



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“Análisis Cinemático de un Manipulador Paralelo Híbrido
Tipo Delta”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO – MECATRÓNICA

PRESENTA:

PATRICIO MARTÍNEZ ZAMUDIO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR JAVIER GONZÁLEZ VILLELA

Ciudad Universitaria, Diciembre 2009

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO**



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Marcelo López Parra
Secretario: Dr. Leopoldo Adrian González González
Vocal: Dr. Víctor Javier González Villela
1^{er} Suplente: Dr. Jesús Manuel Dorador González
2^{do} Suplente: Dr. Francisco Cuenca Jiménez

Lugar donde se realizo la tesis:

México D.F.

Ciudad Universitaria

TUTOR DE TESIS

Dr. Víctor Javier González Villela

Firma

Para mis Padres con mucho

Cariño y Respeto.

Lucia y Patricio.

Agradecimientos:

A dios que ha puesto los medios para que el día de hoy este terminando un ciclo más de mi vida.

A mis padres dado que parte de este logro no sería posible sin el esfuerzo que hacen día a día por ver que tenga lo necesario para poder seguir adelante.

A mis Hermanos Hilda, Jesús y Mauricio.

A Paty por el cariño y la amistad que me ha brindado.

A mi Universidad por todo lo que me ha brindado.

A mi director de tesis el Dr. Víctor Javier González Villela, que por su desempeño y su arduo trabajo, ha sido un ejemplo a seguir.

A mis profesores que a lo largo de mi trayectoria académica me han brindado su apoyo y transmitido sus conocimientos.

A mis compañeros de generación, Jesús, Octavio, Germán, Ares, Miguel, Angélica, Ulises, Xana, Jorge, Humberto.

A mi tío el Ing. Alfredo Nieto Cabrera por el apoyo que me ha
brindado a lo largo de mi carrera.

A mis compañeros de Mixcoac Margarita, Anita, Marce, Lupita, y
todos los que faltan por nombrar del B.V.

Al Dr. Juan Ortega de servicios médicos de la UNAM

Reconocimiento a CONACYT por su apoyo al programa de
Maestría.

Reconocimiento a DGAPA por su apoyo al proyecto PAPIIT
1N108308.

Índice

Capítulo 1

Generalidades

1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	2
1.3	Robots manipuladores paralelos.....	3
1.4	Robots manipuladores paralelos híbridos.....	6
1.4.1	Clasificación de robots manipuladores híbridos.....	7
1.4.2	Tipos de robots manipuladores híbridos.	8
1.5	Robot delta ABB IRB 360	13
1.6	Definición del problema.....	15
1.7	Objetivo.....	15
1.8	Hipótesis.....	16
1.9	Alcances	16
1.10	Justificación.....	16
1.11	Metodología	16
1.12	Dimensiones.....	17

Capítulo 2

Análisis Cinemático

2.1	Introducción	18
2.2	Arquitectura.....	18
2.3	Análisis cinemático del robot manipulador delta hibrido.....	20
2.3.1	Análisis de la posición.....	20
2.3.1.1	Análisis del Robot delta plano.....	22
2.3.1.1.1	Cinemática Inversa del Robot Paralelo Delta Plano.....	25

2.3.1.1.2	Solución del ángulo θ_{ai}	26
2.3.1.1.3	Solución del ángulo θ_{bi}	27
2.3.1.2	Robot delta en el espacio.....	27
2.3.1.2.1	Cinemática inversa del robot paralelo delta híbrido.....	30
2.3.1.2.1.1	Solución del ángulo θ_{gi}	34
2.3.1.2.1.2	Solución del ángulo θ_{fi}	34
2.3.1.2.1.3	Solución del ángulo θ_{ei}	35
2.4	Jacobiano.....	35
2.4.1	Jacobiano del robot delta plano.....	36
2.4.2	Jacobiano del robot delta en el espacio.	37

Capítulo 3

Caracterización de los movimientos

3.1	Introducción	39
3.2	Definición del problema.....	39
3.3	Consideraciones importantes.....	40
3.3.1	Restricciones cinemáticas.....	41
3.4	Planeación de trayectorias.....	41
3.5	Perfil de trayectoria.....	42
3.6	Trayectorias en línea recta.....	44
3.7	Trayectorias cíclicas.....	45
3.8	Trayectorias cíclicas compuestas	45
3.9	Movimientos uno a uno.....	47
3.9.1	Desplazamiento del robot plano y después el robot espacial	48
3.9.2	Desplazamiento del robot espacial y después el robot delta plano	48
3.10	Movimientos simultáneos	49

Capítulo 4

Diseño y construcción del prototipo piloto

4.1	Introducción	50
4.2	Arquitectura del robot manipulador paralelo delta híbrido	50
4.3	Especificaciones y requerimientos	51
4.3.1	Dimensiones	51
4.4	Diseño conceptual	51
4.4.1	Elementos principales propuestos que componen al robot manipulador paralelo delta híbrido.....	51
4.4.2	Electrónica.....	52
4.4.2.1	Actuadores.....	53
4.4.2.2	Actuadores eléctricos	53
4.4.2.3	Selección de los motores.....	53
4.4.3	Etapas de potencia	54
4.4.4	Sensores.....	55
4.4.4.1	Potenciómetro de Precisión (lineales)	55
4.4.5	Selección del microcontrolador.....	55
4.4.6	Aplicación	56
4.5	Diseño a detalle	56
4.6	Diseño Mecánico.....	57
4.7	Diseño de la parte electrónica	64
4.7.1	Dispositivos electrónicos.....	64
4.7.2	La computadora personal	64
4.7.3	Comunicación RS-232.....	64
4.7.4	Limitaciones de la comunicación RS-232	65
4.8	Utilización del microcontrolador PIC16F877.....	65
4.9	Actuadores.	67
4.9.1	Etapas de potencia para los actuadores eléctricos.....	67
4.10	Fuentes de alimentación corriente directa.....	69

4.10.1	Fuente conmutadas.....	69
4.11	Control del robot manipulador paralelo delta híbrido.....	70
4.12	Programación de movimientos del manipulador robótico.....	71
4.12.1	Especificaciones de las entradas y salidas.....	71
4.12.2	Diseño del programa para Visual Basic.....	71
4.13	Diseño y codificación del programa para el microcontrolador.....	72

Capítulo 5

Simulación, Pruebas y Resultados

5.1	Simulación y Pruebas.....	76
5.2	Simulación gráfica.....	76
5.2.1	Simulación de trayectorias cíclicas simples.....	79
5.2.2	Simulación de trayectorias cíclicas compuestas.....	83
5.2.3	Simulación Trayectoria en línea recta.....	90
5.2.4	Prueba del prototipo piloto.....	97

Conclusiones.....	99
--------------------------	-----------

Apéndices

Apéndice A Identidades trigonométricas.....	100
Apéndice B Código fuente del programa.....	102
Apéndice C Dibujos de los elementos mecánicos.....	109
Apéndice D Artículo publicado en congreso.....	136

Bibliografía.....	147
--------------------------	------------

Lista de Símbolos

$C\theta$	Coseno de un ángulo cualquiera
$S\theta$	Seno de un ángulo cualquiera
A_i	Junta rotacional A de la cadena cinemática i
B_i	Junta rotacional B de la cadena cinemática i
C	Centro de la plataforma móvil 1
D_i	Junta rotacional D de la cadena cinemática i
E_i	Junta Universal E de la cadena cinemática i
F_i	Junta Universal F de la cadena cinemática i
G	Centro de la plataforma móvil de salida
R_{wi}	Vector de posición del elemento w de la cadena cinemática i
Q	Matriz de Rotación Q con respecto a x,y,z
T	Matriz de Traslación T con respecto a x,y,z
a_i	Eslabón a de la cadena i
b_i	Eslabón b de la cadena i
GDL	Grados de libertad
λ_p	Constante para robots paralelos planos
λ_e	Constante para robots paralelos en el espacio
n	Numero de eslabones
j	Numero de juntas
f_i	Numero de grados de libertad de la junta i
θ_{ai}	Ángulo a de la cadena cinemática i
ϕ	Orientación de la plataforma móvil 1
μ_i	Distancia angular entre cadena y cadena del robot delta
V_i	Velocidad lineal de la cadena i
ω_{ai}	Velocidad angular del eslabón a de la cadena cinemática i
$P(t)$	Perfil de quinto grado
K_x	Constante para generar trayectoria
w	Constante para generar trayectoria
ξ	Constante para generar trayectoria
A	Constante para generar trayectoria
P	Punto inicial y junta rotacional de la cadena cinemática 1 robot delta plano
Q	Punto inicial y junta rotacional de la cadena cinemática 2 robot delta plano
R	Punto inicial y junta rotacional de la cadena 3 robot delta plano

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Introducción

Teniendo en cuenta la estructura, los robots manipuladores se pueden clasificar en:

- Robots manipuladores tipo serie
- Robots manipuladores paralelos
- Robots manipuladores híbridos

Los robots tipo serie están formados por una cadena cinemática abierta, con una estructura similar al brazo humano (antropomórficos). Estos robots se han utilizado desde hace varias décadas en múltiples aplicaciones, siendo raro el proceso industrial automatizado en el que no se utilicen. En la figura 1.1a se muestra un robot manipulador antropomórfico de seis grados de libertad.

En cambio, los robots paralelos están formados por dos plataformas, una fija y otra móvil, unidas por varias cadenas cinemáticas en paralelo. Esto permite a los mecanismos paralelos soportar grandes cargas, alta velocidad de operación y pueden presentar una mejor repetibilidad. En la figura 1.1b se muestra un robot manipulador paralelo tipo delta de tres grados de libertad.

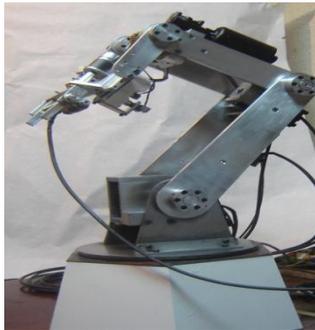


Figura 1.1a robot manipulador antropomórfico



Figura 1.1b robot manipulador paralelo delta

En los últimos años ha habido un creciente interés en los mecanismos paralelos debido a las ventajas sobre los manipuladores seriales tal como la alta flexibilidad, alta rigidez, y elevada exactitud. Un manipulador híbrido es una combinación de cadenas cinemáticas cerradas y cadenas cinemáticas abiertas, en la cual se trata de una secuencia de mecanismos paralelos y seriales. El robot híbrido puede proporcionar características de robots manipuladores serie y paralelo. Los manipuladores híbridos poseen las ventajas de robots en serie y paralelo, con la rigidez de trabajo que tienen los robots paralelos, estos pueden ser conectados en serie diseñados por mecanismos paralelos o de geometría variable.

Para este caso de estudio se realiza el análisis cinemático, el diseño conceptual, la construcción de un prototipo piloto y la simulación de un robot manipulador paralelo delta híbrido, el cual parte de la unión de un robot manipulador paralelo delta plano y de un robot manipulador paralelo delta en el espacio, unidos en configuración serie. Se adoptó esta configuración debido a que los robots manipuladores paralelos tienen menor espacio de trabajo frente a los manipuladores seriales.

1.2 Antecedentes

Según (Bonev 2003) el orden cronológico en que fueron apareciendo los robots paralelos es el siguiente:

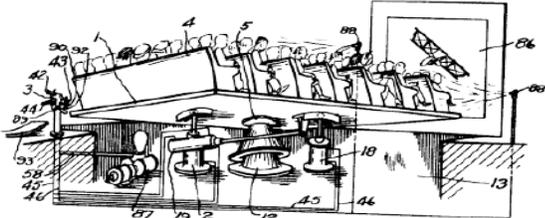
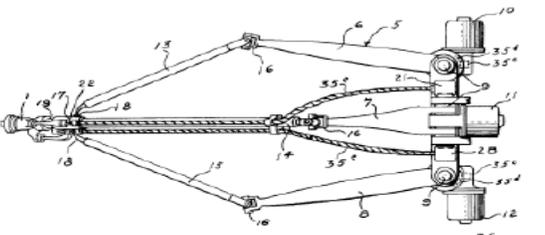
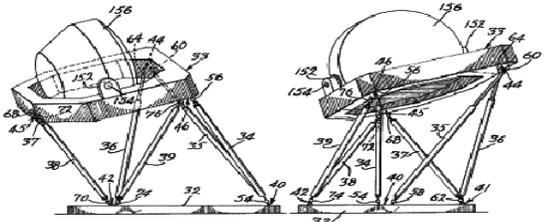
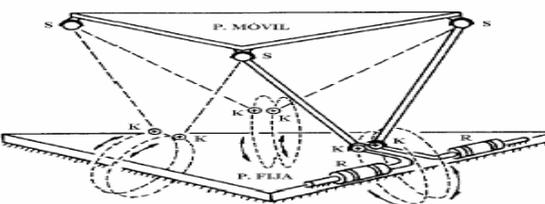
<p>Plataforma de movimiento espacial patentada por J.E. Gwinnett, en 1931.</p>	
<p>En 1942 W.L.V. Pollard patentó un robot paralelo (Position-Controlling Apparatus) para pintar automóviles.</p>	
<p>En 1947 V.E. Gough ideó un robot paralelo con seis actuadores lineales formando una estructura de octaedro, Este robot con seis grados de libertad fue utilizado en la empresa Dunlop para el ensayo de neumáticos de aviación.</p>	
<p>En 1967 K.L. Cappel patentó un simulador de vuelo utilizando la misma estructura que la plataforma de Gough</p>	
<p>Manipulador paralelo 6-RUS con seis grados de libertad accionado por actuadores giratorios presentado por K.H. Hunt en 1983</p>	

Tabla 1.1 Orden cronológico de los robots paralelos

En realidad todos los autores enumerados en este apartado se pueden considerar pioneros ya que desarrollaron sus inventos sin conocimiento previo de los anteriores.

1.3 Robots manipuladores paralelos.

Los manipuladores paralelos son clasificados como:

- Planares
- Esféricos
- Espaciales

De acuerdo con sus características de movimiento. En la figura 1.2 se puede distinguir esta clasificación.



Figura 1.2a Robot paralelo plano(Yang, Chen et al. 2002)

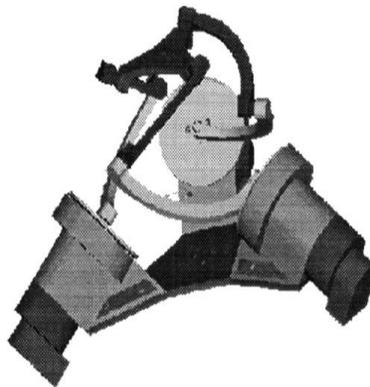


Figura 1.2b Robot paralelo esférico (Staicu 2009)



Figura 1.2c Robot paralelo espacial(Bonev 2002)

También se pueden clasificar de acuerdo a sus características estructurales como: simétricos y asimétricos.

Un manipulador paralelo es llamado simétrico si cumple las siguientes condiciones:

- El número de eslabonamientos debe ser igual al número de grados de libertad de la plataforma móvil.
- El tipo y número de articulaciones en todos los eslabonamientos deben estar arreglados en un modelo idéntico.
- El número y localización de las articulaciones actuadoras deben ser los mismos.

Cuando las condiciones antes mencionadas no llegan a cumplirse, entonces el manipulador es llamado asimétrico. En los robots paralelos simétricos, el número de eslabonamientos, m , es igual al número de grados de libertad F , el cual es igual al número total de cadenas cinemáticas, L . Esto puede expresarse como $m = F = L$.

Los robots paralelos planos pueden ser de dos o tres grados de libertad. En lo que respecta a una plataforma planar general de tres eslabonamientos con tres grados de libertad, ésta consiste en una plataforma de movimiento conectada a una base fija por tres cadenas cinemáticas simples. Usando articulaciones prismáticas y de revolución como pares cinemáticos, se obtienen siete posibles arreglos en manipuladores paralelos planos, como se muestra en la figura 1.3.

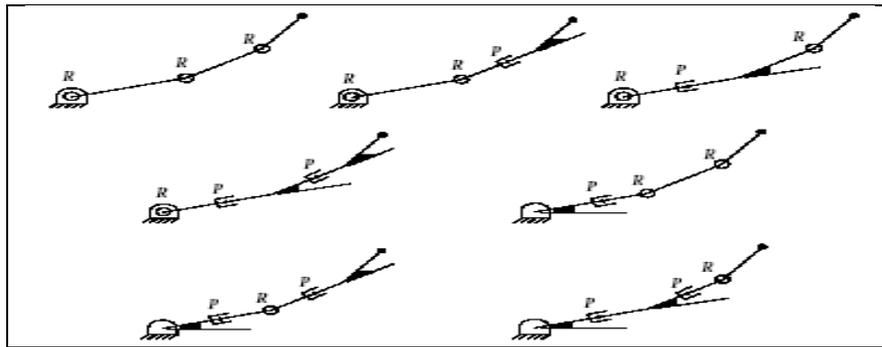


Figura 1.3 Cadenas seriales básicas para manipulador paralelos Planos

El interés sobre los robots paralelos ha ido en aumento considerándose el año 1985 como el año en el que se produce el inicio de un interés que ha ido creciendo de forma exponencial. Se citan los siguientes tipos de robots presentados o analizados en las publicaciones recogidas por (J.-P.MERLET 2006) manipuladores planos con tres grados de libertad accionados por medio de actuadores lineales o giratorios, ver fig. 1.4.

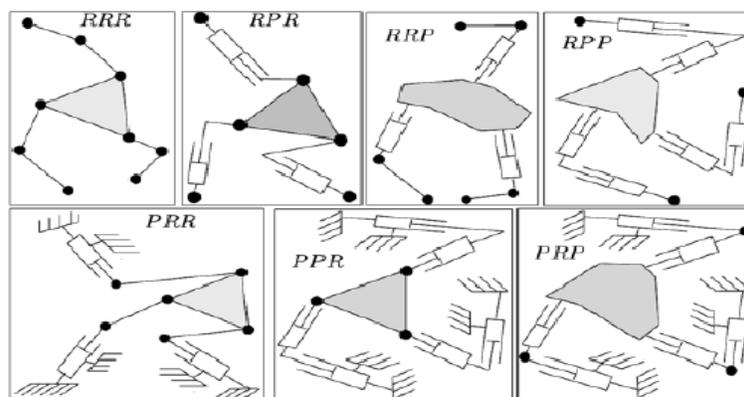


Figura 1.4 Robots paralelos planos con actuadores prismáticos o giratorios.

De los robots paralelos espaciales con tres grados de libertad accionados por medio de actuadores giratorios. Se pueden citar; El robot Delta 1 (Kumar 1992), Fig. 1.5(a). El Ojo de Águila(Gosselin, Hamel et al. 1994), Fig. 1.5(b). Y el Capaman (Ottaviano, Gosselin et al. 2001)Fig. 1.5(c).

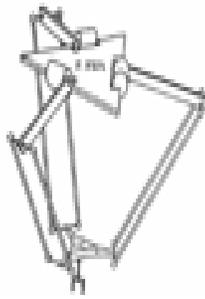


Figura 1.5a

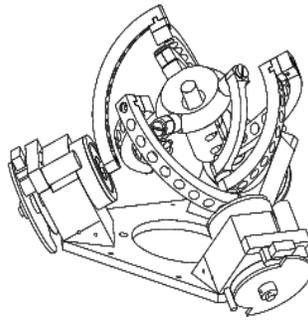


Figura 1.5b

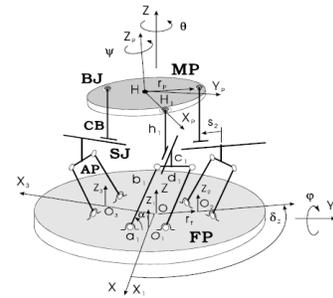


Figura 1.5c

Figura 1.5 Robots de tres grados de libertad con actuadores giratorios.

Manipuladores espaciales con tres grados de libertad accionados por medio de actuadores lineales se pueden citar:

El robot Linapod, similar al Delta pero con actuadores lineales. El Orthoglide (Wenger et al. 2000), Fig.1. 6(a). El Tricept (Neumann et al. 1988), Fig.1.6 (b). Y el 3-UPU (Tsai et al. 1996), Fig. 1.6(c).

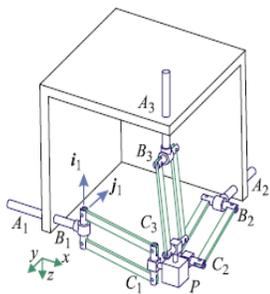


Figura 1.6a Orthoglide



Figura 1.6b Tricept

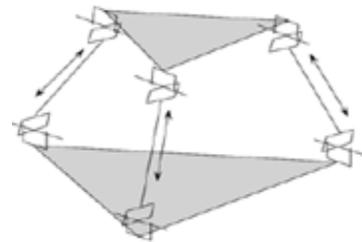


Figura 1.6c 3-UPU

Figura 1.6 Robots de tres grados de libertad con actuadores lineales.

Los robots paralelos de 6 grados de libertad, aparte de los mencionados anteriormente de V.E. Gough, D. Stewart y K.H. Hunt se pueden citar los siguientes: El Active Wrist presentado por (Merlet y Gosselin et al. 1991) Fig.1.7(a). El Hexaglide presentado por (Honegger et al. 1987), Fig. 1.7 (b). Y el Tri-Scott presentado por (Zabalza, Ros, Gil, Pintor, Jimenez et al. 2002), Fig. 1.7(c).

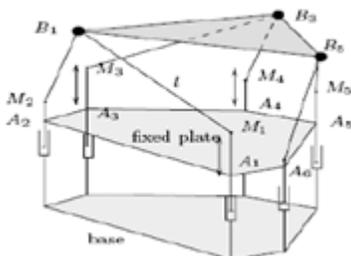


Figura 1.7a Active Wrist

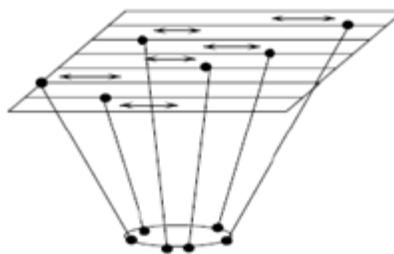


Figura 1.7b Hexaglide

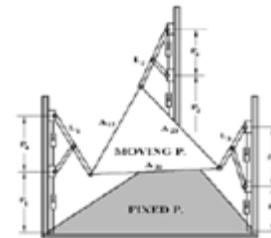


Figura 1.7c Tri-Scott

Figura 1.7 Robots paralelos de seis grados de libertad.

Los robots paralelos se han venido empleando para distintas tareas como en simuladores de vuelo, máquinas caminadoras, dispositivos de máquinas-herramientas, micro-manipulación a alta frecuencia (telescopios) y recientemente para tareas de ensamble. Sin embargo, su gran número de extremidades y juntas pasivas ofrece limitado funcionamiento en términos de precisión.

Los robots paralelos tienen como principal propiedad que su órgano terminal está conectado a una base a través de varias cadenas cinemáticas. Esto permite a los mecanismos paralelos soportar grandes cargas, alta velocidad de operación. El inconveniente que presentan es un espacio de trabajo reducido a comparación con los manipuladores seriales.

Los manipuladores paralelos se han estudiado por varios investigadores entre ellos Kumar, Luh, Merlet entre otros. Teniendo en cuenta la recopilación de publicaciones más relevantes sobre robots paralelos realizada por J.P. Merlet hasta 1969 tiene recogidas 11 publicaciones. En la década de 1970 figuran 13 publicaciones. En la década de 1980 el número aumenta hasta 125. En la década de 1990 recoge 879 publicaciones. Y entre el año 2000 y la actualidad 1023 publicaciones.

Las características de los robots paralelos frente a los robots tipo serie son:

Como inconveniente, tienen menor espacio de trabajo. Como ventajas, la relación masa del robot frente a carga a soportar es mucho menor por lo que admiten mayores aceleraciones durante su movimiento, y por ello, mayores velocidades, también tienen mayor rigidez y precisión ya que soportan la carga por medio de varios brazos en paralelo.

Otra ventaja de los manipuladores paralelos es que los motores de los actuadores están instalados en la plataforma fija, y por ello, son fijos. En cambio en los robots tipo serie los motores de los actuadores están montados en las articulaciones de los diferentes eslabones que componen el robot, lo que hace que la mayor parte de los motores tengan ciertos desplazamientos aumentando las masas móviles y con ello las fuerzas de inercia y el riesgo de averías. A pesar de las ventajas enunciadas, la utilización de los robots paralelos es mucho menor que la de los robots tipo serie.

1.4 Robots manipuladores paralelos híbridos.

Un manipulador híbrido es una combinación de cadenas cinemáticas cerradas y cadenas cinemáticas abiertas, en la cual se trata de una secuencia de mecanismos paralelos y seriales. El robot híbrido puede proporcionar características de robots manipuladores serie y paralelo. Los manipuladores híbridos poseen las ventajas de robots en serie y paralelo, con la rigidez de trabajo que tienen los robots paralelos, estos pueden ser conectados en serie diseñados por mecanismos paralelos o de geometría variable.

Sin embargo el estudio de los manipuladores paralelos híbridos se han presentado en pocos trabajos por ejemplo, (Waldron, Raghavan et al. 1989), (Kumar 1992), (Ricard and Gosselin 1994), (Angeles 2002) entre otros.

1.4.1 Clasificación de robots manipuladores híbridos.

Las conexiones serie y paralelo de manipuladores se clasifican en los siguientes cuatro tipos (Lee and Kim 1993), presenta un método unificado y eficaz de resolver la cinemática inversa de un robot manipulador de seis grados de libertad compuesto de dos robot de tres grados, incluyendo robots paralelos paralelo-paralelo, serie- paralelo, paralelo-serie, serie-serie.

- 1 Paralelo-Paralelo tipo en el que dos brazos paralelos son conectados en serie, como se muestra en Fig. 1.8a. Este tipo de conexión en serie fue propuesto por (Shahinpoor 1992), con una rigidez, y la rápida evolución de sistemas manipulador.
- 2 Serial-Paralelo tipo paralelo en el que un brazo está montado en un brazo de serie, como se muestra en Fig. 1.8b. Este tipo de conexión en serie se propuso en (Waldron, Raghavan et al. 1989) para implementar un micro-manipulador/wrist sistema con gran ancho de banda y de alta resolución.
- 3 Paralelo-Serial tipo de serie en la que un brazo está montado sobre un brazo paralelo, como se muestra en Fig. 1.8c. Este tipo de conexión en serie es inversa a la anterior, el tipo, y puede ser útil para mejorar la estabilidad y la fuerza de la parte inferior de la conexión en serie.
- 4 Tipo de serie- serie en la que dos brazos están conectados en serie, como se muestra en Fig. 1.8d. Este tipo de conexión en serie se pueden encontrar en la serie de brazos convencionales.

