (5.7)$$

Donde:

t es el espesor mínimo necesario por presión.

P_D es la presión de diseño.

R es el radio interno del cilindro.

S es el esfuerzo permisible del material en este caso aluminio.

E es la eficiencia en juntas debido a que esta compuesto de una sola pieza está será 1.

$$t = \frac{(0.0247226 \text{ N/m}^2)(0.0127 \text{ m})}{(17000 \text{ N/m}^2)(1) - 0.6(0.0247226 \text{ N/m}^2)} = 1.84693 \times 10^{-8} \text{ m}$$

El cilindro cuenta con un espesor de 0.0052 m por lo que cumple con el espesor mínimo requerido por presión.

$$\text{Tapa Cónica:} \quad t = \frac{P_D D}{2 \text{Cos } \alpha (SE + 0.4P_D)} \quad (5.8)$$

Donde:

D es el diámetro exterior.

α es el ángulo de conicidad.

$$t = \frac{(0.0247226 \text{ N/m}^2)(0.0254 \text{ m})}{2 \text{Cos}(30^\circ) \left((17000 \text{ N/m}^2)(1) + 0.4(0.0247226 \text{ N/m}^2) \right)} = 2.13265 \times 10^{-8} \text{ m}$$

La tapa cónica cuenta con un espesor de 0.0055 m por lo que cumple.

$$\text{Tapa Plana:} \quad t = d \sqrt{\frac{0.13 P_D}{SE}} \quad (5.9)$$

Donde:

d es el diámetro interior.

$$t = 0.015 \text{ m} \sqrt{\frac{0.13 (0.0247226 \text{ N/m}^2)}{(17000 \text{ N/m}^2)(1)}} = 3.95584 \times 10^{-6} \text{ m}$$

La tapa plana cuenta con un espesor de 0.0035 m por lo que cumple.

Otra cosa que se considera es el diseño del vástago el cual no debe de deformarse, ni romperse cuando este sometido a carga por lo que se tiene que calcular la deflexión máxima permisible la cual esta dada por la siguiente formula:

$$\Delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (5.10)$$

Donde:

F = Fuerza máxima soportada.

L = Longitud del vástago.

E = Modulo de elasticidad.

I = Matriz de inercia del vástago.

$$\Delta = \frac{64 (139.9 \text{ N})(0.027 \text{ m})^3}{3\pi (70 \times 10^9 \text{ N/m}^2) (0.0106066 \text{ m})^4} = 0.0000211 \text{ m}$$

CAPÍTULO 6

6. Sistema de Bombeo

Una bomba es una máquina hidráulica que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía hidráulica de un fluido incompresible que se mueve. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos como puede ser el hormigón antes de fraguar o la pasta de papel. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

La principal clasificación de las bombas por su principio de funcionamiento:

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico.
- Bombas roto-dinámicas.

En las bombas de desplazamiento positivo, generalmente el órgano propulsor de la bomba comunica energía hidráulica de presión al fluido. La principal característica de las bombas de desplazamiento positivo es que la partícula de fluido en contacto con el órgano propulsor de la bomba tiene aproximadamente la misma trayectoria que el órgano propulsor de máquina. En las bombas de desplazamiento positivo existe una relación constante entre la descarga y la velocidad del órgano propulsor de la bomba. Las bombas de desplazamiento positivo se clasifican en:

- Reciprocante: el fluido recibe la acción de fuerzas directamente.
 - ❖ pistón.
 - Simple Efecto: el pistón solo acciona en una de sus caras.
 - Doble Efecto: el pistón acciona en ambas caras.
 - ❖ Émbolo.
 - Simplex: existe una sola cámara con pistón, émbolo o diafragma.
 - Múltiplex: existe más de una cámara.
- Rotativas: el fluido recibe la acción de fuerzas de una o más piezas rotativas que comunican energía de presión.
 - ❖ Rotor Unitario.
 - Aspas.
 - Deslizantes.
 - Flexibles.
 - pistón.
 - Elemento Flexible.
 - Tornillo.
 - ❖ Rotores Múltiples.
 - Engranés.
 - Lóbulos.
 - Balancines.
 - Tornillos.

Una bomba centrífuga transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en energía cinética y potencial. Probablemente es la bomba más versátil de todas, son excelentes para mover los líquidos impuros debido a que no se bloquean con facilidad. A diferencia de las bombas de desplazamiento positivo las partículas de fluido no tienen la misma trayectoria, dirección de la velocidad y aceleración del órgano propulsor. La descarga generada depende de las características de la bomba, del número de rotaciones y de las características de la tubería al que la bomba está conectada. Las bombas centrífugas requieren de otro órgano difusor o recuperador, en la que se transforma la energía hidráulica cinética en energía hidráulica de presión.

El órgano propulsor, rotor o impulsor es esencialmente una pieza cónica o troncocónica dotada de palas y pueden ser:

1. Cerrado: a más del disco que fijan las palas o alabes, existe una corona circular también sujeta a las palas.
2. Abierto: cuando no existe la corona exterior.

Las bombas centrífugas se clasifican en:

- Radial.
- Axial.
- Mixto.

Para este proyecto se utilizará una bomba de desplazamiento positivo recíprocante con un pistón de doble efecto (figura 6.1), debido a las características del proyecto este sistema de bombeo va a ser diseñado y construido. Teniendo principalmente en cuenta las dimensiones que se desea tenga el robot, las fuerzas necesarias para el desplazamiento del robot, las herramientas con que se cuenta en el mercado para poder fabricar las piezas y el material del cual se van a construir los elementos.



Figura 6.1 Bomba de desplazamiento positivo a construir.

Debido a que al utilizar una bomba hidráulica se tienen pérdidas al transformar la energía eléctrica en mecánica, la mecánica en hidráulica y la hidráulica en mecánica; se ha utilizado el principio de Pascal el cual dice “*el incremento de presión aplicado a una superficie de un fluido incompresible (líquido), contenido en un recipiente indeformable, se transmite con el mismo valor a cada una de las partes del mismo*”, con el cual se permite amplificar la intensidad de las fuerzas y constituye el fundamento de elevadores, prensas, frenos y muchos otros dispositivos hidráulicos de maquinaria industrial, el cual se puede utilizar para disminuir la fuerza aplicada por la bomba para poder mover el pistón situado en las patas del robot.

6.1 Principio De Pascal

La prensa hidráulica constituye una aplicación fundamental del principio de Pascal y también un dispositivo que permite entender mejor su significado. Consiste en dos cilindros de diferente sección comunicados entre sí, y cuyo interior está completamente lleno de un líquido (figura 6.1). Dos émbolos de secciones diferentes se ajustan, respectivamente, en cada uno de los dos cilindros, de modo que estén en contacto con el líquido [14].

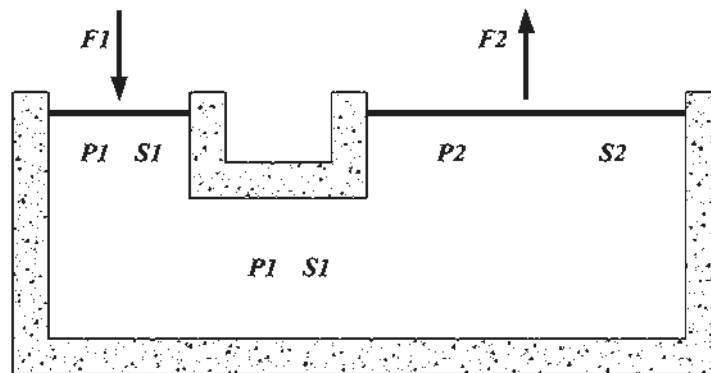


Figura 6.1 Principio de Pascal.

Cuando sobre el émbolo de menor sección S_1 se ejerce una fuerza F_1 la presión p_1 que se origina en el líquido en contacto con él se transmite íntegramente y de forma casi instantánea a todo el resto del líquido. Por el principio de Pascal esta presión será igual a la presión p_2 que ejerce el líquido sobre el émbolo de mayor sección S_2 , es decir:

$$p_1 = p_2 \quad (6.1)$$

Esto es:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \quad (6.2)$$

Por tanto, la relación entre la fuerza resultante en el émbolo grande cuando se aplica una fuerza menor en el émbolo pequeño será mayor cuanto mayor sea la relación entre las secciones:

$$F_1 = \frac{F_2 S_1}{S_2} \quad (6.3)$$

6.2 Determinación De Las Fuerzas Aplicadas Por El Sistema De Bombeo

Como ya se conocen las fuerzas necesarias para que la pata se mueva en los puntos críticos ahora se calculan las fuerzas que debe de entregar el sistema de bombeo para que las fuerzas de las patas se cumplan.

Desplazamiento frontal parte media.

Articulación 1

$$F_{1\max} = \frac{(10.8135 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.40675 \text{ kg}$$

$$F_{1\min} = \frac{(10.5718 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.28588 \text{ kg}$$

Articulación 2

$$F_{2\max} = \frac{(11.4383 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.71916 \text{ kg}$$

$$F_{2\min} = \frac{(11.8524 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.92621 \text{ kg}$$

Articulación 5

$$F_{5\max} = \frac{(0.592621 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.296311 \text{ kg}$$

$$F_{5\min} = \frac{(0.202594 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.101297 \text{ kg}$$

Articulación 6

$$F_{6\max} = \frac{(0.122927 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.0614637 \text{ kg}$$

$$F_{6\min} = \frac{(0.07951 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.0039755 \text{ kg}$$

Desplazamiento lateral parte media.

Articulación 1

$$F_{1\max} = \frac{(13.3579 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 6.67894 \text{ kg}$$

$$F_{1\min} = \frac{(12.1 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 6.05 \text{ kg}$$

Articulación 2

$$F_{2\max} = \frac{(14.2611 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 7.13055 \text{ kg}$$

$$F_{2\min} = \frac{(13.4048 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 6.7024 \text{ kg}$$

Articulación 5

$$F_{5\max} = \frac{(0.611738 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.305869 \text{ kg}$$

$$F_{5\min} = \frac{(0.505162 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.252581 \text{ kg}$$

Articulación 6

$$F_{6\max} = \frac{(0.124157 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.0620784 \text{ kg}$$

$$F_{6\min} = \frac{(0.115512 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.0577562 \text{ kg}$$

Desplazamiento frontal parte extrema.

Articulación 1

$$F_{1\max} = \frac{(11.0092 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.5046 \text{ kg}$$

$$F_{1\min} = \frac{(10.36 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.18 \text{ kg}$$

Articulación 2

$$F_{2\max} = \frac{(12.3112 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 6.1556 \text{ kg}$$

$$F_{2\min} = \frac{(10.9332 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.4666 \text{ kg}$$

Articulación 5

$$F_{5\max} = \frac{(0.592621 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.296311 \text{ kg}$$

$$F_{5\min} = \frac{(0.202594 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.101297 \text{ kg}$$

Articulación 6

$$F_{6\max} = \frac{(0.122927 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.0614637 \text{ kg}$$

$$F_{6\min} = \frac{(0.07951 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.0039755 \text{ kg}$$

Desplazamiento lateral parte extrema.

Articulación 1

$$F_{1\max} = \frac{(11.1316 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.56579 \text{ kg}$$

$$F_{1\min} = \frac{(10.1222 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.06111 \text{ kg}$$

Articulación 2

$$F_{2\max} = \frac{(12 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 6 \text{ kg}$$

$$F_{2\min} = \frac{(11.2759 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 5.63797 \text{ kg}$$

Articulación 5

$$F_{5\max} = \frac{(0.611738 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.305869 \text{ kg}$$

$$F_{5\min} = \frac{(0.505162 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.252581 \text{ kg}$$

Articulación 6

$$F_{6\max} = \frac{(0.124157 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.0620784 \text{ kg}$$

$$F_{6\min} = \frac{(0.115512 \text{ kg})(0.883573 \text{ cm}^2)}{1.76715 \text{ cm}^2} = 0.0577562 \text{ kg}$$

6.3 Diseño Del Actuador Lineal Utilizado En El Sistema De Bombeo

Teniendo en cuenta esto se diseña el pistón impulsor de la bomba utilizando las mismas fórmulas que se utilizaron para el diseño del pistón para la articulación de la pata.

Cilindro:
$$t = \frac{P_D R}{SE - 0.6P_D} \quad (5.7)$$

$$t = \frac{(0.02472 \text{ N/m}^2)(0.009525 \text{ m})}{(17000 \text{ N/m}^2)(1) - 0.6(0.02472 \text{ N/m}^2)} = 3.46298 \times 10^{-9} \text{ m}$$

El cilindro cuenta con un espesor de 0.0042217 m por lo que cumple con el espesor mínimo requerido por presión.

Tapa Cónica:
$$t = \frac{P_D D}{2 \text{Cos } \alpha (SE + 0.4P_D)} \quad (5.8)$$

$$t = \frac{(0.02472 \text{ N/m}^2)(0.01905 \text{ m})}{2 \text{Cos}(30^\circ) \left((17000 \text{ N/m}^2)(1) + 0.4(0.02472 \text{ N/m}^2) \right)} = 3.99871 \times 10^{-9} \text{ m}$$

La tapa cónica cuenta con un espesor de 0.0055 m por lo que cumple con el espesor mínimo requerido por presión.

Tapa Plana:
$$t = d \sqrt{\frac{0.13 P_D}{SE}} \quad (5.9)$$

$$t = 0.0106066 \text{ m} \sqrt{\frac{0.13 (0.02472 \text{ N/m}^2)}{(17000 \text{ N/m}^2)(1)}} = 1.3986 \times 10^{-6} \text{ m}$$

La tapa plana cuenta con un espesor de 0.0035 m por lo que cumple con el espesor mínimo requerido por presión.

Cálculo de la deflexión máxima permisible en el vástago de la bomba:

$$\Delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (5.10)$$

$$\Delta = \frac{64 (69.95 \text{ N})(0.035 \text{ m})^3}{3\pi (70 \times 10^9 \text{ N/m}^2) (0.0075 \text{ m})^4} = 0.0000919 \text{ m}$$

6.4 Cálculo Del Servomotor A Utilizar En El Sistema De Bombeo

Una vez que conocidas las fuerzas de entrada en el sistema de bombeo necesarias para mover las articulaciones se va a determinar el torque que se necesitara para realizar dicha tarea. Para esto se considera un mecanismo biela-manivela (figura 6.1) como sistema motriz.

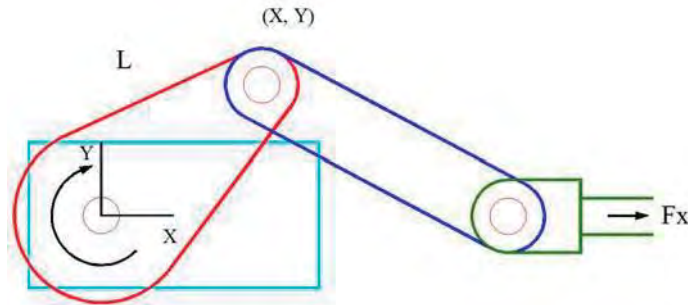
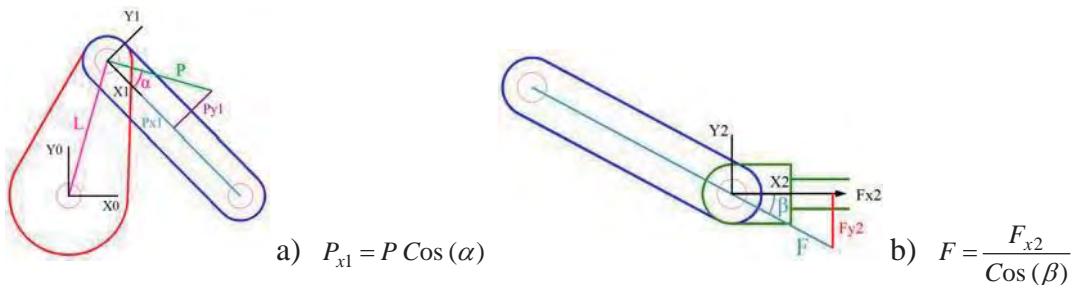


Figura 6.1 Mecanismo biela-manivela del sistema de bombeo.

Para determinar el torque necesario para el sistema de bombeo se tiene que analizar el mecanismo biela-manivela en el cual se harán las siguientes consideraciones: primero la descomposición de la fuerza de empuje proporcionada por el motor (figura 6.2 a) y después la descomposición de la fuerza transmitida por la manivela (figura 6.2 b):



a) $P_{x1} = P \cos(\alpha)$

b) $F = \frac{F_{x2}}{\cos(\beta)}$

Figura 6.2 Descomposición de las fuerzas.

Teniendo en cuenta que $F = P_{x1}$ encontramos la siguiente relación:

$$P \cos(\alpha) = \frac{F_{x2}}{\cos(\beta)} \quad (6.4)$$

$$P = \frac{F_{x2}}{\cos(\alpha) \cos(\beta)} \quad (6.5)$$

$$\tau = P L \quad (6.6)$$

Por lo que el torque está determinado por la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{F_{x2} L}{\cos(\alpha) \cos(\beta)} \quad (6.7)$$

Ya determinadas las fuerzas y con las ecuaciones que se han determinado se procede a encontrar los torques necesarios para cada articulación, con los cuales se pueden considerar las características de los servomotores a utilizar en éste proyecto.

Desplazamiento frontal parte media.

Articulación 1

$$\tau_{1\max} = \frac{(5.40676 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (31.6) \text{Cos} (24.64)} = 20.9517 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{1\min} = \frac{(5.28588 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (34.28) \text{Cos} (47.02)} = 23.35 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 2

$$\tau_{2\max} = \frac{(5.71916 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (13.62) \text{Cos} (41.52)} = 23.5787 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{2\min} = \frac{(5.9262 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (10.83) \text{Cos} (32.85)} = 21.5464 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 5

$$\tau_{5\max} = \frac{(0.296311 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (10.83) \text{Cos} (32.85)} = 1.0773 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{5\min} = \frac{(0.101297 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (45.86) \text{Cos} (48.52)} = 0.6588 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 6

$$\tau_{6\max} = \frac{(0.0614637 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (43.88) \text{Cos} (19.58)} = 0.271518 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{6\min} = \frac{(0.0397556 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (31.6) \text{Cos} (24.64)} = 0.154057 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Desplazamiento Lateral parte media.

Articulación 1

$$\tau_{1\max} = \frac{(6.67894 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (31.6) \text{ Cos} (24.64)} = 25.8816 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{1\min} = \frac{(6.05 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (34.28) \text{ Cos} (47.02)} = 30.21 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 2

$$\tau_{2\max} = \frac{(7.13057 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (10.83) \text{ Cos} (32.85)} = 25.9252 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{2\min} = \frac{(6.70242 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (13.62) \text{ Cos} (41.52)} = 27.6324 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 5

$$\tau_{5\max} = \frac{(0.305869 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (10.83) \text{ Cos} (32.85)} = 1.112 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{5\min} = \frac{(0.252581 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (13.62) \text{ Cos} (41.52)} = 1.0413 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 6

$$\tau_{6\max} = \frac{(0.0620784 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (43.88) \text{ Cos} (19.58)} = 0.274233 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{6\min} = \frac{(0.0577562 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (34.28) \text{ Cos} (47.02)} = 0.307584 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Desplazamiento frontal parte extrema.

Articulación 1

$$\tau_{1\max} = \frac{(5.50462 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (31.6) \text{ Cos} (24.64)} = 21.33 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{1\min} = \frac{(5.18 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (34.28) \text{ Cos} (47.02)} = 27.5864 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 2

$$\tau_{2\max} = \frac{(6.15562 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (10.83) \text{ Cos} (32.85)} = 22.38 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{2\min} = \frac{(5.46658 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (13.62) \text{ Cos} (41.52)} = 22.5374 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 5

$$\tau_{5\max} = \frac{(0.296311 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (10.83) \text{ Cos} (32.85)} = 1.0773 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{5\min} = \frac{(0.101297 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (45.86) \text{ Cos} (48.52)} = 0.6588 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 6

$$\tau_{6\max} = \frac{(0.0614637 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (43.88) \text{ Cos} (19.58)} = 0.271518 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{6\min} = \frac{(0.0397556 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (31.6) \text{ Cos} (24.64)} = 0.154057 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Desplazamiento Lateral parte media.

Articulación 1

$$\tau_{1\max} = \frac{(5.56579 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (31.6) \text{ Cos} (24.64)} = 21.568 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{1\min} = \frac{(5.0611 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (34.28) \text{ Cos} (47.02)} = 26.9533 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 2

$$\tau_{2\max} = \frac{(6 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (10.83) \text{ Cos} (32.85)} = 21.8245 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{2\min} = \frac{(5.63797 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (13.62) \text{ Cos} (41.52)} = 23.2439 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 5

$$\tau_{5\max} = \frac{(0.305869 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (10.83) \text{ Cos} (32.85)} = 1.112 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{5\min} = \frac{(0.252581 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (13.62) \text{ Cos} (41.52)} = 1.0413 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Articulación 6

$$\tau_{6\max} = \frac{(0.0620784 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (43.88) \text{ Cos} (19.58)} = 0.274233 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\tau_{6\min} = \frac{(0.0577562 \text{ Kg}) (3 \text{ cm})}{\text{Cos} (34.28) \text{ Cos} (47.02)} = 0.307584 \text{ Kg} - \text{cm}$$

CAPÍTULO 7

7. Actuador Eléctrico

Para hacer que se mueva el robot se utilizará un sistema de bombeo el cual convierte la energía eléctrica en energía mecánica, y ésta a su vez en energía hidráulica, por lo que se necesita un motor eléctrico como actuador.

7.1 Motor Eléctrico

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Debido a sus múltiples ventajas, entre las que cabe citar su economía, limpieza, comodidad y seguridad de funcionamiento, el motor eléctrico ha reemplazado en gran parte a otras fuentes de energía, tanto en la industria como en el transporte, las minas, el comercio, o el hogar.

Los motores eléctricos satisfacen una amplia gama de necesidades de servicio, desde arrancar, acelerar, mover, o frenar, hasta sostener y detener una carga. Estos motores se fabrican en potencias que varían desde una pequeña fracción de caballo hasta varios miles, y con una amplia variedad de velocidades, que pueden ser fijas, ajustables o variables.

Un motor eléctrico contiene un número mucho más pequeño de piezas mecánicas que un motor de combustión interna o uno de una máquina de vapor, por lo que es menos propenso a los fallos. Los motores eléctricos son los más ágiles de todos en lo que respecta a variación de potencia y pueden pasar instantáneamente desde la posición de reposo a la de funcionamiento al máximo. Su tamaño es más reducido y pueden desarrollarse sistemas para manejar las ruedas desde un único motor, como en los automóviles.

El inconveniente es que las baterías son los únicos sistemas de almacenamiento de electricidad, y ocupan mucho espacio. Además, cuando se gastan, necesitan varias horas para recargarse antes de poder funcionar otra vez, mientras que en el caso de un motor de combustión interna basta sólo con llenar el depósito de combustible.

En cuanto a los tipos de motores eléctricos genéricamente se distinguen motores monofásicos, que contienen un juego simple de bobinas en el estator, y polifásicos, que mantienen dos, tres o más conjuntos de bobinas dispuestas en círculo.

Según la naturaleza de la corriente eléctrica transformada, los motores eléctricos se clasifican en motores de corriente continua, también denominada directa, motores de corriente alterna, que, a su vez, se agrupan, según su sistema de funcionamiento, en motores de inducción, motores sincrónicos y motores de colector. Tanto unos como otros disponen de todos los elementos comunes a las máquinas rotativas electromagnéticas

7.1.2 Motores De Corriente Continúa

La conversión de energía en un motor eléctrico se debe a la interacción entre una corriente eléctrica y un campo magnético. Un campo magnético, que se forma entre los dos polos opuestos de un imán, es una región donde se ejerce una fuerza sobre determinados metales o sobre otros campos magnéticos. Un motor eléctrico aprovecha este tipo de fuerza para hacer girar un eje, transformándose así la energía eléctrica en movimiento mecánico.

Los dos componentes básicos de todo motor eléctrico son el rotor y el estator. El rotor es una pieza giratoria, un electroimán móvil, con varios salientes laterales, que llevan cada uno a su alrededor un bobinado por el que pasa la corriente eléctrica. El estator, situado alrededor del rotor, es un electroimán fijo, cubierto con un aislante. Al igual que el rotor, dispone de una serie de salientes con bobinados eléctricos por los que circula la corriente.

Cuando se introduce una espira de hilo de cobre en un campo magnético y se conecta a una batería, la corriente pasa en un sentido por uno de sus lados y en sentido contrario por el lado opuesto. Así, sobre los dos lados de la espira se ejerce una fuerza, en uno de ellos hacia arriba y en el otro hacia abajo. Si la espira de hilo va montada sobre el eje metálico, empieza a dar vueltas hasta alcanzar la posición vertical. Entonces, en esta posición, cada uno de los hilos se encuentra situado en el medio entre los dos polos, y la espira queda retenida.

Para que la espira siga girando después de alcanzar la posición vertical, es necesario invertir el sentido de circulación de la corriente. Para conseguirlo, se emplea un conmutador o colector, que en el motor eléctrico más simple, el motor de corriente continua, está formado por dos chapas de metal con forma de media luna, que se sitúan sin tocarse, como las dos mitades de un anillo, y que se denominan delgas. Los dos extremos de la espira se conectan a las dos medias lunas.