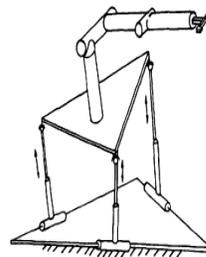
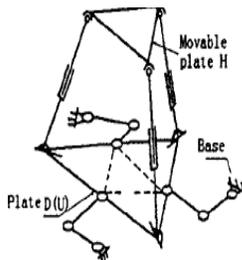
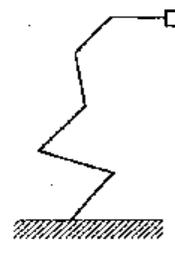
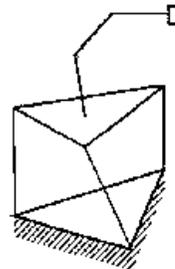
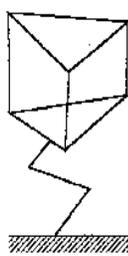
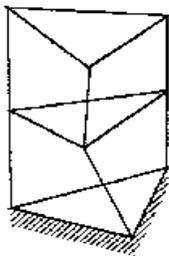


Figura 1.8a paralelo-paralelo

Figura 1.8b serie-paralelo

Figura 1.8c paralelo-serie

Figura 1.8d serie-serie

Figura 1.8. Configuraciones de robots paralelos híbridos

1.4.2 Tipos de robots manipuladores híbridos.

Los manipuladores híbridos combinan mecanismos paralelos y seriales en conexión serie o paralelo, que es una solución factible para aumentar el espacio de trabajo. Entre las desventajas de los mecanismos paralelos se pueden mencionar que tienen un espacio de trabajo menor comparado con los manipuladores seriales debido a su arquitectura y la cinemática es más complicada de resolver.

En vista de las ventajas que ofrecen los robots manipuladores paralelos y los robots manipuladores seriales, se propone un diseño que podrían beneficiarse de ambas configuraciones por lo que se obtiene un "robot manipulador híbrido", mecanismo que está compuesto por cadenas abiertas montadas en mecanismos paralelos.

Entre los trabajos que se encuentran sobre robots manipuladores híbridos se citan los siguientes:

- Cinemática de un robot manipulador serie-paralelo híbrido (Waldron, Raghavan et al. 1989)

Waldron et al. Propuso la manipulación del sistema muñeca y micro-manipulador que es robot serie-paralelo de 6 GDL, obteniendo la cinemática del mecanismo.

- Cinemática de un manipulador serie-paralela híbrido (Shahinpoor 1992)

Estudió sobre la cinemática de un robot manipulador híbrido que tiene la forma de dos robots paralelos conectados en serie de 3 GDL.

- Cinemática, velocidad de manipuladores híbridos de configuración serie paralelo. (Huang, Ling et al. 1993). Figura 1.9.

Estudió la cinemática para facilitar el movimiento de control de un mecanismo robótico híbrido. El manipulador híbrido se compone de un robot serie y de un robot paralelo que pueden ser accionados ambos.

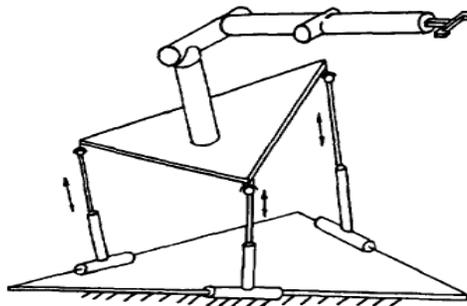


Figura 1.9 Manipulador híbrido A de 6GDL.

- Cinemática de mecanismos robóticos híbridos con módulos serie paralelo. (Huang and Ling 1994)

Este trabajo tiene un enfoque básico, para desarrollar un procedimiento sistemático para el análisis de la cinemática de robots manipuladores híbridos necesarios en el diseño y el control de este tipo de manipuladores. Figura 1.10.

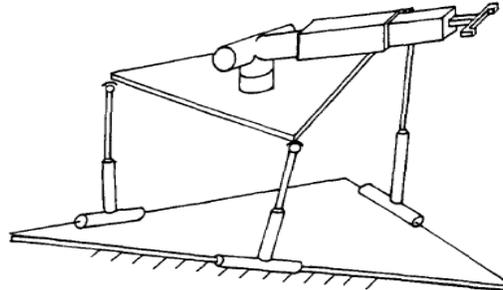


Figura 1.10 Manipulador híbrido B de 6GDL.

- Análisis de la exactitud de un manipulador serie-paralelo de micromovimientos.(Shusheng, Guanghua et al. 1997)

El mecanismo serie-paralelo se emplea en un manipulador de micro movimientos. El mecanismo serie paralelo está compuesto por dos plataformas paralelas de 3GDL (Fig. 1.11).

La parte superior se compone de un mecanismo paralelo 3RPS (figura 1.11.a). La placa H puede moverse a lo largo de la dirección z y girar en torno a x, y. La parte inferior es un mecanismo paralelo plano 3RRR. También de 3GDL. La placa D puede moverse a lo largo de x.

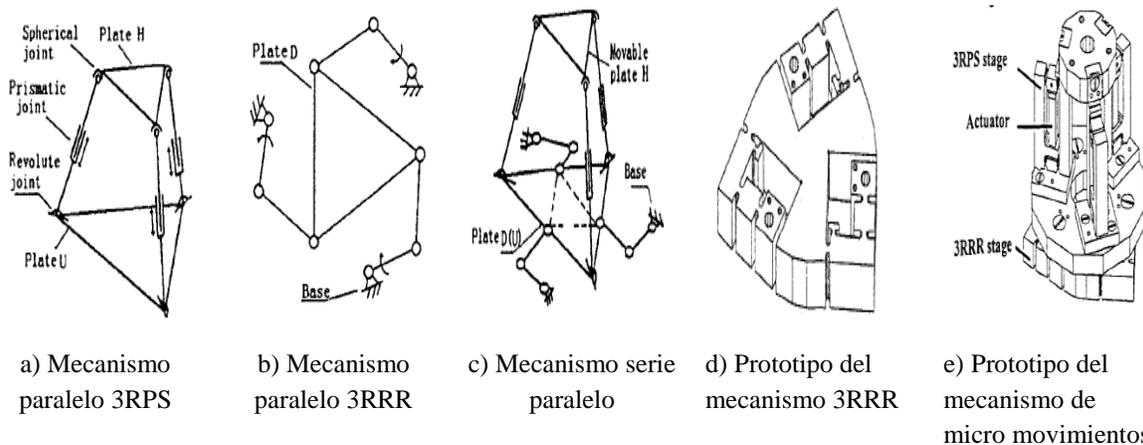


Figura 1.11 Robot manipulador serie paralelo de micro movimientos.

- Cinemática de un robot manipulador híbrido paralelo-serie (Tanev 2000)

Este trabajo se presenta el análisis cinemático de un nuevo tipo de robot manipulador híbrido (paralela serie). El cual consta de dos mecanismos conectados en serie y en paralelo. Cada mecanismo tiene 3GDL, de modo que el conjunto de grados de libertad del robot es de 6GDL Figura 1.12.

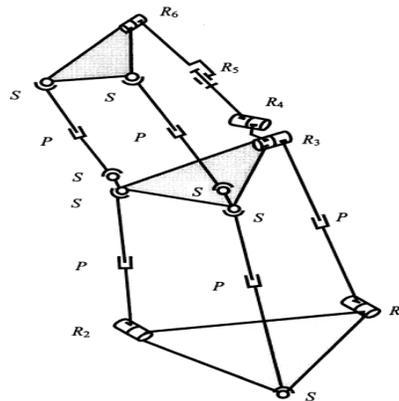


Figura 1.12 Robot manipulador híbrido

- Modelado dinámico inverso de un robot manipulador híbrido serie-paralelo (Ouarda and Wisama 2006). Ver figura 1.13

Este trabajo presenta una solución recursiva para el modelado dinámico inverso de robots híbridos conectados en serie de módulos en paralelo.

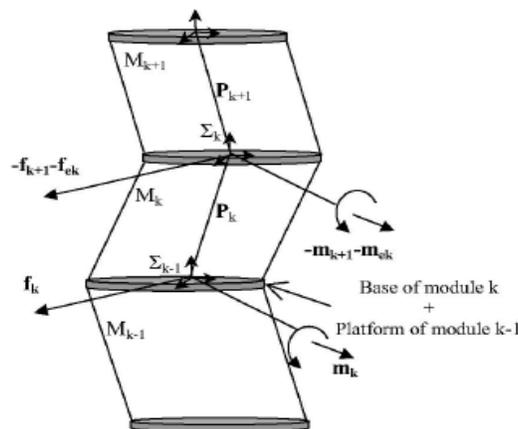


Figura 1.13 Robot manipulador híbrido

- Diseño y control de un mecanismo paralelo actuado para la aplicación de un bípedo (Sellaouti and Ouezdou 2005).

Teniendo tres grados de libertad se diseñan mecanismos de robots humanoides. En lugar de mecanismos seriales se utilizan mecanismos más sólidos como los mecanismos paralelos.

En este trabajo presenté el análisis cinemático de un robot paralelo bípedo denominado ROBIAN se desarrollaron pruebas experimentales para evaluar a la nueva estructura. Ver figura 1.14.

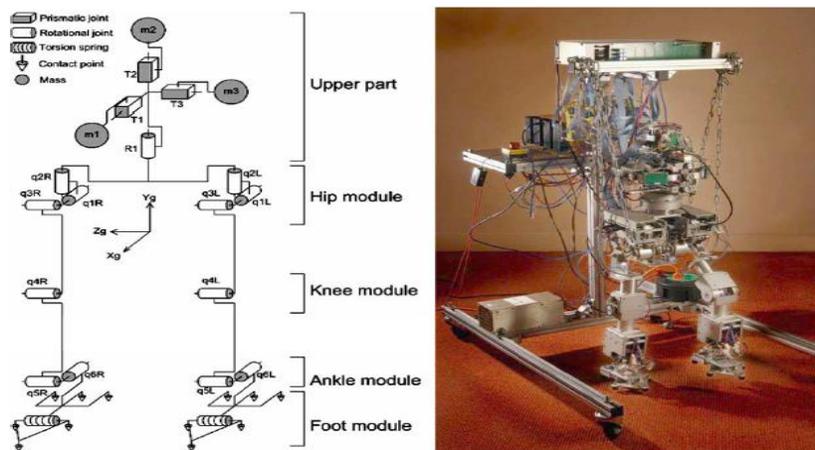


Figura 1.14 Esquema cinemático y fotografía del robot bípedo

- Desarrollo de un manipulador paralelo híbrido cartesiano para cirugía de rodilla (Ping-Lang and Chi-Chung 2006).

En las últimas dos décadas, la robótica médica ha tenido éxito en diversas aplicaciones como la cirugía lo que ha impulsado a un nueva era de la integración de gráficos por ordenador, robots y otras tecnologías mecatrónicas. En un sistema quirúrgico la precisión geométrica, el posicionamiento exacto el ejercer una fuerza predefinida, de un robot proporciona una gran ayuda a los cirujanos en la operación. Ha aumentando la precisión y la habilidad quirúrgica, y al mismo tiempo, reducir la fatiga del cirujano y los errores. La nueva asociación entre los cirujanos y médicos con los robots hacen una buena labor mejor que lo convencional. Ver figura 1.15

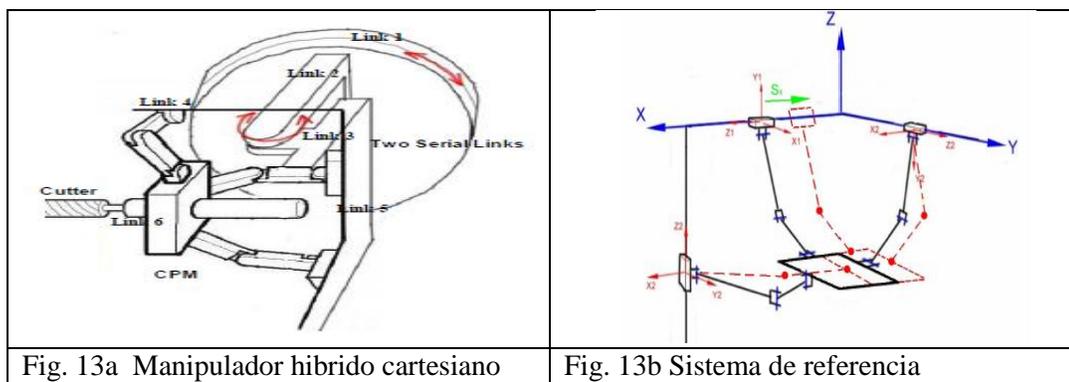


Figura 1.15 Robot manipulador paralelo cartesiano.

- Exploración de aguas profundas con un robo paralelo submarino teleoperado (Saltaren, Aracil et al. 2007).

En este artículo se presenta una nueva aplicación de los robots paralelos, como los vehículos subacuáticos. En este artículo se muestra la metodología aplicada en el proceso de diseño, su modelado y la construcción de un nuevo submarino robot paralelo.

El robot diseñado se basa en la conocida plataforma de Stewart-Gough, que lleva a un nuevo concepto de un robot submarino de geometría variable. La construcción de un vehículo sumergible paralelo presenta un nuevo desafío, la aplicación de robots paralelos bajo el medio ambiente requiere el estudio de los cambios en su cinemática para navegar. Ver figura 1.16

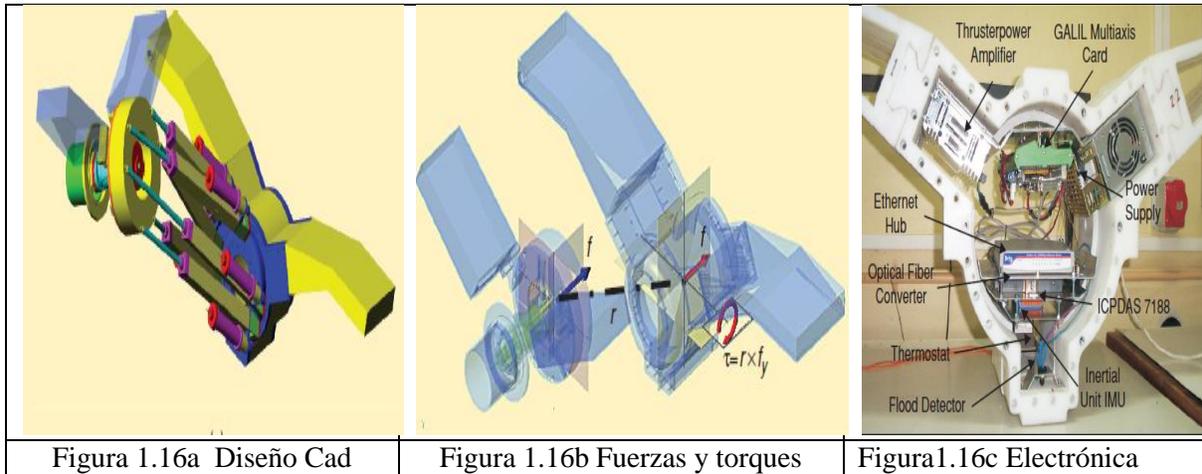


Figura 1.16a Diseño Cad

Figura 1.16b Fuerzas y torques

Figura 1.16c Electrónica

Figura 1.16 Robot paralelo submarino

- Micro nano Manipulador híbrido de mano de dos dedos (Ramadan, Inoue et al. 2007)

En este trabajo se presentó una arquitectura compacta y económica de dos dedos de mano basados en micronano-manipuladores híbridos. Estos consisten en dos mecanismos paralelos de 3GDL, uno sobre el otro conectados en serie. Cada uno de estos, está formado por cadenas cinemáticas cerradas dando lugar a mecanismos paralelos, como efector final tiene pipetas de vidrio, consta de seis actuadores piezoeléctricos, uno por cada cadena, la estructura que presenta en cada cadena es prismática revolución esférica RPS. Ver figura 1.17.

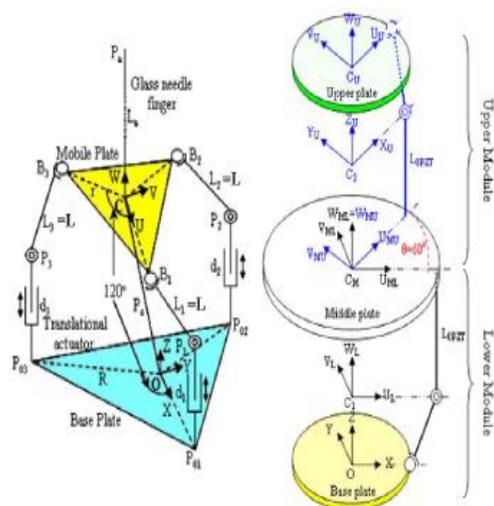


Figura 1.17a Estructura geométrica.

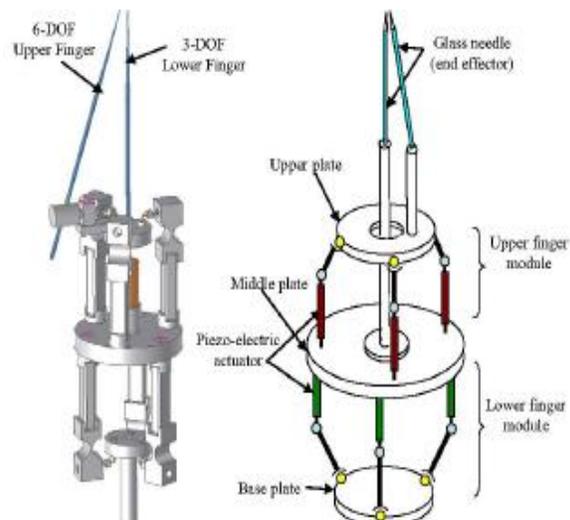


Figura 1.17b Mecanismos paralelos en serie.

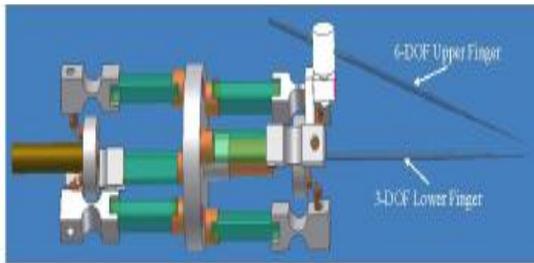


Figura 1.17c Modelo Cad del robot híbrido

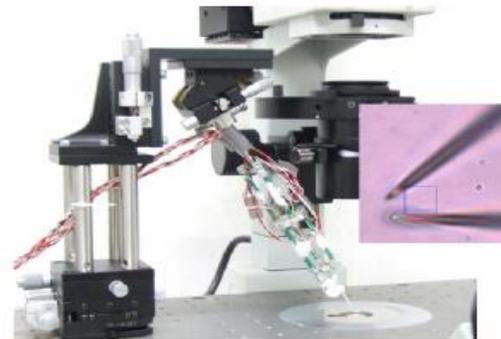


Figura 1.17d Implementación del mecanismo.

Figura 1.17 Robot paralelo híbrido de mano de dos dedos

- Análisis cinemático de un brazo mecánico híbrido de 3GDL (Li and Jin 2008)

Los brazos mecánicos paralelos tienen las ventajas como la reducción de inercia y una alta rigidez. Se espera que se puedan encontrar aplicaciones de los brazos mecánicos híbridos, debido a que tienen ventajas en común los brazos paralelos y los brazos mecánicos serie (Liu, Wang et al. 2002). Figura 1.18.

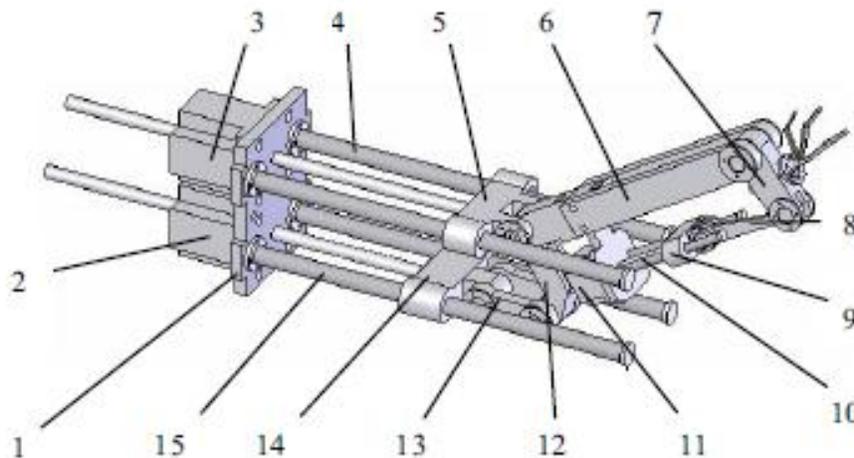


Figura 1.18 Un nuevo brazo mecánico híbrido de 3 GDL

Descripción del sistema: 1 base del sistema, 2, 3 y 11 actuadores lineales, 4 y 15 la parte superior de la pista de deslizamiento, 5 y 14 barra superior, 6 base de antebrazo, 7 muñeca barra de conexión, 8 muñeca obligando a la barra, 9 deslizante, 10 pista de deslizamiento, 12 codo de la barra de conexión, 13 codo obligando a la barra.

1.5 Robot delta ABB IRB 360

El robot delta que se encuentra en el mercado actualmente es el ABB IRB 360, el FlexPicker IRB360 es la segunda generación de robots para aplicaciones de pick and place, con una velocidad aumentada, mayor capacidad de carga y un menor tamaño.

El robot IRB360 es el sucesor del popular sistema FlexPicker™ IRB340. Es el resultado de una experiencia de 10 años, la investigación y desarrollo combinado con una experiencia probada en el campo del packaging.

El IRB 360 existe en versión para salas limpias y en versión inoxidable lavable, resistente a los ciclos de lavado de alta presión, de acuerdo a las exigencias de la manipulación directa de productos alimentarios.

El robot esta certificado IP 69K y diseñado para que pueda ser limpiado de acuerdo con métodos industriales. ABB tiene más de 1800 robots delta instalados por todo el mundo y es el líder en la tecnología de punta de picking y packing[inter].

La gama IRB 360 se compone de tres modelos:

- Versión “compacta”, muy rápido, con una radio de acción de 400 mm
- Versión “standard”, con las mismas características, pero con un radio de acción de 565 mm
- Versión “alta carga”, con el mismo radio de acción, pero con una capacidad de carga de hasta 3kg.

En la figura 1.19 se muestra un esquema del robot delta IRB 360 de la empresa ABB.

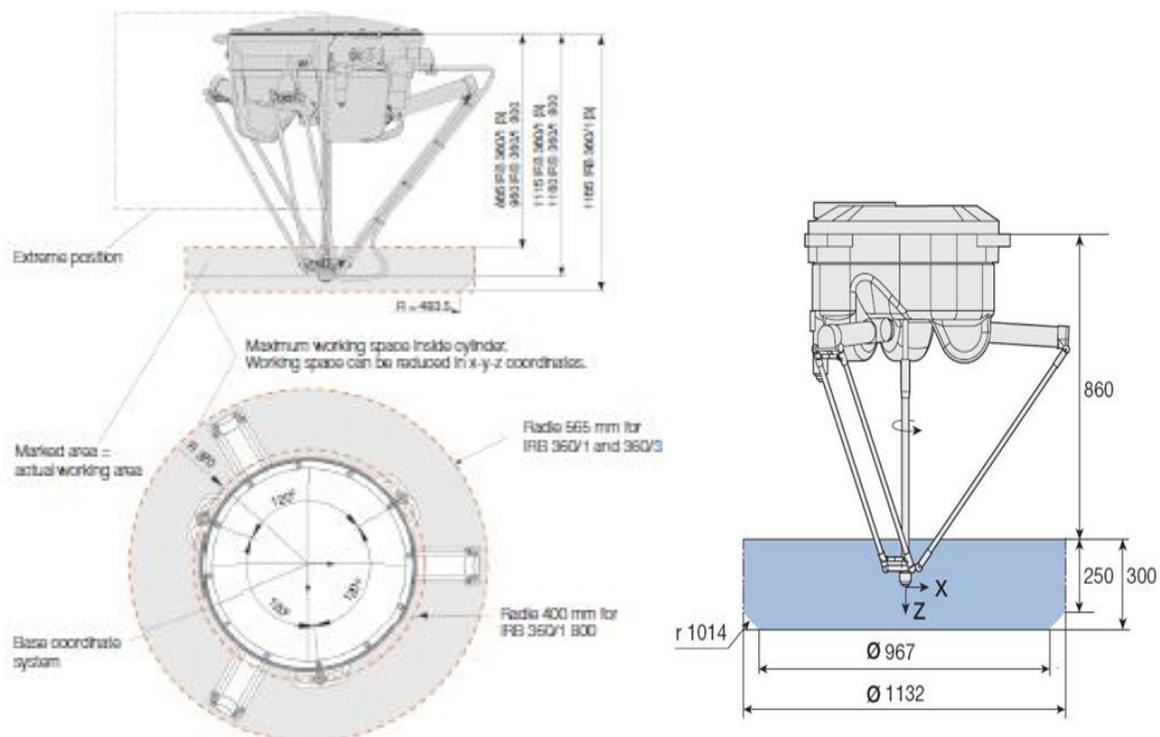


Figura 1.19 Espacio de trabajo del robot delta IRB 360

El IRB 360/800 de la versión compacta tiene las siguientes características:

Capacidad de carga	1Kg.
Peso brazo superior	350g
Peso brazo inferior	350g
Numero de ejes	3 o 4
Repetibilidad	0.1mm
Área de trabajo	
Diámetro	800mm
Altura	200mm
Velocidad máxima	10 m/s
Aceleración máxima aproximada	150 m/s ²
Tiempo de ciclo típicos	25/305/25 0.1Kg 0.30s 25/305/25 1.0Kg 0.36s 90/400/90 0.1Kg 0.44s 90/400/90 1.0Kg 0.51s
Consumo de energía máximo con carga de 1Kg	0.477 kW
Voltaje de alimentación	200-600 V, 50/60 Hz
Peso	120 Kg
Dimensiones	950X1050mm

Tabla 1.2 Características del robot delta IRB360

1.6 Definición del problema.

Se define como robot manipulador híbrido a la combinación de cadenas cinemáticas cerradas y cadenas cinemáticas abiertas, la cual consta de una secuencia de mecanismos paralelos conectados entre sí, se clasifican en cuatro tipos: paralelo-paralelo, serie- paralelo, paralelo-serie, serie-serie, según (Lee and Kim 1993).

El robot híbrido puede proporcionar características de robots manipuladores serie y paralelo. El robot manipulador híbrido que se estudia en este trabajo está compuesto por un robot manipulador delta plano y un robot manipulador delta en el espacio, conectados en serie, cuya configuración no ha sido estudiada aún. Los manipuladores híbridos poseen las ventajas de robots en serie y paralelo, con la rigidez de trabajo que tienen los robots paralelos. Actualmente, ha habido un creciente interés en los robots manipuladores, aunque en los robots manipuladores híbridos hay poca literatura.

1.7 Objetivo.

Este trabajo tiene como objetivo realizar el análisis cinemático y la construcción de un prototipo piloto funcional de un robot manipulador paralelo delta híbrido, con el fin de estudiar las trayectorias y el comportamiento que esta nueva configuración puede tener.

1.8 Hipótesis

El estudio de las propiedades cinemáticas de un robot manipulador delta plano en serie con un robot manipulador delta en el espacio, proporcionarán nuevas técnicas y conocimientos en el área de los robots manipuladores.

1.9 Alcances

Probar las técnicas y conocimientos generados sobre un prototipo piloto de un robot manipulador delta híbrido.

1.10 Justificación

Los robots paralelos se han venido empleando para distintas tareas como en simuladores de vuelo, máquinas caminadoras, dispositivos de máquinas herramientas, micro manipulación a alta frecuencia (telescopios) y recientemente para tareas de ensamble. Una de las desventajas que presentan los robots manipuladores paralelos es un espacio de trabajo reducido.

Al unir dos robots paralelos en serie se obtiene un espacio de trabajo más amplio y por consiguiente se tienen características de robots tipo serie y paralelo. Para este trabajo de investigación se propone unir un robot manipulador paralelo delta plano con un robot manipulador paralelo en el espacio, teniendo al final un robot manipulador paralelo delta híbrido unido en configuración serie, dicha configuración no ha sido estudiada aún.

Los robots manipuladores paralelos tipo delta son utilizados comúnmente en los procesos industriales de pick and place. El robot manipulador paralelo delta híbrido tiene la ventaja que podrá tener un espacio de trabajo más amplio, en este trabajo se realiza el análisis cinemático de este manipulador y la construcción de un prototipo funcional para ver sus propiedades y el comportamiento.

1.11 Metodología

1. Análisis cinemático
 - a) Análisis de posición
 - b) Análisis de velocidad

2. Tipos de movimientos.
 - a) Movimientos uno a uno
 - b) Desplazamiento del robot plano y después el robot espacial
 - c) Desplazamiento del robot espacial y después el robot delta plano
 - d) Movimientos simultáneos

3. Diseño conceptual

- a) Diseño mecánico
 - b) Diseño eléctrico
 - c) Programación y control
4. Diseño a detalle y construcción
 5. Simulación y pruebas
 6. Resultados

1.12 Dimensiones

Se construye el prototipo piloto del robot manipulador paralelo delta híbrido, con escala de 1 es a 3, tomando como medidas de referencia el robot delta IRB 360/800 versión compacta de la empresa ABB.

Componentes	Dimensiones
Eslabón 1	15 cm
Eslabón 2	13 cm
Eslabón 3	11 cm
Eslabón 4	22 cm
Base móvil delta plano	Diámetro 13cm
Base móvil delta espacio	Diámetro 4 cm
Base fija	40X40 cm

Tabla 1.3 Dimensiones del prototipo piloto

Como primera etapa se construyeron modelos en madera de manipuladores paralelos híbridos.

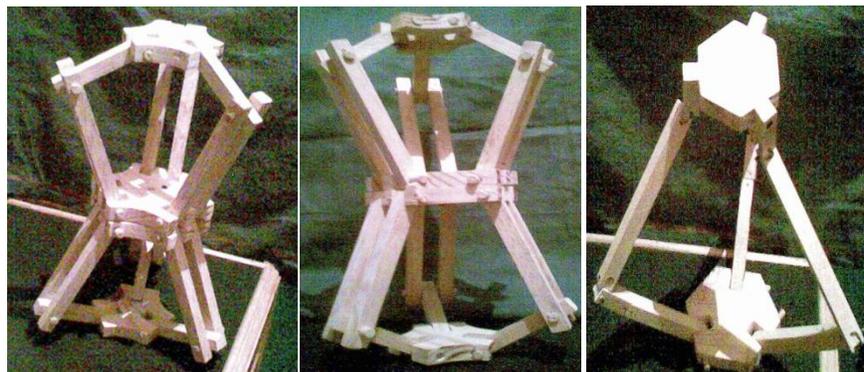


Figura 1.20 Fotografías de modelos de madera de robots híbridos

Capítulo 2.

Análisis Cinemático

2.1 Introducción

Dado que el concepto de robots manipuladores híbridos es muy reciente, muchos problemas teóricos hay por resolver. Este capítulo se presenta el análisis cinemático de un nuevo tipo de robot manipulador híbrido paralelo-serie.

Los manipuladores pueden ser conectados en serie diseñados por mecanismos paralelos o de geometría variable. Cada mecanismo tiene tres grados de libertad, de modo que los grados de libertad son seis del robot manipulador paralelo delta híbrido. En este capítulo también se presenta el Jacobiano de cada manipulador paralelo.

2.2 Arquitectura

En la figura 2.1a se muestra el robot manipulador delta plano, el cual forma la base del sistema del robot manipulador paralelo delta híbrido. En la figura 2.1b se muestra al robot delta en el espacio, y en la figura 2.1c se muestra el robot manipulador delta híbrido a estudiar.

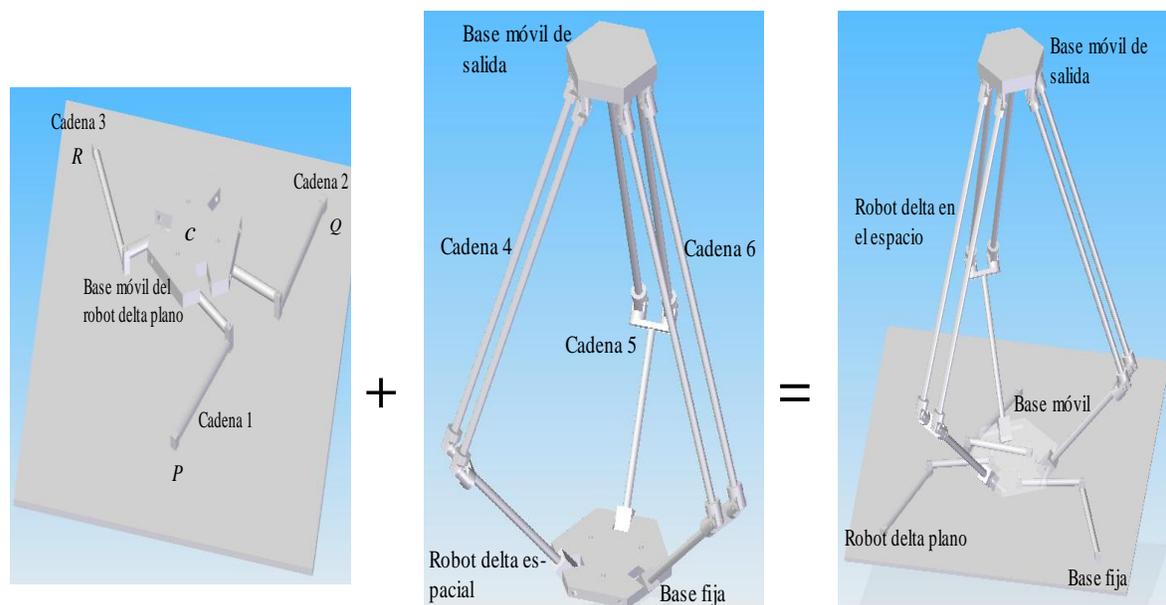


Figura 2.1a Robot delta plano

Figura 2.1b Robot delta espacial

Figura 2.1c Robot delta híbrido

Figura 2.1 Esquema del robot manipulador paralelo delta híbrido

El robot manipulador paralelo delta plano de 3GDL, está compuesto por tres cadenas cinemáticas idénticas distribuidas en un arreglo triangular dispuestas a 0° , 120° , 240° , respectivamente. Las cadenas cinemáticas que están formadas por los pivotes P, Q y R, definen la geometría de la base fija de todo el sistema, y los pivotes B1, B2 y B3 definen la geometría de la plataforma móvil del robot delta plano, ver figura 2.2.

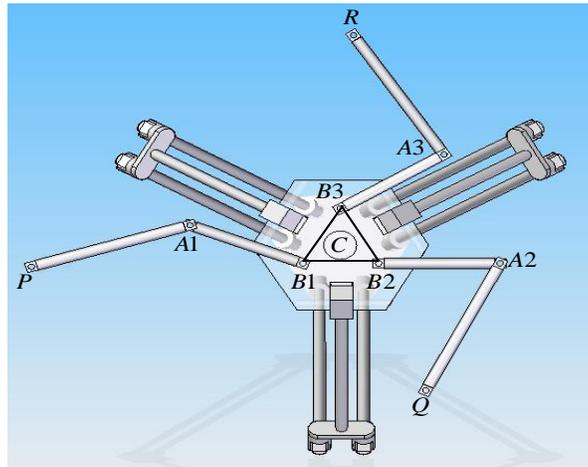


Figura 2.2 Manipulador plano del robot híbrido.

Las tres cadenas que conectan los puntos P, Q y R con los puntos B1, B2 y B3 están unidos por juntas de rotación. Cada cadena consiste en un eslabón rígido de entrada conectado a un segundo eslabón de salida por medio de juntas rotacionales.

El robot manipulador paralelo delta en el espacio de 3GDL, se encuentra sobre la base móvil del robot delta plano, es decir ambos manipuladores comparten la misma base, ver figura 2.1c. Las cadenas cinemáticas que están formadas por los pivotes D1, D2, D3, ver figura 2.3, definen la base del robot delta en el espacio, la cual es la base móvil del robot delta plano, los pivotes F1, F2, F3, definen la base móvil de salida del robot delta híbrido.

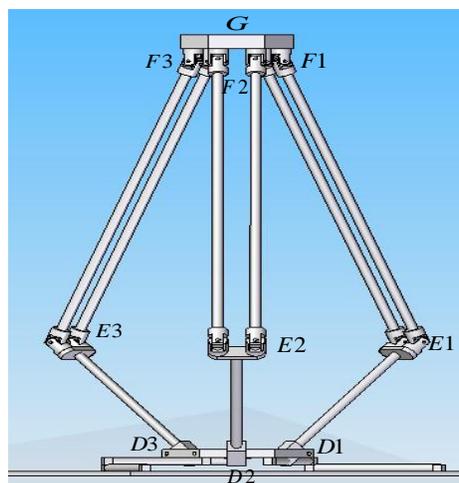


Figura 2.3 Robot Manipulador delta en el espacio

Las cadenas que conectan los puntos D1, D2, D3 con los puntos F1, F2, F3, se componen de un eslabón rígido de entrada, conectado por una junta universal a un segundo eslabón, el cual está conectado por medio de otra junta universal a la plataforma móvil de salida. Las cadenas cinemáticas del robot manipulador delta en el espacio están dispuestas a 60° respecto a las cadenas del robot delta plano. Por lo que las cadenas del robot delta en el espacio también están distribuidas a 0° , 120° y 240° , respectivamente entre ellas. Al sistema se le conoce como configuración delta en los robots manipuladores paralelos por contar con tres cadenas cinemáticas simétricas.

2.3 Análisis cinemático del robot manipulador delta híbrido.

El manipulador delta híbrido se compone de tres ecuaciones de lazo, una ecuación para cada cadena cinemática.

2.3.1 Análisis de la posición

Dada la geometría de las cadenas, al ser similares entre sí permite realizar el análisis para una cadena cinemática y extrapolarla para las demás cadenas. En la figura 2.4 se muestran los vectores que definen al manipulador delta híbrido.

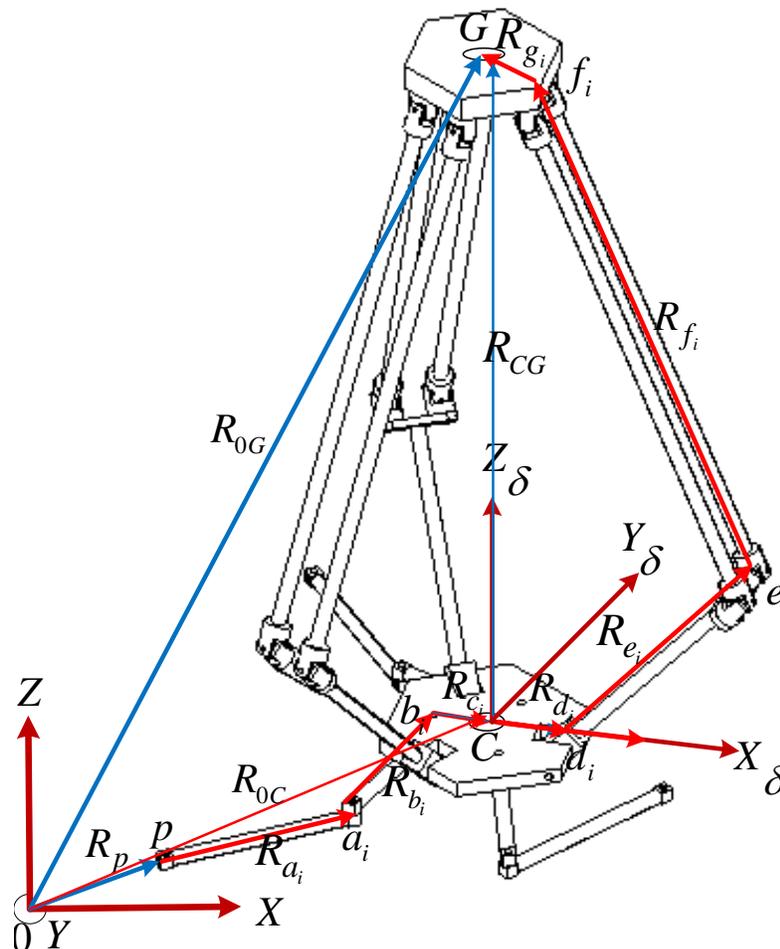


Figura 2.4 Vectores del Robot Manipulador Paralelo Delta Híbrido.

De la figura 2.4, la ecuación de lazo vectorial puede escribirse como:

$$R_{0G} = R_p + R_{ai} + R_{bi} + R_{ci} + R_{di} + R_{ei} + R_{fi} + R_{gi} \quad (2.1)$$

El subíndice i , puede ser $i=1, 2, 3$, dependiendo de la cadena de la que se esté estudiando. Para este trabajo se resuelve la cinemática inversa, dado que se conoce la posición de localización del vector del efector final (x, y, z, ϕ) , se determina la orientación de las articulaciones de los ángulos de los eslabones. A este proceso se le denomina cinemática inversa. El robot manipulador paralelo delta híbrido realiza movimientos de rotación en los ejes “X”, “Y” “Z” por lo que se tendrán que considerar las matrices de rotación correspondientes a dichos planos.

La matriz de transformación homogénea es una matriz 4×4 que transforma un vector de posición expresado en coordenadas homogéneas desde un sistema de coordenadas hasta otro sistema de coordenadas. En la ecuación (2.2) se presenta una matriz de transformación homogénea, se puede considerar que consiste de cuatro submatrices:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ - & - \\ f_{1 \times 3} & 1 \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{matriz de} & \text{vector de} \\ \text{rotacion} & \text{posicion} \\ - & - \\ \text{transformacion} & \\ \text{de perspectiva} & \text{escalado} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

La submatriz de 3×3 superior izquierda representa la matriz de rotación; la submatriz superior derecha 3×1 representa el vector de posición del origen del sistema de coordenada rotado con respecto al sistema de referencia; la submatriz inferior izquierda 1×3 representa la transformación de perspectiva, la submatriz inferior derecha de 1×1 representa el escalado. Las matrices de rotación básicas en los ejes “X”, “Y”, “Z” respectivamente son:

$$Q_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_x & -S\theta_x & 0 \\ 0 & S\theta_x & C\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$Q_y = \begin{pmatrix} C\theta_y & 0 & S\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S\theta_y & 0 & C\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$Q_z = \begin{pmatrix} C\theta_z & -S\theta_z & 0 & 0 \\ S\theta_z & C\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

- ii. Se asignan bases locales en cada cuerpo para movimiento. Es decir si un cuerpo gira le corresponde un ángulo θ_i .

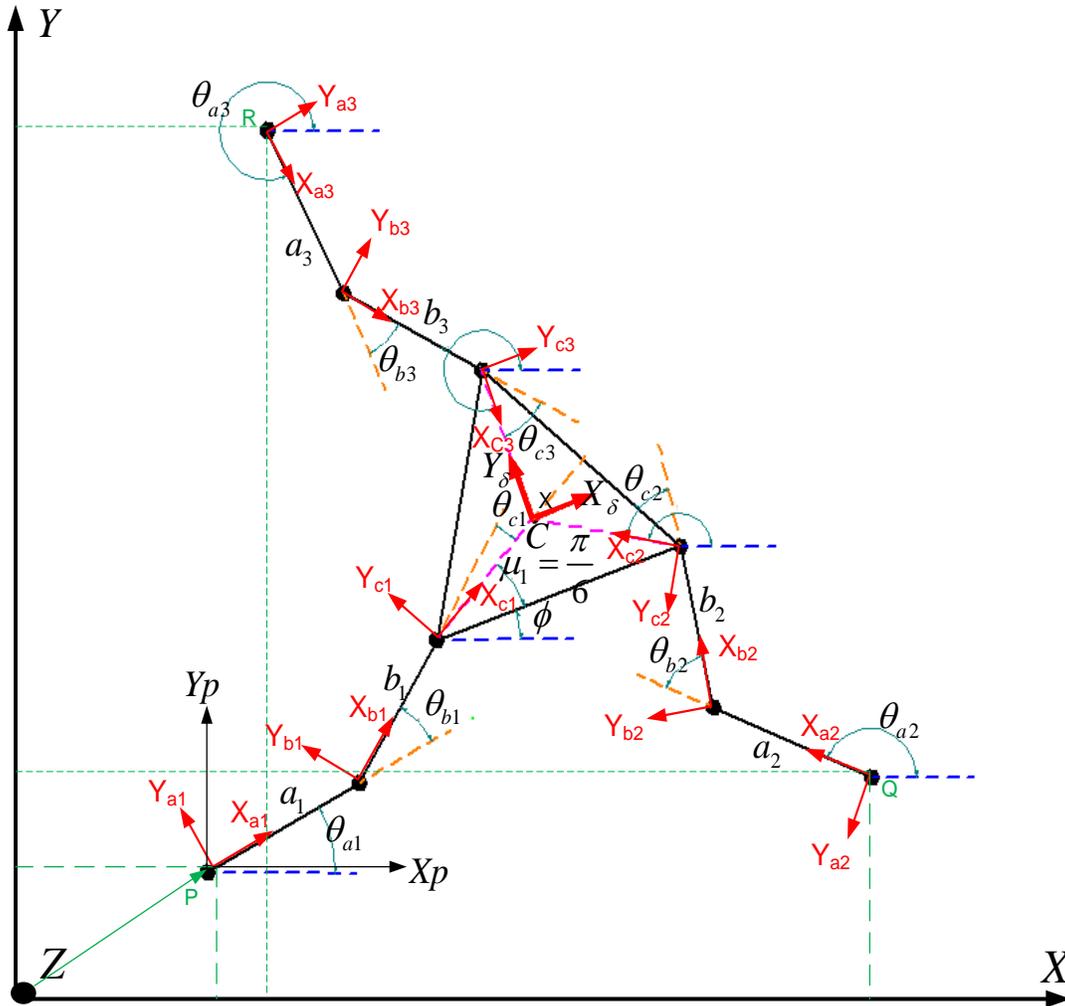


Figura 2.6 Asignación de bases locales robot paralelo delta plano.

- iii. Se cuentan todas las variables o incógnitas a determinar.

Las variables o incógnitas a determinar son 11: $(\theta_{a1}, \theta_{b1}, \theta_{c1}, \theta_{a2}, \theta_{b2}, \theta_{c2}, \theta_{a3}, \theta_{b3}, \theta_{c3}, X_C, Y_C)$

- iv. Grados de libertad.

Los grados de libertad de un mecanismo pueden ser determinados por la fórmula de Chebyshev-Grübler-Kutzbach. (Flores 2006; Ramadan, Inoue et al. 2007)

$$GDL = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i \quad (2.9)$$

El número de parámetros independientes o entradas necesarias para especificar la configuración de un mecanismo se le denominan grados de libertad.

Donde:

GDL : Grados de libertad del mecanismo

$\lambda p = 3$: Para mecanismos planos

$\lambda e = 6$: Para mecanismos en el espacio

n : Número de eslabones.

j : Número total de juntas.

f_i : Número de grados de libertad de la junta i .

De la figura 2.5 se observa que el robot manipulador delta plano está formado por $n=8$ eslabones, incluyendo la tierra del sistema, $j=9$ juntas, y $f_i=9$ grados de libertad. Sustituyendo estos datos en la ecuación(2.9), el robot manipulador delta plano tiene tres grados de libertad.

$$GDL = 3(8 - 9 - 1) + 9 = 3$$

Por lo tanto el número de grados de libertad del robot delta plano es $GDL=3$. De la figura 2.6 se observa que hay 11 variables que engloban al robot paralelo plano en su totalidad. Como variables independientes se encuentran: $\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$, las cuales son accionadas por los actuadores en este caso motores. Como variables dependientes se tienen: $\theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}, \theta_{c1}, \theta_{c2}, \theta_{c3}, X_C, Y_C$.

De la figura 2.7 se observa que $\theta_{a_i} + \theta_{b_i} - \theta_{c_i} = \phi + \mu_i$ donde $i = 1, 2, 3$ y μ_i es conocida.

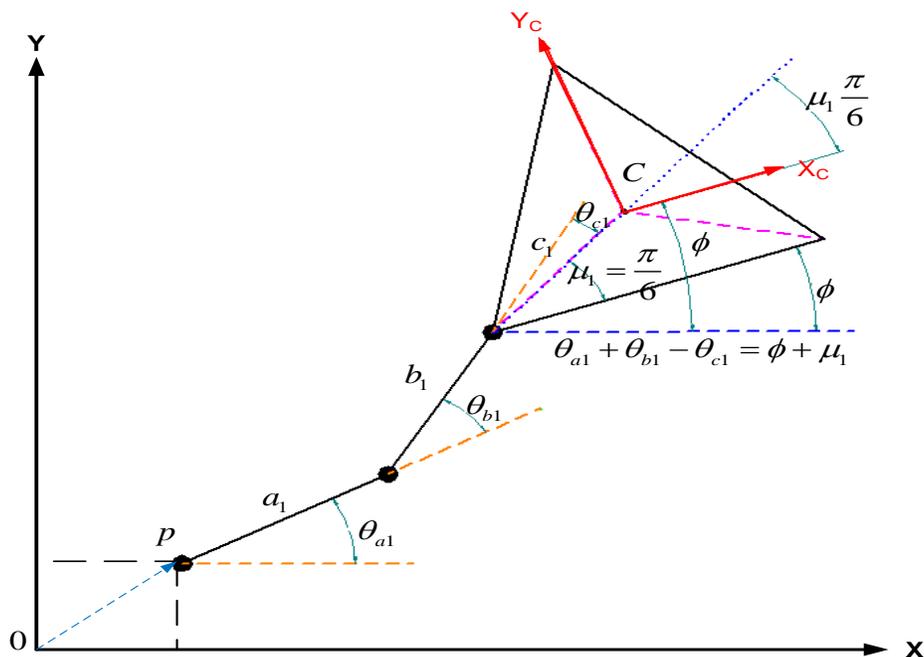


Fig. 2.7 Cadena 1 del robot 3RRR

Utilizando la restricción cinemática:

$$\theta_{ai} + \theta_{bi} - \theta_{ci} = \phi + \mu_i \quad (2.10)$$

El sistema de 11 variables pasa a ser de 9, $(\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}, \theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}, X_G, Y_G, \phi)$.

Como consiguiente se tiene el siguiente sistema.

Solución 1. Para la cinemática directa $\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$ se conocen y se calcula X_G, Y_G, ϕ

Datos	Ecuaciones	Incógnitas
$\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$	6 ecuaciones	$\theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}, X_G, Y_G, \phi$

Tabla 2.1 Variables para la cinemática directa

Solución 2. Para la cinemática inversa se conocen X_G, Y_G, ϕ y se calculan $\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$

Datos	Ecuaciones	Incógnitas
X_G, Y_G, ϕ	6 ecuaciones	$\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}, \theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}$

Tabla 2.2 Variables para la cinemática inversa

2.3.1.1.1 Cinemática Inversa del Robot Paralelo Delta Plano

El manipulador delta plano se divide en tres cadenas cinemáticas, en la figura 2.8 se muestran los vectores del robot delta plano.

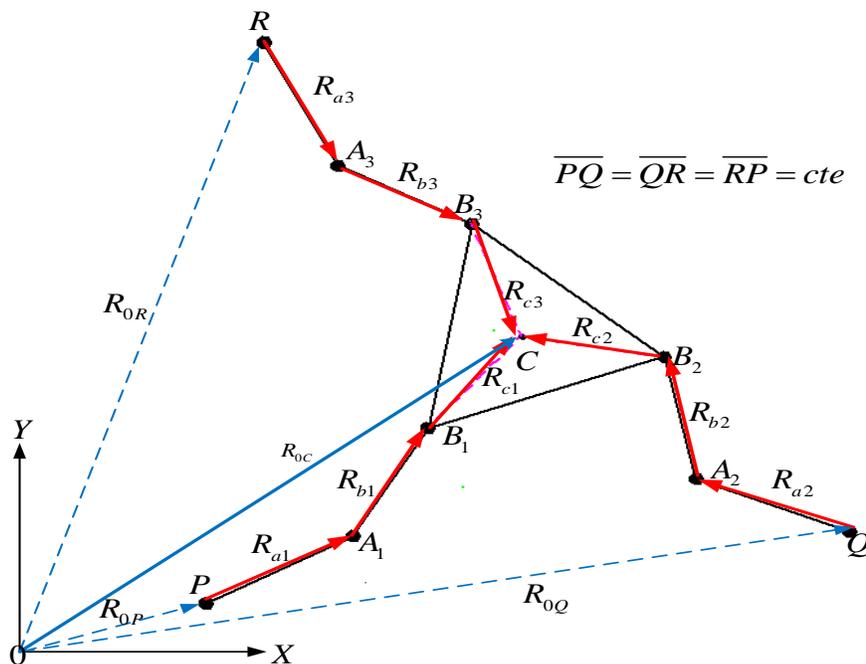


Figura 2.8 Manipulador delta plano con tres articulaciones de rotación.