Dos conexiones fijas, unidas al bastidor del motor y llamadas escobillas, hacen contacto con cada una de las delgas del colector, de forma que, al girar la armadura, las escobillas contactan primero con una delga y después con la otra. Cuando la corriente eléctrica pasa por el circuito, la armadura empieza a girar y la rotación dura hasta que la espira alcanza la posición vertical. Al girar las delgas del colector con la espira, cada media vuelta se invierte el sentido de circulación de la corriente eléctrica. Esto quiere decir que la parte de la espira que hasta ese momento recibía la fuerza hacia arriba, ahora la recibe hacia abajo, y la otra parte al contrario. De esta manera la espira realiza otra media vuelta y el proceso se repite mientras gira la armadura.

La velocidad a la que funciona un motor depende de la intensidad del campo magnético que actúa sobre el rotor, así como de la corriente de ésta. Cuanto más fuerte es el campo, más bajo es el grado de rotación necesario para generar un voltaje inducido lo bastante grande como para contrarrestar el voltaje aplicado. Por esta razón, la velocidad de los motores de corriente continua puede controlarse mediante la variación de la corriente del campo.

7.2 Servomotor

Los servos son un tipo especial de motor de corriente directa que se caracterizan por su capacidad para situarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su intervalo de operación. Para ello, el servomotor (figura 7.1), espera un tren de pulsos que se corresponde con el movimiento a realizar.



Figura 7.1 Servomotor.

Se dice que el servo es un dispositivo con un eje de rendimiento controlado ya que puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que exista una señal codificada en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. En la práctica, se usan servos para posicionar elementos de control como palancas, pequeños ascensores y timones.

Están generalmente formados por un amplificador, un motor, un sistema reductor formado por ruedas dentadas y un circuito de realimentación, todo en una misma caja de pequeñas dimensiones (figura 7.2). El motor del servo tiene algunos circuitos de control y un potenciómetro conectado al eje central del motor. Este potenciómetro permite al circuito de control, supervisar el ángulo actual del servo motor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito chequea que el ángulo no es correcto, el motor volverá a la dirección correcta, hasta llegar al ángulo que es correcto. El eje del servo es capaz de llegar alrededor de los 180 grados, pero varía según el fabricante.



Figura 7.2 Servomotor desarmado.

La modulación por anchura de pulso, PWM (*Pulse Width Modulation*), es una de los sistemas más empleados para el control de servos. Este sistema consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está a nivel alto, manteniendo el mismo período con el objetivo de modificar la posición del servo según se desee.

Para la generación de una onda PWM (Figura. 7.3) en un microcontrolador, lo más habitual es usar un *timer* y un comparador (interrupciones asociadas), de modo que el microcontrolador quede libre para realizar otras tareas, y la generación de la señal sea automática y más efectiva. El mecanismo consiste en programar el *timer* con el ancho del pulso (el período de la señal) y al comparador con el valor de duración del pulso a nivel alto. Cuando se produce una interrupción de *overflow* del *timer*, la subrutina de interrupción debe poner la señal PWM a nivel alto y cuando se produzca la interrupción del comparador, ésta debe poner la señal PWM a nivel bajo. En la actualidad, muchos microcontroladores, disponen de hardware específico para realizar esta tarea, eso sí, consumiendo los recursos antes mencionados (*timer* y comparador) [15].



Figura 7.3 PWM para recorrer todo el rango de operación del servo

El sistema de control de un servo se limita a indicar en que posición se debe situar. Esto se lleva a cabo mediante una serie de pulsos tal que la duración del pulso indica el ángulo de giro del motor. Cada servo tiene sus márgenes de operación, que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo que el servo entiende. Los valores más generales se corresponden con pulsos de entre 1 ms y 2 ms de anchura (Figura 7.4), que dejarían al motor en ambos extremos (0° y 180°). El valor 1.5 ms indicaría la posición central o neutra (90°), mientras que otros valores del pulso lo dejan en posiciones intermedias. Estos valores suelen ser los recomendados, sin embargo, es posible emplear pulsos menores de 1 ms o mayores de 2 ms, pudiéndose conseguir ángulos mayores de 180° . Si se sobrepasan los límites de movimiento del servo, éste comenzará a emitir un zumbido, indicando que se debe cambiar la longitud del pulso. El factor limitante es el tope del potenciómetro y los límites mecánicos constructivos.

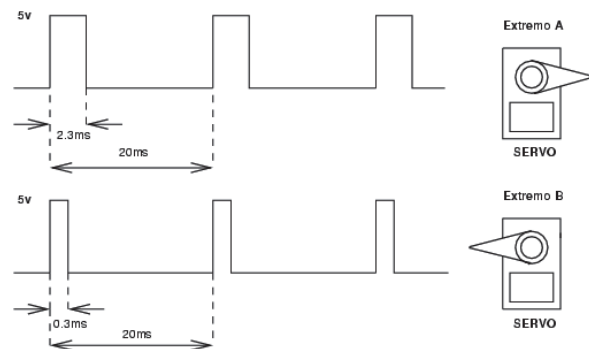


Figura 7.4 Tren de pulsos para control del servo.

El período entre pulso y pulso (tiempo de OFF) no es crítico, e incluso puede ser distinto entre uno y otro pulso. Se suelen emplear valores ~ 20 ms (entre 10 ms y 30 ms). Si el intervalo entre pulso y pulso es inferior al mínimo, puede interferir con la temporización interna del servo, causando un zumbido, y la vibración del eje de salida. Si es mayor que el máximo, entonces el servo pasará a estado dormido entre pulsos. Esto provoca que se mueva con intervalos pequeños.

Es importante destacar que para que un servo se mantenga en la misma posición durante un cierto tiempo, es necesario enviarle continuamente el pulso correspondiente. De este modo, si existe alguna fuerza que le obligue a abandonar esta posición, intentará resistirse. Si se deja de enviar pulsos (o el intervalo entre pulsos es mayor que el máximo) entonces el servo perderá fuerza y dejará de intentar mantener su posición, de modo que cualquier fuerza externa podría desplazarlo.

Los servomotores cuentan con 3 cables de conexión externa:

- Rojo es para alimentación, V_{cc} ($\sim +5$ volts);
- Negro para conexión a tierra (GND);
- Blanco o amarillo es la línea de control por la que se le envía la señal codificada para comunicar el ángulo en el que se debe posicionar.

La forma en como debe conectarse se muestra en la figura 7.5.

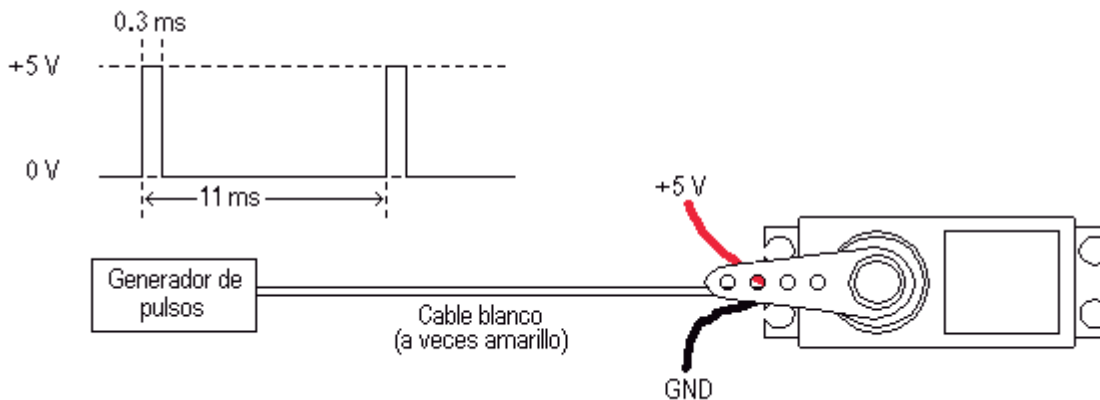


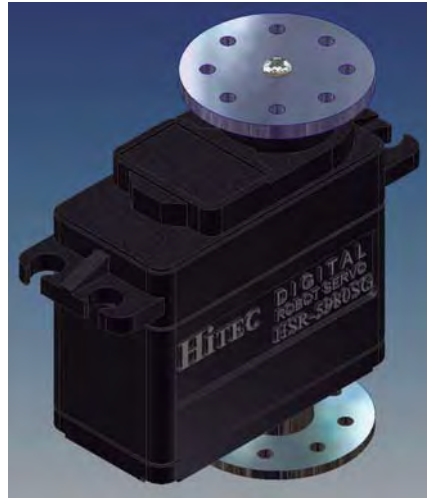
Figura 7.5 Diagrama de conexión de un servomotor.

Para este proyecto se van a necesitar 20 servomotores que suministrarán la fuerza necesaria para que el robot pueda desplazarse sin ninguna contrariedad. Estos servomotores los podemos clasificar en 2 tipos debido a sus características físicas, las cuales cumplen con requerimientos que son el resultado del análisis cinético del robot, a continuación daremos las especificaciones de cada uno de estos 2 servomotores.

7.3 Especificaciones Generales De Los Servomotores

A continuación se muestran las características generales de los servomotores que pueden ser utilizados en la construcción del robot, basados en los cálculos de los torques obtenidos en el capítulo anterior.

Servomotor digital HSR – 5980 SG.



Sistema de control: + control de la anchura de pulso 1500 usec Neutral
Rango del voltaje de operación: 6.0 V – 7.4 V
Rango de temperatura de operación: -20 °C – + 60 °C

Datos con un voltaje de operación de 7.4 V.

Velocidad de operación: 0.14 sec/60° sin carga
Esfuerzo de torsión de parada: 30.0 Kg.cm
Esfuerzo de torsión: 39.0 Kg.cm / 5° holdout
Corriente ociosa: 10 mA parado
Corriente de operación: 380 mA / sin carga en operación
Corriente de parada: 5200 mA
Anchura de banda muerta: 2 usec
Recorrido de operación: 90±1° / pulso de recorrido 400 usec
Dirección: reloj / pulso de recorrido 1500 a 1900 usec
Tipo de motor: coreless metal brush
Tipo de potenciómetro: 6 slider / indirect drive
Tipo de amplificador: Amplificador digital con mosfet drive
Dimensiones: 40 x 20 x 37 mm
Peso: 70 gr.

Servomotor digital HSR – 5498 SG.



Sistema de control: + control de la anchura de pulso 1500 usec Neutral
Rango del voltaje de operación: 6.0 V – 7.4 V
Rango de temperatura de operación: -20 °C – + 60 °C

Datos con un voltaje de operación de 7.4 V.

Velocidad de operación: 0.19 sec/60° sin carga
Esfuerzo de torsión de parada: 13.5 Kg.cm
Esfuerzo de torsión: 14.4 Kg.cm / 5° holdout
Corriente ociosa: 10 mA parado
Corriente de operación: 240 mA / sin carga en operación
Corriente de parada: 1480 mA
Anchura de banda muerta: 5 usec
Recorrido de operación: 90±1° / pulso de recorrido 900 usec
Dirección: reloj / pulso de recorrido 1500 a 1900 usec
Tipo de motor: cored metal brush
Tipo de potenciómetro: 4 slider / indirect drive
Tipo de amplificador: Amplificador digital con mosfet drive
Dimensiones: 40 x 20 x 37 mm
Peso: 59.8 gr.

CAPÍTULO 8

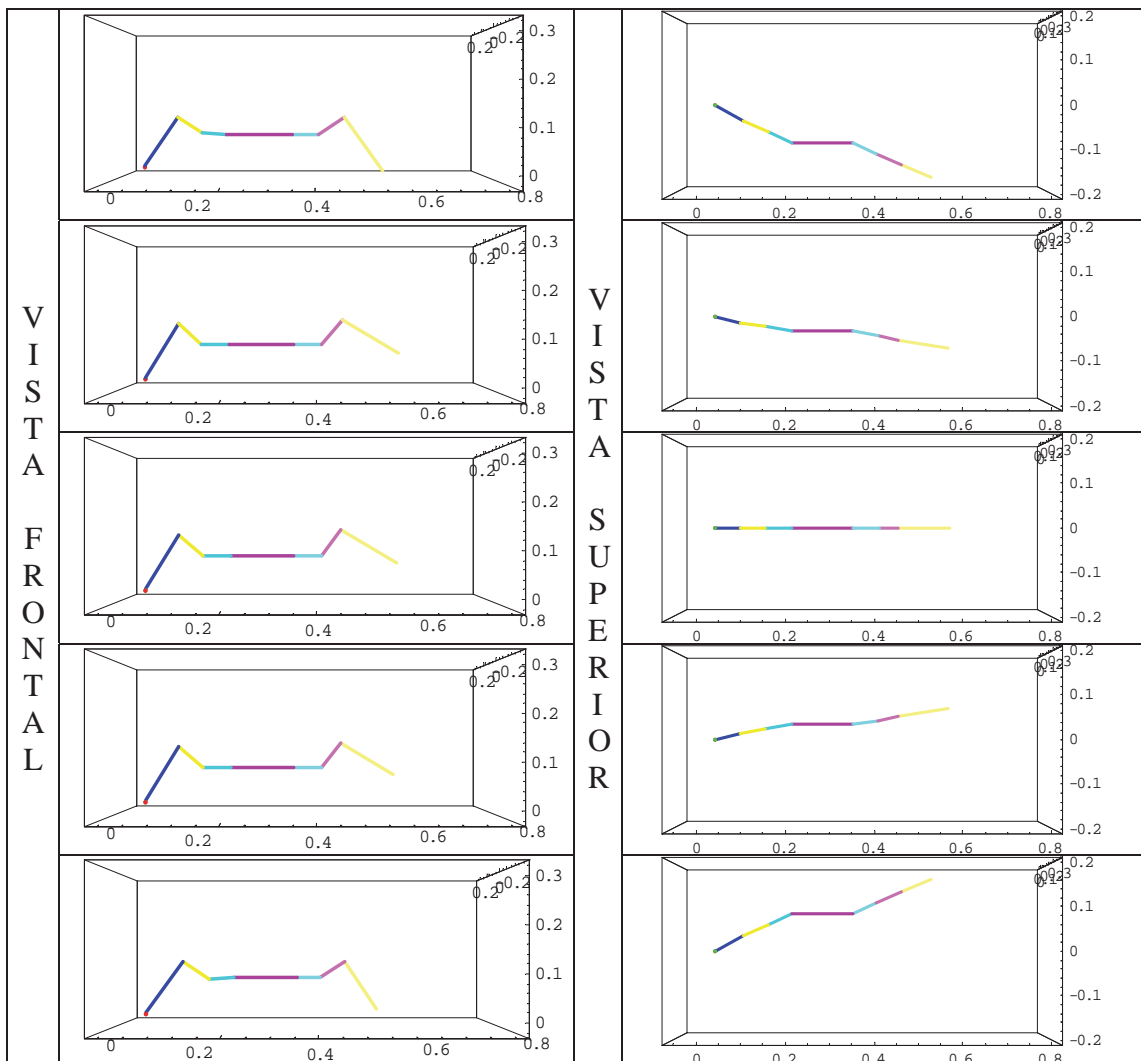
8. Análisis, Resultados y Discusiones

8.1 Parte Media Del Robot

8.1.1 Desplazamiento Frontal De La Parte Media Del Robot

8.1.1.1 Simulación Del Desplazamiento Frontal

Considerando las características físicas de esta parte del robot descritas en el capítulo 3 y teniendo en cuenta la dimensión y posición del pistón el desplazamiento frontal máximo que puede tener el robot es de 18.33 cm. con una elevación de 6.5 cm. sobre la superficie de apoyo. Haciendo uso del algoritmo de Denavit-Hartenberg se obtiene la simulación del desplazamiento frontal de la parte media del robot (figura 8.1).



* Nota: Las líneas en la simulación simbolizan cada uno de los eslabones.

Figura 8.1 Simulación del desplazamiento frontal de la parte media del robot.

Entendiendo que esta trayectoria se debe de realizar en un tiempo de 1 seg, se obtienen las siguientes gráficas de desplazamiento para cada articulación (figura 8.2), éstos valores son útiles debido a que con ellos se determinan las velocidades angulares y las aceleraciones angulares necesarias para poder determinar el torque que se experimentaría en cada articulación.

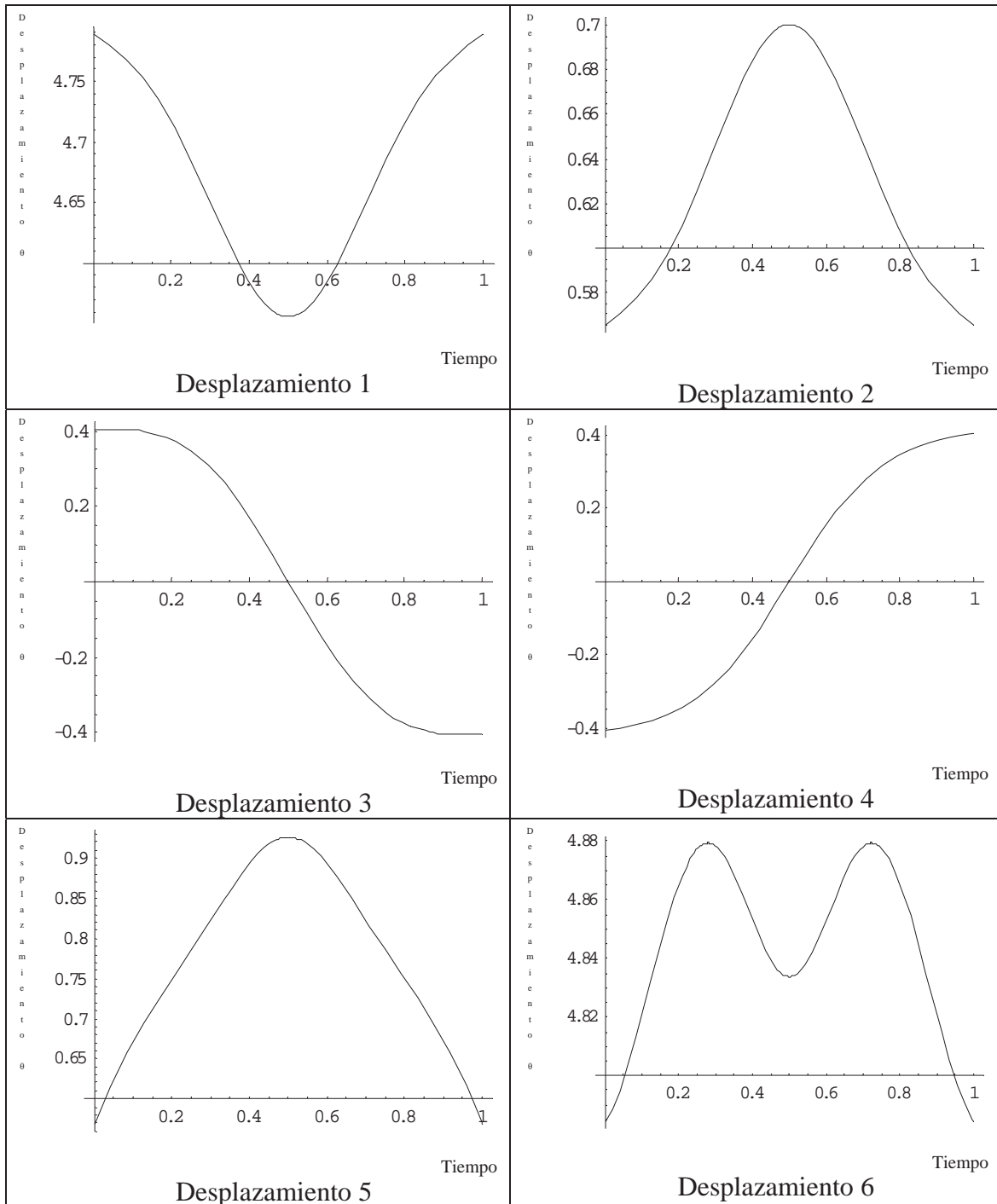


Figura 8.2 Desplazamiento durante el desplazamiento frontal de la parte media.

8.1.1.2 Torques Experimentados Durante El Desplazamiento Frontal

Haciendo uso del algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler y con los datos mencionados en el capítulo 4 como son la longitud, la masa, el centro de gravedad y la matriz de inercia de cada uno de los eslabones, se obtienen las gráficas de los torques (figura 8.3) que experimentaría la parte media del robot durante la trayectoria antes planteada.

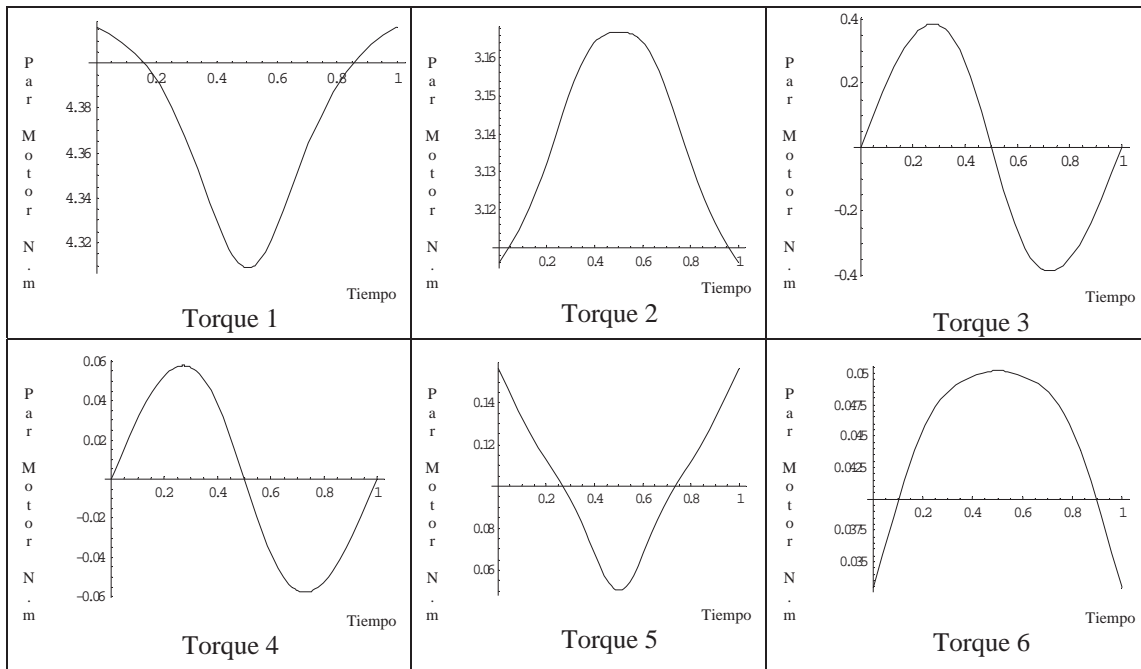


Figura 8.3 Torques experimentados por la parte media del robot en la trayectoria frontal.

8.1.1.3 Fuerzas Aplicadas A Los Eslabones Durante El Desplazamiento Frontal

A continuación se muestran los datos obtenidos en el capítulo 5 con los cuales se conoce la fuerza que se debe de aplicar, con un brazo de palanca conocido en un ángulo determinado para poder obtener el torque necesario para el movimiento de cada uno de los eslabones en sus puntos de inicio y de fin.

	Torque (kg.cm)		Brazo de palanca (cm)	Ángulo de la fuerza (°)		Fuerza (kg)	
	máximo	mínimo		máximo	mínimo	máximo	mínimo
1	56.32	54.791	5.35	76.7837	90	10.8135	10.5718
2	40.3925	39.5	4	56.4261	61.9859	11.4383	11.8524
3	5.09684		-	-	-	-	-
4	0.764526		-	-	-	-	-
5	1.975	0.76452	4	56.4261	70.6346	0.59262	0.20259
6	0.6371	0.41412	5.35	75.6367	76.7837	0.12292	0.07951

- Nota: No existen fuerzas en las articulaciones 3 y 4 debido a que en estas se utilizaran servomotores para accionarlas.

8.1.1.4 Fuerza Aplicada Por El Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo

A continuación se muestran los datos obtenidos en el capítulo 6 con los cuales se conoce que fuerza que debe aplicar el actuador hidráulico del sistema de bombeo para tener la fuerza requerida en el actuador hidráulico de las extremidades en los puntos de inicio y fin de la trayectoria planteada.

	Fuerza de Salida (kg)		Áreas		Fuerza de entrada	
	máxima	mínima	entrada	salida	máxima	mínima
1	10.8135	10.5718	0.883573	1.76715	5.40676	5.28588
2	11.4383	11.8524	0.883573	1.76715	5.71916	5.92621
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	0.592621	0.202594	0.883573	1.76715	0.296311	0.101297
6	0.122927	0.07951	0.883573	1.76715	0.0614637	0.0039755

- Nota: No existen fuerzas en las articulaciones 3 y 4 debido a que en estas se utilizaran servomotores para accionarlas.