De la geometría del robot delta plano de la figura 2.8, la ecuación de lazo se puede escribir como:

$$R_{0C} = R_{0P} + R_{PA_i} + R_{A_iB_i} + R_{B_iC} \quad (2.11)$$

De la ecuación de lazo se parte para tener la ecuación escalar de la cadena 1 del robot delta plano, la cual queda de la siguiente forma. Como las cadenas son simétricas se realiza el análisis de una cadena, siendo el mismo procedimiento para las dos restantes. En la figura 2.6 se tiene el marco de referencia inicial, para cada cadena, a partir de una base inercial X, Y, Z aplicando matrices de transformación homogéneas se llega a la base local X_{ai}, Y_{ai}, Z_{ai}

$$R_{0P} = Tx(X_p)Ty(Y_p) \quad (2.12)$$

Las transformaciones correspondientes para alcanzar al sistema de referencia local $X_\delta, Y_\delta, Z_\delta$ son:

$$R_{PA_i} = Q_Z(\theta_{ai})Tx(a_i) \quad (2.13)$$

$$R_{PA_i} = Q_Z(\theta_{ai})Tx(a_i) \quad (2.14)$$

$$R_{A_iB_i} = Q_Z(\theta_{ai})Q_Z(\theta_{bi})Tx(b_i) \quad (2.15)$$

$$R_{B_iC} = Q_Z(\theta_{ai})Q_Z(\theta_{bi})Q_Z(\theta_{ci})Tx(c_i) \quad (2.16)$$

2.3.1.1.2 Solución del ángulo θ_{ai}

Sustituyendo las transformaciones que se tienen de las ecuaciones (2.12),(2.13),(2.14),(2.15),(2.16) en la ecuación vectorial (2.11)se tiene:

$$X_C = X_p + a_i C\theta_{ai} + b_i C(\theta_{ai} + \theta_{bi}) + c_i C(\theta_{ai} + \theta_{bi} - \theta_{ci}) \quad (2.17)$$

$$Y_C = Y_p + a_i S\theta_{ai} + b_i S(\theta_{ai} + \theta_{bi}) + c_i S(\theta_{ai} + \theta_{bi} + \theta_{ci}) \quad (2.18)$$

Realizando el cambio de variable de la ecuación (2.10) en las ecuaciones (2.17) y (2.18)se tiene:

$$X_C = X_p + a_i C\theta_{ai} + b_i C(\theta_{ai} + \theta_{bi}) + c_i C(\phi + \mu_i) \quad (2.19)$$

$$Y_C = Y_p + a_i S\theta_{ai} + b_i S(\theta_{ai} + \theta_{bi}) + c_i S(\phi + \mu_i) \quad (2.20)$$

Al utilizar la ecuación de lazo

$$R_{0C} - R_{0P} - R_{PA_i} - R_{A_iB_i} = R_{B_iC} \quad (2.21)$$

Se tiene:

$$X_C - X_p - a_i C\theta_{ai} - c_i C(\mu_i + \phi) = b_i C(\theta_{ai} + \theta_{bi}) \quad (2.22)$$

$$Y_C - Y_p - a_i S\theta_{ai} - c_i S(\mu_i + \phi) = b_i S(\theta_{ai} + \theta_{bi}) \quad (2.23)$$

Para obtener el valor del ángulo θ_{ai} , las ecuaciones (2.22) y (2.23) se elevan al cuadrado, se suman y se iguala a cero, teniendo como resultado una ecuación escalar de segundo grado.

$$(b_i^2 - (-X_c + X_p + a_i C\theta_{ai} + c_i C(\mu_i + \phi)))^2 - (-Y_c + Y_p + a_i S\theta_{ai} + c_i S(\mu_i + \phi))^2 = 0 \quad (2.24)$$

Se sustituyen las identidades trigonométricas 1 y 2, en la ecuación (2.24).

$$S\theta_{ai} = \frac{2t_i}{1+t_i^2} \dots\dots\dots \text{identidad } _1$$

$$C\theta_{ai} = \frac{1-t_i^2}{1+t_i^2} \dots\dots\dots \text{Identidad } _2$$

$$t_i = \text{Tan}\left(\frac{\theta_{ai}}{2}\right), \dots\dots\dots \text{identidad } _3$$

Se obtiene una ecuación de segundo grado en función del parámetro t_i (Tsai 1999).

$$b_i^2 - \left(\frac{a_i - a_i t_i^2}{1+t_i^2} - X_c + X_p + c_i C(\mu_i + \phi)\right)^2 - \left(\frac{2a_i t_i}{1+t_i^2} - Y_c + Y_p + c_i S(\mu_i + \phi)\right)^2 \quad (2.25)$$

Se resuelve la ecuación 2.26 y se obtienen los posibles valores para t_i , una vez que se tienen los valores del parámetro t_i , se sustituye en la identidad trigonométrica 3 y se despeja a θ_{ai} , por ser una ecuación de segundo grado se tienen dos posibles soluciones que satisfacen a la ecuación, teniendo así dos posibles ángulos para la cadena 1.

$$\theta_{ai} = 2t \text{an}^{-1}[\pm t_i] \quad (2.26)$$

2.3.1.1.3 Solución del ángulo θ_{bi}

Para encontrar el valor del ángulo θ_{b1} , se sustituye el valor de θ_{a1} en la ecuación (2.19) o (2.20) . Y se despeja a θ_{b1} .

$$\theta_{bi} = \text{Cos}^{-1}\left[\frac{X_c - X_p - a_i C\theta_{ai} - c_i C(\mu_i + \phi)}{b_i}\right] - \theta_{ai} \quad (2.27)$$

Para encontrar la solución de los ángulos $\theta_{a2}, \theta_{a3}, \theta_{b2}, \theta_{b3}$ Se realizan las mismas operaciones para las cadenas 2 y 3. En total hay ocho posibles soluciones para el manipulador paralelo delta plano.

2.3.1.2 Robot delta en el espacio.

Se analiza al robot manipulador paralelo delta en el espacio de manera similar al robot delta plano.

- i. Como primer paso se numeran arbitrariamente los cuerpos en movimiento en el mecanismo y las juntas.

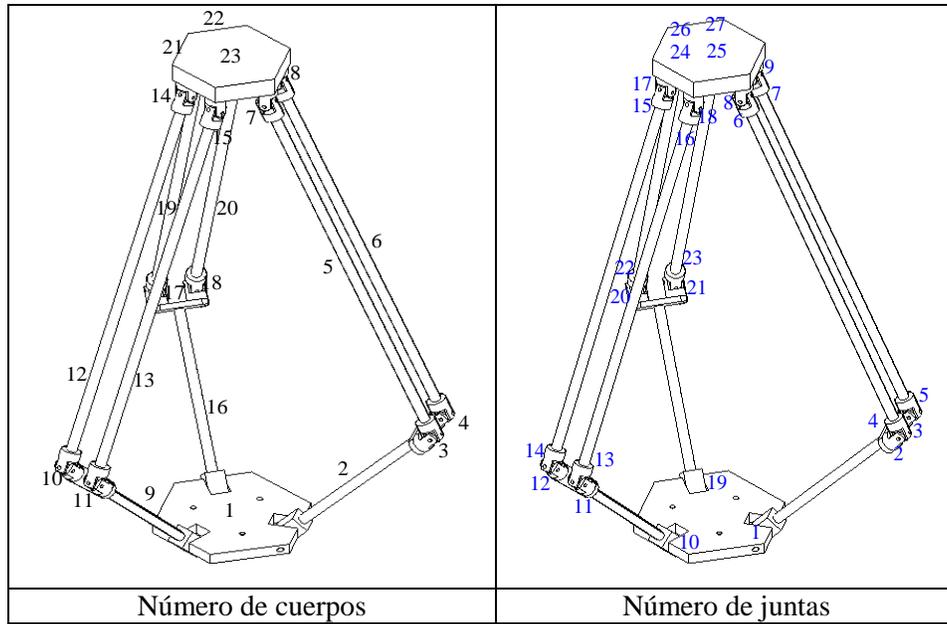


Figura 2.9 Manipulador plano de tres grados de libertad.

- ii. Se asignan bases locales en cada cuerpo para movimiento. Es decir si un cuerpo gira le corresponde un ángulo θ .

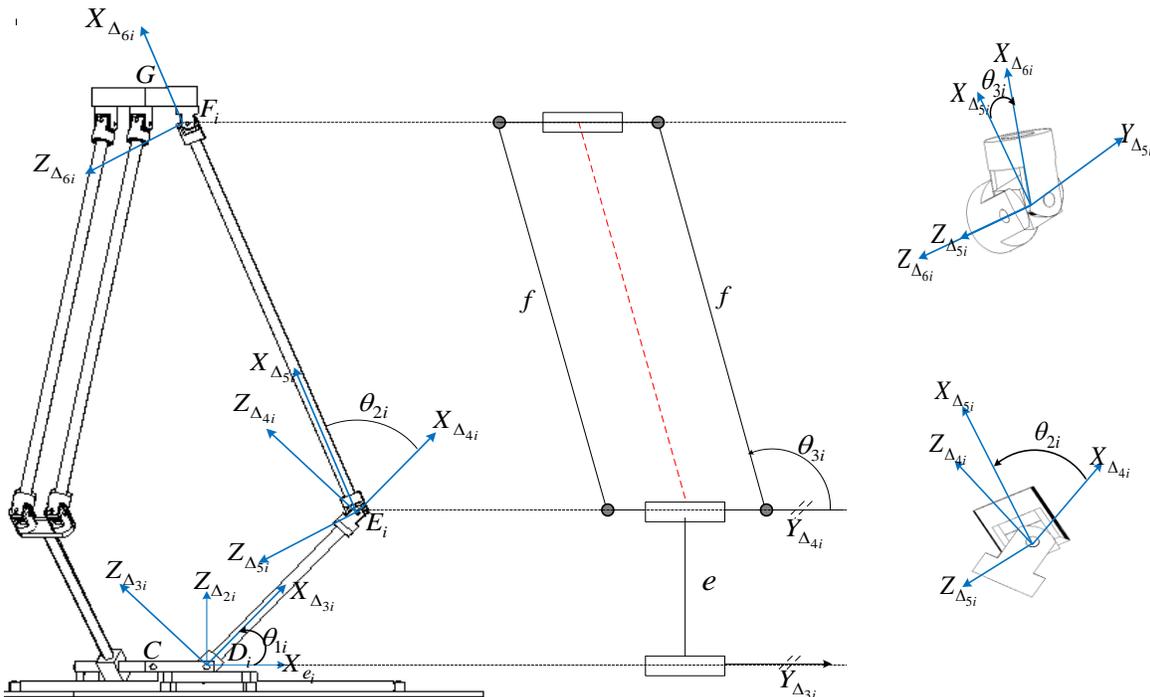


Figura 2.10 Asignación de bases locales robot paralelo en el espacio.

iii. Se cuentan todas las variables o incógnitas a determinar.

Las variables o incógnitas a determinar son 12: $(\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, X_G, Y_G, Z_G)$

iv. Grados de libertad.

Los grados de libertad de un mecanismo pueden ser determinados por la fórmula (2.9) de Chebyshev-Grübler-Kutzbach.(Flores 2006; Ramadan, Inoue et al. 2007).

De la figura 2.9 se observa que el robot manipulador delta en el espacio está formado por $n=23$ eslabones, $j=27$ juntas, y $fi=27$ grados de libertad. Sustituyendo estos datos en la ecuación (2.9), el robot manipulador delta plano tiene menos tres grados de libertad.

$$GDL = 6(23 - 27 - 1) + 27 = -3$$

Por lo tanto el número de grados de libertad del robot delta en el espacio es $GDL = -3$. De la ecuación de Chebyshev-Grübler Kutzbach, esta fórmula no es aplicable en este caso porque no se considera la geometría de la cadena, sólo su topología. (Angeles 1988)

De la figura 2.10 se observa que hay 12 variables que engloban al robot paralelo plano en su totalidad. Como variables independientes se encuentran: $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$, las cuales son accionadas por los actuadores en este caso motores. Como variables dependientes se tienen: $\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, X_G, Y_G, Z_G$. Para el análisis cinemático directo e inverso se considera lo siguiente:

Cinemática directa se conocen $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$ y se calcula X_G, Y_G, Z_G .

Datos	Ecuaciones	Incógnitas
$\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$.	9ecuaciones	$\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, X_G, Y_G, Z_G$

Cinemática inversa se conocen X_G, Y_G, Z_G . y se calculan $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$. Para la solución de la cinemática inversa de este manipulador se toma en cuenta la orientación del ángulo $\phi + \mu_i$.

Datos	Ecuaciones	Incógnitas
X_G, Y_G, Z_G	9 ecuaciones	$\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}$

La plataforma móvil del robot delta paralelo híbrido, no se puede orientar en los ejes X, Y, solo tendrá una rotación en el eje Z, por lo que la plataforma de salida del robot delta en el espacio siempre será perpendicular a la plataforma del robot manipulador delta plano. El vector que va de $\overline{CD_i}$, dependiendo del valor de $i=1, 2, 3$, cada cadena tendrá un ángulo asociado ϕ al cual hay que sumarle el ángulo de orientación μ_i del robot manipulador paralelo delta plano.

Del vector que va de $\overline{D_i E_i}$ se encuentra el ángulo θ_{1i} , este ángulo al ser actuado mueve a toda la cadena cinemática. Del vector que va de $\overline{E_i F_i}$ se tienen los ángulos θ_{2i}, θ_{3i} , que estarán en función del ángulo θ_{1i} , ver figura 2.10.

2.3.1.2.1 Cinemática Inversa del Robot Paralelo Delta Híbrido.

Para resolver la cinemática inversa del robot delta en el espacio hay que tomar en cuenta, que la posición del efector final depende de la posición del robot delta plano más la posición del robot delta en el espacio.

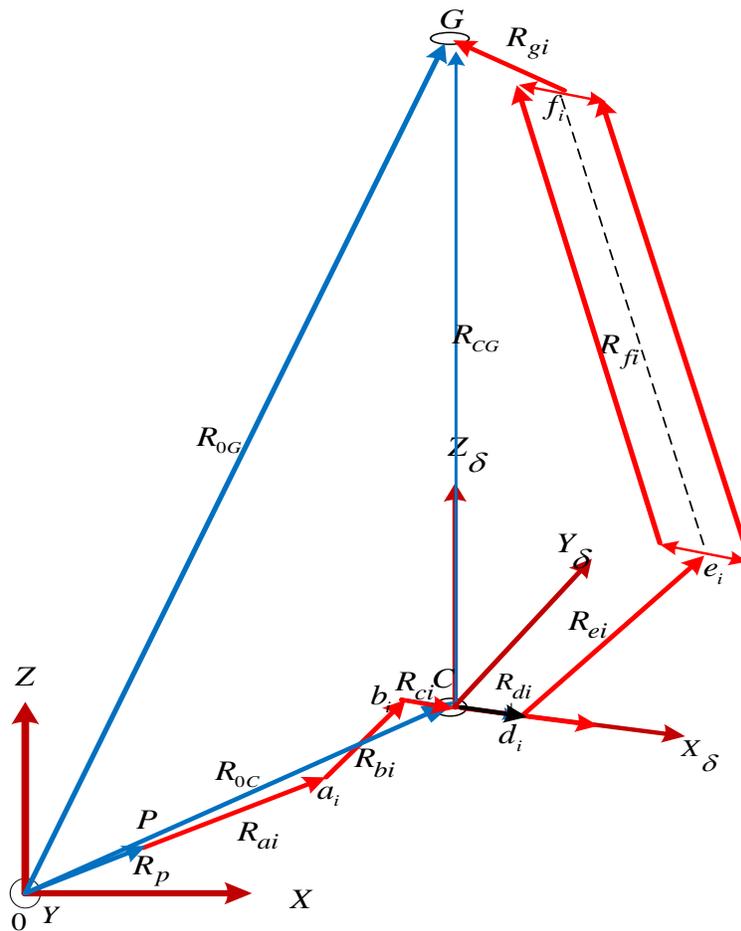


Figura 2.11 Vectores del robot paralelo delta híbrido.

De la geometría del robot paralelo delta híbrido figura 2.11, la ecuación de lazo para el robot delta en el espacio se puede escribir como:

$$R_{0G} = R_{0C} + R_{CG} \quad (2.28)$$

$$R_{0G} - R_{0C} = R_{di} + R_{ei} + R_{fi} + R_{gi} \quad (2.29)$$

$$R_{0G} - R_{0C} + R_{di} - R_{gi} = R_{ei} + R_{fi} \quad (2.30)$$

Se realiza el análisis de sólo una cadena cinemática, debido a que son simétricas las tres cadenas que componen al mecanismo, solo se varía al subíndice i .

En la figura 2.12 se tiene el marco de referencia inicial, para cada cadena, se parte de la base inercial (X, Y, Z) y aplicando la matriz de transformación homogénea se llega a la base local ($X_\delta, Y_\delta, Z_\delta$).

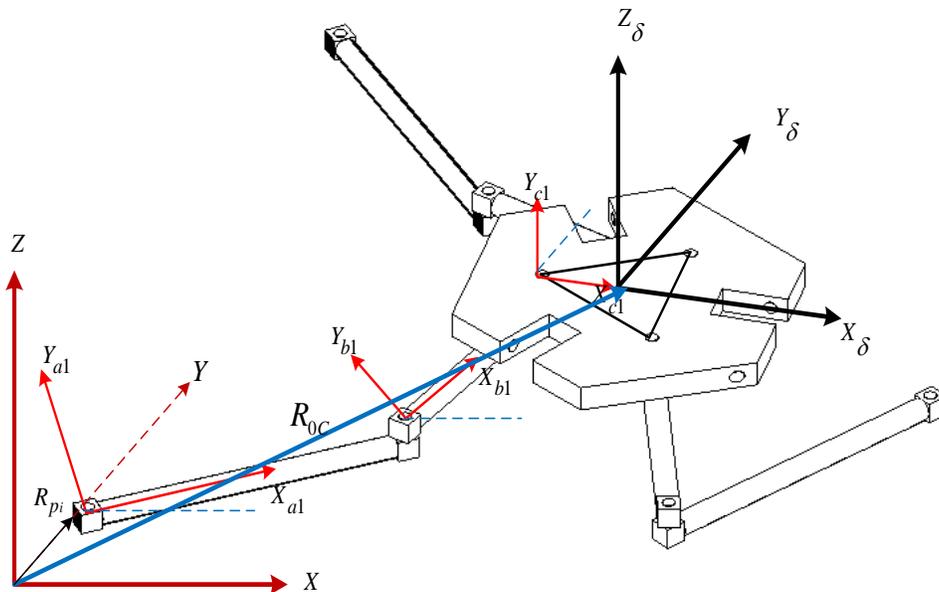


Figura 2.12 Sistema inercial robot paralelo delta híbrido.

El vector R_{0c} es el vector que parte de la base inercial (X, Y, Z) a la base local ($X_\delta, Y_\delta, Z_\delta$). Las transformaciones necesarias se aprecian en las ecuaciones (2.12),(2.13),(2.14),(2.15),(2.16)

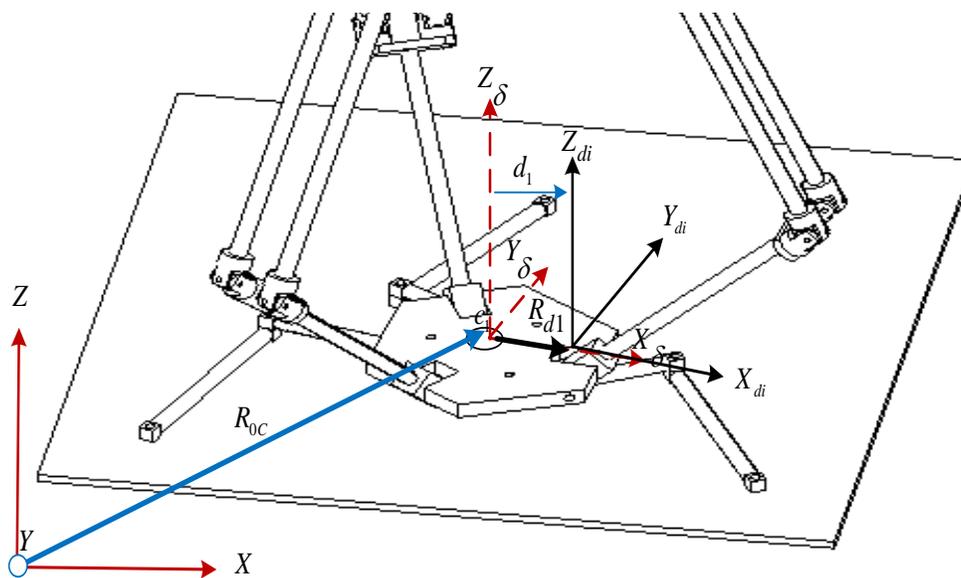


Figura 2.13 Sistema local del robot delta paralelo híbrido.

De la figura 2.13 se observa que para llegar al sistema de referencia local (X_{di}, Y_{di}, Z_{di}) . Se necesita la siguiente transformación.

$$R_{di} = Tx(d_i)n \tag{2.31}$$

$$n = [0, 0, 0, 1]^T \tag{2.32}$$

De la figura 2.14, la cadena cinemática que parte del punto D_i y llega hasta el punto F_i , debido a la geometría del robot se puede analizar de la siguiente forma:

$$R_{e_i} + R_{e'_{i1}} + R_{f_{i1}} + R_{g_{i1}} = R_{e_i} + R_{f_i} \tag{2.33}$$

Dado que $R_{e'_{i1}}, R_{g_{i1}}$ son constantes de igual magnitud, pero de sentido contrario, por lo tanto al realizar la suma vectorial, se cancelan una con la otra

$$R_{e_i} + \cancel{R_{e'_{i1}}} + R_{f_{i1}} + \cancel{R_{g_{i1}}} = R_{e_i} + R_{f_i} \tag{2.34}$$

Teniendo así, que al análisis para la posición del punto D_i al punto F_i , se puede determinar cómo se plantea en la ecuación (2.32).

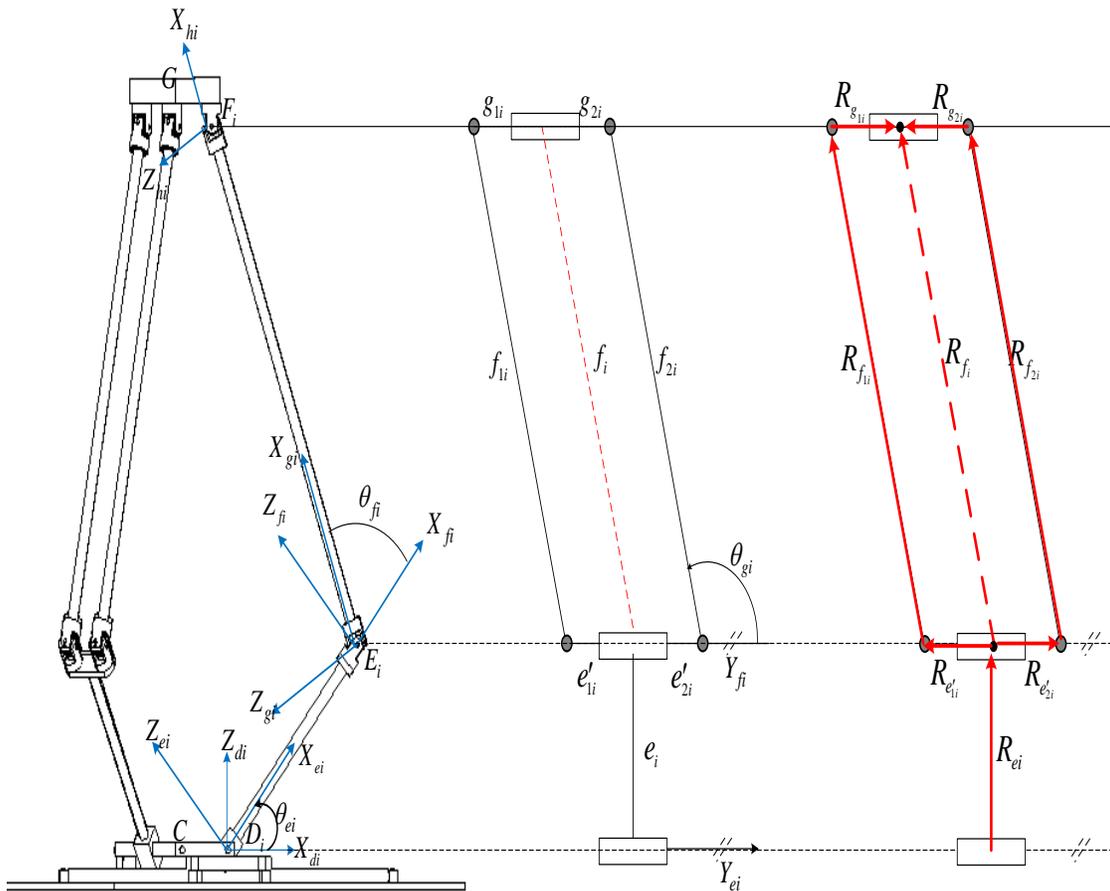


Figura 2.14 Descripción de los ángulos de las juntas

Observando la figura 2.14, se tienen las transformaciones que permiten llegar al sistema de referencia local (X_{hi}, Y_{hi}, Z_{hi}) , partiendo del sistema (X_{di}, Y_{di}, Z_{di}) . Donde:

$$R_{ei} = Qy(\theta_{ei})Tx(e_i)n \quad (2.35)$$

$$R_{fi} = Qy(\theta_{ei}).Qy(\theta_{fi}).Qz(\theta_{gi}).Tx(f_i)n \quad (2.36)$$

$$R_{gi} = Tx(g_i)n \quad (2.37)$$

Sustituyendo los valores de las ecuaciones (2.31), (2.35), (2.36), (2.37) en la ecuación de lazo vectorial (2.30) se tiene:

$$R_{0G} - R_{0C} + R_{di} - R_{gi} = \begin{pmatrix} e_i C \theta_{e1} + f_i C(\theta_{ei} + \theta_{f2}) S \theta_{gi} \\ f_i C(\theta_{gi}) \\ e_i S(\theta_{e1}) + f_i S(\theta_{ei} + \theta_{f2}) S \theta_{gi} \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

Para poder resolver la ecuación de lazo (2.38) se parte del origen del sistema y se llega al punto F_i , ver figura 2.15.

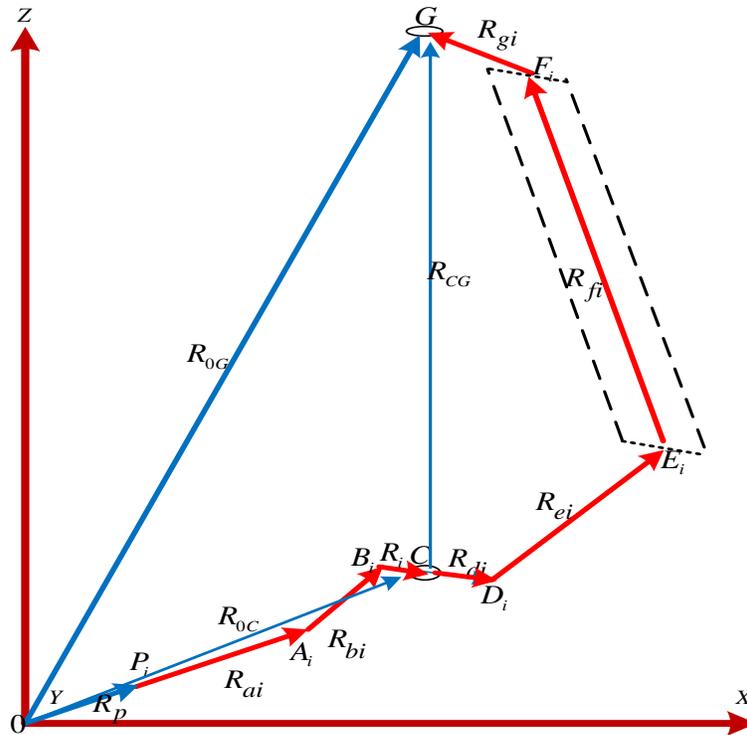


Figura 2.15 Análisis de una cadena.

Teniendo así como resultado:

$$\begin{pmatrix} C(\mu_i + \phi) & S(\mu_i + \phi) & 0 \\ -S(\mu_i + \phi) & C(\mu_i + \phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_{0C} \\ Y_{0C} \\ Z_{0C} \end{pmatrix} \right) - \begin{pmatrix} d_i \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g_i \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_i C(\theta_{e1}) + f_i C(\theta_{ei} + \theta_{f2}) S \theta_{gi} \\ f_i C(\theta_{gi}) \\ e_i S(\theta_{e1}) + f_i S(\theta_{ei} + \theta_{f2}) S \theta_{gi} \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

$$\begin{pmatrix} (X_G + X_C)C(\mu_i + \phi) + (Y_G + Y_C)S(\mu_i + \phi) + g_i - d_i \\ (Y_G + Y_C)C(\mu_i + \phi) - (X_G + X_C)S(\mu_i + \phi) \\ z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_i C \theta_{e_i} + f_i C(\theta_{e_i} + \theta_{f_2}) S \theta_{g_i} \\ f_i C \theta_{g_i} \\ e_i S \theta_{e_i} + f_i S(\theta_{e_i} + \theta_{f_2}) S \theta_{g_i} \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

Donde:

$$X_C = X_j + a_i C \theta_{a_i} + b_i C(\theta_{a_i} + \theta_{b_i}) + c_i C(\phi + \mu_i) \quad (2.41)$$

$$Y_C = Y_j + a_i S \theta_{a_i} + b_i S(\theta_{a_i} + \theta_{b_i}) + c_i S(\phi + \mu_i) \quad (2.42)$$

$$Z_C = 0 \quad (2.43)$$

Para $i = 1, j = P, i = 2, j = Q, i = 3, j = R$.

2.3.1.2.1.1 Solución del ángulo θ_{g_i}

Se toma el segundo elemento de la ecuación (2.40) para poder obtener el valor del ángulo θ_{g_i}

$$(Y_G + Y_C)C(\mu_i + \phi) - (X_G + X_C)S(\mu_i + \phi) = f_i C \theta_{g_i} \quad (2.44)$$

Al despejar el ángulo θ_{g_i} . Se tienen como resultado dos posibles valores.

$$\theta_{g_i} = \pm \text{ArcCos} \left(\frac{(Y_G + Y_C)C(\mu_i + \phi) - (X_G + X_C)S(\mu_i + \phi)}{f_i} \right) \quad (2.45)$$

2.3.1.2.1.2 Solución del ángulo θ_{f_i}

Una vez que se determinó θ_{g_i} , se puede determinar θ_{f_i} , con solo sumar los cuadrados de los elementos del lado izquierdo (LI) y del lado derecho (LD) de la ecuación (2.40)

$$LI = \left((X_G + X_C)C(\mu_i + \phi) + (Y_G + Y_C)S(\mu_i + \phi) + g_i - d_i \right)^2 + \left((Y_G + Y_C)C(\mu_i + \phi) - (X_G + X_C)S(\mu_i + \phi) \right)^2 + z_f^2 \quad (2.46)$$

$$LD = \left(e_i C \theta_{e_i} + f_i C(\theta_{e_i} + \theta_{f_2}) S \theta_{g_i} \right)^2 + \left(f_i C \theta_{g_i} \right)^2 + \left(e_i S \theta_{e_i} + f_i S(\theta_{e_i} + \theta_{f_2}) S \theta_{g_i} \right)^2 \quad (2.47)$$

Elevando al cuadrado y simplificando se tiene una sola ecuación en función de θ_{f_i}

$$LI^2 = LD^2 \quad (2.48)$$

Sustituyendo el valor de θ_{g_i} y despejando a θ_{f_i} de la ecuación (2.48) se tienen dos posibles valores.

$$\theta_{f_i} = \pm \text{ArcCos} \left(\frac{k_1 + k_2}{(2 e_i f_i)} \right) \quad (2.49)$$

Donde:

$$k_1 = (Csc[\theta_{gi}](d_i^2 - e_i^2 - f_i^2 - 2 d_i g_i + g_i^2 + X_G^2 - 2 X_G X_C + X_C^2 + Y_G^2 - 2 Y_G Y_C + Y_C^2)$$

$$k_2 = Z_G^2 - 2 (d_i - g_i) (X_G - X_C) Cos[\mu_i + \phi] - 2 (d_i - g_i) ((Y_G - Y_C) Sin[\mu_i + \phi]$$

2.3.1.2.1.3 Solución del ángulo θ_{ei}

Una vez que se conocen los valores de θ_{fi}, θ_{gi} , se toma la primera parte de la ecuación (2.40) y se sustituyen los valores de los ángulos ya encontrados.

$$(X_G + X_C)C(\mu_i + \phi) + (Y_G + Y_C)S(\mu_i + \phi) + g_i - d_i = e_i C\theta_{e1} + f_i C(\theta_{ei} + \theta_{f2}) S\theta_{gi} \quad (2.50)$$

Despejando a θ_{ei} de la ecuación (2.50), se obtienen cuatro posibles valores que satisfacen a la ecuación de los cuales solo dos son reales y los demás no son validos para la solución del sistema, cuya solución completa se puede apreciar en el capítulo 5.

2.4 Jacobiano.

El jacobiano relaciona las velocidades articulares con las velocidades cartesianas del extremo. Sea $x_i = f_i(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$ para $i = 1, 2, 3, \dots, m$ un conjunto de m ecuaciones siendo cada una de estas una función de n variables independientes. Las derivadas temporales de x_i pueden ser expresadas en función de \dot{q}_i de la siguiente forma matricial:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta q_1}{\delta \theta_1} & \dots & \frac{\delta q_1}{\delta \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta q_m}{\delta \theta_1} & \dots & \frac{\delta q_m}{\delta \theta_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1' \\ \theta_2' \\ \vdots \\ \vdots \\ \theta_n' \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

Para los manipuladores paralelos, (Goselin y Angeles 1990) sugieren separar la matriz jacobiana en dos matrices, una asociada con la cinemática directa y otra con la cinemática inversa.

Las variables actuadas se pueden denotar por el vector q , la posición de la plataforma móvil de salida se puede denotar por el vector x , las función de cada cadena se pueden expresar de la siguiente forma (Tsai 1999):

$$f(x, q) = 0 \quad (2.52)$$

Donde f es una función implícita de q y x , de dimensión n , y θ , es un vector dimensional n , diferenciando la ecuación, (2.52) con respecto al tiempo se obtiene la relación de cambio de las juntas de entrada y la velocidad de salida del efector final.

$$J_x \dot{x} = J_q \dot{q} \quad (2.53)$$

Donde

$$J_x = \frac{\delta f}{\delta x} \quad (2.54)$$

$$J_q = \frac{\delta f}{\delta q} \quad (2.55)$$

La derivada de las dos matrices jacobianas separadas pueden escribirse como:

$$\dot{q} = J\dot{x} \quad (2.56)$$

$$J = J_q^{-1} J_x \quad (2.57)$$

La matriz definida en la ecuación (2.56) , para manipuladores paralelos corresponde a la matriz jacobiana inversa para manipuladores seriales.

2.4.1 Jacobiano del robot delta plano.

Se utiliza el método convencional de velocidad de lazo vectorial (Tsai 1999), para determinar el jacobiano del robot delta plano. De la figura (2.6), se observa que θ_{ai}, θ_{bi} , denotan la orientación de los ángulos de los eslabones a_i, b_i con respecto al eje X_i . Para el caso de este manipulador, el vector de entradas es $q = [\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}]$ y el vector de salidas es $x = [X_C, Y_C, \phi]$.

La ecuación de lazo para cadena se puede escribir de la siguiente forma:

$$\overline{0C} - \overline{B_iC} = \overline{P_iA_i} + \overline{A_iB_i} \quad (2.58)$$

Dado que es un mecanismo plano el vector de velocidad esta sobre el eje Z, positivo. La ecuación de velocidad del lazo vectorial se obtiene derivando con respecto al tiempo a la ecuación (2.58).

$$\begin{pmatrix} V_{Cx} - c_i \omega_\phi S(\mu_i + \phi) \\ V_{Cy} + c_i \omega_\phi C(\mu_i + \phi) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_i \omega_{\theta_{ai}} S(\theta_{ai}) - b_i (\omega_{\theta_{ai}} + \omega_{\theta_{bi}}) S(\theta_{ai} + \theta_{bi}) \\ a_i \omega_{\theta_{ai}} C(\theta_{ai}) - b_i (\omega_{\theta_{ai}} + \omega_{\theta_{bi}}) C(\theta_{ai} + \theta_{bi}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

Dado que $\omega_{\theta_{ai}}$ es una variable dependiente esta se puede eliminar de la ecuación (2.59), aplicando el producto punto del vector $\overline{A_iB_i}$, a ambos lados de la ecuación (2.59). Para obtener una ecuación escalar.

$$a_i b_i \omega_{\theta_{ai}} S\theta_{bi} = b_i (V_{Cx} C(\theta_{ai} + \theta_{bi}) + V_{Cy} S(\theta_{ai} + \theta_{bi}) + c_i \omega_\phi S(\theta_{ai} + \theta_{bi} - \mu_i - \phi)) \quad (2.60)$$

Para $i=1, 2, 3$. Sustituyendo la ecuación (2.60) en la ecuación (2.54), Para J_X se tiene:

$$J_X = \begin{pmatrix} b_1 C \theta_{a1} & b_1 S(\theta_{a1} + \theta_{b1}) & b_1 c_1 S(\theta_{a1} + \theta_{b1} - \mu_1 - \phi) \\ b_2 C \theta_{a2} & b_2 S(\theta_{a2} + \theta_{b2}) & b_2 c_2 S(\theta_{a2} + \theta_{b2} - \mu_2 - \phi) \\ b_3 C \theta_{a3} & b_3 S(\theta_{a3} + \theta_{b3}) & b_3 c_3 S(\theta_{a3} + \theta_{b3} - \mu_3 - \phi) \end{pmatrix} \quad (2.61)$$

Para J_q se tiene:

$$J_q = \begin{pmatrix} a_1 b_1 S \theta_{b1} & 0 & 0 \\ 0 & a_2 b_2 S \theta_{b2} & 0 \\ 0 & 0 & a_3 b_3 S \theta_{b3} \end{pmatrix} \quad (2.62)$$

De la ecuación (2.57) se tiene:

$$J = \begin{pmatrix} \omega_{a1} \\ \omega_{a2} \\ \omega_{a3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Csc(\theta_{b1})(V_{CX} Cos(\theta_{a1} + \theta_{b1}) + V_{CY} Sin(\theta_{a1} + \theta_{b1}))}{a_1} \\ \frac{Csc(\theta_{b2})(V_{CX} Cos(\theta_{a2} + \theta_{b2}) + V_{CY} Sin(\theta_{a2} + \theta_{b2}))}{a_2} \\ \frac{Csc(\theta_{b3})(V_{CX} Cos(\theta_{a3} + \theta_{b3}) + V_{CY} Sin(\theta_{a3} + \theta_{b3}))}{a_3} \end{pmatrix} \quad (2.63)$$

2.4.2 Jacobiano del robot delta en el espacio.

Realizando un análisis similar al anterior se tiene:

$$J_X = \begin{pmatrix} b_{1x} & b_{1y} & b_{1z} \\ b_{2x} & b_{2y} & b_{2z} \\ b_{3x} & b_{2y} & b_{3z} \end{pmatrix} \quad (2.64)$$

Donde:

$$\begin{aligned} b_{1x} &= C \cos(\theta_{e1} + \theta_{f1}) C \cos(\mu_1 + \phi) \sin(\theta_{g1}) - \cos(\theta_{g1}) \sin(\mu_1 + \phi) \\ b_{1y} &= C \cos(\theta_{g1}) C \cos(\mu_1 + \phi) + \cos(\theta_{e1} + \theta_{f1}) \sin(\theta_{g1}) \sin(\mu_1 + \phi) \\ b_{1z} &= \sin(\theta_{e1} + \theta_{f1}) \sin(\theta_{g1}) \\ b_{2x} &= C \cos(\theta_{e2} + \theta_{f2}) C \cos(\mu_2 + \phi) \sin(\theta_{g2}) - \cos(\theta_{g2}) \sin(\mu_2 + \phi) \\ b_{2y} &= C \cos(\theta_{g2}) C \cos(\mu_2 + \phi) + \cos(\theta_{e2} + \theta_{f2}) \sin(\theta_{g2}) \sin(\mu_2 + \phi) \\ b_{2z} &= \sin(\theta_{e2} + \theta_{f2}) \sin(\theta_{g2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_{3x} &= C \cos(\theta_{e3} + \theta_{f3}) C \cos(\mu_3 + \phi) \sin(\theta_{g3}) - \cos(\theta_{g3}) \sin(\mu_3 + \phi) \\
 b_{3y} &= C \cos(\theta_{g3}) C \cos(\mu_3 + \phi) + \cos(\theta_{e3} + \theta_{f3}) \sin(\theta_{g3}) \sin(\mu_3 + \phi) \\
 b_{3z} &= \sin(\theta_{e3} + \theta_{f3}) \sin(\theta_{g3})
 \end{aligned}$$

$$J_q = \begin{pmatrix} -e_1 S \theta_{f1} S \theta_{g1} & 0 & 0 \\ 0 & -e_2 S \theta_{f2} S \theta_{g2} & 0 \\ 0 & 0 & -e_3 S \theta_{f3} S \theta_{g3} \end{pmatrix} \quad (2.65)$$

$$J = \begin{pmatrix} \omega_{e1} \\ \omega_{e2} \\ \omega_{e3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{K_{l1} + K_{l2}}{e_1} \\ -\frac{K_{m1} + K_{m2}}{e_2} \\ -\frac{K_{n1} + K_{n2}}{e_3} \end{pmatrix} \quad (2.66)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 K_{l1} &= C \operatorname{csc}(\theta_{f1}) C \operatorname{csc}(\theta_{g1}) (C \theta_{g1}) V_{GY} C(\mu_1 + \phi) - V_{GX} S(\mu_1 + \phi) \\
 K_{l2} &= S \theta_{g1} (V_{GZ} S(\theta_{e1} + \theta_{f1}) C(\theta_{e1} + \theta_{f1}) (V_{GX} C(\mu_1 + \phi) + V_{GY} S(\mu_1 + \phi))) \\
 K_{m1} &= C \operatorname{csc}(\theta_{f2}) C \operatorname{csc}(\theta_{g2}) (C \theta_{g2} (V_{GY} C(\mu_2 + \phi) - V_{GX} S(\mu_2 + \phi))) \\
 K_{m2} &= S \theta_{g2} (V_{GZ} S(\theta_{e2} + \theta_{f2}) C(\theta_{e2} + \theta_{f2}) (V_{GX} C(\mu_2 + \phi) + V_{GY} S(\mu_2 + \phi))) \\
 K_{n1} &= C \operatorname{csc}(\theta_{f3}) C \operatorname{csc}(\theta_{g3}) (C \theta_{g3} (V_{GY} C(\mu_3 + \phi) - V_{GX} S(\mu_3 + \phi))) \\
 K_{n2} &= S \theta_{g3} (V_{GZ} S(\theta_{e3} + \theta_{f3}) C(\theta_{e3} + \theta_{f3}) (V_{GX} C(\mu_3 + \phi) + V_{GY} S(\mu_3 + \phi)))
 \end{aligned}$$

Capítulo 3.

Caracterización de los movimientos

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis de los movimientos del robot manipulador paralelo delta híbrido. Las trayectorias que puede seguir así como el comportamiento que presenta la unión de los dos mecanismos.

3.2 Definición del problema

Se requiere encontrar el número de movimientos que el robot manipulador paralelo delta híbrido puede realizar. Cada movimiento debe de ser analizado caracterizado y simulado. No se sabe con seguridad que tipo de movimientos se pueden realizar al unir estos dos mecanismos.

El robot manipulador paralelo delta híbrido se compone de dos robots manipuladores paralelos tipo delta, unidos en una configuración serie.

1. En la base de todo el sistema, se encuentra el robot manipulador paralelo delta plano cuyas características son:
 - i. El robot manipulador plano es del tipo 3RRR, el cual tiene un movimiento en el plano(X, Y).
 - ii. Debido a la configuración que presenta, tiene una rotación (ϕ) sobre el eje Z.
 - iii. El robot manipulador paralelo delta plano está compuesto por una plataforma fija y una plataforma móvil.
 - iv. El robot manipulador paralelo delta plano está formado por tres cadenas cinemáticas.
 - v. Cada cadena cinemática del robot manipulador delta plano está formado por dos eslabones rígidos conectados por juntas rotacionales.
 - vi. El movimiento de los eslabones del robot manipulador paralelo delta plano son dependientes.
 - vii. Se tiene un actuador para cada cadena cinemática del robo manipulador paralelo delta plano.
 - viii. Sobre la base móvil del robot delta plano se encuentra conectado en configuración serie el robot manipulador paralelo delta en el espacio.
2. El robot manipulador paralelo en el espacio se encuentra sobre la base móvil del robot delta plano cuyas características son:
 - ix. El robot delta en el espacio está formado por la base móvil del robot delta plano y una plataforma móvil de salida.

- x. El movimiento del robot es el espacio (X, Y, Z) y a consecuencia del robot delta plano tiene una rotación (ϕ) en el eje Z.
- xi. Al robot delta en el espacio lo componen tres cadenas cinemáticas simétricas.
- xii. Se tiene un actuador para cada cadena cinemática del robot manipulador paralelo delta en el espacio.
- xiii. Cada cadena está formada por tres eslabones rígidos.
- xiv. Cada eslabón del robot delta en el espacio está formado por juntas de rotación y juntas universales.

Tomando en cuenta las restricciones anteriores se requiere encontrar:

- a) El número y tipo de movimientos del robot manipulador paralelo delta híbrido.
- b) Los desplazamientos angulares que este robot puede tener.

3.3 Consideraciones importantes

Para esta configuración existen movimientos cinemáticos equivalentes en el sentido de los lugares geométricos que recorren los eslabones en su conjunto y en el efector final. Es decir para un punto definido, en el espacio, el robot manipulador paralelo delta híbrido se puede posicionar y orientar de diferentes formas.

El movimiento del robot está en función de los desplazamientos angulares aplicados por los actuadores de los eslabones de entrada. La variable de tiempo es considerada para el análisis de los movimientos.

En este trabajo de tesis la masa de los eslabones y de los actuadores no se toman en cuenta. Así como las fuerzas que producen el movimiento tampoco son consideradas por lo que el problema a solucionar es “cinemático”. El robot manipulador paralelo delta híbrido está formado por dos robots paralelos los movimientos que se pueden tener son los siguientes:

Se puede desplazar primero cualquiera de los dos robots y posteriormente se desplaza el robot que quedo fijo, a este movimiento se le denomina para este trabajo de tesis como “movimiento uno a uno”. Si se desplazan los dos robots al mismo tiempo para este trabajo de tesis se define como movimientos simultáneos.

Si se realiza una combinación de movimientos, es decir si para llegar a un punto determinado el robot manipulador paralelo delta híbrido puede realizar movimientos definidos como uno a uno y posteriormente un movimiento simultáneo o viceversa, para este trabajo de tesis se denomina como movimiento combinado.

Para este trabajo de tesis se realizó el análisis cinemático de la posición, en el capítulo 2 se obtuvieron las ecuaciones que definen la posición y orientación del efector final del robot manipulador paralelo delta híbrido. Para poder resolver dichas ecuaciones se tuvieron que plantear restricciones cinemáticas geométricas. Dado que es posible obtener múltiples soluciones a las ecuaciones obtenidas.

3.3.1 Restricciones cinemáticas.

Sea $p = [p_1 \dots p_r]^T$ un vector de las variables necesarias para determinar completamente la posición y orientación de todas las partes de un sistema físico, para este caso el robot manipulador paralelo delta híbrido, cuando se utilizan estas variables para describir un movimiento es necesario tener en cuenta que las variables pueden ser no independientes.

Así para el movimiento del robot manipulador paralelo delta híbrido debe de cumplir con alguna restricción. El modelo geométrico de los robots manipuladores en general involucra restricciones.

En general es posible formular restricciones del tipo:

$$G_k(p, p', t) = 0; k = 1, \dots, s'; \quad (3.1)$$

Es decir se deben de satisfacer s restricciones o ecuaciones en las variables p , sus derivadas p' y, posiblemente, el tiempo t . Para que se cumpla una restricción debe de haber una fuerza que obligue a ello. En general estas fuerzas pueden plantear problemas complejos, ya que no son conocidas previamente, y dependen del movimiento, en algunos casos se resuelve eliminando las variables redundantes, teniendo así un conjunto mínimo de variables $p = [p_1 \dots p_n]^T, n < r$, y prescindiendo las fuerzas.

Las restricciones pueden ser holónomas o no holónomas. Las holónomas son aquellas en las que no intervienen las velocidades; es decir tienen la forma:

$$G_k(p, t) = 0; k = 1, \dots, s'; \quad (3.2)$$

Las no holónomas dependen de las velocidades, para que una restricción sea no holónoma se exige además que no sea integrable; es decir, que no se deduzca por derivación total, con respecto al tiempo de una holónoma. Los modelos cinemáticos de los robots manipuladores con base fija se caracterizan por que las restricciones del movimiento son holónomas.

3.4 Planeación de trayectorias.

Se puede decir que la trayectoria está compuesta por dos partes:

1. Lugar geométrico. Son los puntos físicos por los cuales pasa el robot manipulador ya sea en el espacio operacional o en el espacio de las juntas.
2. Perfil de trayectoria. Es la evolución en el tiempo de la posición velocidad y aceleración del robot manipulador para ir de una posición inicial a otra final.

Para el robot manipulador paralelo delta híbrido, la trayectoria en el espacio de trabajo suele especificarse por la posición y orientación de un sistema asociado al efector final. De forma más concreta existen dos formas de básicas para especificar el movimiento.

- i. Suministrando puntos consecutivos e ignorando la trayectoria espacial que describe el robot entre cada dos puntos.
- ii. Especificando el camino que debe de unir los puntos mediante una determinada trayectoria, tal como una línea recta o un círculo, que debe describir el robot manipulador paralelo delta híbrido en el espacio de trabajo.

La primera alternativa se le denomina tradicionalmente control punto a punto, sólo tiene interés práctico cuando los puntos están suficientemente separados, ya que en caso contrario, la especificación sería muy laboriosa.

La segunda alternativa se denomina tradicionalmente control de trayectoria continua. En este caso, el sistema de control debe de hacer que el robot reproduzca lo más fiel mente posible la trayectoria especificada.

La solución de las ecuaciones de lazo del capítulo 2 depende de las trayectorias que el manipulador paralelo delta híbrido pueda seguir. De esta forma el problema de generación de trayectorias se plantea normalmente en el espacio articular en cuyo caso se trata de especificar la posición para cada una de las articulaciones.

Las trayectorias generadas deben de ser trayectorias suaves, lo que implica restricciones sobre las derivadas. Normalmente la primera derivada debe de ser continua.

En este trabajo se propone que el robot manipulador paralelo delta híbrido pueda seguir diferentes trayectorias como son:

- a. Trayectorias el línea recta
- b. Trayectorias cíclicas regulares
- c. Trayectorias cíclicas z

3.5 Perfil de trayectoria.

Se puede emplear una definición paramétrica de la curva que permita contemplar fácilmente la generación de movimientos tanto en el espacio de trabajo como en el espacio de las variables articulares.

Las curvas paramétricas se caracterizan por la representación funcional de cada una de sus dimensiones. Las coordenadas de un punto de la curva en el plano se expresan mediante el vector:

$$P(\lambda) = [x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)] \quad (3.3)$$

Donde λ es el parámetro y $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ son las funciones asociadas a cada una de las dimensiones. Para este trabajo de tesis se utiliza un polinomio de quinto grado. Con el fin de que los movimientos sean suaves.

Se tiene el polinomio de quinto grado.

$$P(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (3.4)$$

Obteniendo su primera derivada:

$$\dot{P}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 \quad (3.5)$$

Para la segunda derivada:

$$\ddot{P}(t) = 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 \quad (3.6)$$

Con las condiciones iniciales para $t=0$;

$$P(t) = 0 \Rightarrow a_0$$

$$\dot{P}(t) = 0 \Rightarrow a_1 = 0$$

$$\ddot{P}(t) = 0 \Rightarrow 2a_2 = 0; a_2 = 0$$

Poniendo condiciones finales. Para $t = t_f$, donde t_f es el tiempo final del recorrido.

$$P(t = t_f) = P_{\max} \Rightarrow 1$$

$$\dot{P}(t = t_f) = 0$$

$$\ddot{P}(t = t_f) = 0$$

Tomando en consideración a a_0, a_1, a_2 , de las ecuaciones (3.4), (3.5), (3.6).

$$\begin{pmatrix} t_f^3 + t_f^4 + t_f^5 \\ 3t_f^2 + 4t_f^3 + 5t_f^4 \\ 6t_f + 12t_f^2 + 20t_f^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se llega a:

$$a_3 = \frac{10}{t_f^3}, a_4 = \frac{15}{t_f^4}, a_5 = \frac{6}{t_f^3}$$

Sustituyendo $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ en las ecuaciones (3.4), (3.5), (3.6) se tiene:

$$P(t) = 10 \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 \quad (3.8)$$

$$\dot{P}(t) = 30\left(\frac{t^2}{t_f^3}\right) - 60\left(\frac{t^3}{t_f^4}\right) + 30\left(\frac{t^2}{t_f^3}\right) \quad (3.9)$$

$$P(t) = 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \quad (3.10)$$

Se definen las siguientes trayectorias que el robot manipulador paralelo delta híbrido pueda seguir. Se utilizó el perfil de quinto grado para que el manipulador siga una trayectoria suave.

3.6 Trayectorias en línea recta.

Se conoce un punto inicial $P1(x1, y1, z1)$ y un punto final $P2(x2, y2, z2)$, la trayectoria a seguir es una línea recta. Donde el robot manipulador paralelo delta plano describirá la trayectoria en el plano mientras que el robot manipulador paralelo delta en el espacio seguirá la trayectoria en el espacio, ver figura 1. Las ecuaciones que describen dicho movimientos son:

$$x = x1 + (x2 - x1) * P(t) \quad (3.11)$$

$$y = y1 + (y2 - y1) * P(t) \quad (3.12)$$

$$z = z1 + (z2 - z1) * P(t) \quad (3.13)$$

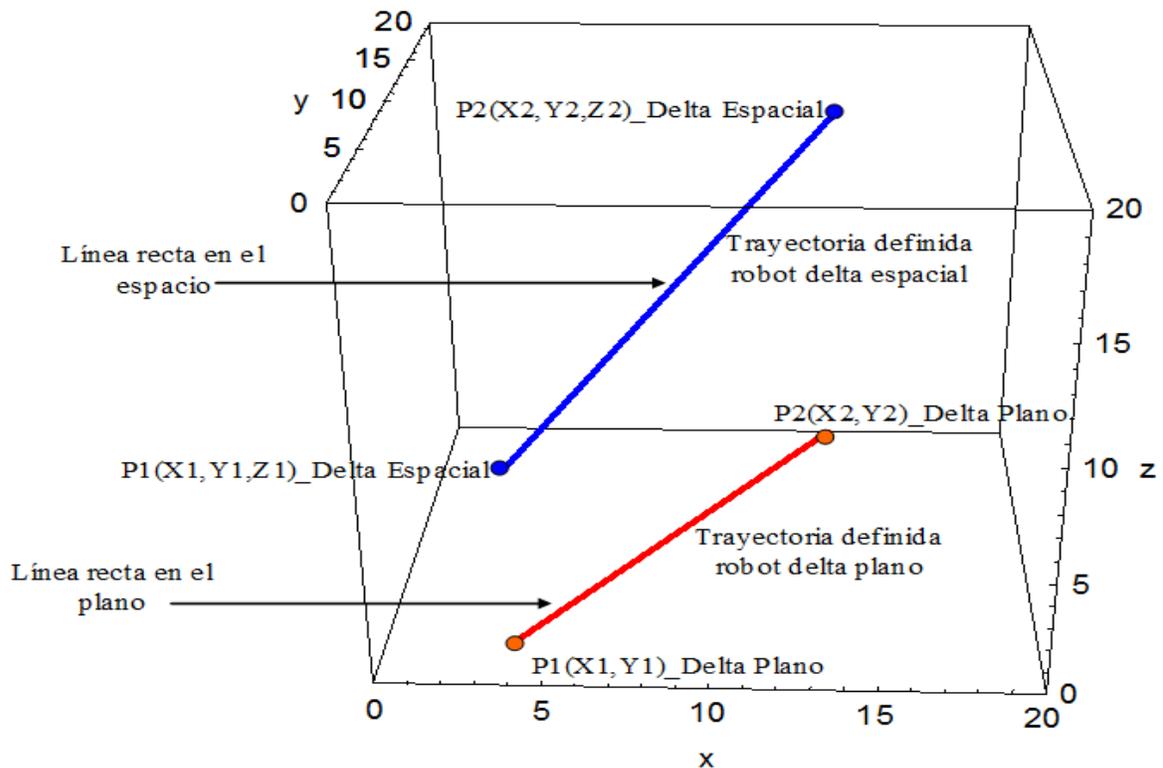


Fig. 3.1 Trayectorias de líneas rectas

3.7 Trayectorias cíclicas.

Las ecuaciones parametrizadas que describen las trayectorias cíclicas regulares están dadas de la siguiente forma:

$$x = Kx + [A * \text{Sin}(P(t) * w + \xi)] \quad (3.14)$$

$$y = Ky + [-B * \text{Sin}(P(t) * w1 + \xi1)] \quad (3.15)$$

$$z = Kz + [C * \text{Sin}(P(t) * w2 + \xi2)] \quad (3.16)$$

Donde $Kx, Ky, Kz, A, B, C, w, w1, w2, \xi, \xi1, \xi2$ son constantes que modifican a la trayectoria según el valor propuesto.