8.1.1.5 Cálculo De Elemento Impulsor Del Sistema De Bombeo

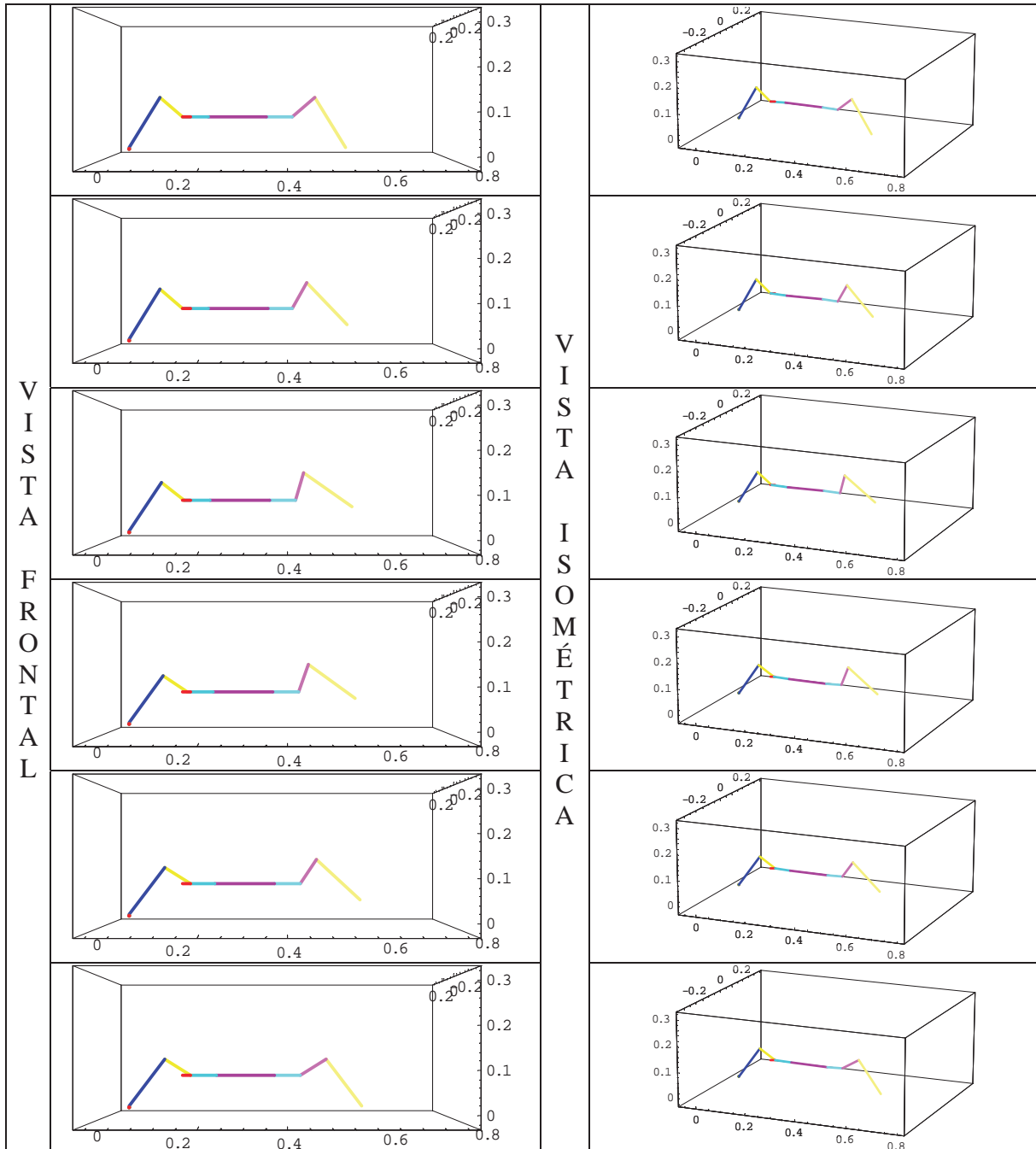
En esta parte se muestran los datos obtenidos para poder escoger el elemento impulsor según sus características, el cual proporciona la fuerza requerida en cada eslabón para que todo el sistema hidráulico funcione correctamente y la parte media del robot se desplacé en la trayectoria frontal descrita al principio.

	Fuerza (kg)		Brazo de palanca (cm)	Posición del Ángulo				Torque (kg.cm)	
	máx	mín		biela		manivela		máx	mín
				máx	mín	máx	mín		
1	5.4067	5.2858	3	31.6	34.28	24.64	47.02	20.951	23.35
2	5.7191	5.9262	3	13.62	10.83	41.52	32.85	23.578	21.546
3	-	-	-	-	-	-	-	5.09684	
4	-	-	-	-	-	-	-	0.765426	
5	0.2963	0.10129	3	10.83	45.86	32.85	48.52	1.0773	0.6588
6	0.0614	0.03975	3	43.88	31.6	19.58	24.64	0.2715	0.15405

8.1.2 Desplazamiento Lateral De La Parte Media Del Robot

8.1.2.1 Simulación Del Desplazamiento Lateral

Considerando las características físicas del robot el desplazamiento lateral máximo que puede tener el robot es de 4 cm. con una elevación de 6.5 cm. sobre la superficie de apoyo. Utilizando las herramientas que se usaron en el cálculo anterior se puede simular el desplazamiento lateral de la parte media del robot (figura 8.4).



- Nota: Las líneas en la simulación simbolizan cada uno de los eslabones.

Figura 8.4 Simulación del desplazamiento lateral de la parte media del robot.

Esta trayectoria se debe de realizar en un tiempo de 1 seg, encontrando las siguientes graficas de desplazamiento para cada articulación (figura 8.5).

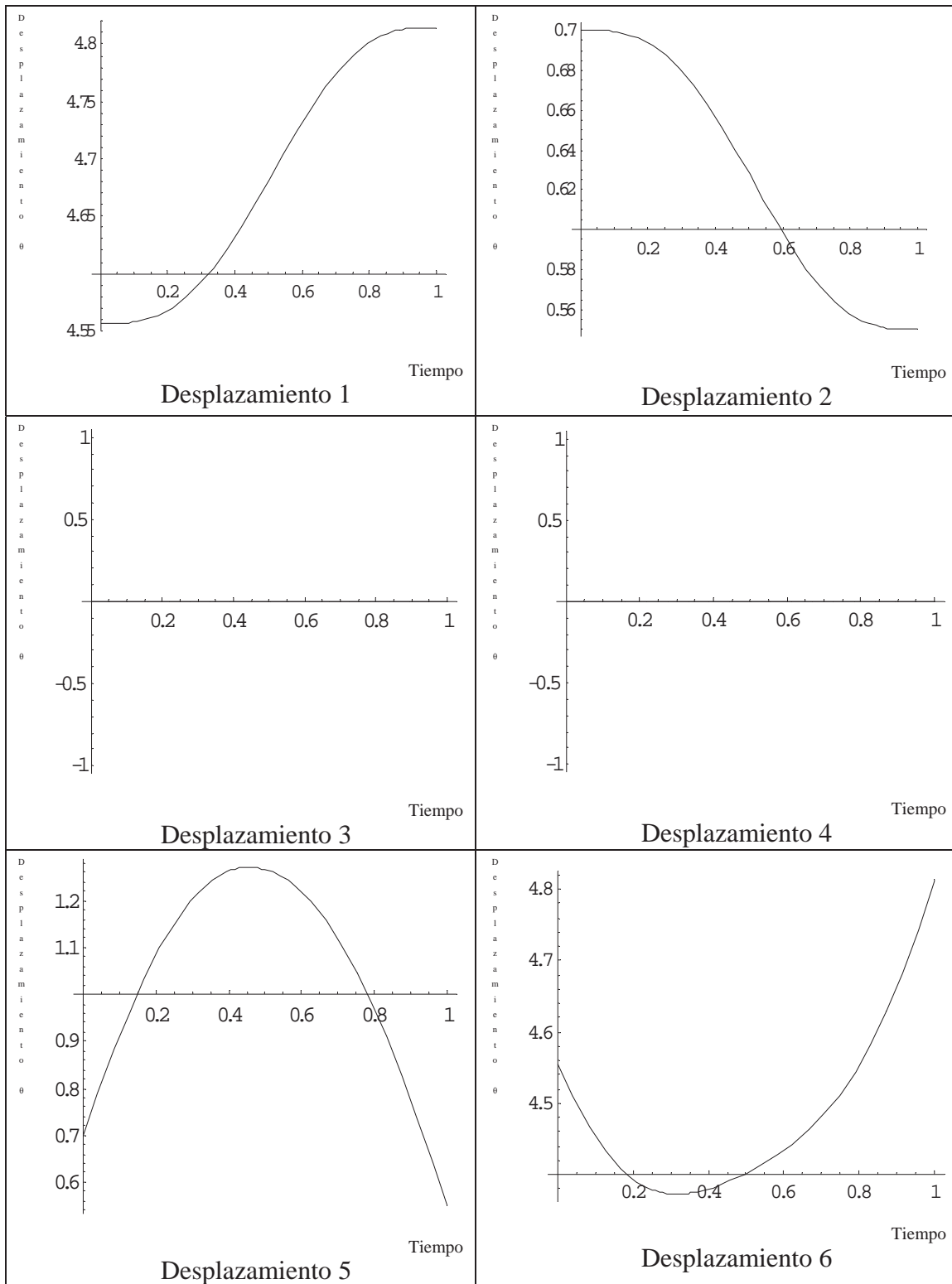


Figura 8.5 Desplazamiento durante la trayectoria lateral de la parte media.

8.1.2.2 Torques Experimentados Durante El Desplazamiento Lateral

Haciendo uso del algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler se obtienen las gráficas de los torques (figura 8.6), que experimentaría la parte media del robot durante la trayectoria antes planteada.

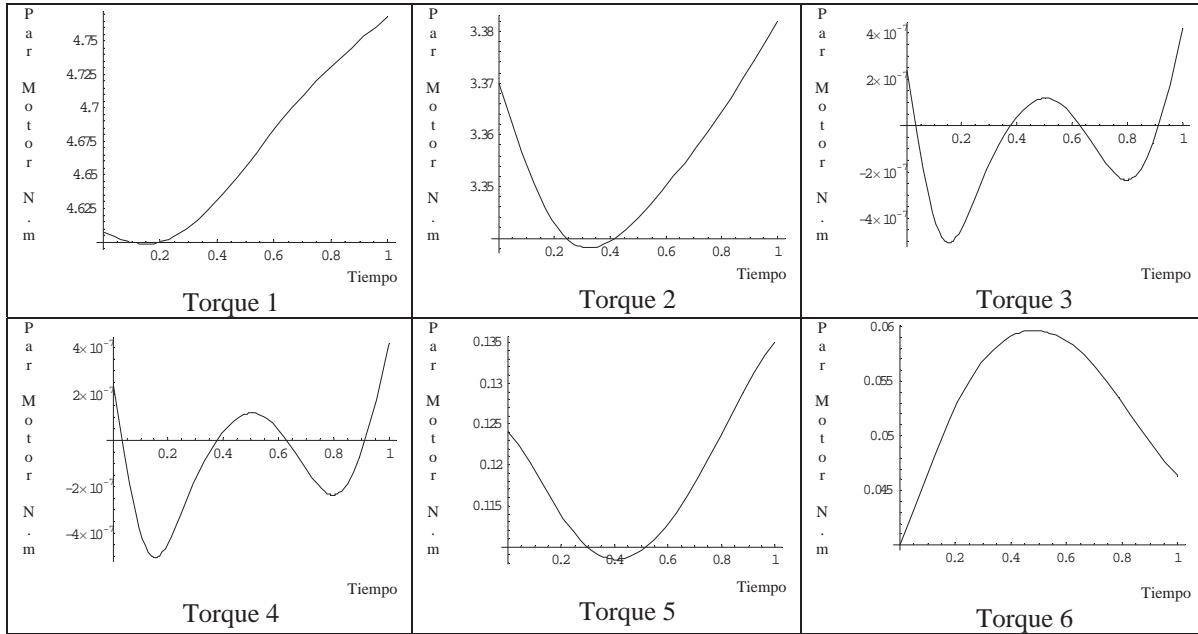


Figura 8.6 Torques experimentados en la parte media del robot en la trayectoria lateral.

8.1.2.3 Fuerzas Aplicadas A Los Eslabones Durante El Desplazamiento Lateral

A continuación se muestran los datos obtenidos en el capítulo 5 con los cuales se conoce la fuerza que se debe de aplicar, con un brazo de palanca conocido en un ángulo determinado para poder obtener el torque necesario para el movimiento de cada uno de eslabones en sus puntos de inicio y de fin.

	Torque (kg.cm)		Brazo de palanca (cm)	Ángulo de la fuerza (°)		Fuerza (kg)	
	máximo	mínimo		máximo	mínimo	máximo	mínimo
1	69.5719	64.73	5.35	76.7837	90	13.3579	12.1
2	47.528	47.3369	4	56.4261	61.9859	14.2611	13.4048
3	0		-	-	-	-	-
4	0		-	-	-	-	-
5	2.0387	1.7838	4	56.4261	61.9859	0.61173	0.50516
6	0.6434	0.618	5.35	75.6367	90	0.12415	0.1155

- Nota: No existen valores para el torque en las articulaciones 3 y 4 debido a que en el desplazamiento lateral no existe movimiento en estas.

8.1.2.4 Fuerza Aplicada Por El Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo

A continuación se muestran los datos obtenidos en el capítulo 6 con los cuales se conoce que fuerza que debe aplicar el actuador hidráulico del sistema de bombeo para tener la fuerza requerida en el actuador hidráulico de las extremidades en los puntos de inicio y fin de la trayectoria planteada.

	Fuerza de Salida (kg)		Áreas		Fuerza de entrada	
	máxima	mínima	Entrada	salida	máxima	mínima
1	13.3579	12.1	0.883573	1.76715	6.67894	6.05
2	14.2611	13.4048	0.883573	1.76715	7.13055	6.7024
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	0.611738	0.505162	0.883573	1.76715	0.305869	0.252581
6	0.124157	0.115512	0.883573	1.76715	0.062078	0.057756

- Nota: No existen valores para el torque en las articulaciones 3 y 4 debido a que en el desplazamiento lateral no existe movimiento en estas.

8.1.2.5 Calculó De Elemento Impulsor Del Sistema De Bombeo

En esta parte se muestran los datos obtenidos para poder escoger el elemento impulsor según sus características, el cual proporciona la fuerza requerida en cada eslabón para que todo el sistema hidráulico funcione correctamente y la parte media del robot se desplacé en la trayectoria lateral.

	Fuerza (kg)		Brazo de palanca (cm)	Ángulo de posición				Torque (kg.cm)	
	máx	mín		Biela		manivela		máx	mín
				máx	mín	máx	mín		
1	6.6789	6.05	3	31.6	34.28	24.64	47.02	25.881	29.95
2	7.1305	6.7024	3	10.83	13.62	32.85	41.52	25.925	27.632
3	-	-	-	-	-	-	-	0	
4	-	-	-	-	-	-	-	0	
5	0.3058	0.2525	3	10.83	13.62	32.85	41.52	1.112	1.0413
6	0.0621	0.0577	3	43.88	34.28	19.58	47.02	0.2742	0.3075

8.1.3 Servomotores A Utilizar En El Sistema De Bombeo De La Parte Media

Se deben considerar varias cosas, primero los torques mínimos requeridos para que el robot funcione deben ser los torques mayores en la primera y la segunda articulaciones debido a que las articulaciones 5 y 6 deben soportar la misma carga en el siguiente movimiento para que se pueda desplazar, y otra los torques de los dos tipos de desplazamientos ya que es una sola pieza por lo que se tiene que el torque mínimo requerido para el funcionamiento del robot es el del desplazamiento lateral cuando las extremidades están totalmente extendidas y es de 29.95 kg.cm, a continuación se muestran los datos de servomotor que pueden ser utilizados debido a sus características.

Servomotor digital HSR – 5980 SG.

Sistema de control:	+ control de la anchura de pulso 1500 usec Neutral
Rango del voltaje de operación:	6.0 V – 7.4 V
Datos con un voltaje de operación de 7.4 V.	
Velocidad de operación:	0.14 sec/60° sin carga
Esfuerzo de torsión de parada:	30.0 Kg.cm
Esfuerzo de torsión:	39.0 Kg.cm / 5° holdout
Corriente de operación:	380 mA / sin carga en operación
Anchura de banda muerta:	2 usec
Recorrido de operación:	90±1° / pulso de recorrido 400 usec
Tipo de motor:	coreless metal brush
Tipo de potenciómetro:	6 slider / indirect drive
Tipo de amplificador:	Amplificador digital con mosfet drive
Dimensiones:	40 x 20 x 37 mm
Peso:	70 gr.

Para la tercera y cuarta articulaciones deben de soportar las mismas cargas para poder hacer que el robot se desplace por lo que se utilizará el mismo tipo de servomotor en éstas, debido a que el torque máximo en estas articulaciones es de 5.09684 kg.cm se pretende utilizar el siguiente servomotor el cual satisface las necesidades planteadas.

Servomotor digital HSR – 5498 SG.

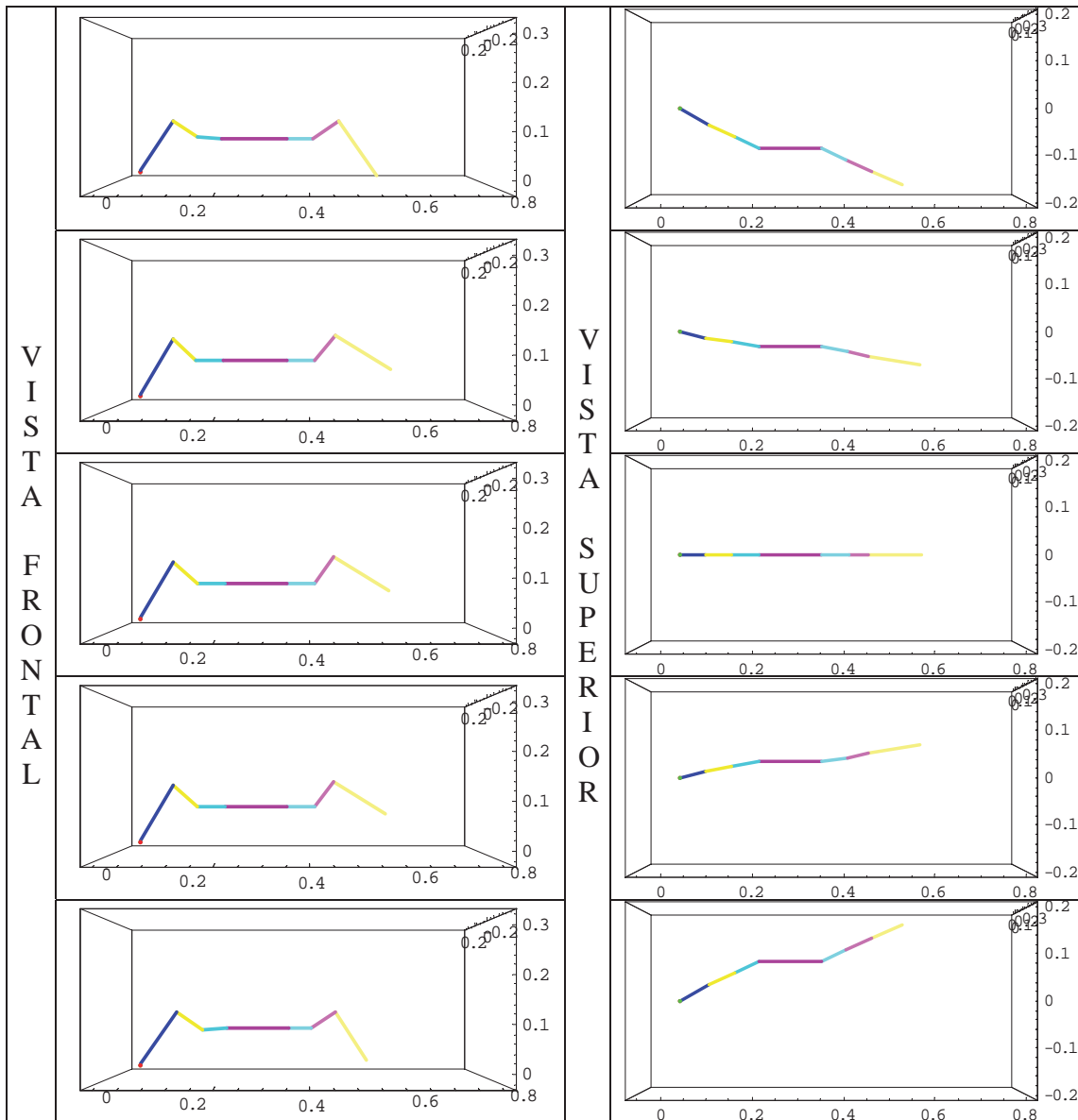
Sistema de control:	+ control de la anchura de pulso 1500 usec Neutral
Rango del voltaje de operación:	6.0 V – 7.4 V
Datos con un voltaje de operación de 7.4 V.	
Velocidad de operación:	0.19 sec/60° sin carga
Esfuerzo de torsión de parada:	13.5 Kg.cm
Esfuerzo de torsión:	14.4 Kg.cm / 5° holdout
Corriente de operación:	240 mA / sin carga en operación
Anchura de banda muerta:	5 usec
Recorrido de operación:	90±1° / pulso de recorrido 900 usec
Tipo de motor:	cored metal brush
Tipo de potenciómetro:	4 slider / indirect drive
Tipo de amplificador:	Amplificador digital con mosfet drive
Dimensiones:	40 x 20 x 37 mm
Peso:	59.8 gr.

8.2 Parte Extrema Del Robot

8.2.1 Desplazamiento Frontal De La Parte Extrema Del Robot

8.2.1.1 Simulación Del Desplazamiento Frontal

Considerando las características físicas de esta parte del robot el desplazamiento frontal máximo que puede tener el robot es de 18.33 cm. con una elevación de 6.5 cm. sobre la superficie de apoyo. Haciendo uso del algoritmo de Denavit-Hartenberg se obtiene la simulación del desplazamiento frontal de la parte extrema (figura 8.7).



* Nota: Las líneas de colores en la simulación simbolizan cada uno de los eslabones.

Figura 8.7 Simulación del desplazamiento frontal de la parte extrema del robot.

Entendiendo que esta trayectoria se debe de realizar en un tiempo de 1 seg, se obtienen las siguientes gráficas de desplazamiento para cada articulación (figura 8.8), estos valores son útiles debido a que con ellos se determinan las velocidades angulares y las aceleraciones angulares necesarias para poder determinar el torque que se experimentaría en cada articulación.

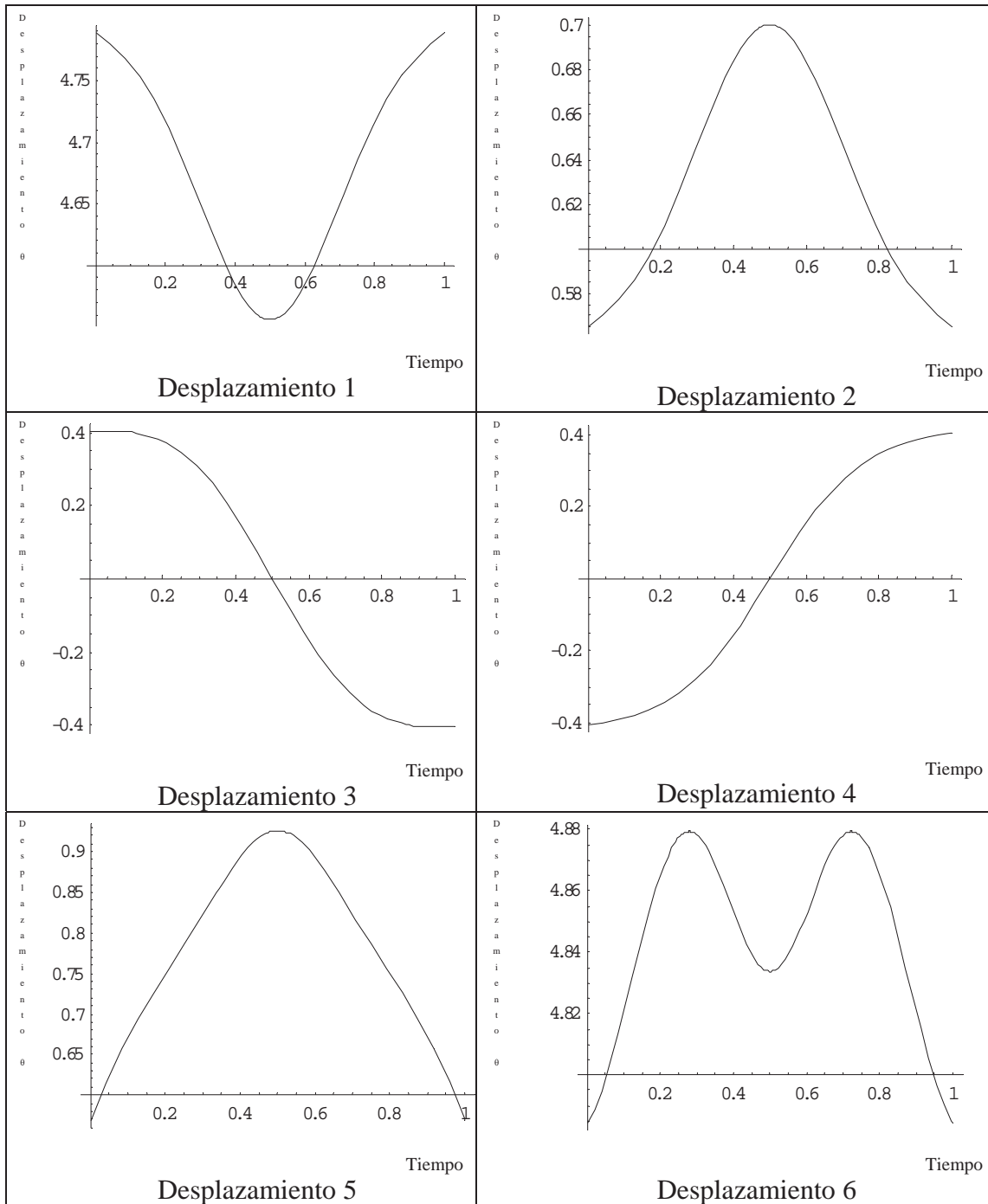


Figura 8.8 Desplazamiento durante el desplazamiento frontal de la parte media.