En la figura 2, se observa que al solo tomar los valores que se obtienen de la ecuación (3.14) y (3.15), se obtienen la trayectoria en el plano (X, Y) , dicha trayectoria es la proyección de la trayectoria que se describe en el espacio (X, Y, Z) .

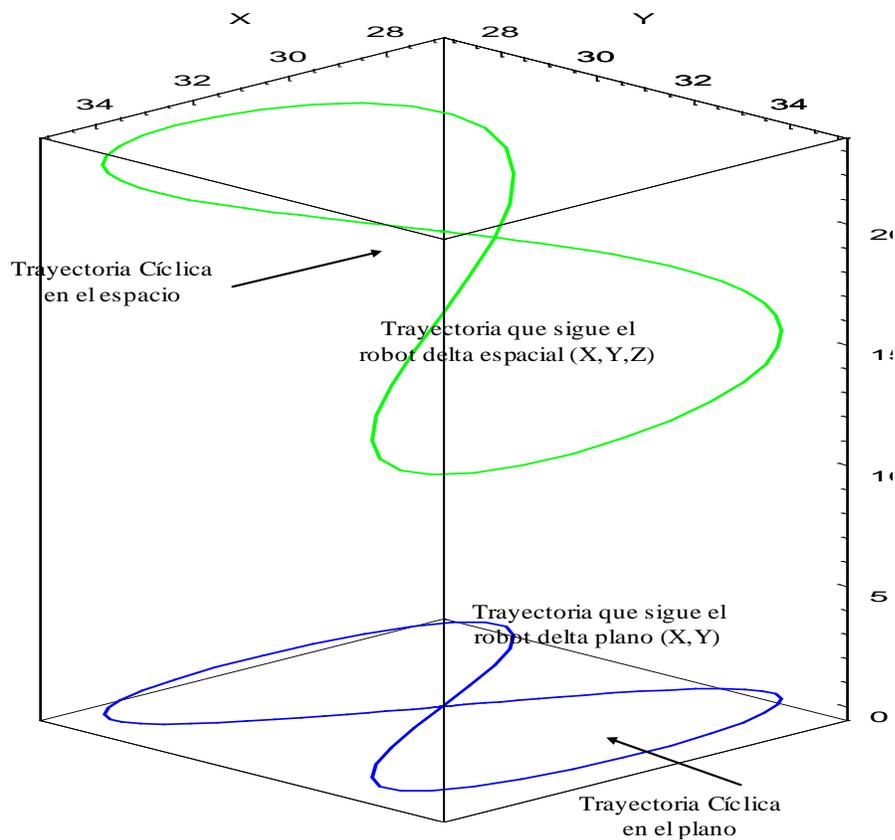


Fig. 3.2 Trayectorias cíclicas regulares

3.8 Trayectorias cíclicas compuestas

Las ecuaciones parametrizadas que describen las trayectorias cíclicas compuestas están dadas de la siguiente forma:

Para el robot manipulador paralelo delta plano se tienen las siguientes ecuaciones para la trayectoria.

$$x = Kx + [A1 * \sin(P(t) * (w + A1) + \xi 2)] \quad (3.17)$$

$$y = Ky + [-B * \sin(P(t) * (w1 * B) + \xi 1)] \quad (3.18)$$

Para el robot manipulador paralelo delta en el espacio se tienen las siguientes ecuaciones para la trayectoria.

$$x = Kx + [A * \sin(P(t) * w + \xi 2)] \quad (3.19)$$

$$y = Ky + [-B * \sin(P(t) * w1 + \xi 1)] \quad (3.20)$$

$$z = Kz + [C * \sin(P(t) * w2 + \xi 2)] \quad (3.21)$$

Donde $Kx, Ky, Kz, A, A1, B, C, w, w1, w2, \xi, \xi 1, \xi 2$ son constantes que modifican a la trayectoria según el valor propuesto.

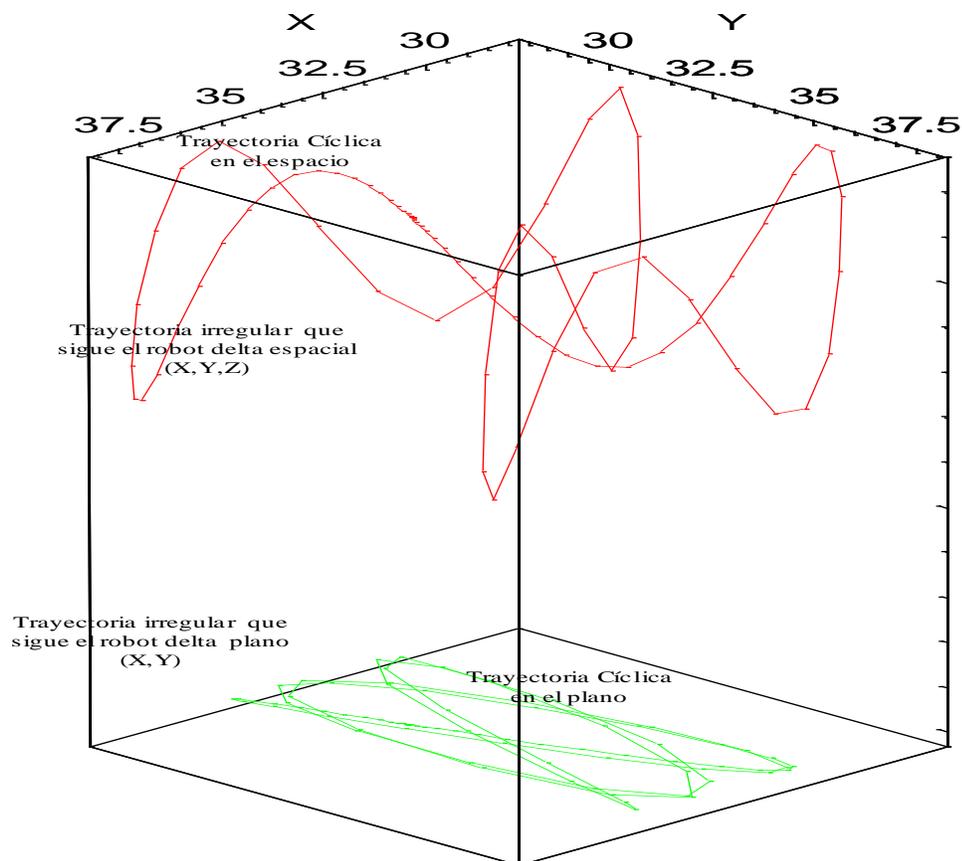


Fig. 3.3 Trayectorias irregulares

En la figura 3, se observa que al tomar los valores que se obtienen de la ecuación (3.17) y (3.18), se obtienen la trayectoria en el plano (X, Y), dicha trayectoria es la generada por una ecuación de trayectoria diferente a la ecuación de trayectoria el espacio(X, Y, Z)

3.9 Movimientos uno a uno

Se analizan los movimientos del robot manipulador paralelo delta híbrido, se definen como movimientos uno a uno al desplazamiento que puede tener alguno de los dos robots paralelos que componen al robot manipulador paralelo delta híbrido.

Se define como movimiento uno a uno al desplazamiento que presenta uno de los dos robots, mientras un robot se desplaza el otro se mantiene fijo, cuando el robot delta que está en movimiento llega a una posición determinada, el robot que estuvo fijo comienza a moverse hasta llegar a su posición final.

En la figura 4 se muestra un esquema del robot manipulador paralelo delta híbrido, donde el robot delta plano se desplaza de un punto inicial a un punto final siguiendo una trayectoria en línea recta, al llegar al punto final en el plano, el robot delta en el espacio continúa con el movimiento hasta llegar al punto final en el espacio. A este tipo de movimiento se le denomina uno a uno.

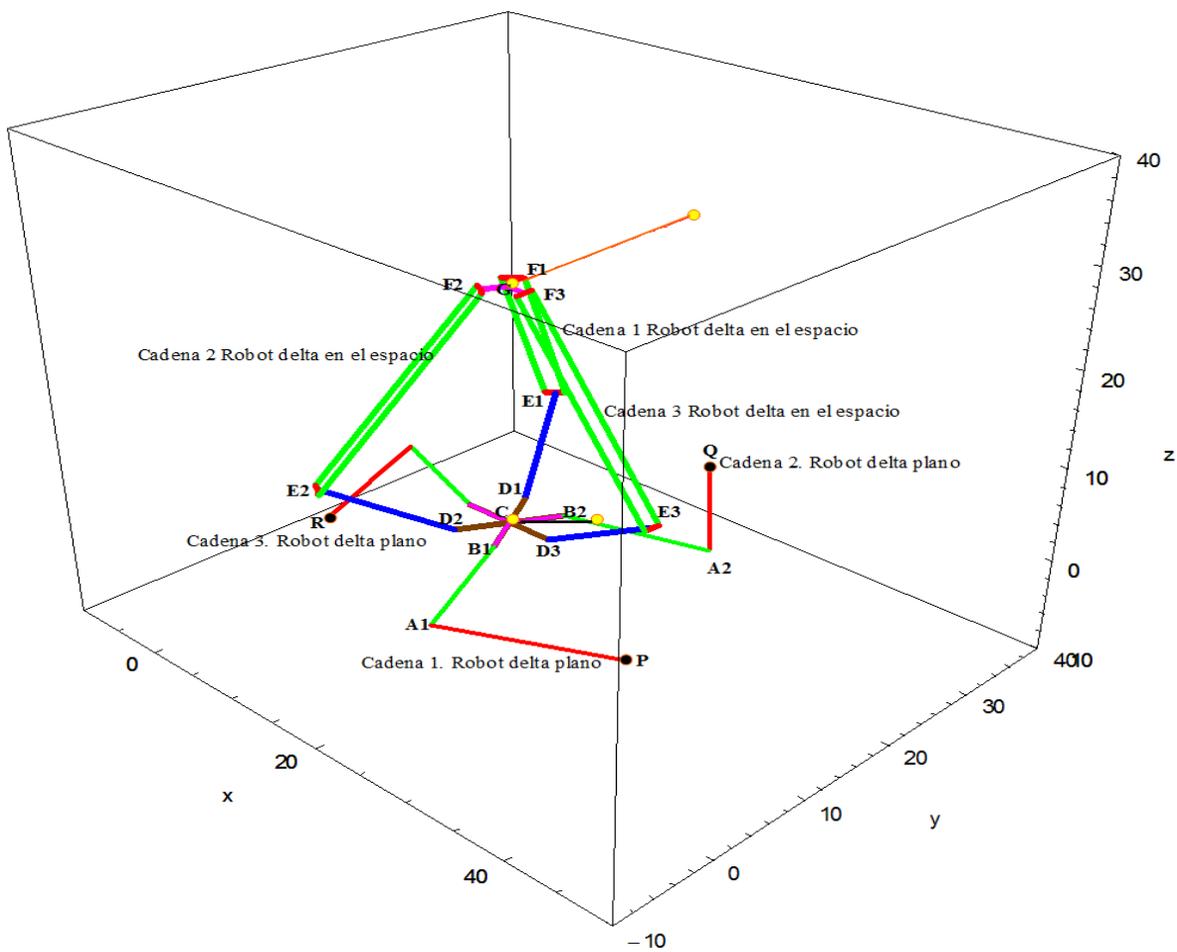


Fig. 3.4 Esquema del robot manipulador paralelo delta híbrido

3.9.1 Desplazamiento del robot plano y después el robot espacial

El robot manipulador paralelo delta plano puede presentar un desplazamiento, si alguno de los actuadores que lo componen es accionado, cabe mencionar que con solo accionar uno y solo un actuador se obtiene un desplazamiento. Para el robot manipulador paralelo delta en el espacio sucede el mismo caso, con solo accionar uno de los tres actuadores que componen al mecanismo se obtiene un desplazamiento angular.

El robot manipulador paralelo delta híbrido puede seguir trayectorias ya sean en línea recta o trayectorias como elipses, círculos, irregulares, cíclicas, etc.

3.9.2 Desplazamiento del robot espacial y después el robot delta plano

En este caso se desplaza el robot manipulador paralelo en el espacio una determinada posición y posteriormente se mueve el robot delta plano.

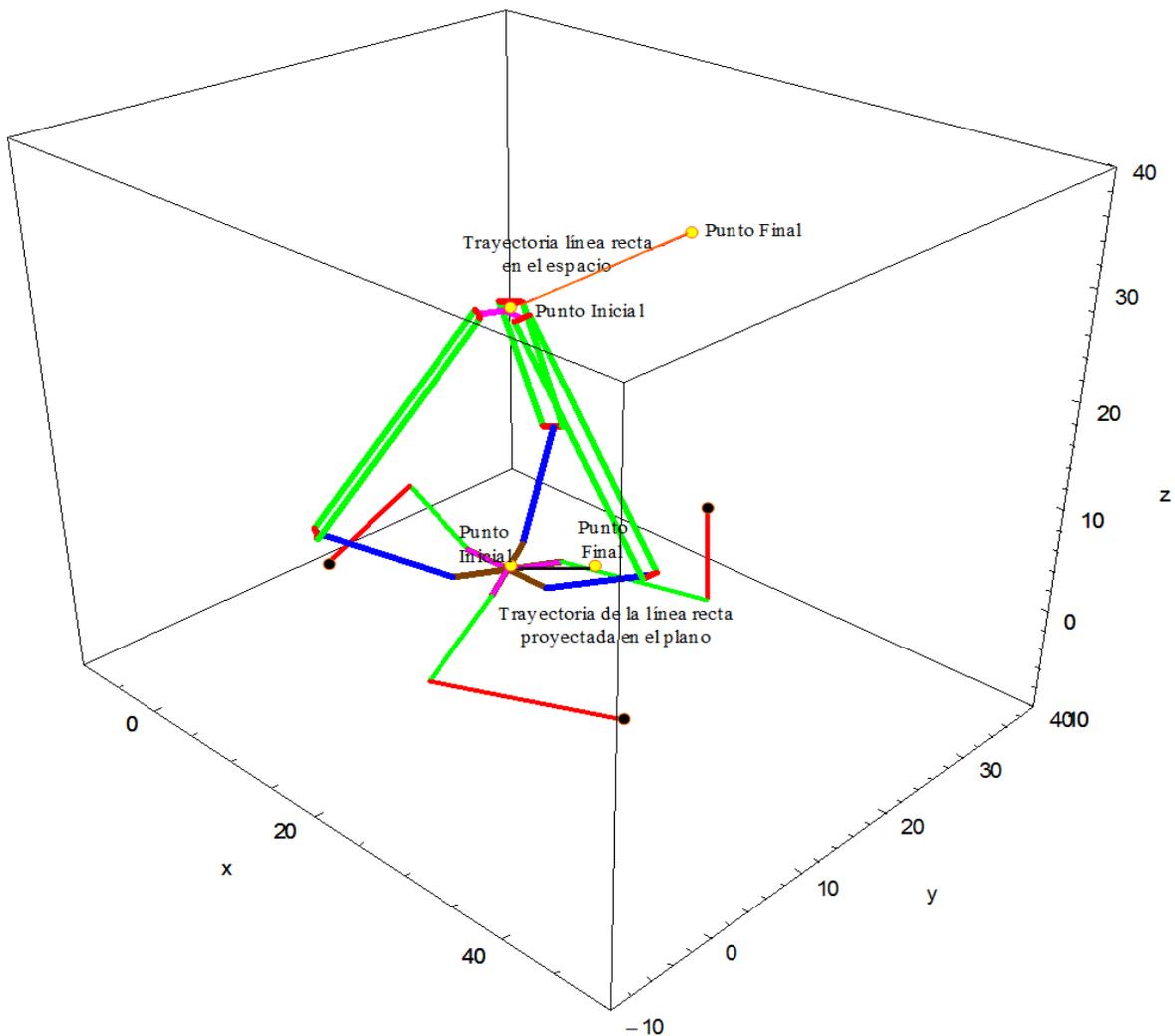


Fig. 3.5 Visualización de los puntos iniciales y finales

3.10 Movimientos simultáneos

El robot manipulador paralelo delta híbrido se mueve todo el sistema al mismo tiempo para alcanzar una determinada posición, teniendo así los movimientos de ambos robots.

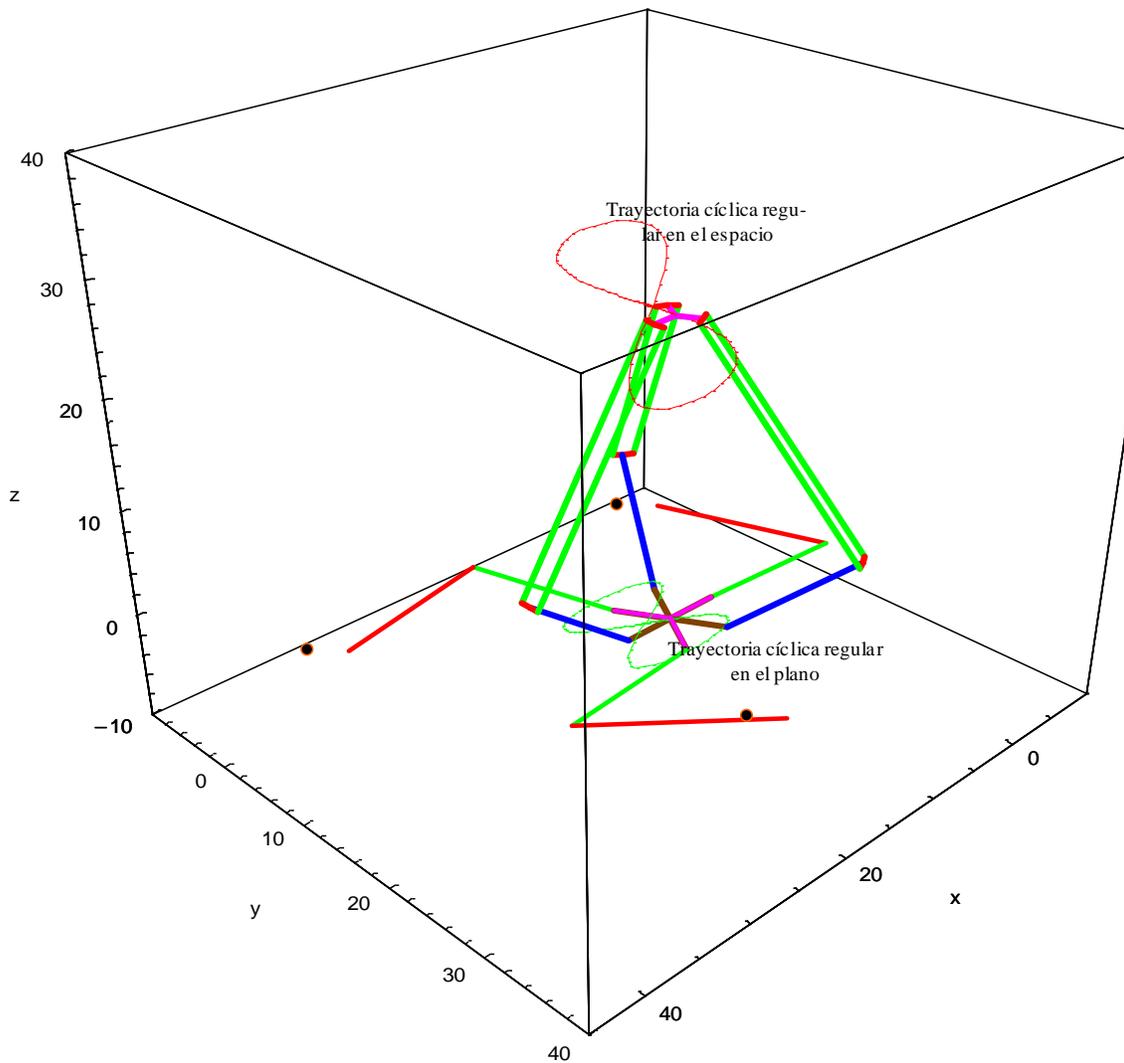


Fig. 3.6 Esquema del robot manipulador paralelo delta híbrido

Capítulo 4.

Diseño y construcción del prototipo piloto.

4.1 Introducción

El diseño de ingeniería se puede definir como el proceso de aplicar las diversas técnicas y los principios científicos con el objeto de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficiente detalle para permitir su realización.

En este capítulo se diseña, se define y se calculan los afin de determinar el tamaño, las formas y los materiales necesarios para cada uno de los componentes interrelacionados del robot manipulador paralelo delta híbrido.

4.2 Arquitectura del robot manipulador paralelo delta híbrido

Tomando en cuenta las especificaciones mencionadas de la tabla 4.2, se propone un modelo teórico. El mecanismo se compone por un manipulador paralelo delta plano y un manipulador paralelo delta en el espacio conectados en una configuración serie.

En la tabla 4.1 se aprecian los elementos que componen al robot manipulador paralelo delta híbrido.

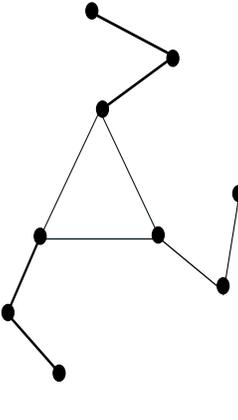
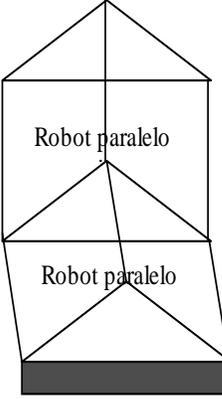
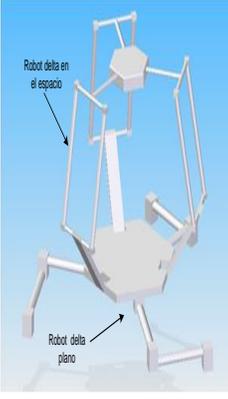
			
<p>Robot paralelo delta plano</p>	<p>Robot paralelo delta en el espacio</p>	<p>Robots paralelos-paralelos conectados en serie</p>	<p>Robot paralelo delta híbrido</p>

Tabla 4.1 Elementos del robot manipulador paralelo delta híbrido

4.3 Especificaciones y requerimientos

Se requiere construir el prototipo piloto de un manipulador paralelo delta híbrido, cuya configuración ofrece mayor espacio de trabajo.

4.3.1 Dimensiones

Se construyó un prototipo funcional el cual está hecho a escala de 1 a 3, tomando como medidas de referencia el robot paralelo delta espacial IRB 360/800 versión compacta de la empresa de robots ABB. En el caso del robot delta plano las medidas de los eslabones dependen de la distancia máxima que se desee alcanzar, por lo que se propusieron las medidas de los eslabones en proporción del tamaño del robot manipulador paralelo delta espacial.

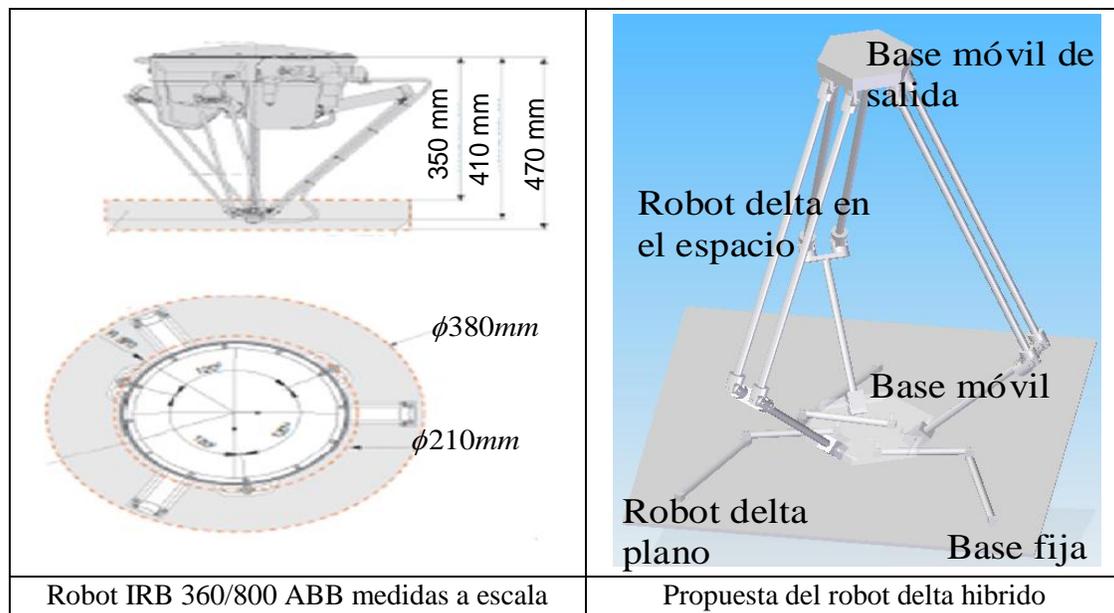


Figura 4.2. Prototipo piloto

4.4 Diseño conceptual

El robot manipulador paralelo delta híbrido está formado principalmente por 25 cuerpos. La base que soportará a todo el sistema, la base móvil 1 y 2, soportes, eslabones y las juntas universales que se detallan más adelante, todos estos elementos que componen al robot son de geometrías sencillas, que se maquinaron en tornos y fresas convencionales.