8.2.1.2 Torques Experimentados Durante El Desplazamiento Frontal

Haciendo uso del algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler y con los datos mencionados en el capítulo 4 como son la longitud, la masa, el centro de gravedad y la matriz de inercia de cada uno de los eslabones, se obtienen las gráficas de los torques (figura 8.9) que experimentaría la parte extrema del robot durante la trayectoria antes planteada.

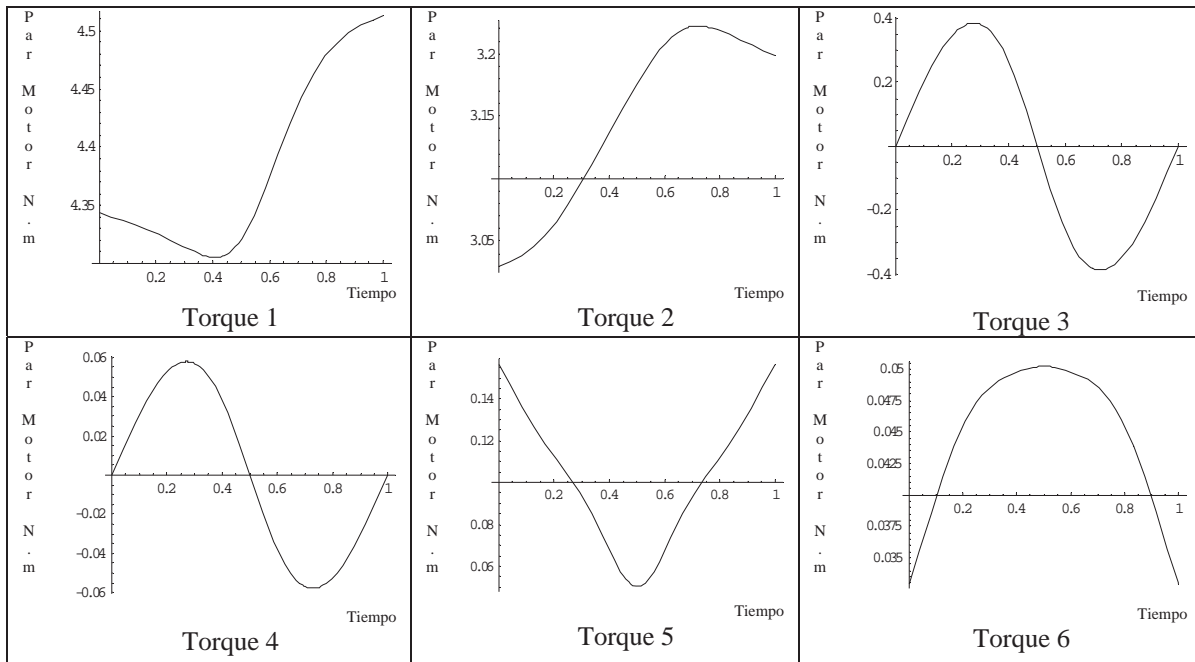


Figura 8.9 Torques experimentados en la parte media del robot en la trayectoria frontal.

8.2.1.3 Fuerzas Aplicadas A Los Eslabones Durante El Desplazamiento Frontal

A continuación se muestran los datos obtenidos en el capítulo 5 con los cuales se conoce la fuerza que se debe de aplicar, con un brazo de palanca conocido en un ángulo determinado para poder obtener el torque necesario para el movimiento de cada uno de eslabones en sus puntos de inicio y de fin.

	Torque (kg.cm)		Brazo de palanca (cm)	Ángulo de la fuerza (°)		Fuerza (kg)	
	máximo	mínimo		máximo	mínimo	máximo	mínimo
1	57.3394	55.4281	5.35	76.7837	90	11.0092	10.36
2	41.0296	38.6086	4	56.4261	61.9859	12.3112	10.9332
3	5.09684		-	-	-	-	-
4	0.764526		-	-	-	-	-
5	1.975	0.76452	4	56.4261	70.6346	0.59262	0.20259
6	0.6371	0.41412	5.35	75.6367	76.7837	0.12292	0.07951

- Nota: No existen fuerzas en las articulaciones 3 y 4 debido a que en estas se utilizaran servomotores para accionarlas.

8.2.1.4 Fuerza Aplicada Por El Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo

A continuación se muestran los datos obtenidos en el capítulo 6 con los cuales se conoce que fuerza que debe aplicar el actuador hidráulico del sistema de bombeo para tener la fuerza requerida en el actuador hidráulico de las extremidades en los puntos de inicio y fin de la trayectoria planteada.

	Fuerza de Salida (kg)		Áreas		Fuerza de entrada	
	máxima	mínima	entrada	salida	máxima	mínima
1	11.0092	10.36	0.883573	1.76715	5.50462	5.18
2	12.3112	10.9332	0.883573	1.76715	6.15562	5.46658
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	0.592621	0.202594	0.883573	1.76715	0.296311	0.101297
6	0.122927	0.07951	0.883573	1.76715	0.0614637	0.0039755

- Nota: No existen fuerzas en las articulaciones 3 y 4 debido a que en estas se utilizaran servomotores para accionarlas.

8.2.1.5 Calculo De Elemento Impulsor Del Sistema De Bombeo

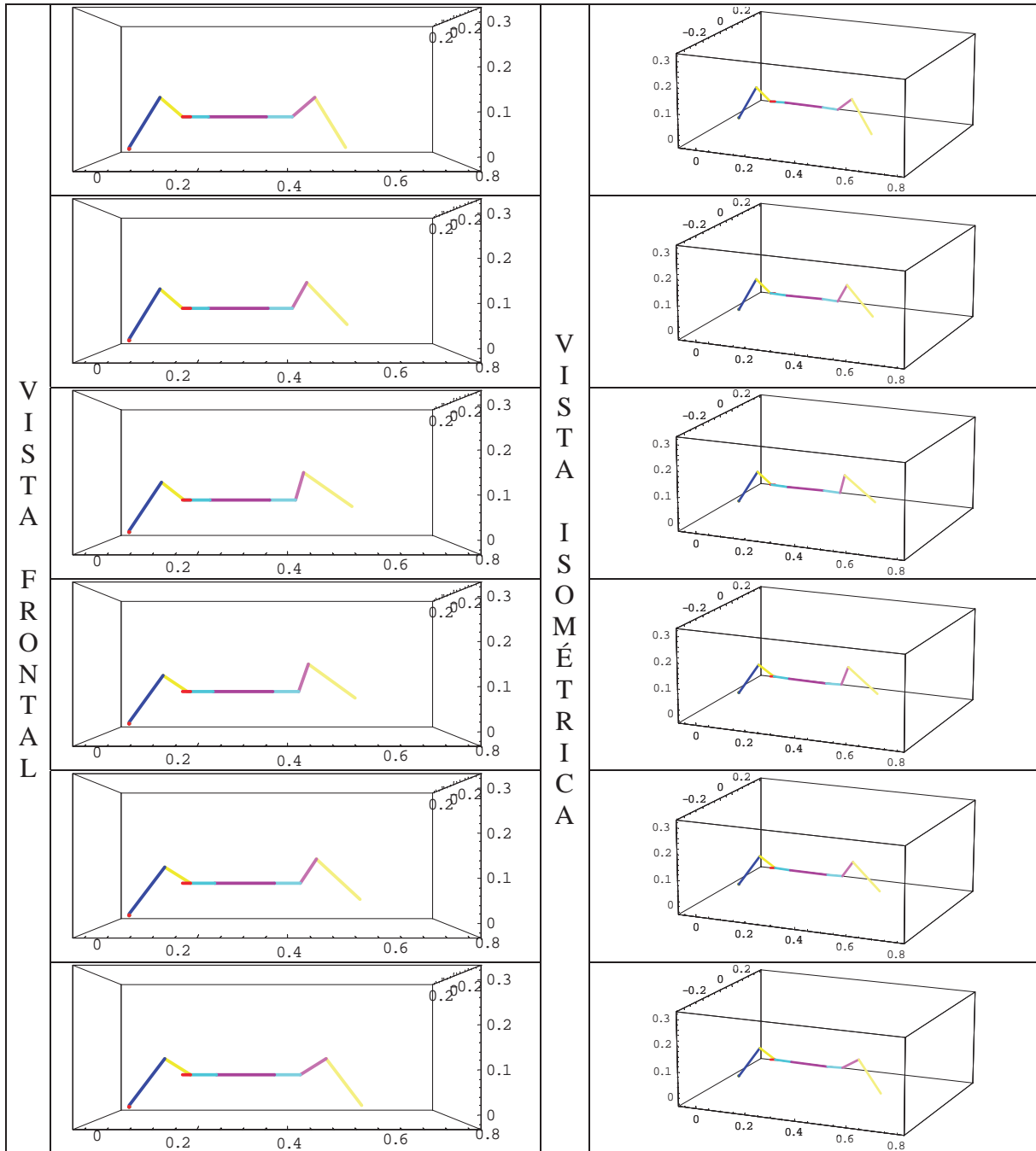
En esta parte se muestran los datos obtenidos para poder escoger el elemento impulsor según sus características, el cual proporciona la fuerza requerida en cada eslabón para que todo el sistema hidráulico funcione correctamente y las partes extremas del robot se desplacen en la trayectoria frontal descrita.

	Fuerza (kg)		Brazo de palanca (cm)	Ángulo de posición				Torque (kg.cm)	
	máx	mín		biela		manivela		máx	mín
				máx	mín	máx	mín		
1	5.5046	5.18	3	31.6	34.28	24.64	47.02	21.33	27.5864
2	6.1556	5.4665	3	10.83	13.62	32.85	41.52	22.38	22.5374
3	-	-	-	-	-	-	-	5.09684	
4	-	-	-	-	-	-	-	0.765426	
5	0.2963	0.10129	3	10.83	45.86	32.85	48.52	1.0773	0.6588
6	0.0614	0.03975	3	43.88	31.6	19.58	24.64	0.2715	0.15405

8.2.2 Desplazamiento Lateral De La Parte Extrema Del Robot

8.2.2.1 Simulación Del Desplazamiento Lateral

Considerando las características físicas del robot el desplazamiento lateral máximo que puede tener el robot es de 4 cm. con una elevación de 6.5 cm. sobre la superficie de apoyo. Utilizando las herramientas que se usaron en el cálculo anterior se puede simular el desplazamiento lateral de la parte extrema del robot (figura 8.10).



- Nota: Las líneas de colores en la simulación simbolizan cada uno de los eslabones.

Figura 8.10 Simulación del desplazamiento lateral de la parte extrema del robot.

Esta trayectoria se debe de realizar en un tiempo de 1 seg, obteniendo las siguientes gráficas de desplazamiento para cada articulación (figura 8.11).

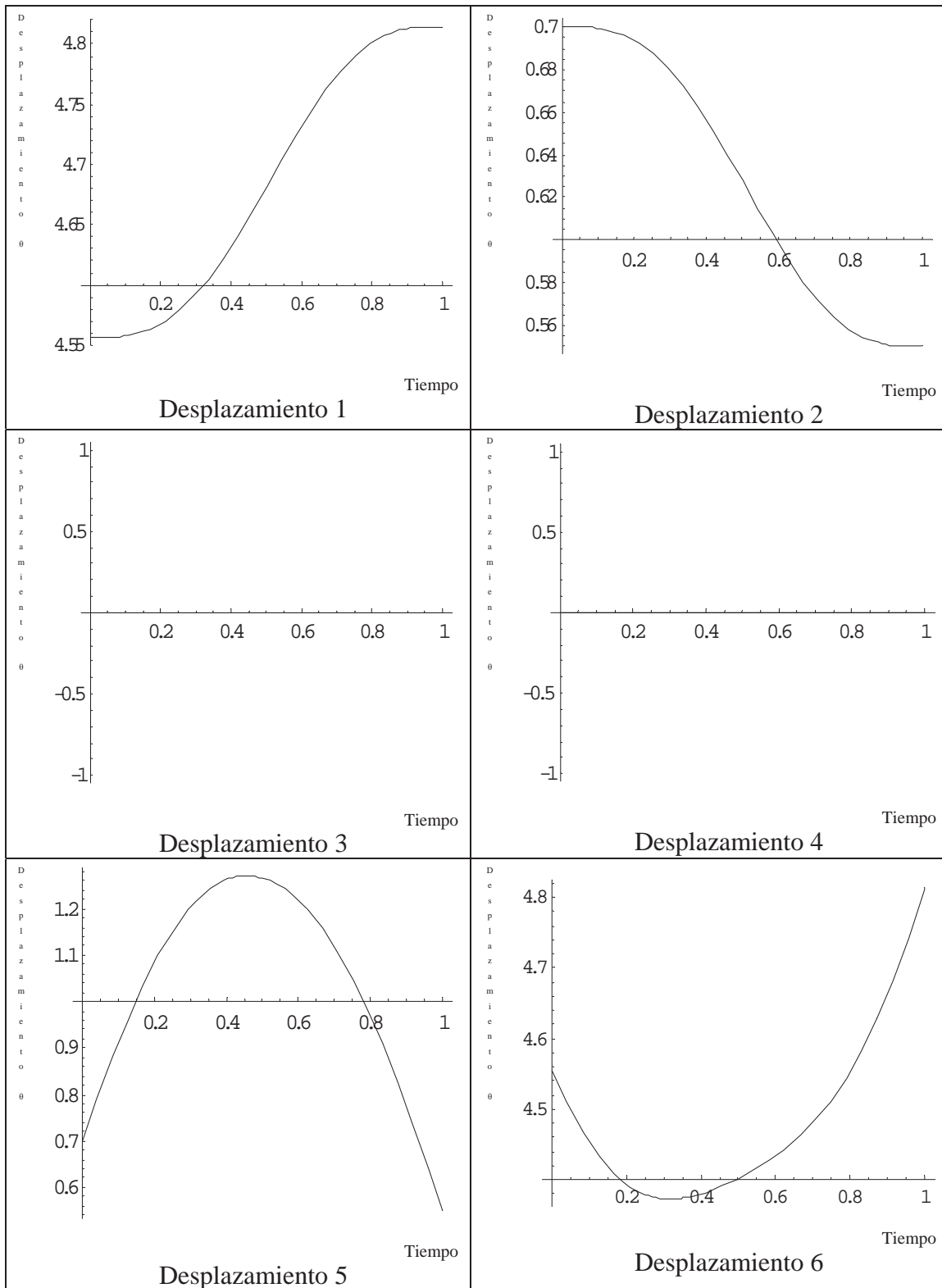


Figura 8.11 Desplazamiento durante la trayectoria lateral de la parte extrema.

8.2.2.2 Torques Experimentados Durante El Desplazamiento Lateral

Haciendo uso del algoritmo computacional para el modelo dinámico de Newton-Euler se obtienen las gráficas de los torques (figura 8.12), que experimentaría la parte extrema del robot durante la trayectoria antes planteada.

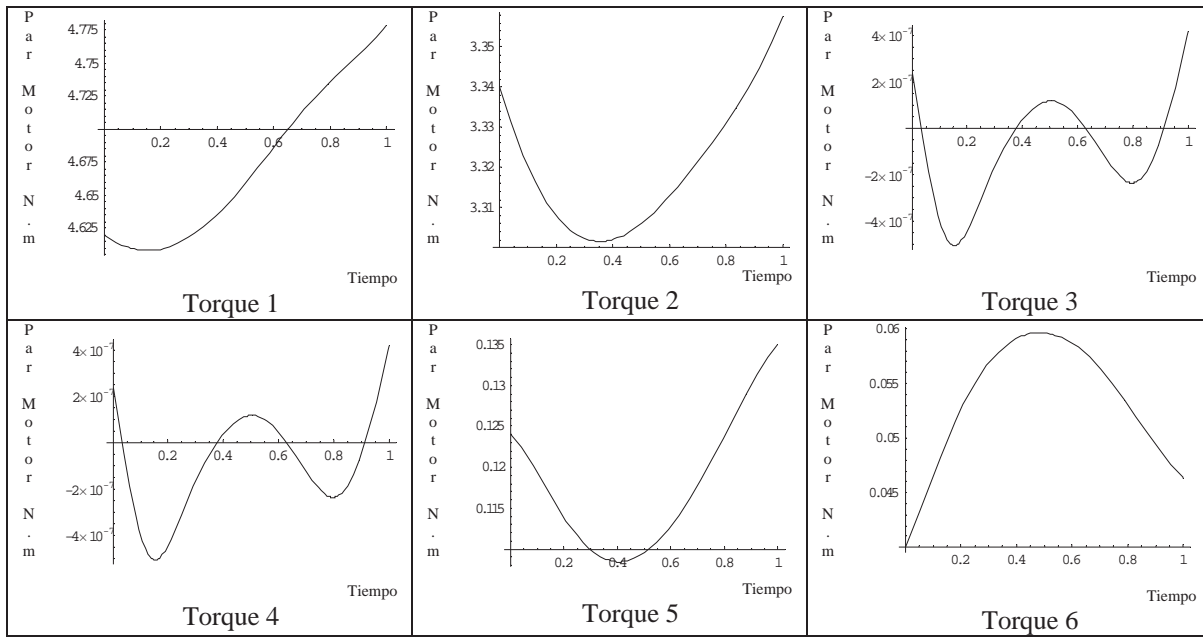


Figura 8.12 Torques experimentados en la parte extrema del robot en la trayectoria lateral.

8.2.2.3 Fuerzas Aplicadas A Los Eslabones Durante El Desplazamiento Lateral

A continuación se muestran los datos obtenidos en el capítulo 5 con los cuales se conoce la fuerza que se debe de aplicar, con un brazo de palanca conocido en un ángulo determinado para poder obtener el torque necesario para el movimiento de cada uno de eslabones en sus puntos de inicio y de fin.

	Torque (kg.cm)		Brazo de palanca (cm)	Ángulo de la fuerza (°)		Fuerza (kg)	
	máximo	mínimo		máximo	mínimo	máximo	mínimo
1	57.9766	54.1539	5.35	76.7837	90	11.1316	10.1222
2	40	39.8191	4	56.4261	61.9859	12	11.2759
3	0	-	-	-	-	-	-
4	0	-	-	-	-	-	-
5	2.0387	1.7838	4	56.4261	61.9859	0.61173	0.50516
6	0.6434	0.618	5.35	75.6367	90	0.12415	0.1155

- Nota: No existen valores para el torque en las articulaciones 3 y 4 debido a que en el desplazamiento lateral no existe movimiento en estas.

8.2.2.4 Fuerza Aplicada Por El Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo

A continuación se muestran los datos obtenidos en el capítulo 6 con los cuales se conoce que fuerza que debe aplicar el actuador hidráulico del sistema de bombeo para tener la fuerza requerida en el actuador hidráulico de las extremidades en los puntos de inicio y fin de la trayectoria planteada.

	Fuerza de Salida (kg)		Áreas		Fuerza de entrada	
	máxima	mínima	entrada	salida	máxima	mínima
1	11.1316	10.1222	0.883573	1.76715	5.56579	5.06111
2	12	11.2759	0.883573	1.76715	6	5.63797
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	0.611738	0.505162	0.883573	1.76715	0.305869	0.252581
6	0.124157	0.115512	0.883573	1.76715	0.062078	0.057756

- Nota: No existen valores para el torque en las articulaciones 3 y 4 debido a que en el desplazamiento lateral no existe movimiento en estas.

8.2.2.5 Calculo De Elemento Impulsor Del Sistema De Bombeo

En esta parte se muestran los datos obtenidos para poder escoger el elemento impulsor según sus características, el cual proporciona la fuerza requerida en cada eslabón para que todo el sistema hidráulico funcione correctamente y las partes extremas del robot se desplacen en la trayectoria lateral descrita.

	Fuerza (kg)		Brazo de palanca (cm)	Ángulo de posición				Torque (kg.cm)	
	máx	mín		biela		manivela		máx	mín
				máx	mín	máx	mín		
1	5.5657	5.0611	3	31.6	34.28	24.64	47.02	21.568	26.953
2	6	5.6379	3	10.83	13.62	32.85	41.52	21.8245	23.243
3	-	-	-	-	-	-	-	0	
4	-	-	-	-	-	-	-	0	
5	0.3058	0.2525	3	10.83	13.62	32.85	41.52	1.112	1.0413
6	0.0621	0.0577	3	43.88	34.28	19.58	47.02	0.2742	0.3075

8.2.3 Servomotores A Utilizar En El Sistema De Bombeo De La Parte Extrema

Se deben considerar varias cosas, primero los torques mínimos requeridos para que el robot funcione deben ser los torques mayores en la primera y la segunda articulaciones debido a que las articulaciones 5 y 6 deben soportar la misma carga en el siguiente movimiento para que se pueda desplazar, y otra los torques de los dos tipos de desplazamientos ya que es una sola pieza por lo que se tiene que el torque mínimo requerido para el funcionamiento del robot es el del desplazamiento lateral cuando las extremidades están totalmente extendidas y es de 27.119 kg.cm, a continuación se muestran los datos de servomotor que pueden ser utilizados debido a sus características.

Servomotor digital HSR – 5980 SG.

Sistema de control:	+ control de la anchura de pulso 1500 usec Neutral
Rango del voltaje de operación:	6.0 V – 7.4 V
Datos con un voltaje de operación de 7.4 V.	
Velocidad de operación:	0.14 sec/60° sin carga
Esfuerzo de torsión de parada:	30.0 Kg.cm
Esfuerzo de torsión:	39.0 Kg.cm / 5° holdout
Corriente de operación:	380 mA / sin carga en operación
Anchura de banda muerta:	2 usec
Recorrido de operación:	90±1° / pulso de recorrido 400 usec
Tipo de motor:	coreless metal brush
Tipo de potenciómetro:	6 slider / indirect drive
Tipo de amplificador:	Amplificador digital con mosfet drive
Dimensiones:	40 x 20 x 37 mm
Peso:	70 gr.

Para la tercera y cuarta articulaciones deben de soportar las mismas cargas para poder hacer que el robot se desplace por lo que se utilizará el mismo tipo de servomotor en éstas, debido a que el torque máximo en estas articulaciones es de 5.09684 kg.cm se pretende utilizar el siguiente servomotor el cual satisface las necesidades planteadas.

Servomotor digital HSR – 5498 SG.

Sistema de control:	+ control de la anchura de pulso 1500 usec Neutral
Rango del voltaje de operación:	6.0 V – 7.4 V
Datos con un voltaje de operación de 7.4 V.	
Velocidad de operación:	0.19 sec/60° sin carga
Esfuerzo de torsión de parada:	13.5 Kg.cm
Esfuerzo de torsión:	14.4 Kg.cm / 5° holdout
Corriente de operación:	240 mA / sin carga en operación
Anchura de banda muerta:	5 usec
Recorrido de operación:	90±1° / pulso de recorrido 900 usec
Tipo de motor:	cored metal brush
Tipo de potenciómetro:	4 slider / indirect drive
Tipo de amplificador:	Amplificador digital con mosfet drive
Dimensiones:	40 x 20 x 37 mm
Peso:	59.8 gr.

8.3 Diseño Del Actuador Hidráulico De Las Extremidades

Teniendo en cuenta las fuerzas que intervienen en el desplazamiento y el área del pistón se conoce la presión máxima de trabajo, con este dato y las características físicas del pistón se obtiene la siguiente tabla de valores.

Elemento	Presión (kg/m ²)	diámetro (m)		Angulo de conicidad	Esfuerzo permisible (kg/m ²)	Espesor calculado (m)	Espesor real (m)
		Interno	Externo				
Cilindro	0.02472	0.015	0.0254	-	17000	1.84x10 ⁻⁸	0.0052
Tapa Cónica	0.02472	0.015	0.0254	30°	17000	2.13x10 ⁻⁸	0.0055
Tapa Plana	0.02472	0.015	0.0254	-	17000	3.95x10 ⁻⁸	0.0035

Otra cosa a considerar es la deflexión que sufriría el vástago del pistón debido a la fuerza que debe aplicar, debido a que este sale y entra tiene diferentes longitudes por lo que para el calculo de la deflexión se considerará el pistón como una barra empotrada y se considerará cuando se encuentre afuera ya que es la máxima longitud y con la carga máxima que debe soportar aplicada de forma perpendicular para suponer la máxima deflexión que el vástago podría soportar.

Vástago del actuador hidráulico de las extremidades				
Fuerza (N)	Longitud (m)	Modulo de elasticidad (N/m ²)	Matriz de inercia (m ⁴)	Deflexión (m)
139.9	0.027	70 x 10 ⁹	6.21262 x 10 ⁻¹⁰	0.0000211

8.4 Diseño Del Actuador Hidráulico Del Sistema De Bombeo

Para el diseño de este actuador se tendrán las mismas consideraciones que se tuvieron en el diseño del actuador hidráulico de las extremidades como son la presión de trabajo debida a la fuerza máxima que encontramos en el desarrollo del sistema.

Elemento	Presión (kg/cm ²)	diámetro (m)		Angulo de conicidad	Esfuerzo permisible (N/m ²)	Espesor calculado (m)	Espesor real (m)
		Interno	Externo				
Cilindro	0.02472	0.009525	0.195	-	17000	3.46x10 ⁻⁹	0.00422
Tapa Cónica	0.02472	0.009525	0.195	30°	17000	3.99x10 ⁻⁹	0.0055
Tapa Plana	0.02472	0.009525	0.195	-	17000	1.39x10 ⁻⁸	0.0035

La deflexión máxima que soportara el vástago del actuador hidráulico del sistema de bombeo también debe de ser calculado, por lo que se tendrán las mismas consideraciones que se tuvieron con el actuador hidráulico de las extremidades.

Vástago del actuador hidráulico del sistema de bombeo				
Fuerza (N)	Longitud (m)	Modulo de elasticidad (N/m ²)	Matriz de inercia (m ⁴)	Deflexión (m)
69.95	0.035	70 x 10 ⁹	4.21262 x 10 ⁻¹⁰	0.0000919

8.5 Discusiones

Las graficas de torque en los desplazamientos nos muestran sólo la mitad del desplazamiento ya que para que el desplazamiento fuera completo y el robot diera un paso las extremidades que se movieron en la primera parte tendrían que servir de apoyo en la segunda mientras que los que estaban de apoyo se desplazarían, debido a que el movimiento en la segunda parte es similar en trayectoria al de la primera parte se puede decir que las gráficas serían similares pero con la diferencia de que en éstos empezarían en el punto final de los torques obtenidos y terminarían en el punto inicial del los mismos.

Se considero un aumento del 25 % en los torques considerando las perdidas por fricción en las articulaciones, así como, las perdidas por fricción en los pistones hidráulicos que se utilizan para proporcionar movimiento al robot, para disminuir las perdidas por fricción en las articulaciones del robot se pretende colocar cojinetes axiales.

CAPÍTULO 9

9. Conclusiones

9.1 Conclusiones Generales

Con base en los objetivos planteados al inicio de éste proyecto y teniendo en cuenta los resultados que se han obtenido durante el desarrollo del mismo, se puede concluir lo siguiente.

Los robots caminantes electro-hidráulicos pueden llegar a realizar las mismas funciones que los robots eléctricos, desplazarse de la misma forma, caminar por el mismo tipo de terrenos, utilizar una morfología similar, pesar casi lo mismo así como tener casi el mismo tamaño, con la ventaja de que se tienen ciertos tipos de arreglos que hacen poder aprovechar la energía hidráulica para poder soportar mas carga que la que podría soportar un robot eléctrico y utilizar motores con un par motor mas bajo que el que utilizaría un robot eléctrico.

Un sistema de actuación hidráulico es capaz de accionar las extremidades del robot haciendo que estas sigan diferentes trayectorias y permitiendo que el robot pueda desplazarse lateralmente, frontalmente o de reversa, de una manera similar a como lo haría un robot eléctrico y con la misma precisión durante la trayectoria.

Es factible el diseño de un robot caminante electro-hidráulico de seis extremidades operado por un sistema de actuación hidráulico que permita el movimiento motriz de las extremidades, teniendo la ventaja de que por contar con seis extremidades el desplazamiento del robot se haría de una manera mas rápida de la que se tendría con un robot de cuatro extremidades ya que el robot de seis extremidades podría desplazar tres extremidades a la vez mientras que las otras tres sirven como soporte para el robot algo que no se puede realizar con un robot cuadrúpedo ya que si intentara mover mas de una pata a la vez éste perdería el equilibrio y caería.

Una de las cosas por las que no existen muchos robots de éste tipo es que implican una gran cantidad de cálculos debido a la cantidad de sistemas que se requieren para su funcionamiento lo que complica muchas veces el diseño de éste tipo de robots debido a que la mínima variación en uno de los sistema implica un rediseño casi total del robot, otra de sus desventajas es que a diferencia de los robots eléctricos, éstos contienen muchos elementos de los cuales la mayoría deben de ser diseñados y construidos sobre pedido ya que en el mercado no se cuenta con éstos elementos y por ser elementos únicos representa una mayor inversión en tiempo y dinero encareciendo en gran medida el diseño y la construcción de éste.

9.2 Trabajos a futuro

Hay mucho por investigar en el diseño de robot electro-hidráulicos caminantes éste es el primer paso hacia el desarrollo de más y mejores robots de este tipo, sobre todo en la actualidad que día a día existen grandes avances tecnológicos, con el diseño de nuevos materiales más resistentes y ligeros, así como, motores mas pequeños, ligeros y potentes.

Una de las cosas que se puede mejorar es el sistema de bombeo existen muchas formas de transmitir energía hidráulica ésta es una de ellas pero existen otros tipos de mecanismos que pudieran tener menos perdidas. Otra de las cosas que se requiere mejorar es el pistón que impulsa a las extremidades ya que con esta dimensión estamos muy limitados en el movimiento lateral del robot.

Dentro de los trabajos a futuro que se pretenden realizar en este proyecto es el de controlar a este robot mediante el uso de algoritmos inteligentes que le den la capacidad de desplazarse de una manera independiente y casi inteligente, teniendo la posibilidad de determinar y seguir la trayectoria mas sencilla dentro de un terreno con una amplia gama de obstáculos para poder desarrollar diferentes tipos de trabajos como son el de reconocimiento, muestreo, o para ayudar a realizar alguna tarea peligrosa como la limpia de desecho dañinos para el ser humano, entre muchos otros posibles.

Referencias y Bibliografías

[1] W. Spong, Mark; Vidyasagar, M, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, United States of America.

[2] http://es.wikipedia.org/wiki/tres_leyes_de_la_robotica

[3] Kingsley, D.A., R.D. Quinn and R.E. Ritzmann, *A Cockroach Inspired Robot With Artificial Muscles*. International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Kyoto, Japan.

[4] <http://www.plustech.fi>

[5] Sony Aibo robot. <http://www.aibo.com>

[6] Honda Asimo. <http://asimo.honda.com>

[7] www.robocup.org

[8] Pablo González de Santos, Elena García, Joaquín Esmera, *Cuadripedal Locomotion*, Ed. Springer

[9] <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/>

[10] <http://en.wikipedia.org/wiki/ThrustSSC>

[11] <http://proton.ucting.udg.mx>

[12] <http://laboratorios.fi.uba.ar/lscm/>

[13] diseño de recipientes a presión

[14] http://es.wikipedia.org/wiki/prensa_hidraulica

[15] http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/motores_servo.htm

[16] Mark E. Rosheim, *Robot Evolution*, John Wiley & Sons

[17] Lung-Wen Tsai, *Robot Analysis*, John Wiley & Sons

[18] H. Asada, J.-J.E. Slotine, *Robot Analysis and Control*, John Wiley & Sons

[19] John J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publishing Company

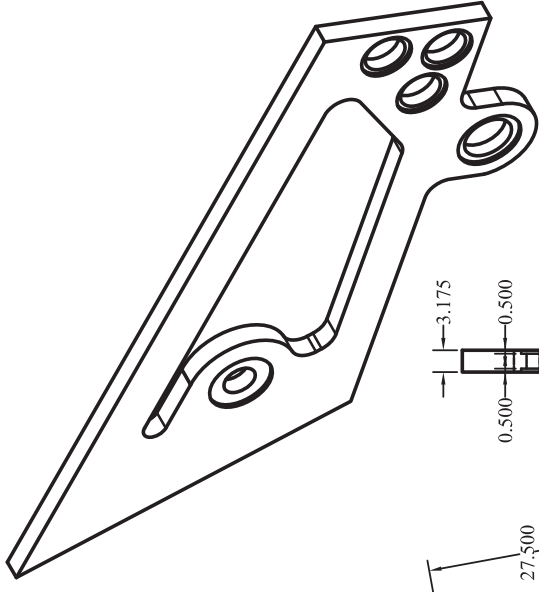
[20] M.Z. Kolovsky, A.N. Evgrafov, Yu. A. Semenov, A.V. Sloush, *Foundations of Engineering Mechanics*, Springer

- [21] Hamilton H. Mabie, Charles F. Reinholtz, *Mechanisms and Dynamics of Machinery*, John Wiley & Sons
- [22] Kenneth J. Waldron, Gary L. Kinzel, *Kinematics, Dynamics and Design of Machinery*, John Wiley & Sons
- [23] Homer D. Eckhardt, *Kinematics Design of Machines and Mechanisms*, McGraw Hill
- [24] Andrew D. Dimarogonas, *Machine Design*, Wiley-Interscience
- [25] Jack A. Collins, *Mechanical Design of Machine Elements and Machines*, John Wiley & Sons
- [26] R.C. Hibbeler, *Engineering Mechanics Dynamics*, Prentice Hall
- [27] J.L. Meriam, L.C. Kraige, *Engineering Mechanics Dynamics*, John Wiley & Sons
- [28] Mark C. Readman, *Flexible Joint Robots*, CRC Press

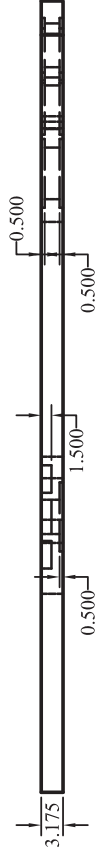
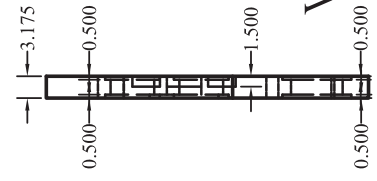
Apéndices

Apéndice I

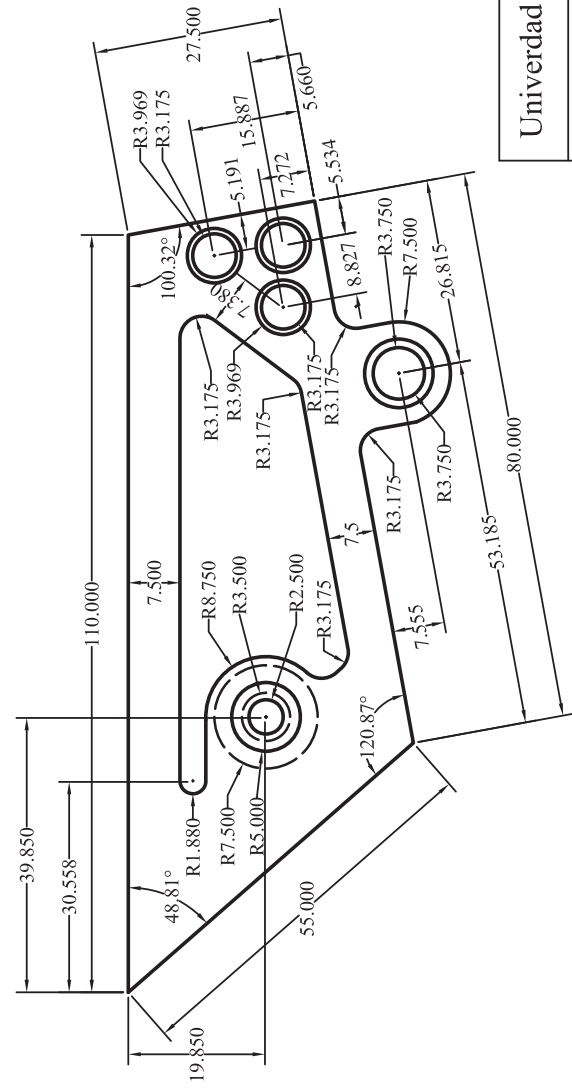
Dibujos de Detalle



Vista Lateral

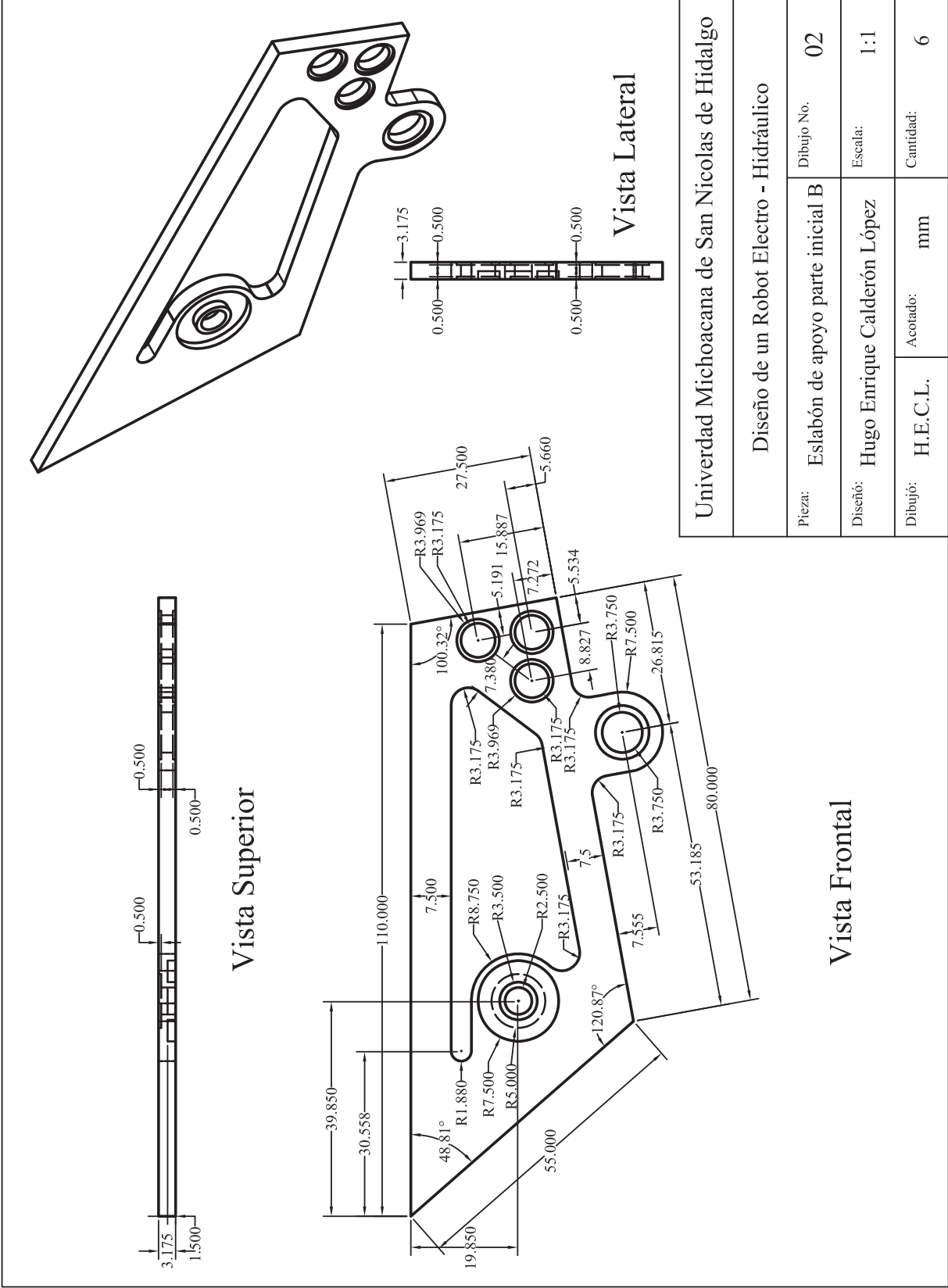


Vista Superior

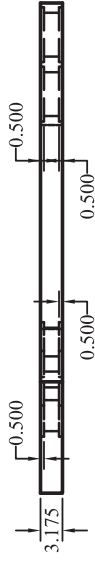
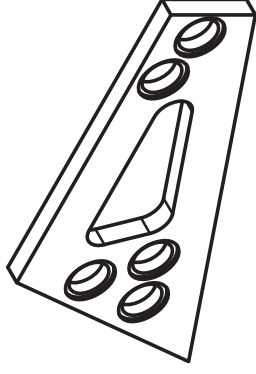


Vista Frontal

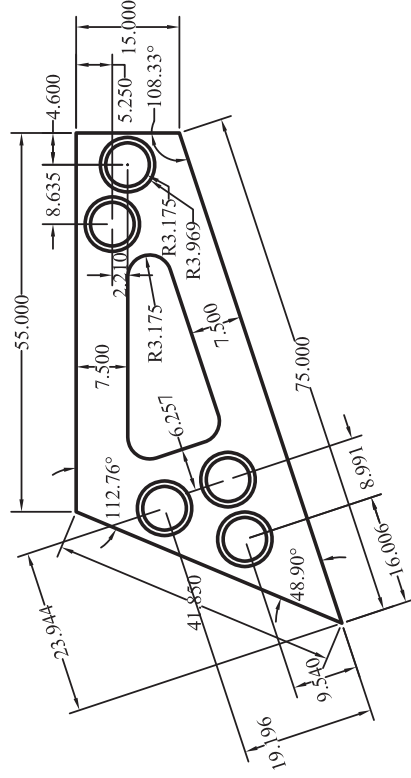
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Eslabón de apoyo parte inicial A	Dibujo No. 01
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 6



Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	Eslabón de apoyo parte inicial B
Dibujo No.:	02
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.
Acotado:	mm
Cantidad:	6



Vista Superior

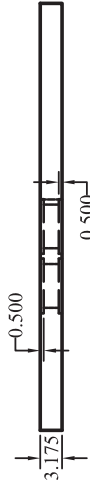


Vista Frontal

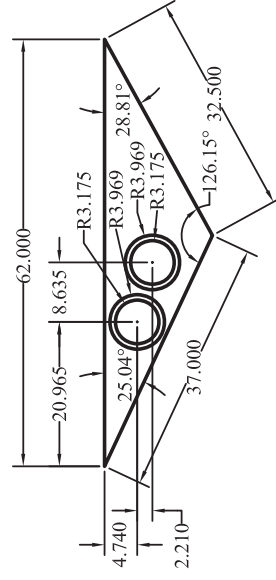
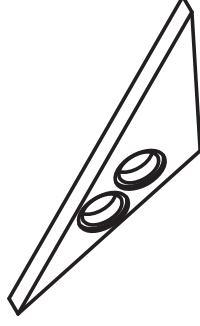


Vista Lateral

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Eslabón de apoyo parte media	Dibujo No. 03
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 12

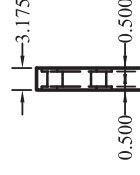


Vista Superior



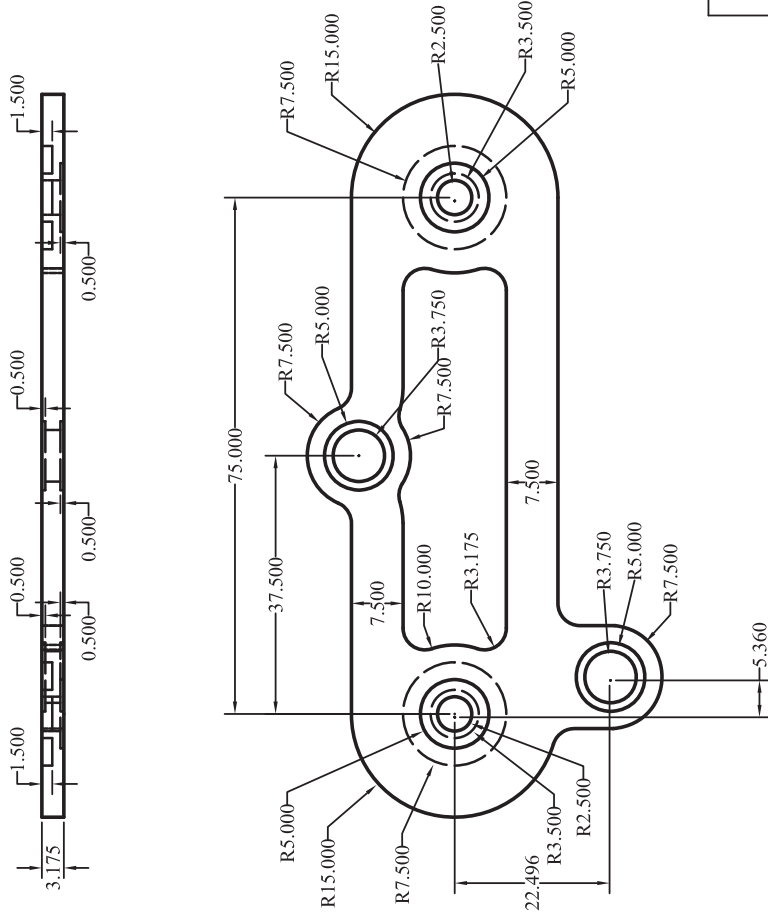
Vista Frontal

Vista Lateral

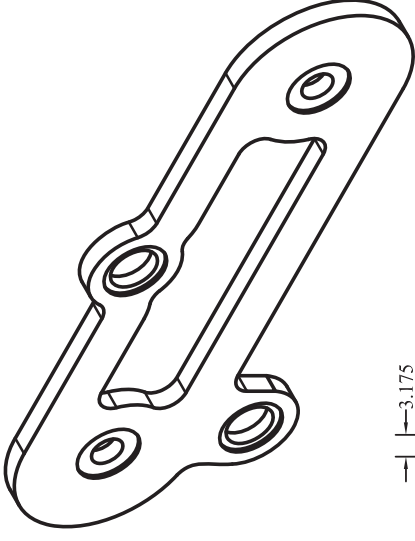
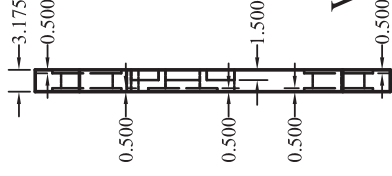


Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	Eslabón de apoyo parte final
Dibujo No.	04
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.
Acotado:	mm
Cantidad:	6

Vista Superior



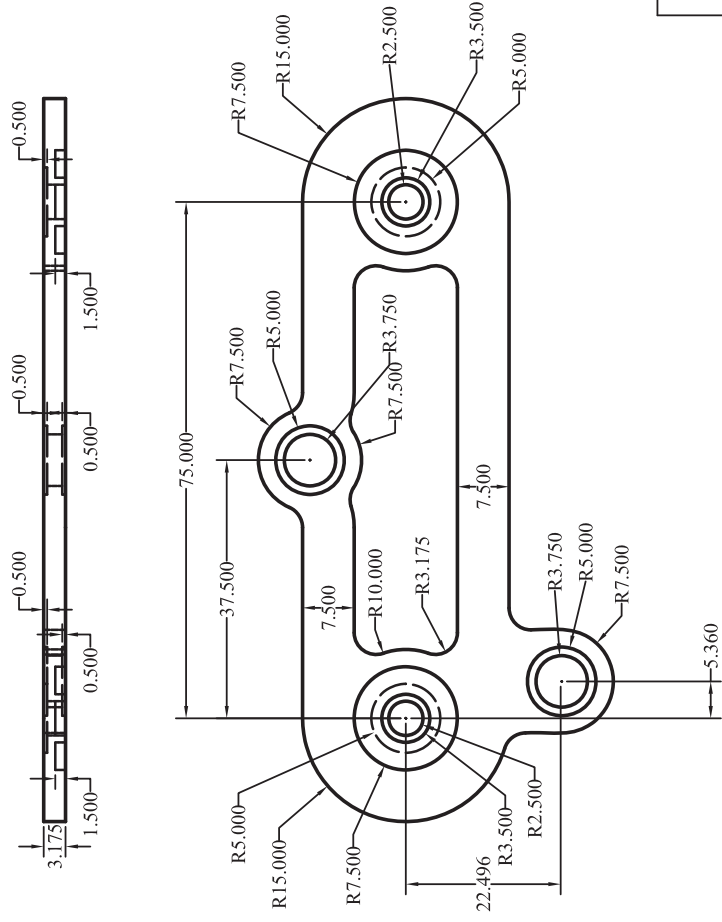
Vista Lateral



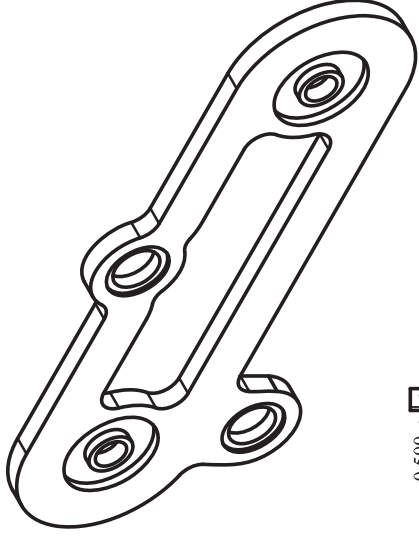
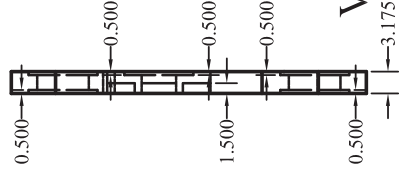
Vista Frontal