4.4.1 Elementos principales propuestos que componen al robot manipulador paralelo delta híbrido.

- Mecánica
- Electrónica
- Programación

No. Parte	Descripción	No. pzas	Dimensiones	Material
1.	Base fija cuadrada	1	400 X 400 mm	Placa de Acero.
2.	Soporte para rodamientos del eslabón primario delta plano	3	Diámetro de 40 mm. Largo de 30mm	Acero
3.	Flechas para eslabones primarios robot delta plano	3	Diámetro de 0.625 mm. Largo 60mm	Aluminio
4.	Eslabones primarios delta plano robot delta plano	3	Diámetro de 0.95 mm. Largo de 130mm	Aluminio
5.	Eslabones secundarios delta plano robot delta plano	1	Diámetro de 0.95 mm. Largo de 100mm	Aluminio
6.	Pernos para eslabones primarios y secundarios delta plano	3	Diámetro de 0.95 mm. Largo 40mm	Aluminio
7.	Pernos para eslabones secundarios y plataforma 1	3	Diámetro de 12.5 mm. Largo 40mm	Acero
8.	Plataforma delta plano base móvil	1	Diámetro de 140 mm	Aluminio
9.	Eslabones primarios delta espacial	3	Diámetro de 0.95 mm. Largo de 11mm	Aluminio
10.	Eslabones secundarios delta espacial	3	Diámetro de 0.95 mm. Largo de 22 mm	Aluminio
11.	Placa soporte de juntas universales	3	Ancho 19.5 mm Largo de 40 mm	Aluminio
12.	Juntas universales	12	Diámetro de 0.95 mm. Largo 40 mm	Acero
13.	Base móvil delta espacial	1	Diámetro de 60 mm.	Aluminio
14.	Flecha para junta eslabones primarios delta espacial	3	Diámetro de 0.95 mm. Largo 70 mm	Aluminio
15.	Rodamientos	6	No. 6002	Acero
16.	Bujes	6	Diámetro de 16mm	Bronce

Tabla 4.2 Elementos principales

4.4.2 Electrónica

La parte electrónica está compuesta por los actuadores (motores de C.D), etapas de potencia (transistores), los circuitos integrados (microcontroladores), los sensores (potenciómetros lineales industriales), fuentes de alimentación, tarjetas electrónicas, entre los más importantes.

4.4.2.1 Actuadores

Su misión principal es generar el movimiento, de los dispositivos a utilizar, según las órdenes dadas por la unidad de control. Se clasifican en tres grandes grupos, según la energía que lleguen a utilizar:

- Neumáticos
- Hidráulicos
- Eléctricos

Se descarta la posibilidad de utilizar actuadores neumáticos e hidráulicos, debido a que son de mayor tamaño, por consiguiente pesados en comparación con los actuadores eléctricos, además que su costo es muy elevado, no son muy precisos, su control es más complejo y requieren un mantenimiento constante.

4.4.2.2 Actuadores eléctricos

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en los diferentes dispositivos industriales actuales, así como el la robótica. Existen varios tipos de motores, de entre los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos, que a su vez se subdividen en otros como se enuncia a continuación.

1. Motores de corriente directa que a su vez se dividen en:
 - I. Servomotor.
 - II. Motor a pasos.
 - III. Motorreductores

4.4.2.3 Selección de los motores

En los motores de corriente directa existen motores con escobillas, sin escobillas, motores a pasos, servomotores y motorreductores. Se descarta la posibilidad de utilizar motores a pasos debido a que entre los inconvenientes que presentan, se puede citar que su funcionamiento a bajas velocidades no es suave, existe el peligro de pérdida de posición por trabajar en bucle abierto, tienden a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas y presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar, su potencia nominal es baja y su precisión llega hasta 1.8°.

Se emplean para el posicionado de ejes que no precisan grandes potencias (giro de pinza) o para robots pequeños (educacionales). Por tener una potencia nominal baja no son adecuados para implementarlos en el robot manipulador paralelo delta híbrido.

Por otro lado los servomotores son un tipo especial de motor de c.c. que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su intervalo de operación.

Para el caso de los motorreductores son una variante de los motores de CD, ya que la única diferencia es que cuentan con un juego de engranes acoplado en la flecha de salida del motor, o de un engrane de sinfín, produciendo así una disminución considerable de la velocidad, y el aumento del par del motor, los motorreductores pueden ser con escobillas o sin escobillas. Y la potencia de estos depende del embobinado que tengan.

4.4.3 Etapas de potencia

Los dispositivos semiconductores de potencia son los elementos más importantes de un sistema electrónico para accionar a los actuadores. El transistor está compuesto por tres partes colector emisor y base, es un dispositivo electrónico semiconductor se utilizará para este trabajo de tesis como conmutador on-off, teniendo así que la corriente que circula por el "colector" es función amplificada de la que se inyecta en la "base", pero naturalmente, el transistor sólo gradúa la corriente que circula a su través, desde una fuente de corriente continua conectada al "emisor" y circula hacia la carga por el "colector", según el tipo de circuito que se utilice.

El factor de amplificación logrado entre corriente de base y corriente de colector, se denomina ganancia del transistor, otros parámetros a tener en cuenta y que son particulares de cada tipo de transistor son: Tensiones de ruptura de Colector-Emisor, Base-Emisor, Colector-Base y potencia máxima, disipación de calor, frecuencia de trabajo, y varias tablas donde se grafican los distintos parámetros como son, corriente de base, tensión Colector-Emisor, tensión Base-Emisor, corriente de Emisor, etc. Los tres tipos de esquemas básicos para utilización analógica de los transistores son: emisor común, colector común y base común. Cuando se selecciona un transistor hay que tomar en cuenta el tipo de encapsulado, así como el esquema de identificación de las terminales. También hay que conocer una serie de valores máximos de tensiones, corrientes y potencias que no se deben de sobrepasar para no destruir el dispositivo.

El parámetro de la potencia disipada por el transistor es especialmente crítico con la temperatura, de modo que esta potencia disminuye a medida que crece el valor de la temperatura, siendo a veces necesario la instalación de un ventilador o un disipador de calor. La zona de funcionamiento del transistor que se utilizará es la de saturación debido a que en esta zona el transistor es utilizado para aplicaciones de conmutación (potencia, circuitos digitales), y lo podemos considerar como un cortocircuito entre el colector y el emisor.

Para lograr el control de los motorreductores se utilizarán a los transistores en configuración denominada puente H, la cual es una configuración que permite controlar el sentido de giro del motor, pero no la velocidad por lo que se diseñara una etapa de potencia en configuración en puente H, la cual contara con tres pines principalmente que serán el pin de activación de la etapa, el pin de invertir giro, y el pin de señal de Modulación por Ancho de Pulso (PWM).

La Modulación por Ancho de Pulso (PWM) para el motorreductor de C.D está basada en el hecho de que si se recorta la señal C.D de alimentación en forma de una onda cuadrada, la energía que recibe el motor disminuirá de manera proporcional a la relación entre la parte alta (habilita corriente) y baja (cero corriente) del ciclo de la onda cuadrada. Controlando esta relación se logra variar la velocidad del motorreductor de una manera bastante aceptable.

4.4.4 Sensores

Para medir el desplazamiento angular de las juntas rotacionales se tiene que utilizar sensores para poder determinar la posición de estas en cada instante existen los sensores denominados como encoders, que son los más indicados para este trabajo pero debido a sus altos costos se utilizan potenciómetros lineales.

4.4.4.1 Potenciómetro de Precisión (lineales)

Básicamente, los potenciómetros consisten en una resistencia provista de un contacto móvil. El movimiento del contacto puede ser de traslación, rotación, o una combinación de los dos. El elemento resistente se excita con voltaje de C.D o de C.A, y el voltaje de salida es (idealmente) función lineal del movimiento de entrada.

Existen dos restricciones en todos los sensores resistivos.

- La primera restricción es que cada uno de ellos necesita una alimentación eléctrica para dar una señal de salida, puesto que un cambio en la resistencia no es una señal en sí.
- La segunda restricción es que, esa alimentación, cuya magnitud afecta a la señal de salida, es limitada por el mismo calentamiento del sensor, ya que un cambio en temperatura también cambia el valor de resistencia.

4.4.5 Selección del microcontrolador

Se denomina microcontrolador a un dispositivo programable capaz de realizar diferentes actividades que requieran del procesamiento de datos digitales, del control y comunicación digital de diferentes dispositivos

Los microcontroladores poseen una memoria interna que almacena dos tipos de datos; las instrucciones, que corresponden al programa que se ejecuta, y los registros, es decir, los datos que el usuario maneja, así como registros especiales para el control de las diferentes funciones del microcontrolador. Los microcontroladores se programan en lenguaje ensamblador principalmente y cada microcontrolador varía su conjunto de instrucciones de acuerdo a su fabricante y modelo. De acuerdo al número de instrucciones que el microcontrolador maneja se le denomina de arquitectura RISC (reducido) o CISC (complejo).

Los microcontroladores poseen principalmente una ALU (Unidad Lógica Aritmética), memoria del programa, memoria de registros, y pines I/O (entrada I/O salida). La ALU es la encargada de procesar los datos dependiendo de las instrucciones que se ejecuten (ADD, OR, AND), mientras que los pines son los que se encargan de comunicar al microcontrolador con el medio externo.

La función de los pines puede ser de transmisión o recepción de datos, alimentación de la corriente para el funcionamiento de este o pines de control específico.

Para este trabajo se utiliza el microcontrolador denominado PIC 16F877. Este microcontrolador es fabricado por MicroChip familia a la cual se le denomina PIC. El modelo 16F877 posee varias características que hacen a este microcontrolador un dispositivo muy versátil, eficiente, económico y práctico para ser empleado en la aplicación que posteriormente será detallada.

Características más importantes del PIC:

- Soporta modo de comunicación serial, posee dos pines para ello.
- Se puede ampliar la memoria para datos y programa.
- Memoria reprogramable: La memoria en este PIC es la que se denomina FLASH; este tipo de memoria se puede borrar electrónicamente (esto corresponde a la “F” en el modelo).
- Set de instrucciones reducido (tipo RISC), pero con las instrucciones necesarias para facilitar su manejo.
- Tiene dos salidas de señal de PWM
- Cuenta con ocho pines para señales analógicas-digitales

4.4.6 Aplicación

Se utilizará el microcontrolador denominado PIC 16F877, para diseñar un controlador que permita establecer una comunicación entre una PC, el microcontrolador y las etapas de potencia. Es decir por medio de una PC, se mandaran datos a los microcontroladores, los cuales recibirán la información por medio de la comunicación serial conocida como RS-232.

El microcontrolador tendrá conectado a sus pines las seis etapas de potencia que accionan a los seis motores que componen al robot manipulador paralelo delta híbrido, como también tendrá conectados a los potenciómetros lineales, que son los encargados de leer cada una de las posiciones angulares de las seis juntas rotacionales, por medio del convertidor analógico digital que el PIC posee internamente.

Así el usuario le dará una instrucción por medio de la PC, para que al robot manipulador paralelo delta híbrido realice una tarea, con lo cual el microcontrolador recibirá la orden, la interpretara accionará las etapas de potencias adecuadas, y comenzara a censar por medio de los potenciómetro lineales, el movimiento angular de las juntas rotacionales, cuando los valores de los potenciómetros lleguen a la posición deseada, el microcontrolador mandara las señales correspondientes a las etapas de potencia para que estas dejen de trabajar, cumpliendo con la tarea requerida.

4.5 Diseño a detalle

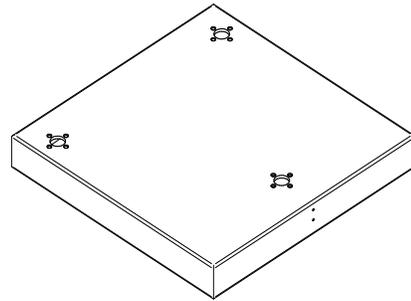
Por necesidad se debe de diseñar al robot manipulador paralelo delta híbrido elemento por elemento, es vital reconocer la función y el desempeño de cada una de las partes, por lo tanto su diseño, dependen de muchas otras piezas interrelacionadas, dentro del robot manipulador paralelo delta híbrido. Comenzaremos con la descripción de las partes que componen a este mecanismo.

4.6 Diseño Mecánico

A continuación se describen cada una de las partes que componen al robot manipulador paralelo delta híbrido.

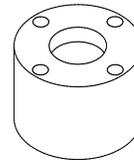
Base principal cuadrada

Es la base de todo el sistema, por la parte de abajo se colocan los actuadores junto con los soportes de balero y las flechas para eslabones planos, que serán los encargados de mover a los eslabones del robot manipulador paralelo delta plano. El material de la base es placa doblada de acero de 1/8 de pulgada de espesor. Ver plano 1 del apéndice C



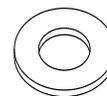
Soporte para balero de eslabón D_P

En la parte interna de este soporte se colocan dos rodamientos, los cuales a su vez sirven para darle estabilidad a la flecha que conecta al actuador con el primer eslabón del robot manipulador paralelo delta plano.. Acero 4011. Ver plano 2 del apéndice C



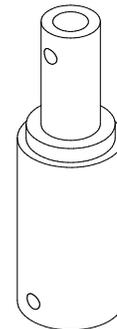
Rondana separación de rodamientos

Esta rondana sirva para separar a los rodamientos. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 3 del apéndice C



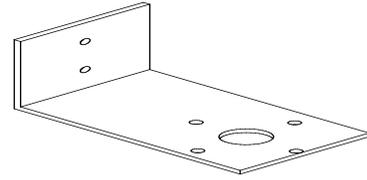
Flecha para eslabón D_P

Esta flecha sirve para fijar al actuador por la parte inferior la cual lleva un orificio para que embone la flecha del motor así como un opresor para fijar dicha flecha, lleva un escalón en la parte superior para fijar al eslabón primario del robot delta plano y en la parte superior, en el orificio se conecta al potenciómetro lineal. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 4 del apéndice C



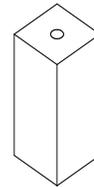
Base soporte de actuador delta plano

Esta base sirve para fijar al actuador a la base principal cuadrada, para evitar que el actuador gire y así lograr el movimiento del eslabón primario. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 5 del apéndice C



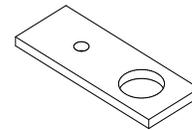
Cuadrado soporte de potenciómetro

Este cuadrado sirve para sujetar la placa que sostiene al potenciómetro. Se fija en la base principal cuadrada. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 6 del apéndice C



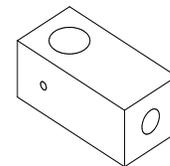
Placa soporte de potenciómetro.

Esta placa sirve para sujetar al potenciómetro y así evitar que gire. Se fija en la parte superior del cuadrado soporte de potenciómetro. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 7 del apéndice C



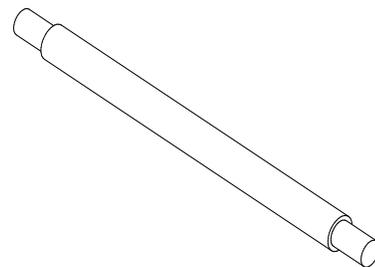
Cuadrado_A1i de eslabón D_P

Esta parte es el inicio del eslabón primario del robot paralelo delta plano, se conecta a la flecha para eslabón D_P y se fija por medio de un perno. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 8 del apéndice C



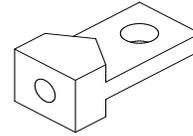
Barra eslabón primario D_P

Esta barra se conecta a presión en la pieza denominada cuadrado_A1i del eslabón D_P y al cuadrado_A1F Material aluminio 6061 T6. Ver plano 9 del apéndice C



Cuadrado_A1f de eslabón D_P

Es el final del eslabón primario se conecta a presión a la barra de eslabón primario. En la parte del medio esta rebajada por ambos lados para que se conecte al cuadrado_B1i y gire. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 10 del apéndice C



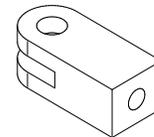
Perno de unión eslabón primario y secundario

Esta pieza sirve para unir al cuadrado_A1f y al cuadrado_B1i, obteniendo un movimiento rotacional. Material Acero 4011. Ver plano 11 del apéndice C



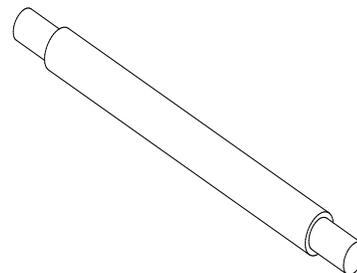
Cuadrado_B1i de eslabón D_P

Esta parte es el inicio del eslabón secundario del robot paralelo delta plano, se conecta a la barra eslabón secundario D_P y al cuadrado_A1F. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 12 del apéndice C



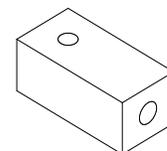
Barra eslabón secundario D_P

Esta barra se conecta a presión en la pieza denominada cuadrado_B1i y al cuadrado_B1F del eslabón D_P. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 13 del apéndice C



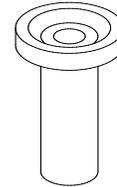
Cuadrado_B1f de eslabón D_P

Es el final del eslabón secundario se conecta a presión a la barra de eslabón secundario, en la parte superior lleva un orificio el cual lleva rosca M5. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 14 del apéndice C



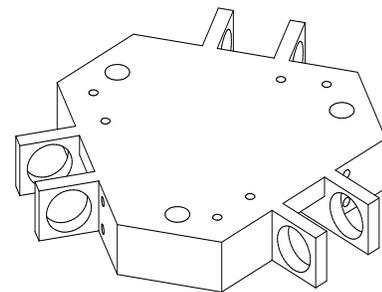
Perno de unión eslabón secundario y base hexagonal móvil 1

Esta pieza sirve para unir al cuadrado_Bif y a la base hexagonal móvil 1 por medio de un tornillo, obteniendo un movimiento rotacional. Material Acero 4011. Ver plano 15 del apéndice C



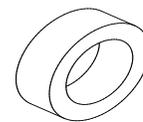
Base hexagonal móvil 1

En esta pieza sirve de unión entre los eslabones del robot paralelo delta plano y del robot paralelo delta espacial. M5. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 16 del apéndice C



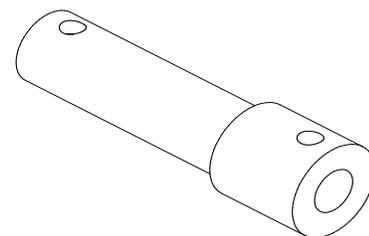
Bujes de latón

Estos bujes permiten que disminuya la fricción entre la flecha que mueve al eslabón primario del robot paralelo delta espacial y los orificios donde embonan. Material latón. Ver plano 17 del apéndice C



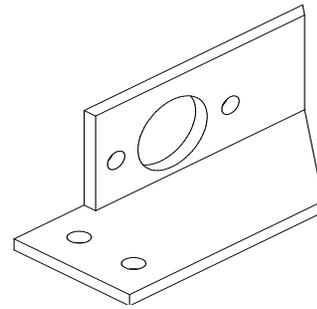
Flecha para eslabón D_E

Esta flecha sirve para fijar al actuador por la parte lateral derecha la cual lleva un orificio para que embona la flecha del motor así como un opresor para fijar dicha flecha, en la parte media se fija al eslabón primario del robot manipulador paralelo delta espacial y en la parte lateral izquierda en el orificio se conecta al potenciómetro lineal, el cual también se fija con un opresor. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 18 del apéndice C



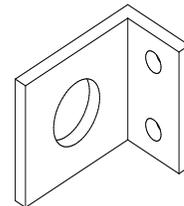
Base soporte de actuador delta espacial

Esta base sirve para fijar al actuador a la base hexagonal móvil 1, para evitar que el actuador gire y así lograr el movimiento del eslabón primario del robot paralelo delta espacial. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 19 del apéndice C



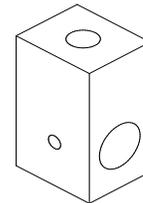
Base en ángulo soporte de potenciómetros

Esta pieza va atornillada a la base hexagonal móvil 1, sirve para sostener a los potenciómetros que están acoplados a las flechas para eslabón D_E. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 20 del apéndice C



Cuadrado_C1i de eslabón D_E

Esta parte es el inicio del eslabón primario del robot paralelo delta espacial, se conecta a la barra eslabón primario D_E. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 21 del apéndice C



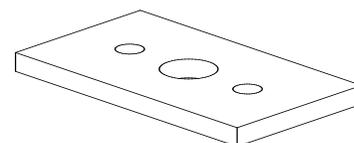
Barra eslabón primario D_E

Esta barra se conecta a presión en la pieza denominada cuadrado_C1i del eslabón D_E y a la placa que soporta las juntas universales. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 22 del apéndice C



Placa soporte de juntas universales

Esta pieza sirve para conectar a presión a la barra de eslabón primario, D_E y a las juntas universales que componen al robot manipulador paralelo delta espacial. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 23 del apéndice C



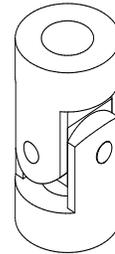
Cilindro unió para juntas universales

Esta pieza sirve para poder acoplar al nudo universal y la barra de eslabón secundario, cada junta universal sólo lleva una pieza de estas. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 24 del apéndice C



Juntas universales

Las juntas universales se sustituyeron por nudos universales de ¼ ”de la marca truper, a los cuales se le realizo las modificaciones necesarias para que funcionaran como juntas universales y se adaptaron al robot manipulador paralelo delta híbrido.



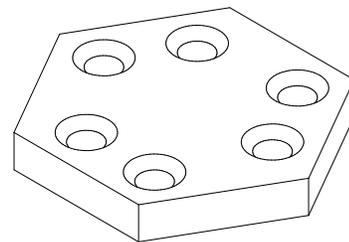
Barra eslabón Secundario D_E

Esta barra está conectada en sus dos extremos por juntas universales. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 25 del apéndice C



Base hexagonal móvil 2

En esta pieza sirve de unión entre los eslabones secundarios del robot paralelo delta espacial y las juntas universales, es la base móvil de salida del mecanismo. Material aluminio 6061 T6. Ver plano 26 del apéndice C



En la figura 4.3 se muestra al robot manipulador paralelo delta híbrido diseñado en el software Solid Edge, el cual está compuesto por las piezas antes descritas, así como también se muestra una fotografía de cómo quedó el prototipo final.

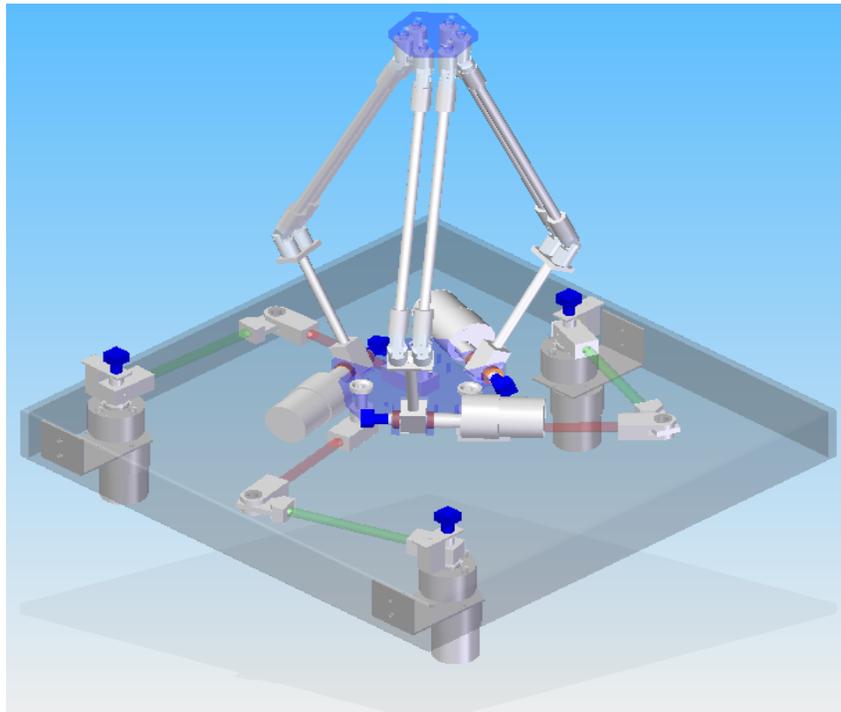


Figura 4.3 (a)

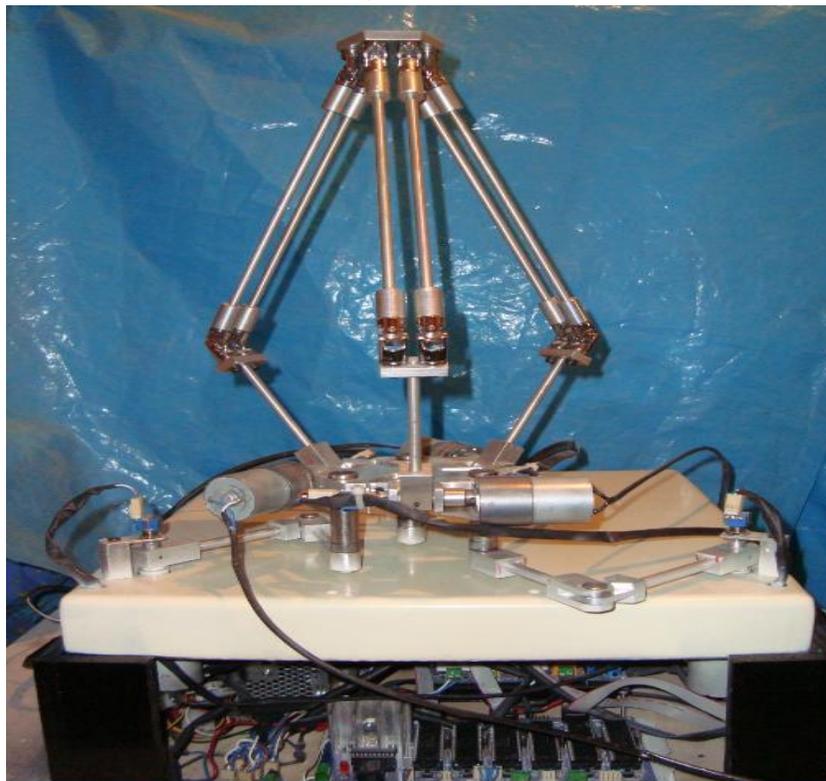


Figura 4.3 (b)

Figura 4.3 Estructura del robot manipulador paralelo delta híbrido: (a) diseñada en Solid Edge y (b) construida.

4.7 Diseño de la parte electrónica

4.7.1 Dispositivos electrónicos

Una vez definidos los sistemas mecánicos se especificaran los componentes que permiten realizar los movimientos de dichas piezas. Para el funcionamiento del robot manipulador paralelo delta híbrido se necesita una PC, esto con el fin de realizar un ambiente gráfico el cual permita la interfaz entre el usuario y el manipulador mediante un programa amigable al cual el usuario pueda darle instrucciones de una manera sencilla.

4.7.2 La computadora personal

Una computadora es un sistema digital con tecnología de microelectrónica capaz de procesar datos a partir de un grupo de instrucciones denominado programa. La estructura básica de una computadora incluye microprocesador (CPU), memoria y dispositivos de entrada/salida (E/S).

Por medio de la PC se podrá realizar la comunicación entre el robot manipulador paralelo delta híbrido y el usuario. Para lo cual se realizará un programa en el software denominado Visual Basic, el cual permite realizar la comunicación serial RS-232, por lo que será posible entablar una comunicación entre el microcontrolador y la computadora, se elige este software debido a que permite realizar un interfaz gráfica de usuario que lo hace muy fácil de manejar.

4.7.3 Comunicación RS-232

Se utilizará la comunicación serial para transmitir datos en formato ASCII. Para realizar la comunicación se utilizan 3 líneas de transmisión: (1) Tierra (o referencia), (2) Transmitir, (3) Recibir.

Las características más importantes de la comunicación serial son la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, y la paridad. Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las características sean iguales. El puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez.

Velocidad de transmisión (*baud rate*): Indica el número de bits por segundo que se transfieren, y se mide en baudios, el programa en Visual se configura a 9600[bits/s].

Bits de datos: Se refiere a la cantidad de bits en la transmisión. Se utilizará el ASCII extendido que es de 0 a 255, lo que utiliza 8 bits. Un paquete se refiere a una transferencia de un byte.

Bits de parada: Usado para indicar el fin de la comunicación de un sólo paquete. Los bits de parada no sólo indican el fin de la transmisión sino además dan un margen de tolerancia para esa las diferencias de de los relojes.