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	Eslabón medio de la pata A
Dibujo No.	05
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.
Acotado:	mm
Cantidad:	6

Vista Superior



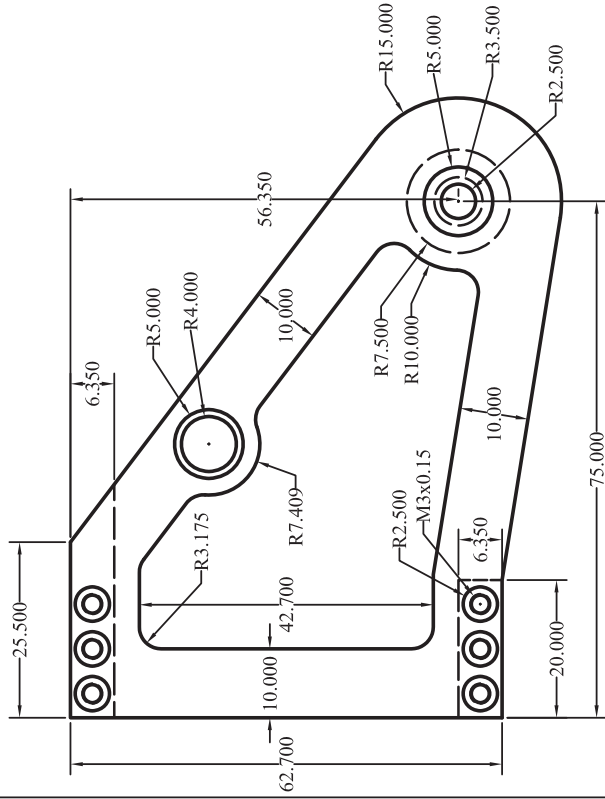
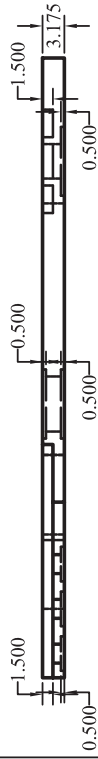
Vista Lateral



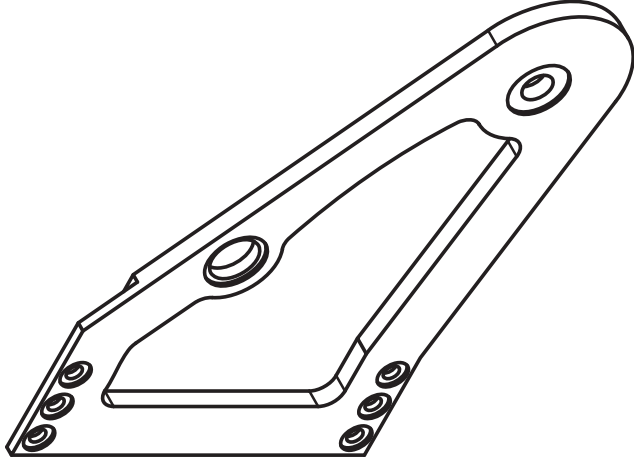
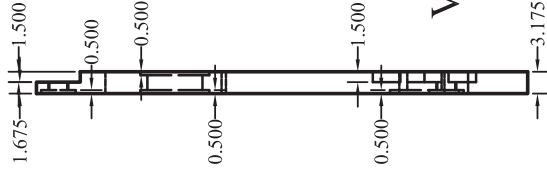
Vista Frontal

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Eslabón medio de la pata B	Dibujo No. 06
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado: mm
		Cantidad: 6

Vista Superior

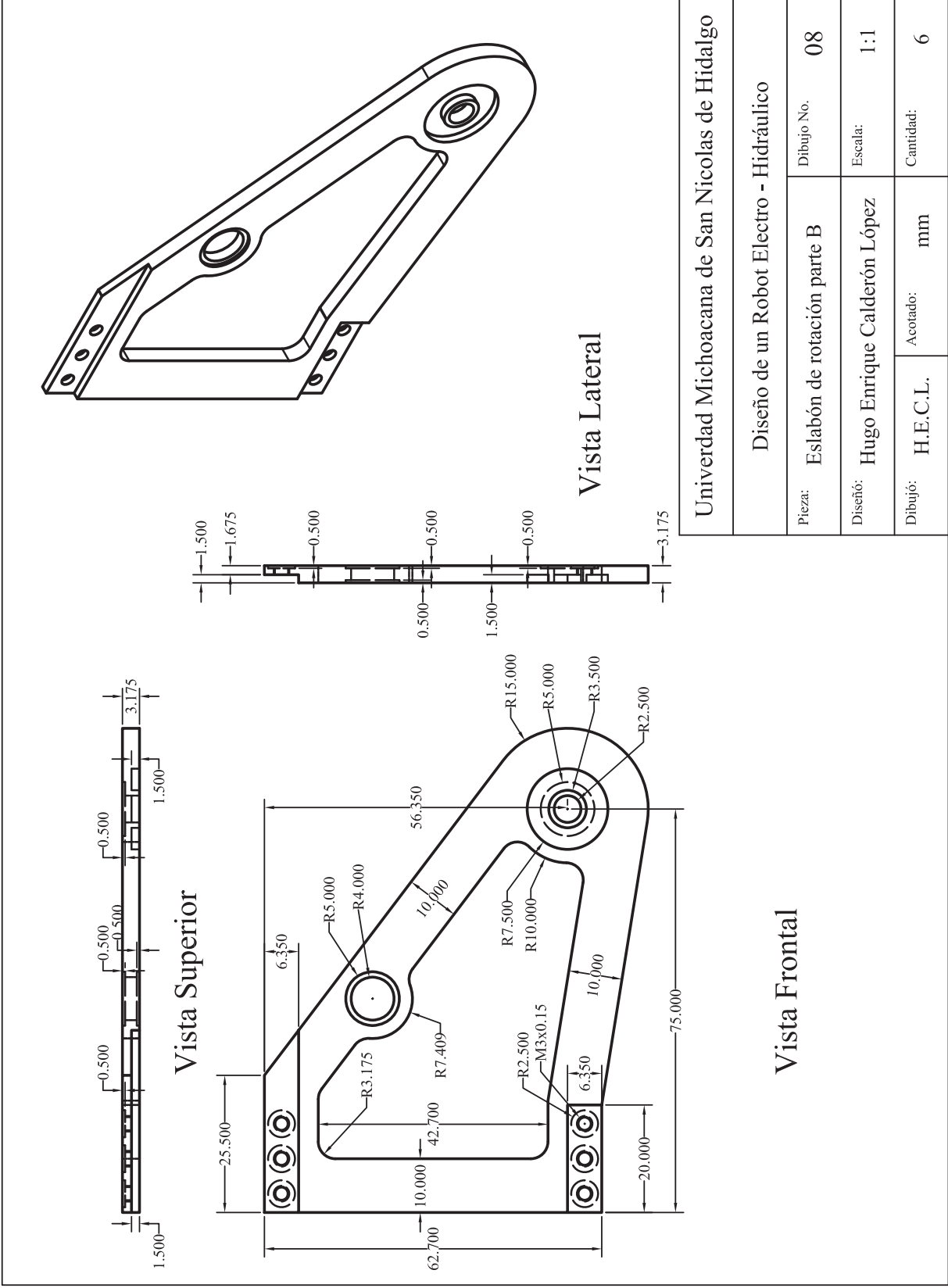


Vista Lateral



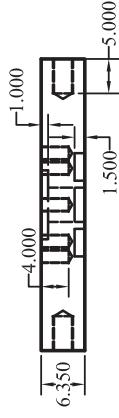
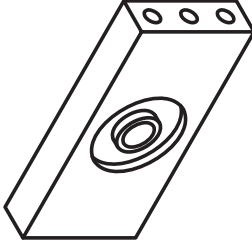
Vista Frontal

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Pieza: Eslabón de rotación parte A	Dibujo No. 07
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 6

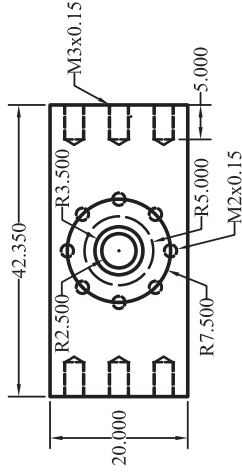


Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Eslabón de rotación parte B	Dibujo No. 08
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	
Dibujo:	H.E.C.L.	Acorado: mm
		Cantidad: 6

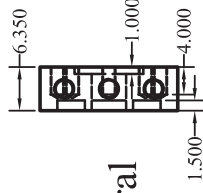
Vista Frontal



Vista Superior

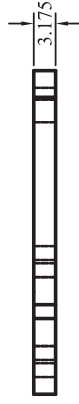


Vista Frontal

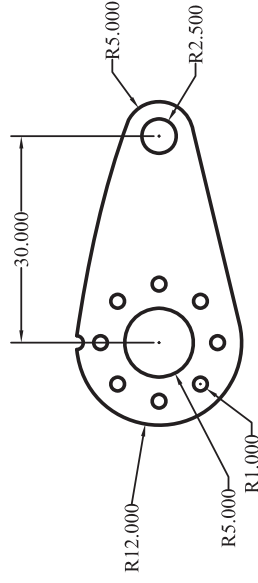


Vista Lateral

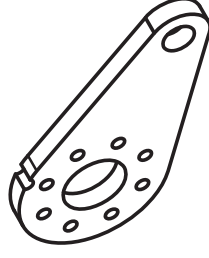
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Eslabón de rotación parte C	Dibujo No.	09
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado:	mm
		Cantidad:	12



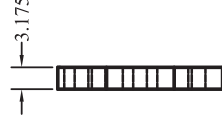
Vista Superior



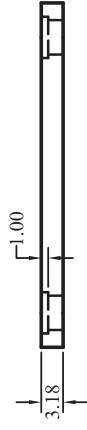
Vista Frontal



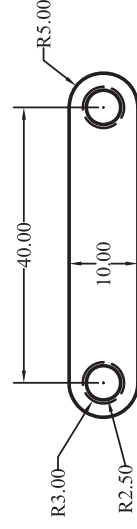
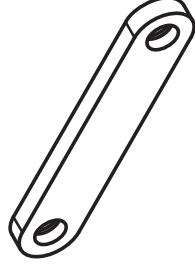
Vista Lateral



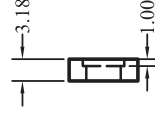
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Biela	Dibujo No.	12
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado:	mm
		Cantidad:	12



Vista Superior

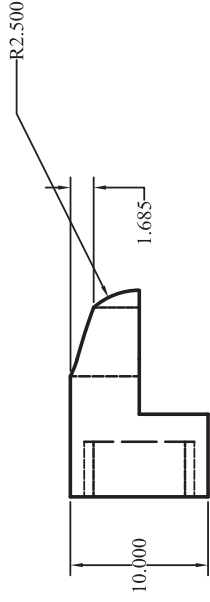
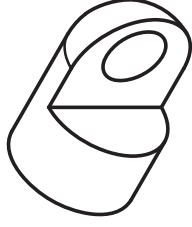


Vista Frontal

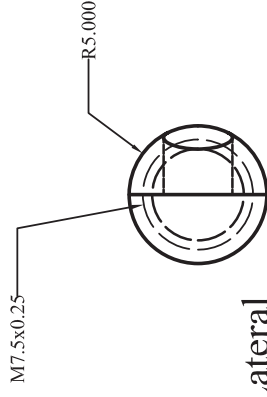


Vista Lateral

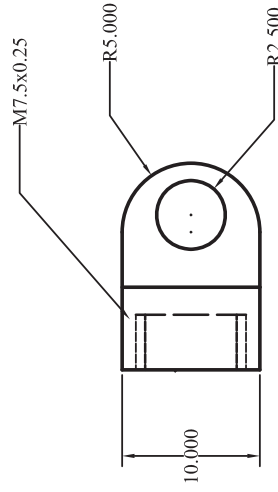
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Manivela	Dibujo No. 13
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado: mm
		Cantidad: 12



Vista Superior



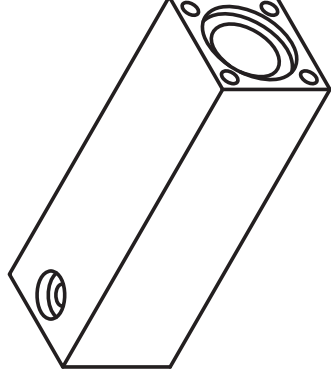
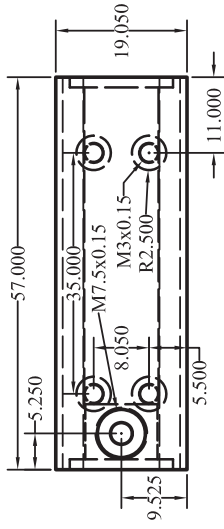
Vista Lateral



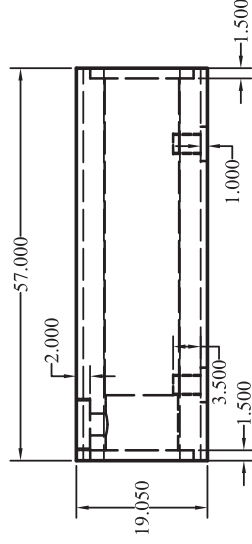
Vista Frontal

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Acoplamiento de la bomba	Dibujo No. 14
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:2
Dibujó: H.E.C.L.	Acorado: mm
	Cantidad: 12

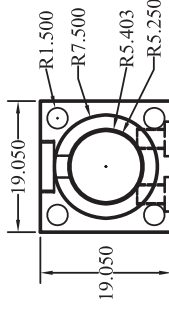
Vista Superior



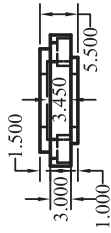
Vista Frontal



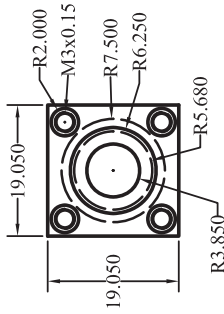
Vista Lateral



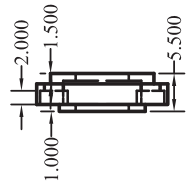
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	Cilindro del piston bomba
Dibujó:	Hugo Enrique Calderón López
Dibujó:	H.E.C.L.
Dibujó:	Acorado: mm
Dibujó No.	15
Escala:	1:1
Cantidad:	12



Vista Superior

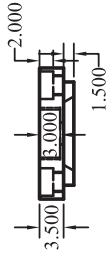


Vista Frontal

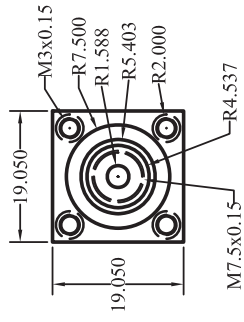


Vista Lateral

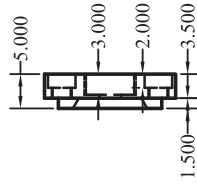
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Tapa superior del pistón bomba	Dibujo No. 16
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado: mm
		Cantidad: 12



Vista Superior

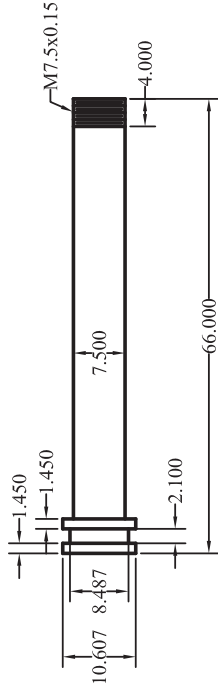
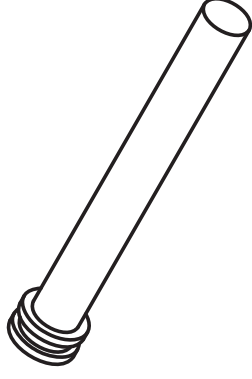


Vista Frontal

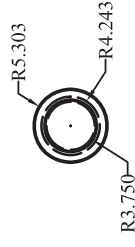


Vista Lateral

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Tapa inferior del pistón bpmba	Dibujo No. 17
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado: mm
		Cantidad: 12

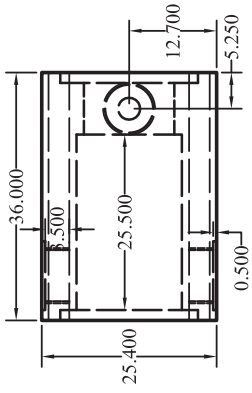


Vista Frontal

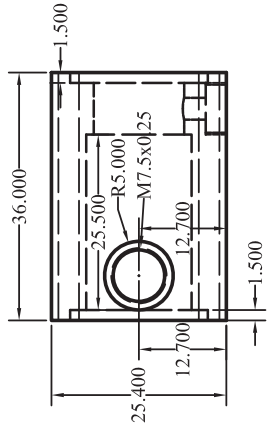


Vista Lateral

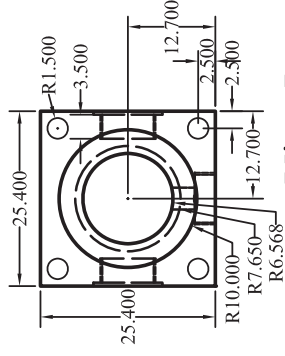
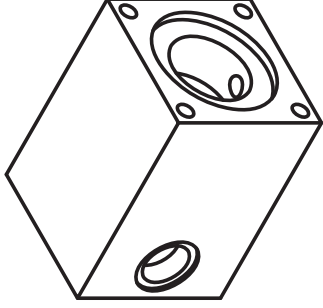
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Vástago del pistón bomba	Dibujo No. 18
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado: mm
		Cantidad: 12



Vista Superior

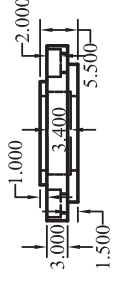
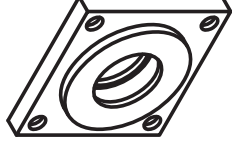


Vista Frontal

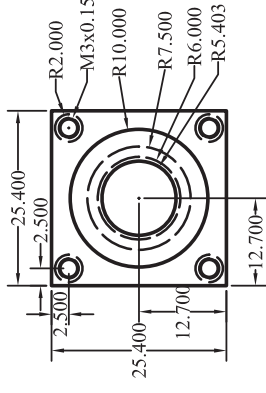


Vista Lateral

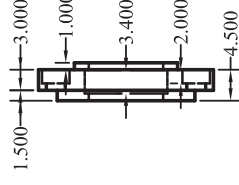
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Cilindro del pistón de la pata	Dibujo No.	19
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	12



Vista Superior

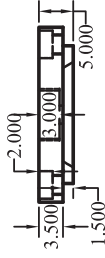
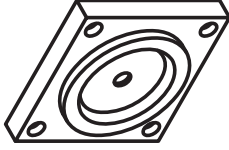


Vista Frontal

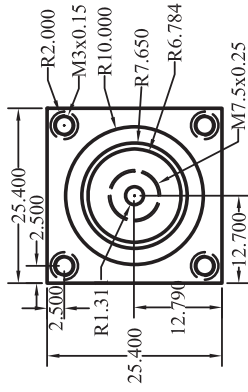


Vista Lateral

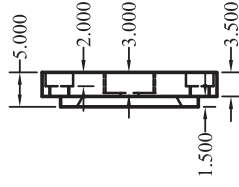
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Tapa superior del pistón de la pata	Dibujo No. 20
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 12



Vista Superior

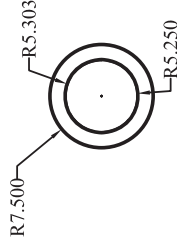
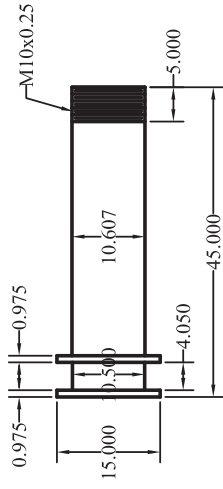
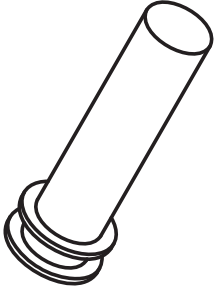


Vista Frontal



Vista Lateral

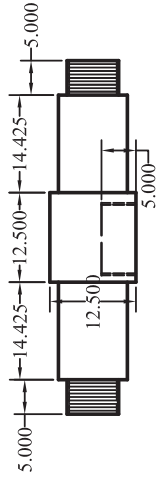
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza: Tapa inferior del pistón de la pata	Dibujo No.	21
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado:	mm
	Cantidad:	12



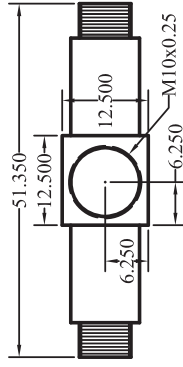
Vista Lateral

Vista Frontal

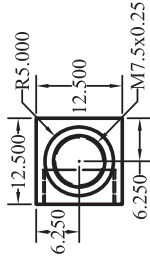
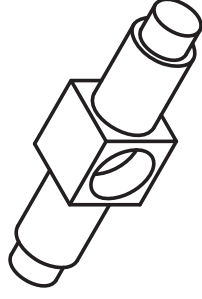
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Vastago de pistón de la pata	Dibujo No. 22
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado: mm
		Cantidad: 12



Vista Superior

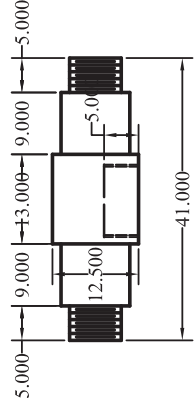
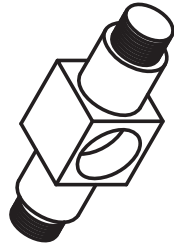


Vista Frontal

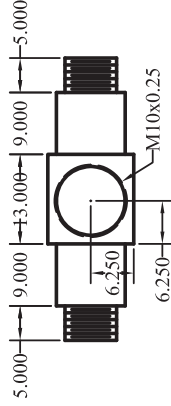


Vista Lateral

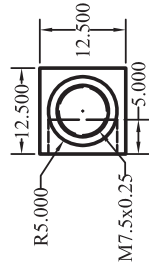
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	Acoplamiento eslabón apoyo
Dibujo No.	23
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.
Acorado:	mm
Cantidad:	6



Vista Superior

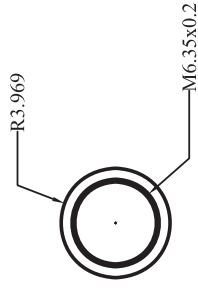


Vista Frontal

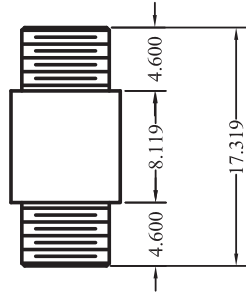


Vista Lateral

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Acoplamiento eslabón medio	Dibujo No. 24
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado: mm
		Cantidad: 6

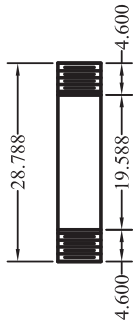


Vista Lateral

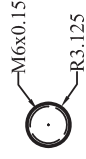


Vista Frontal

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Separador eslabón apoyo	Dibujo No. 25
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:2
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado: mm
		Cantidad: 36

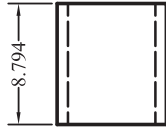


Vista Frontal

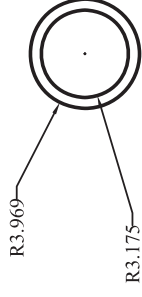


Vista Lateral

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Separador eslabón apoyo B	Dibujo No.	26
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	12

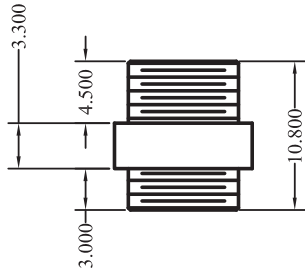


Vista Frontal

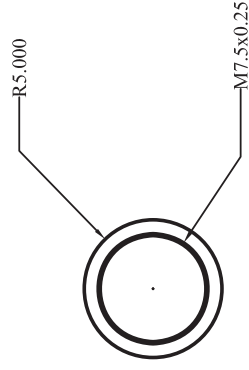


Vista Lateral

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Separador eslabón apoyo C	Dibujo No. 27
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:2
Dibujó: H.E.C.L.	Acorado: mm
	Cantidad: 24

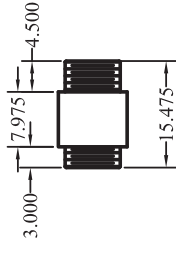


Vista Frontal



Vista Lateral

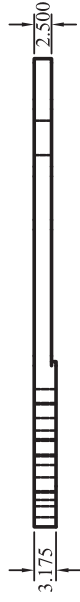
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Separador pistón pata	Dibujo No.	28
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:2
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	12



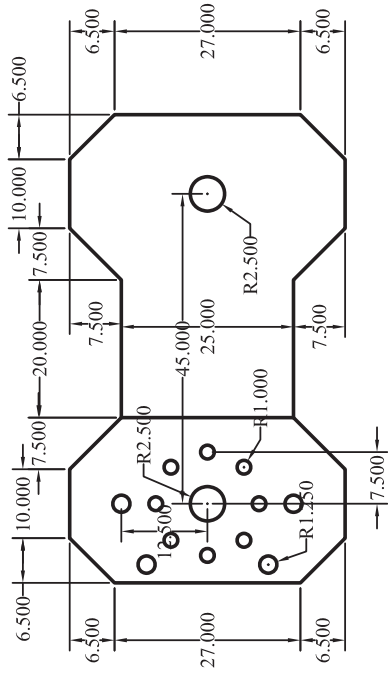
Vista Frontal

Vista Lateral

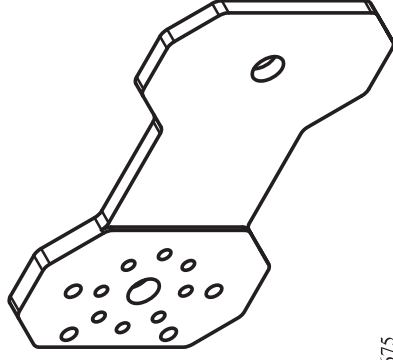
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Separador pistón mecanismo	Dibujo No.	29
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	12



Vista Superior

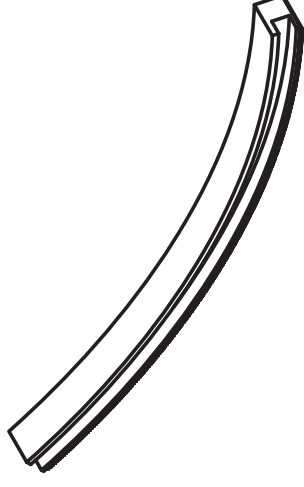
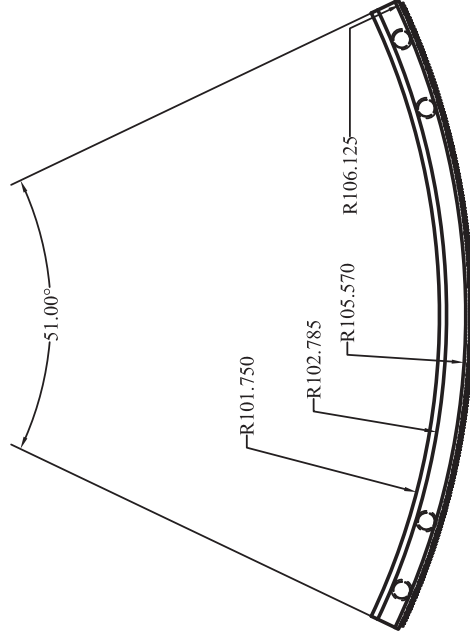


Vista Frontal



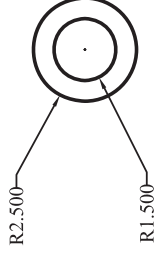
Vista Lateral

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	SopORTE unión de cuerpos	Dibujo No.	30
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado:	mm
		Cantidad:	8



Vista Superior

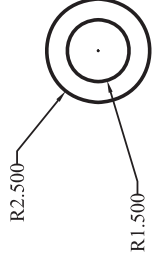
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Guia de rotación	Dibujo No.	31
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	2



Vista Frontal

Vista Lateral

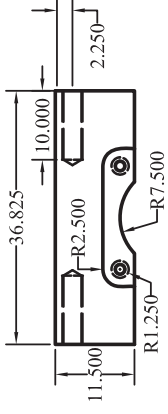
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Soporte guia de rotación	Dibujo No. 32
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:3
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 16



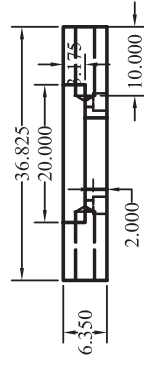
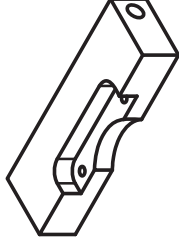
Vista Frontal

Vista Lateral

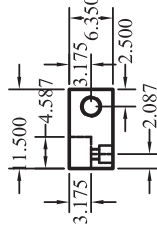
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Soporte pistón de bomba	Dibujo No. 33
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:3
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado: mm
		Cantidad: 48



Vista Superior

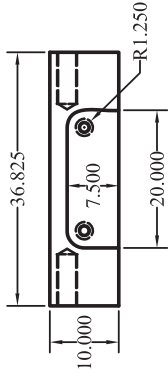


Vista Frontal

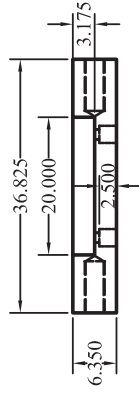
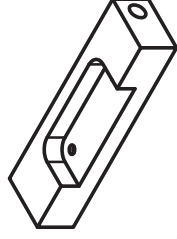


Vista Lateral

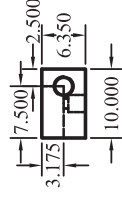
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Soporte Motor HSR-5980SG	Dibujo No. 34
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 4



Vista Superior

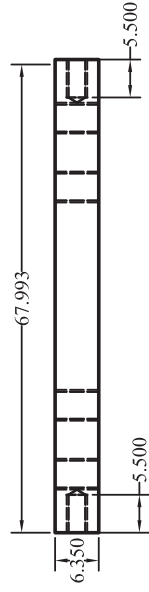


Vista Frontal

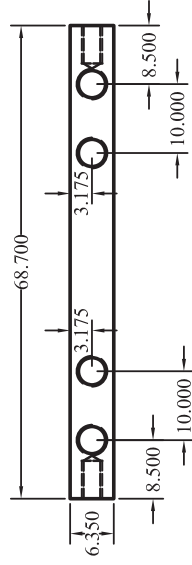


Vista Lateral

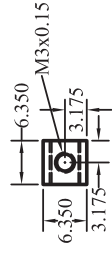
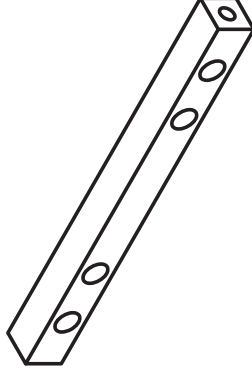
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	SopORTE de motores	Dibujo No.	35
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	16



Vista Superior

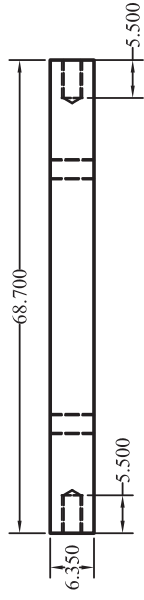


Vista Frontal

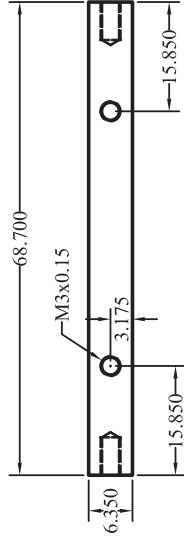


Vista Lateral

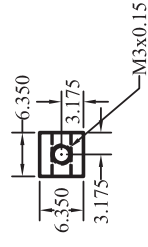
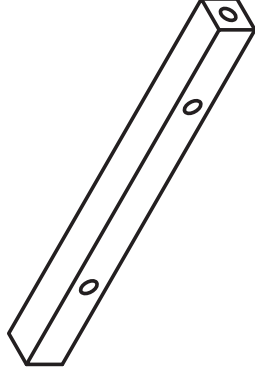
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Soporte motor bomba	Dibujo No. 36
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 24



Vista Superior

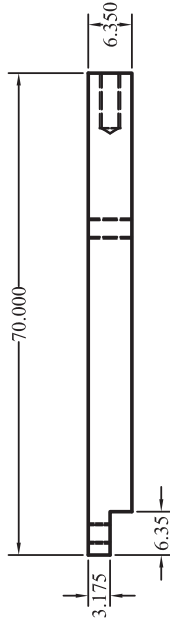


Vista Frontal

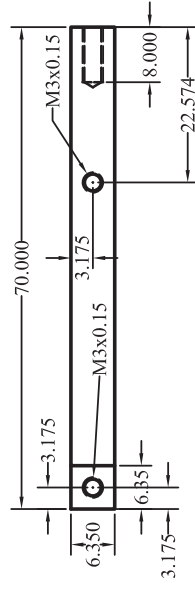
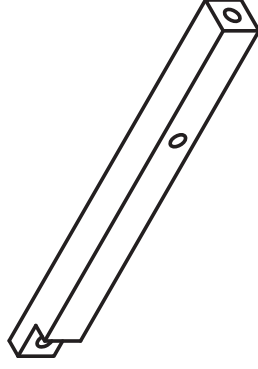


Vista Lateral

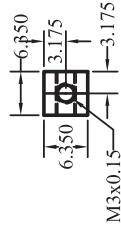
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	SopORTE de rotación de la pata
Dibujo No.	37
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.
Acotado:	mm
Cantidad:	12



Vista Superior

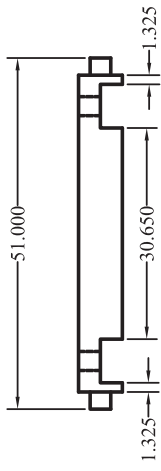


Vista Frontal

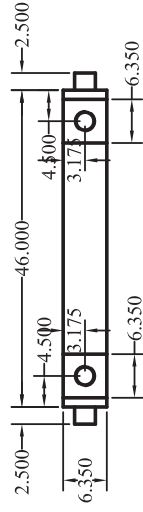
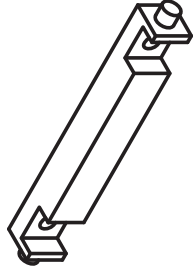


Vista Lateral

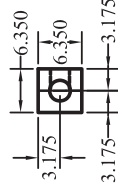
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	SopORTE horizontal de rotación
Dibujo No.	38
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.
Acorado:	mm
Cantidad:	8



Vista Superior



Vista Frontal

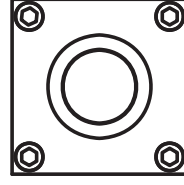
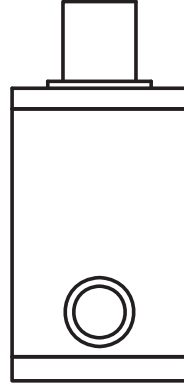
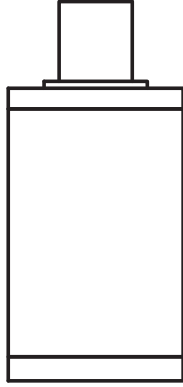
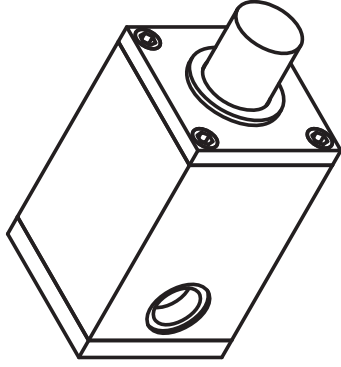


Vista Lateral

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Acoplamiento de rotación	Dibujo No. 39
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujo: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 4

Apéndice II

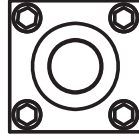
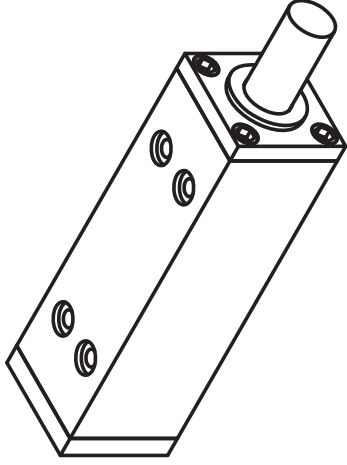
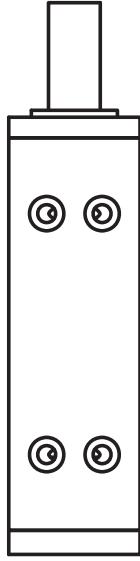
Dibujos de Ensamble



Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

Diseño de un Robot Electro - Hidráulico

Pieza:	Pistón de la pata	Dibujo No.	01
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:1
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado:	mm
		Cantidad:	12



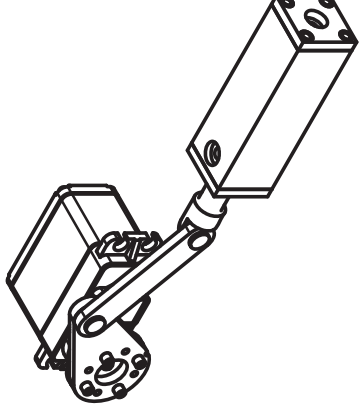
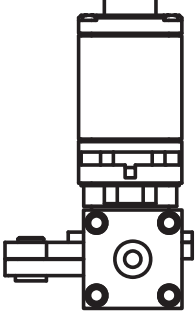
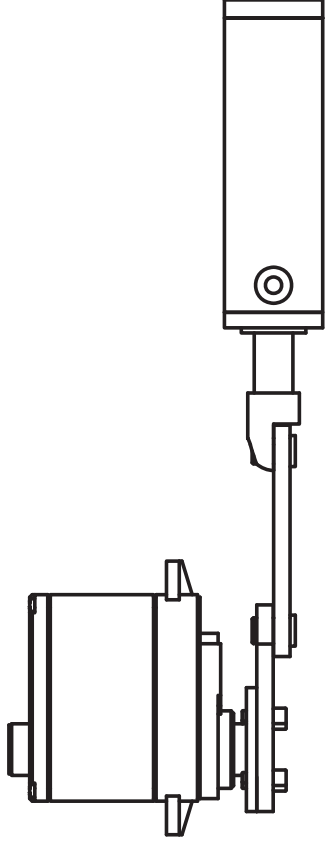
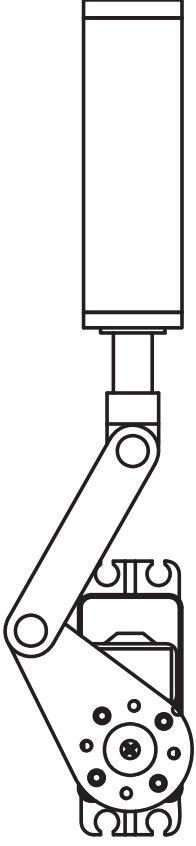
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

Diseño de un Robot Electro - Hidráulico

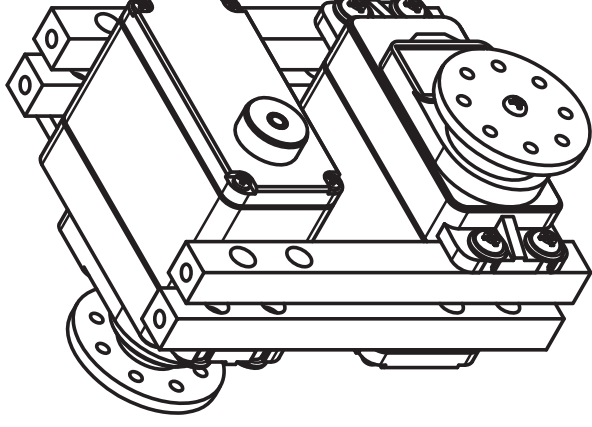
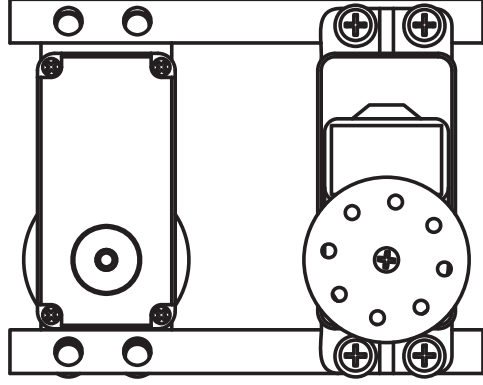
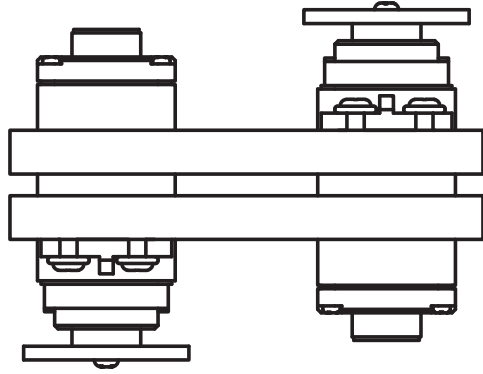
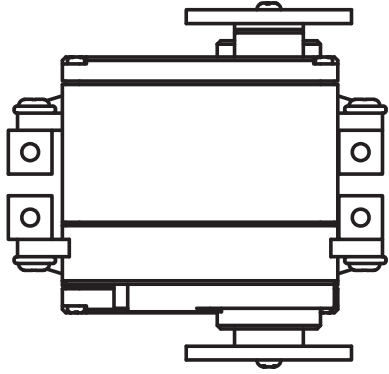
Pieza: Pistón mecanismo de bombeo Dibujo No. 02

Diseño: Hugo Enrique Calderón López Escala: 1:1

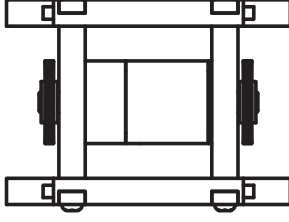
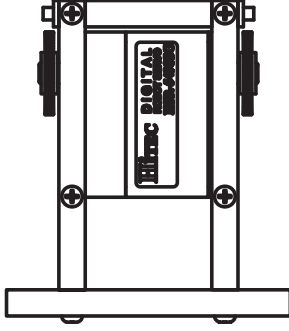
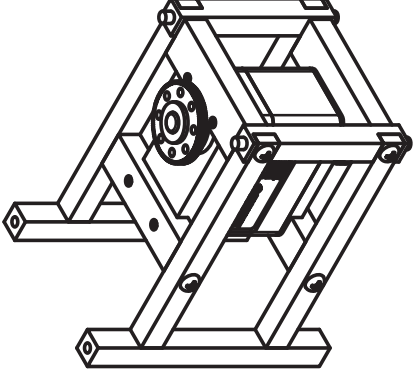
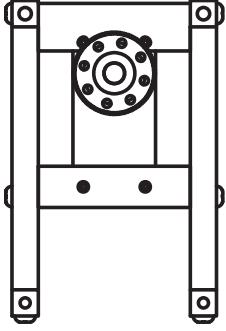
Dibujó: H.E.C.L. Acotado: mm Cantidad: 12



Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Sistema de bombeo	Dibujo No. 03
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:0.75
Dibujó: H.E.C.L.	Acorado: mm
	Cantidad: 12



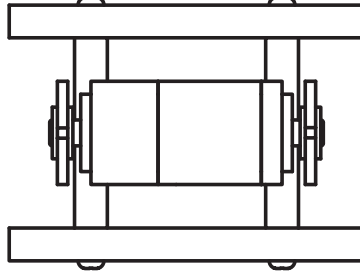
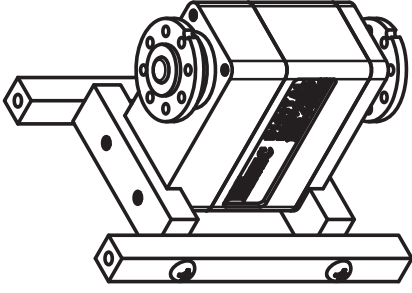
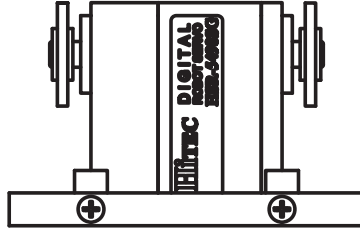
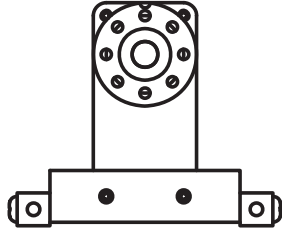
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Motores de bombeo	Dibujo No. 04
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujo: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 6



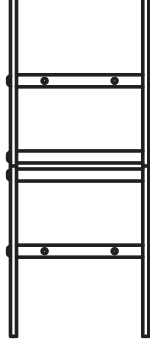
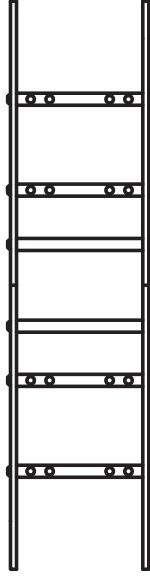
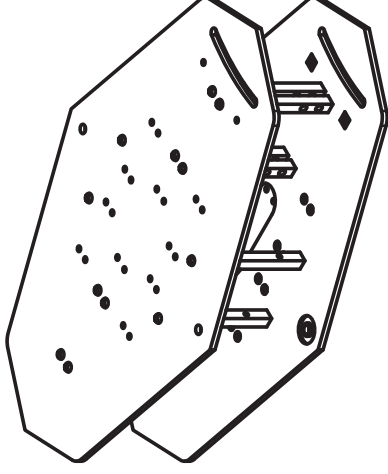
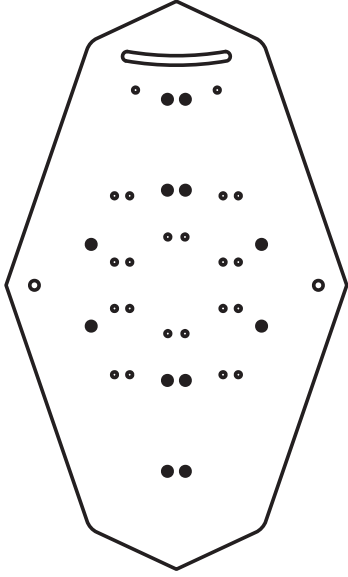
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

Diseño de un Robot Electro - Hidráulico

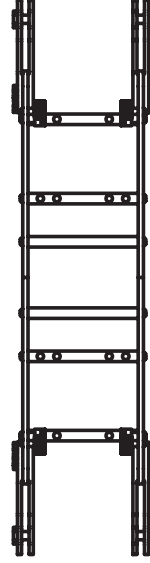
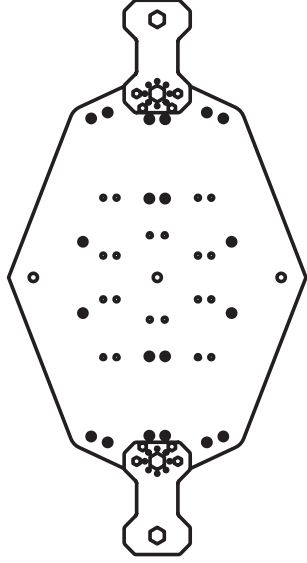
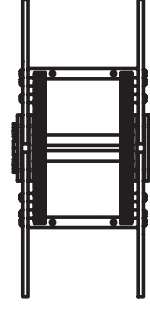
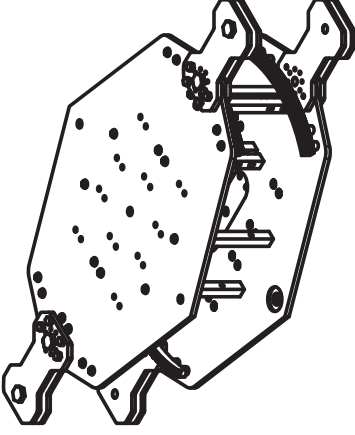
Pieza:	Mecanismo de rotación cuerpo	Dibujo No.	05
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:0.6
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	2



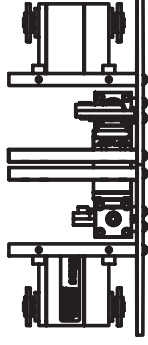
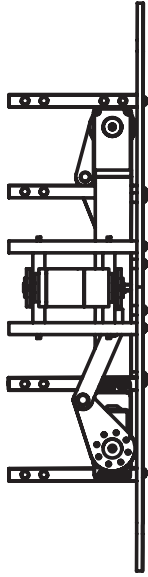
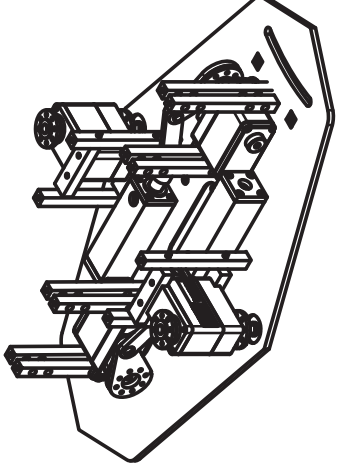
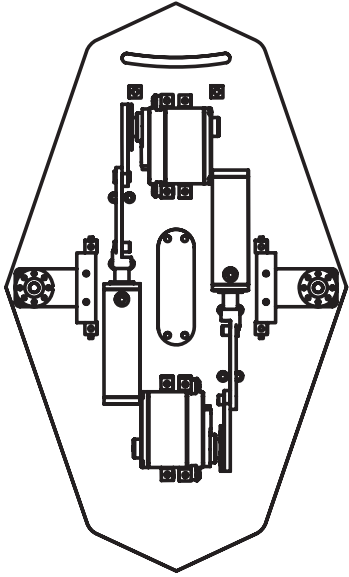
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Mecanismo de rotación pata	Dibujo No. 06
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:0.75
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 6



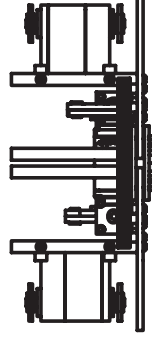
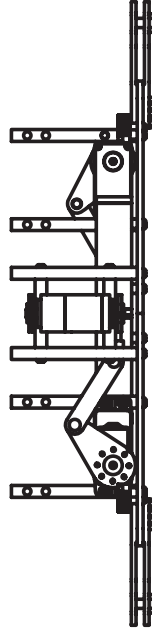
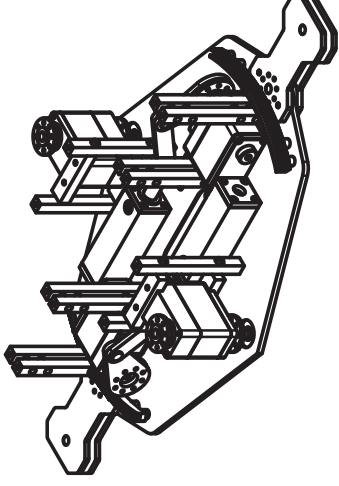
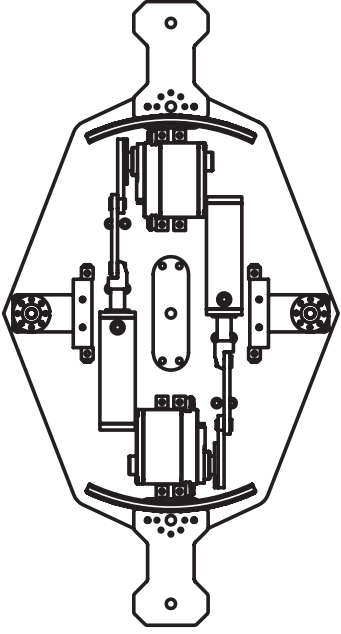
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	Soportes parte extrema del robot
Dibujo No.	07
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Escala:	1:0.275
Dibujó:	H.E.C.L.
Acotado:	mm
Cantidad:	2



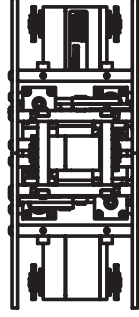
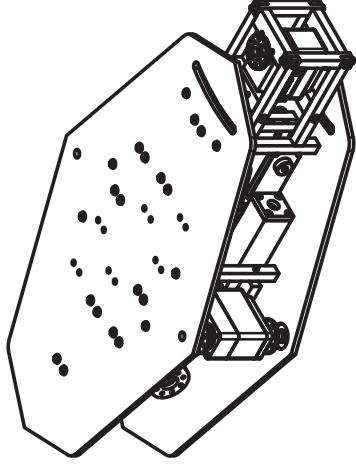
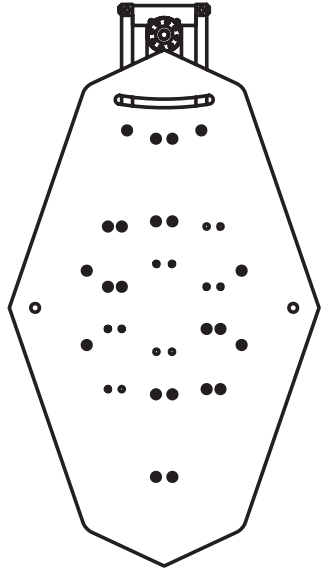
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Soportes parte media del robot	Dibujo No.	08
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:0.275
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	1



Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Elementos parte extrema del robot	Dibujo No. 09
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:0.275
Dibujó: H.E.C.L.	Acotado: mm
	Cantidad: 2



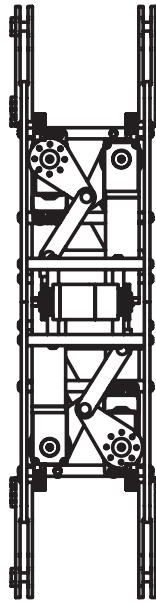
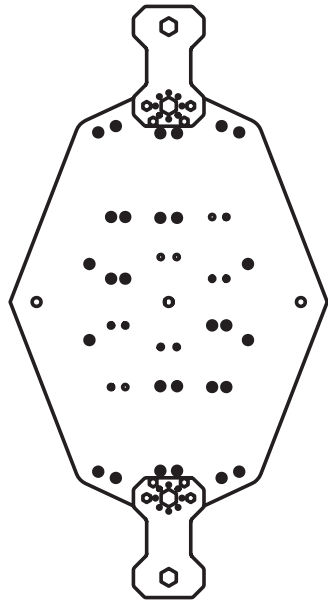
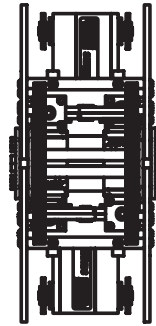
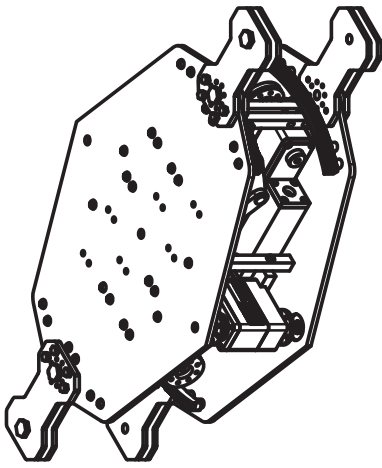
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	Elementos parte media del robot
Dibujo No.	10
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Escala:	1:0.275
Dibujó:	H.E.C.L.
Acotado:	mm
Cantidad:	1



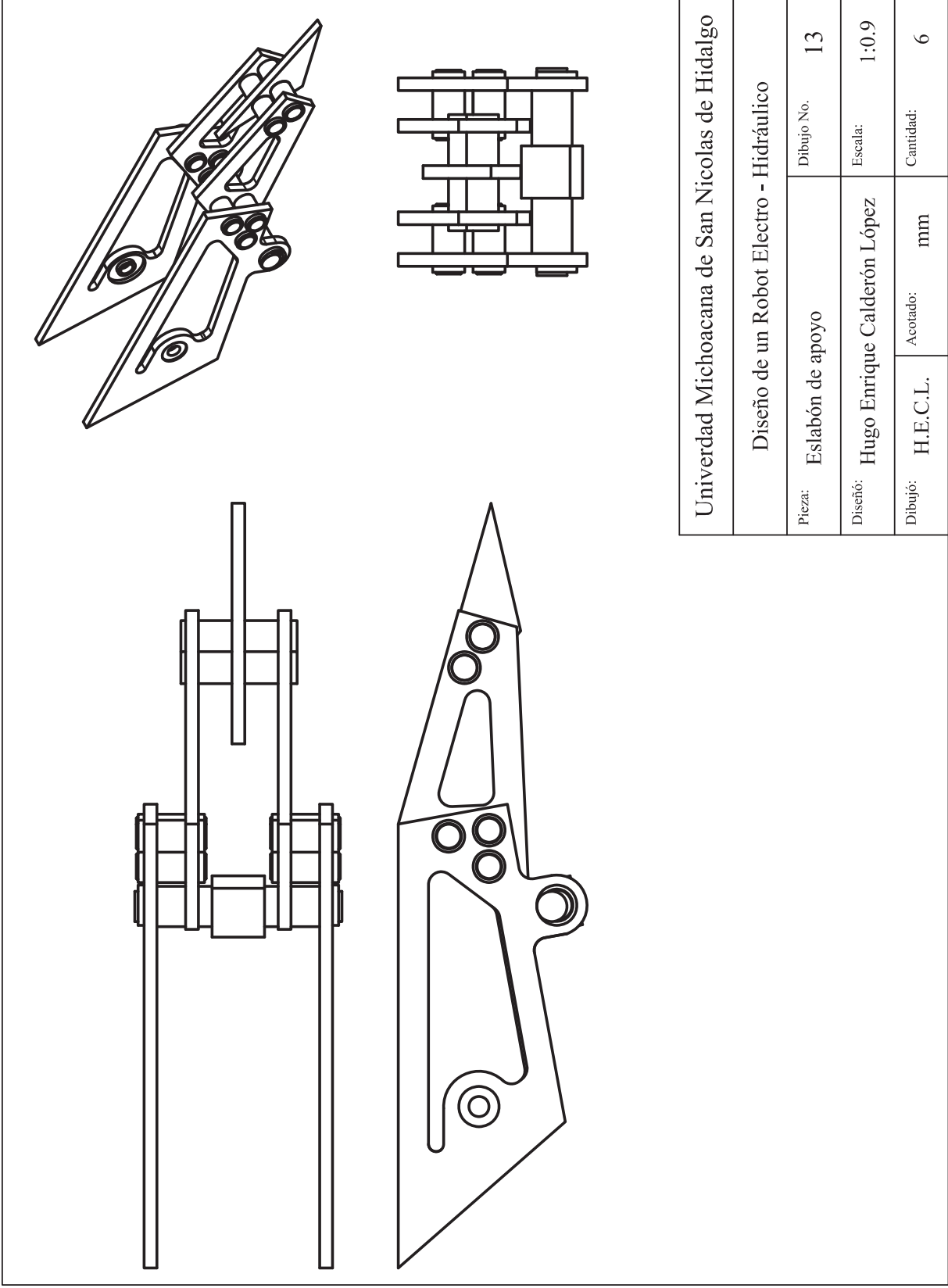
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

Diseño de un Robot Electro - Hidráulico

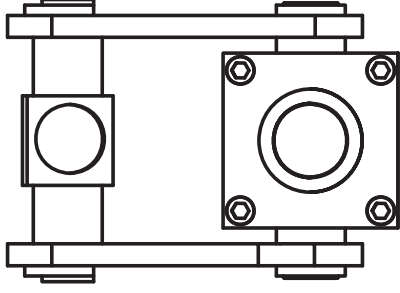
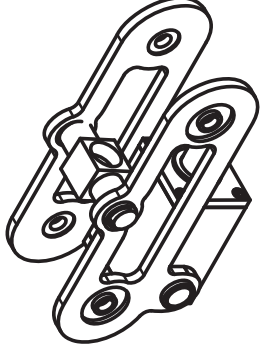
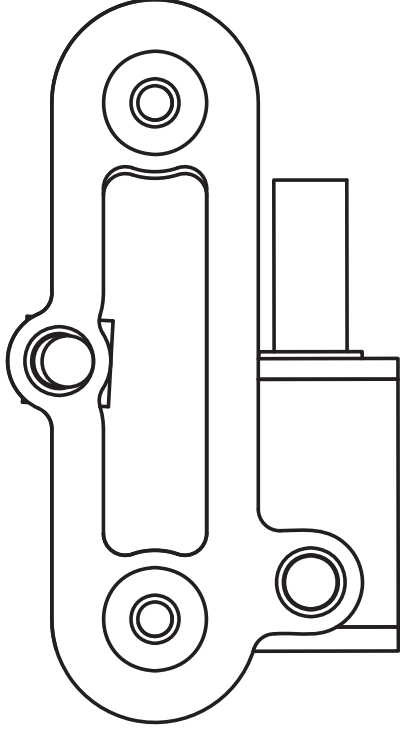
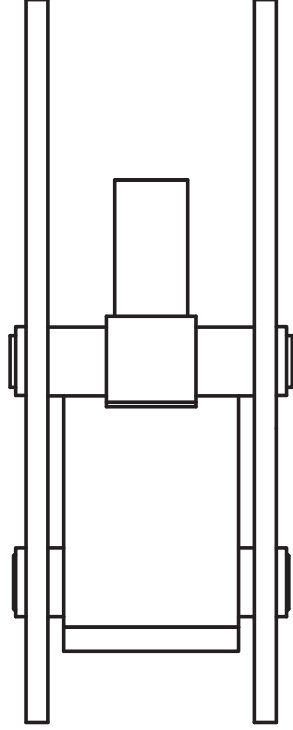
Pieza:	Eslabón extremo del robot	Dibujo No.	11
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:0.25
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	2



Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Parte media del robot	Dibujo No.	12
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:0.35
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado:	mm
		Cantidad:	1

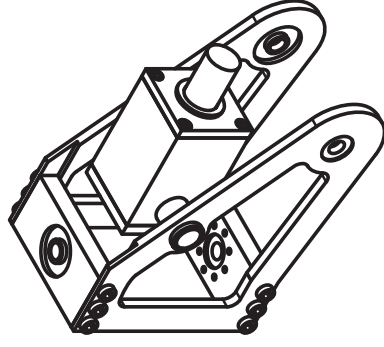
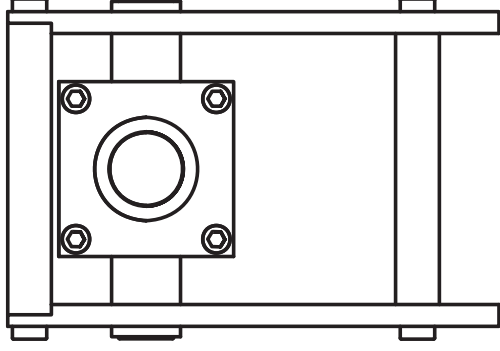
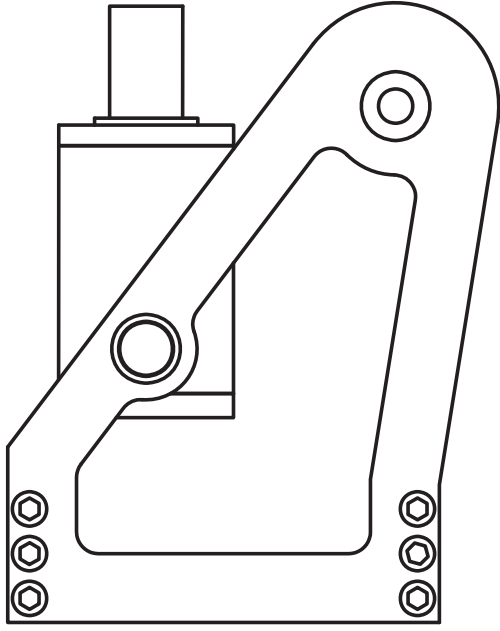


Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Eslabón de apoyo	Dibujo No. 13
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:0.9
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado: mm Cantidad: 6

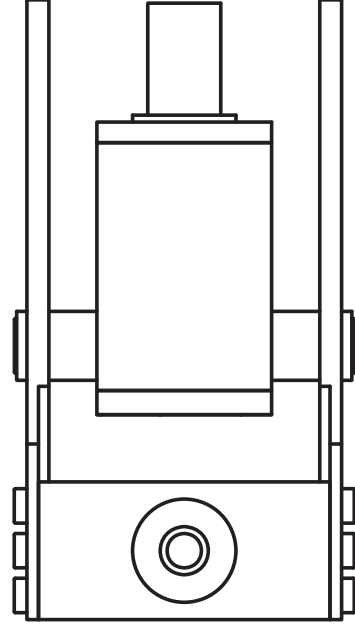


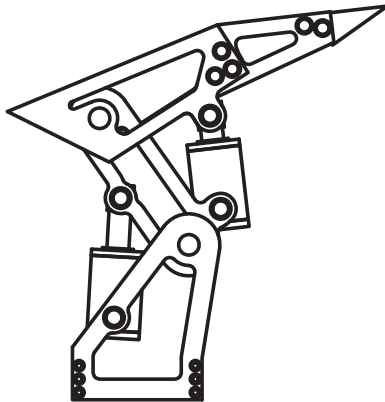
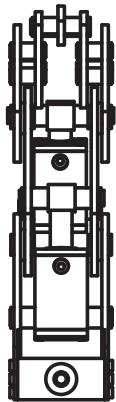
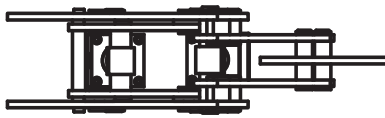
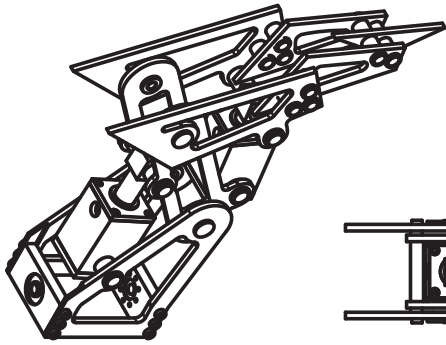
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza: Eslabón medio de la pata	Dibujo No. 14
Diseño: Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujó: H.E.C.L.	Acorado: mm
	Cantidad: 6

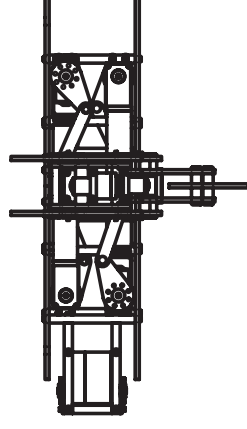
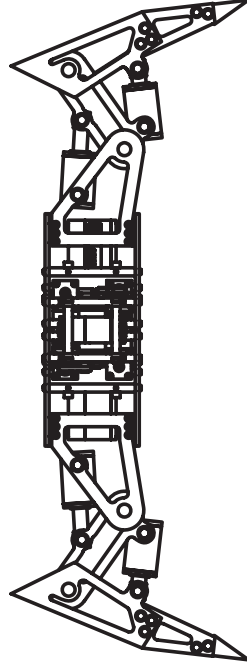
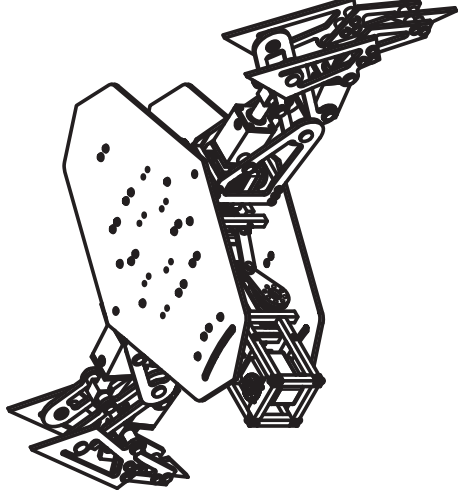
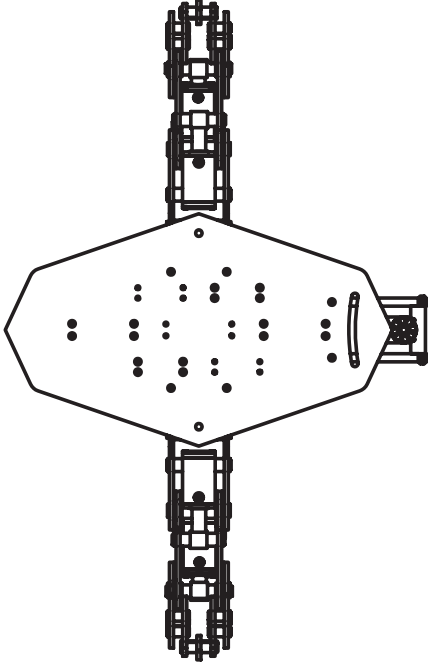


Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo		
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico		
Pieza:	Eslabón de Rotación	Dibujo No. 15
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala: 1:1
Dibujo:	H.E.C.L.	Acotado: mm Cantidad: 6

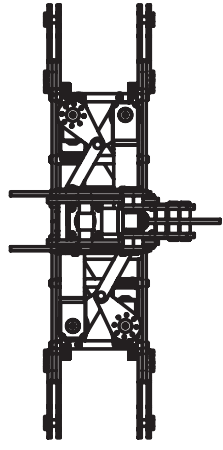
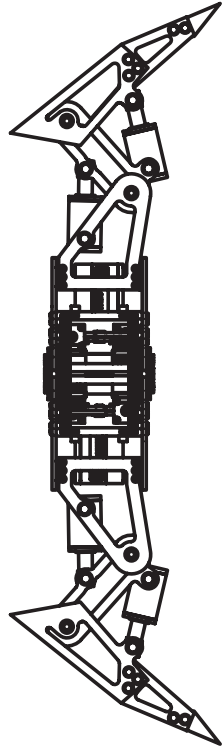
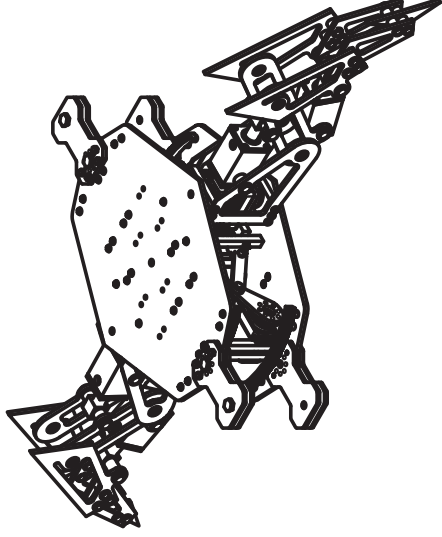
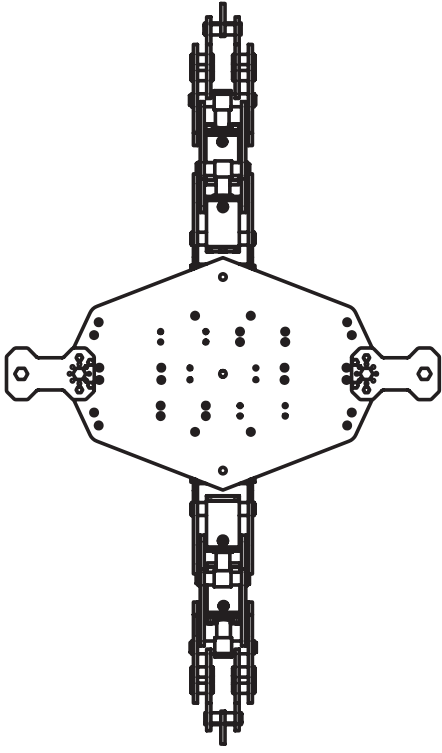




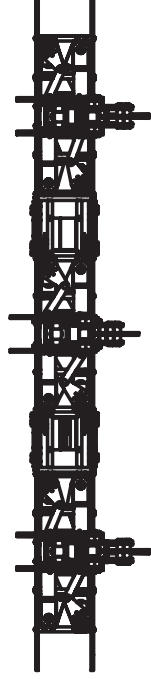
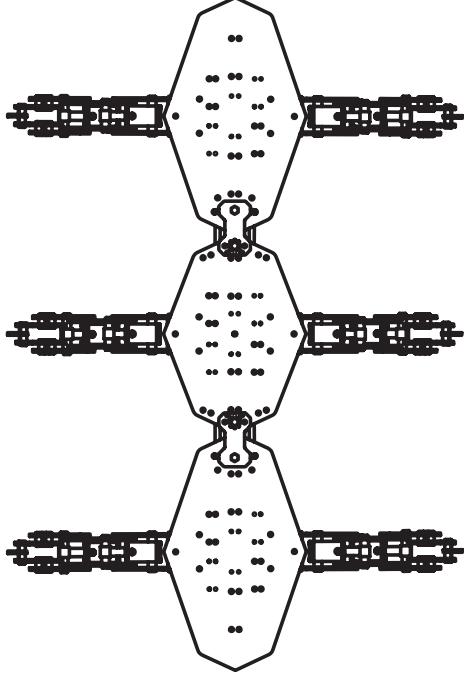
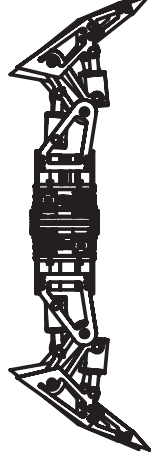
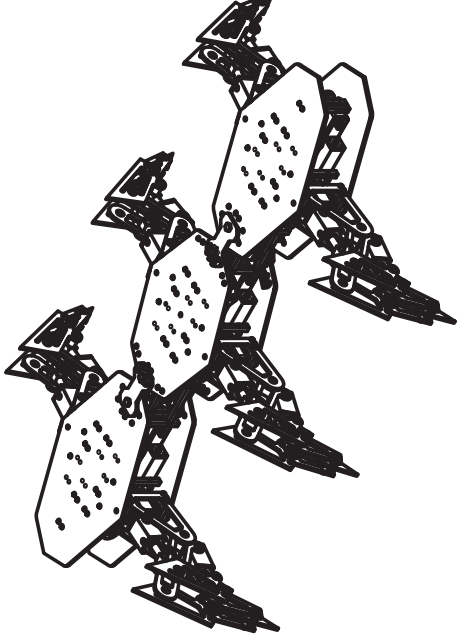
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Pata del robot	Dibujo No.	16
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:0.33
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	6



Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo			
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico			
Pieza:	Parte extrema del robot	Dibujo No.	17
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:0.2
Dibujó:	H.E.C.L.	Acorado:	mm
		Cantidad:	2



Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo	
Diseño de un Robot Electro - Hidráulico	
Pieza:	Parte media del robot
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López
Dibujó:	H.E.C.L.
Dibujo No.	18
Escala:	1:0.2
Acorado:	mm
Cantidad:	1



Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo

Diseño de un Robot Electro - Hidráulico

Pieza:	Robot Electro - Hidráulico	Dibujo No.	19
Diseño:	Hugo Enrique Calderón López	Escala:	1:0.125
Dibujó:	H.E.C.L.	Acotado:	mm
		Cantidad:	1