Paridad: Es una forma sencilla de verificar si hay errores en la transmisión serial. Existen cuatro tipos de paridad: par, impar, marcada y espaciada. La opción de no usar paridad alguna también está disponible.

4.7.4 Limitaciones de la comunicación RS-232

La RS-232 C tiene una limitación de distancia máxima de 15 metros. La norma RS-232 especifica que la capacidad en la línea no debe superar los 2.500 picofaradios. Los cables que se suelen utilizar tienen una capacidad de 120 a 150 picofaradios por metro de longitud

Una segunda limitación es su método de toma de tierra o retorno común. Este método, llamado transmisión no balanceada, si hay diferencia de potencial entre los dos extremos del cable, se reduce la región de transición entre marca y espacio. Cuando ocurre esto, existe la posibilidad que no se interpreten bien los distintos estados de la señal. Otra dificultad es su máximo de 20 Kb/s para la velocidad de transmisión.

4.8 Utilización del microcontrolador PIC16F877.

Se utiliza el microcontrolador PIC 16F877, el cual será el encargado de poder recibir las instrucciones de la PC. Por medio de la comunicación serial RS-232, para lo cual dicha comunicación estará entablada en código ASCII.

Se configura al microcontrolador para que pueda operar por medio de la interrupción por recepción de datos (RS-232). Se utilizará la comunicación serie asíncrona para lo cual se configura al modulo USART, llamado SCI (Serial Communications Interface), y que funcionará en el modo Asíncrono (Full Duplex, bidireccional).

El microcontrolador PIC 16F877 posee un convertidor A/D de 10 bits de resolución y 8 canales. El cual se configurara para poderlo utilizar. Así como el Modo de modulación de ancho de pulso (PWM).

Se utilizará un microcontrolador para cada uno de los motorreductores, con lo cual cada microcontrolador tendrá conectado un potenciómetro lineal para censar las posiciones de la junta rotacional, activará una etapa de potencia que accionará al motorreductor y podrá recibir datos por medio de la comunicación serial RS-232.

Todos los microcontroladores estarán conectados a un circuito integrado cuya función es convertir las señales que llegan de la PC en TTL, para que el microcontrolador pueda leer y recibir dichas señales. Además que conectando de esta forma a los microcontroladores les llegará la información al mismo tiempo, con lo cual cada uno de microcontroladores tomará la información que necesite desechando la información que le sea basura.

Esto es con el fin de que el tiempo de respuesta entre la PC y el microcontrolador sea lo más rápida, evitando así perder tiempo con alguna otra forma de comunicación entre los micros como la comunicación I^2C . Por consiguiente la programación se simplifica un poco.

Del diagrama de bloques de la figura 4.2, se observa que del microcontrolador uno al microcontrolador seis tendrá las mismas características, por lo que su programación será semejante. Cada uno de estos microcontroladores manda tres señales a las etapas de potencia, la señal P_Ac, que es la que activa a la etapa de potencia mandando un cero lógico, la señal P_Gi invierte el giro del motor dependiendo si el valor que le llega es uno o cero, y por último la señal PWM, que como su nombre lo indica es la señal que manda los pulso para variar la velocidad del motor.

Cada microcontrolador censa un potenciómetro lineal, por medio del convertidor analógico digital, dependiendo del valor que este recibe mandará una señal de PWM, que hará que el motor se mueva. Se utiliza al microcontrolador PIC16F877, debido a su capacidad de memoria, cuenta con un convertidor A/D de 10 bits de resolución, debido a que si se utiliza otro microcontrolador más pequeño es posible tener que agregarle una memoria adicional, con lo cual se incrementan los costos y además también la programación.

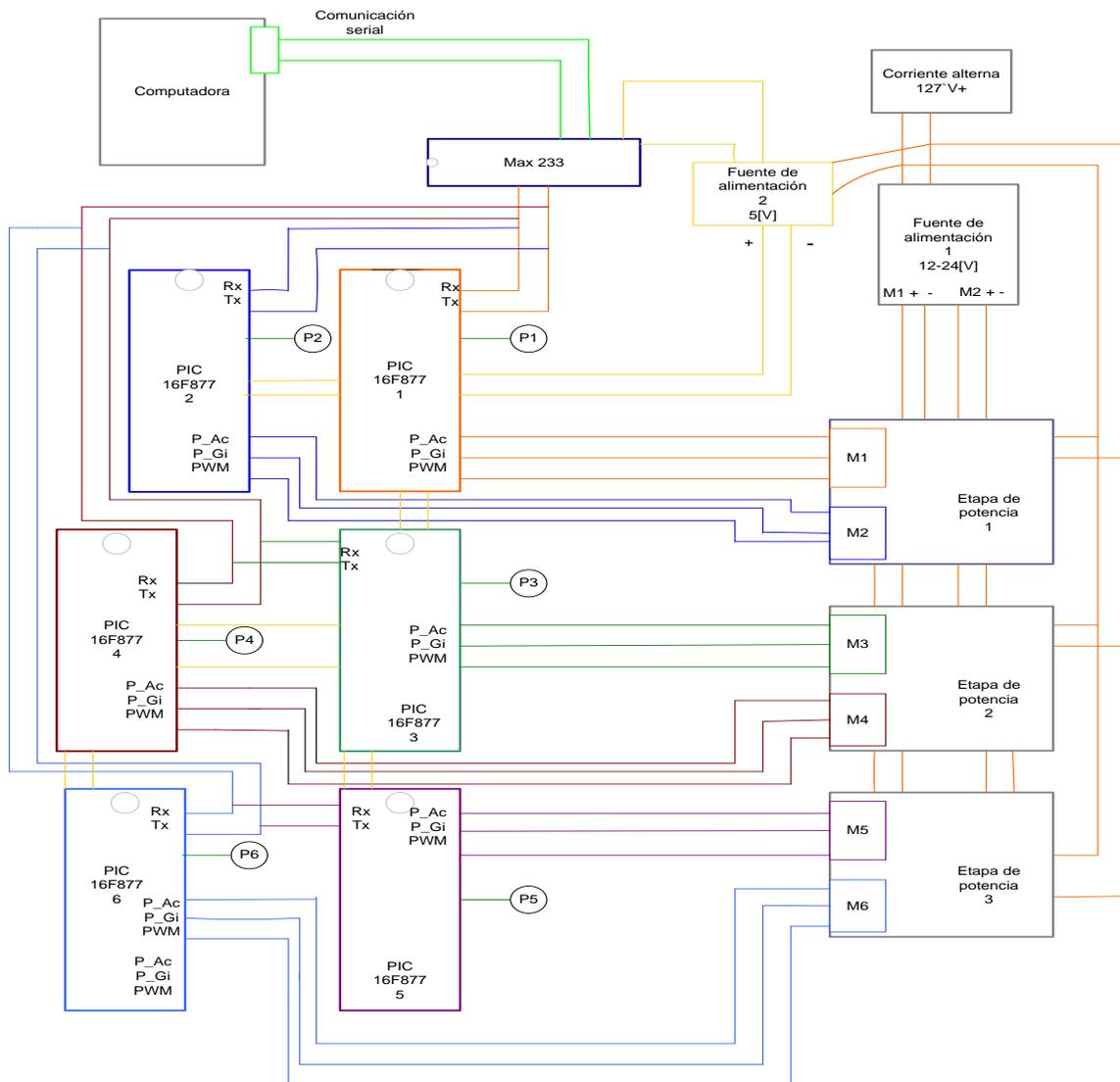


Figura 4.4 Diagrama de bloques implementación de los microcontroladores.

4.9 Actuadores.

Las actuadores eléctricos utilizados son seis motorreductores, los cuales tienen las mismas características. Las especificaciones de los seis motores utilizados se detallan en la tabla 4.3.

Motorreductor con escobillas de imán permanente	Especificaciones.
Voltaje	De 6[V] a 12[V]
Corriente	2.5 a 5[A] Como máximo.
Potencia	15 a 60[Watts]
Dimensiones	Cilindro de diámetro 37[mm.] y largo 100[mm.]
Torque	9 a 18 Kg-cm
Velocidad de salida.	41 a 80[rpm]

Tabla 4.3 Motorreductores

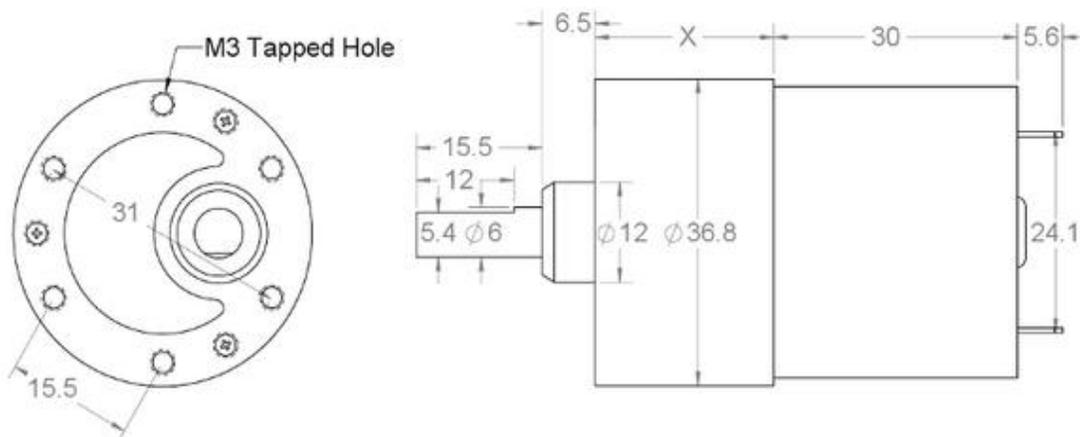


Figura 4.5 Manorreductor de C.D

4.9.1 Etapas de potencia para los actuadores eléctricos.

Los motorreductores tienen una potencia de 15 a 60 [Watts], el voltaje al que pueden trabajar es de 6[V] a 12[V], y a una corriente máxima de 5[A], con lo cual partiendo de estas características se selecciona la etapa que mejor cubra las necesidades.

Se desea mandar tres señales a la etapa de potencia para activar el motorreductor, una señal de activar motor, una de inversión de giro y por último la señal de PWM.

Se adquirieron tres etapas de potencia para los motorreductores, las cuales tienen las siguientes características:

- Pueden trabajar con un voltaje mínimo de 3[V] hasta un voltaje máximo de 30[V].
 - Soportan una corriente máxima de 10[A].
 - Cuentan con un sensor de corriente el cual al calentarse los transistores comienzan los ventiladores que trae la etapa a funcionar, para reducir el calentamiento de la tarjeta.
 - Cada tarjeta puede controlar dos motores.
 - Cuentan con un botón para el reset en caso de falla.
-
- Para activar a los transistores la señal que manda el microcontrolador primero debe de pasar por un dispositivo electrónico. Para verificar si la información que se le manda es la correcta y activar al motor de una forma segura.
 - Cuenta con bornes en los cuales se debe de conectar el voltaje para que trabajen los motores.
 - Cuenta con su propia fuente de 5[V], para activar a los ventiladores y a los demás integrados.
 - Debe de alimentarse a la toma corriente de 127[V] de CA.
 - Cuenta con 10 pines, los cuales están distribuidos de la siguiente forma

Pin1 M1	Pin 2 M1	Pin 3 M1	Pin 4 M1	Pin5 M2	Pin 6 M2	Pin 7 M2	Pin 8 M2	Pin 9	Pin 10
Señal de error	Activar Motor	Inversión de giro	Señal de PWM	Señal de error	Activar Motor	Inversión de giro	Señal de PWM	GND	VCC

Tabla 4.4 Distribución de salidas de la tarjeta.

Por lo que para el funcionamiento de la tarjeta se requiere que el microcontrolador le mande 3 señales las cuales son:

1. Señal de activar motor la cual sólo se activa cuando el micro le manda un cero lógico.
2. Señal de invertir giro, la cual responde con un 0 giro en sentido horario, con un 1 el giro es en sentido antihorario.
3. Señal de PWM.

El microcontrolador también debe de estar configurado en un pin como entrada debido a que en caso de que la tarjeta llegara a tener una falla esta manda una señal de un 1 lógico por medio del pin 1 y el pin 5 de la tarjeta, con lo cual el microcontrolador podrá mandar una señal a la computadora para que el operario pueda percatarse de alguna falla.

Se deben de conectar el pin 9 y el pin 10 a Gnd y a Vcc, respectivamente para que pueda trabajar la tarjeta, que es el mismo voltaje al que son conectados los microcontroladores que en este caso son 5[V].

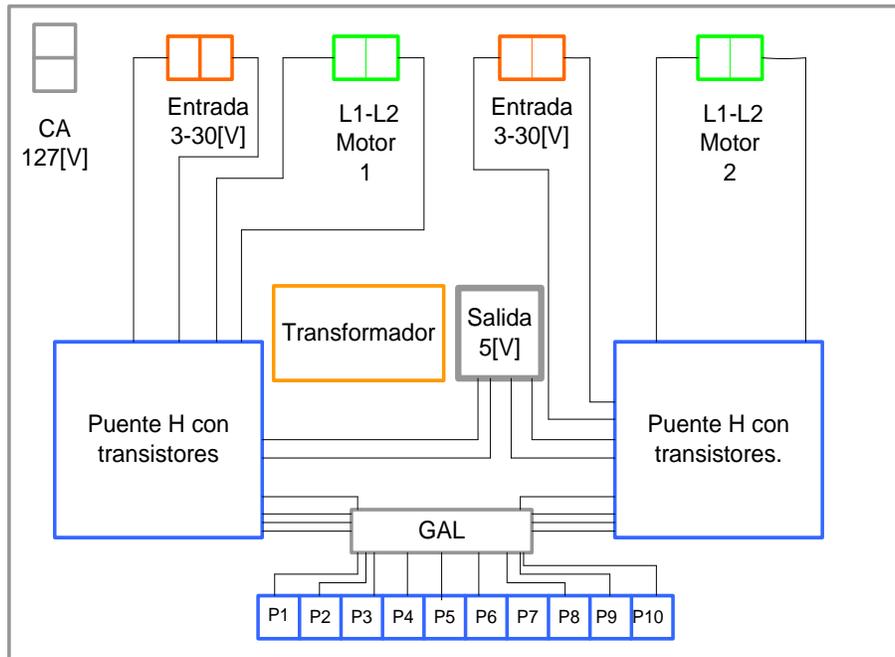


Figura 4.6 Diagrama de bloques de la etapa de potencia.

4.10 Fuentes de alimentación corriente directa.

4.10.1 Fuente conmutadas

Debido al amperaje que se maneja se utilizarán fuentes de PC, las cuales son fuentes que pueden suministrar un amperaje alto y es muy difícil que se dañen debido a que son fuentes conmutadas. Se utilizarán dos debido a que una será la encargada de suministrar el voltaje de operación de los motores, y la otra se encargara de suministrar el voltaje a los microcontroladores. Se realiza una breve descripción de cómo es que funciona una fuente conmutada.

La fuente de alimentación conmutada es más compleja que las convencionales, pero consiguen unos rendimientos mucho mejores, de un 80%, frente al 40% o 50% de las otras. Esto, unido al progresivo avance de la integración de circuitos, ha conseguido que se utilicen en multitud de equipos electrónicos de consumo. Las fuentes conmutadas son de circuitos relativamente complejos, pero se puede siempre diferenciar cuatro bloques constructivos básicos:

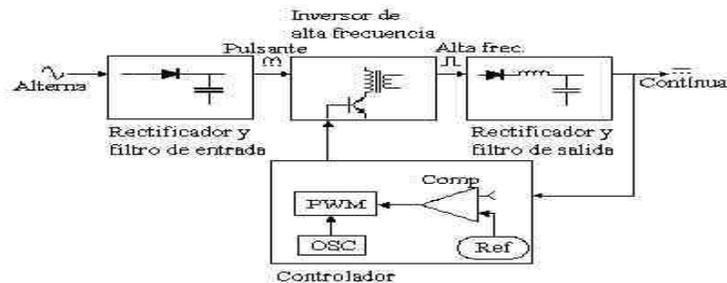


Figura 4.7 Diagrama eléctrico a bloques la fuente conmutada.

En el primer bloque se rectifica y se filtra la tensión alterna de entrada convirtiéndola en una continua pulsante. El segundo bloque se encarga de convertir esa continua en una onda cuadrada de alta frecuencia (10 a 200 kHz.), La cual es aplicada a una bobina o al primario de un transformador. Luego el segundo bloque rectifica y filtra la salida de alta frecuencia del bloque anterior, entregando así una continua pura.

El cuarto bloque se encarga de comandar la oscilación del segundo bloque. Este bloque consiste de un oscilador de frecuencia fija, una tensión de referencia, un comparador de tensión y un modulador de ancho de pulso (PWM). El modulador recibe el pulso del oscilador y modifica su ciclo de trabajo según la señal del comparador, el cual coteja la tensión continua de salida del tercer bloque con la tensión de referencia.

4.11 Control del robot manipulador paralelo delta híbrido.

Para realizar el control del manipulador robótico se llevara a cabo mediante el controlador proporcional el cual es un controlador lineal. La acción de control es directamente proporcional al error. Para este caso se tomará el error de la posición angular. El cual convierte un comando de posición de entrada en respuesta de posición de salida.

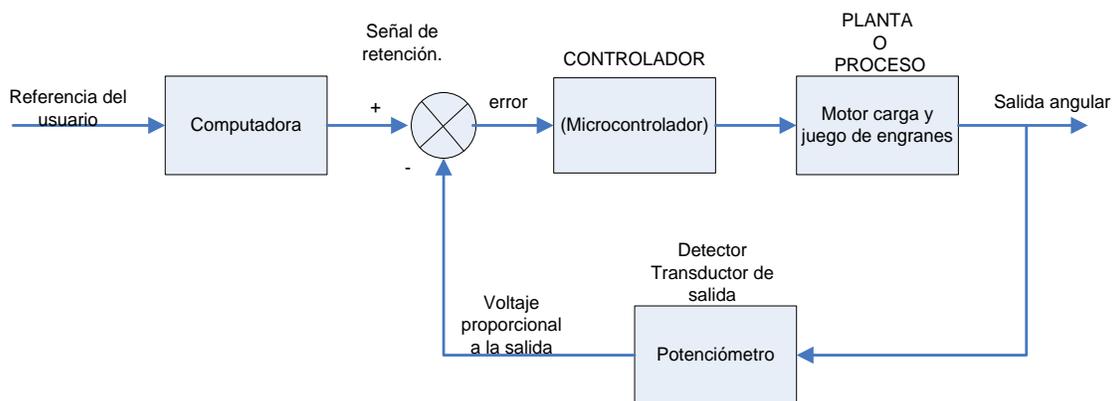


Figura 4.8 Diagrama de bloques del sistema de control

El propósito de este sistema es que cada junta rotacional que mueve a las articulaciones por medio del motor, lleguen al ángulo de entrada deseado. Para lo cual se realiza las siguientes operaciones: el desplazamiento angular de la salida es convertido en voltaje, por el potenciómetro de la trayectoria de retroalimentación.

El microcontrolador realiza la comparación entre el valor del potenciómetro y del valor de la entrada angular por medio del convertidor A/D. Dependiendo del valor que se tenga se amplifica o reduce la señal de actuación, la cual excita a la planta. El sistema opera de manera normal para llevar el error a cero. Cuando la entrada y la salida son iguales, el error será cero, y el motor no girará.

No se toman en cuenta los factores dinámicos del motor, sólo el desplazamiento angular del potenciómetro, el cual puede ser leído por el convertidor analógico del microcontrolador, realizando estas las operaciones necesarias para poder enviar un dato K, el cual es un valor que varía conforme avanza el potenciómetro y así mismo se envía una señal en PWM al motor para que este trabaje y llegue a la posición deseada.

4.12 Programación de movimientos del manipulador robótico.

Primeramente se debe de definir el problema, por lo que este programa debe de poder realizar un enlace entre la computadora y el microcontrolador, el cual a su vez estará encargado de mover los actuadores y de registrar las lecturas de los sensores, para poder llevar al robot manipulador paralelo delta híbrido a la posición que se desee.

La programación por guiado consiste en desplazar al manipulador robótico a un sistema de referencia asociado a este, de forma que alcance las configuraciones deseadas a la vez que se registran sus valores. Es decir el robot manipulador paralelo delta híbrido, actuará como un digitalizador de posiciones en un espacio cartesiano para poder realizar la simulación de movimientos. Para lo cual es necesario realizar una especie de botonera en el lenguaje de programación de Visual Basic, la cual permitirá poder mover de forma independiente cada una de las articulaciones del robot manipulador paralelo delta híbrido, y posteriormente guardara los valores.

Los movimientos que realizan para el seguimiento de una trayectoria están respaldados por los modelos que se obtuvieron de la cinemática directa e inversa, las ecuaciones obtenidas de cada junta rotacional se programan en Visual Basic, con el propósito de sólo indicar la posición inicial y final en coordenadas cartesianas. Visual Basic tomará los valores los interpretará y mandará los valores iniciales y finales que deberán de tener los potenciómetros para que lleguen a su destino.

4.12.1 Especificaciones de las entradas y salidas.

Para que la computadora se comunique con los microcontroladores será necesario utilizar la comunicación serial RS-232, con sólo las dos líneas de Rx (recepción de datos) y Tx (transmisión de datos) será posible enviarles la información a los seis microcontroladores.

Para cada microcontrolador se necesitan dos entradas, una para leer el valor del potenciómetro, y otra por donde le llega el dato de la PC, y como salidas se necesitan cuatro. Una para activar la etapa de potencia que mueve al motor, la segunda para invertir el giro del motor, la tercera para mandar la señal de PWM del motor, la cuarta para transmitir datos por comunicación serial a la PC.

4.12.2 Diseño del programa para Visual Basic.

Se debe de realizar un panel visual el cual mostrara una botonera que permite accionar a los ocho motores utilizados de forma independiente. Estos permiten mover cada motor de dos formas la primera permite que cada motor sufra un desplazamiento largo, y la segunda permite un desplazamiento fino.

Deben de existir dos botones adicionales uno de ellos denominado guardar _valores cuya función es la de enviarle a al microcontrolador la función de guardar valores de los potenciómetros del manipulador robótico una vez que este haya sido desplazado a la posición deseada. Posteriormente el otro botón denominado realizar _rutina al ser accionado tendrá la función de mandar al manipulador robótico a posición inicial y realizar la operación que se había guardado con anterioridad. Esto será para el caso de la programación por guiado.

Para la secuencia de una trayectoria se mostrará un panel en el cual se podrán escribir los valores de las posiciones iniciales y finales, para que Visual Basic interprete los valores y los mande al microcontrolador al accionar el botón denominado como mandar _ valores. Debe de existir un botón el cual al ser accionado el manipulador robótico se dirigirá a su posición de inicio denominado como home. Y otro botón que de denominado como simulación el cual mandará la señal al microcontrolador para que realice la simulación de taladrado.

4.13 Diseño y codificación del programa para el microcontrolador.

El diagrama de flujo 4.1 muestra como se deben de mover las juntas rotacionales para llegar a los eslabones a la posición de inicio. El programa principalmente checa si el valor del potenciómetro es igual al valor preestablecido que se propone como inicio, cada microcontrolador realizará los mismos pasos por lo cual el diagrama de flujo se extrapola para los cuatro microcontroladores restantes.

El Programa en Visual Basic sólo debe de mandar una letra “Q”, para que los microcontroladores la interpreten como posición de inicio. Y después debe de mandar los valores de cada articulación para que cada microcontrolador tome el valor respectivo y comience a mover a los motorreductores que se encargaran de llegar a la posición deseada.

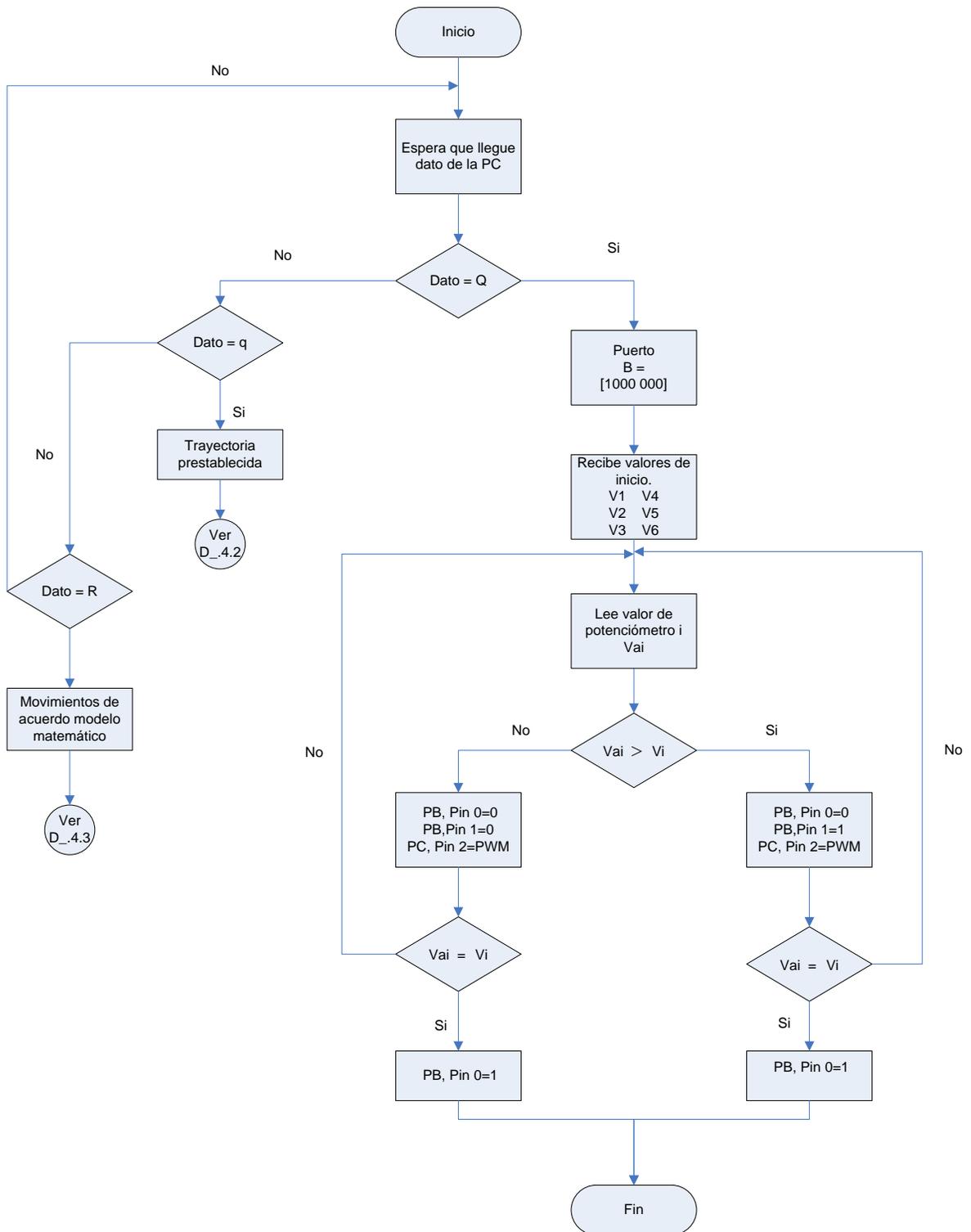


Diagrama D_4.1 Posición de inicio de los eslabones.

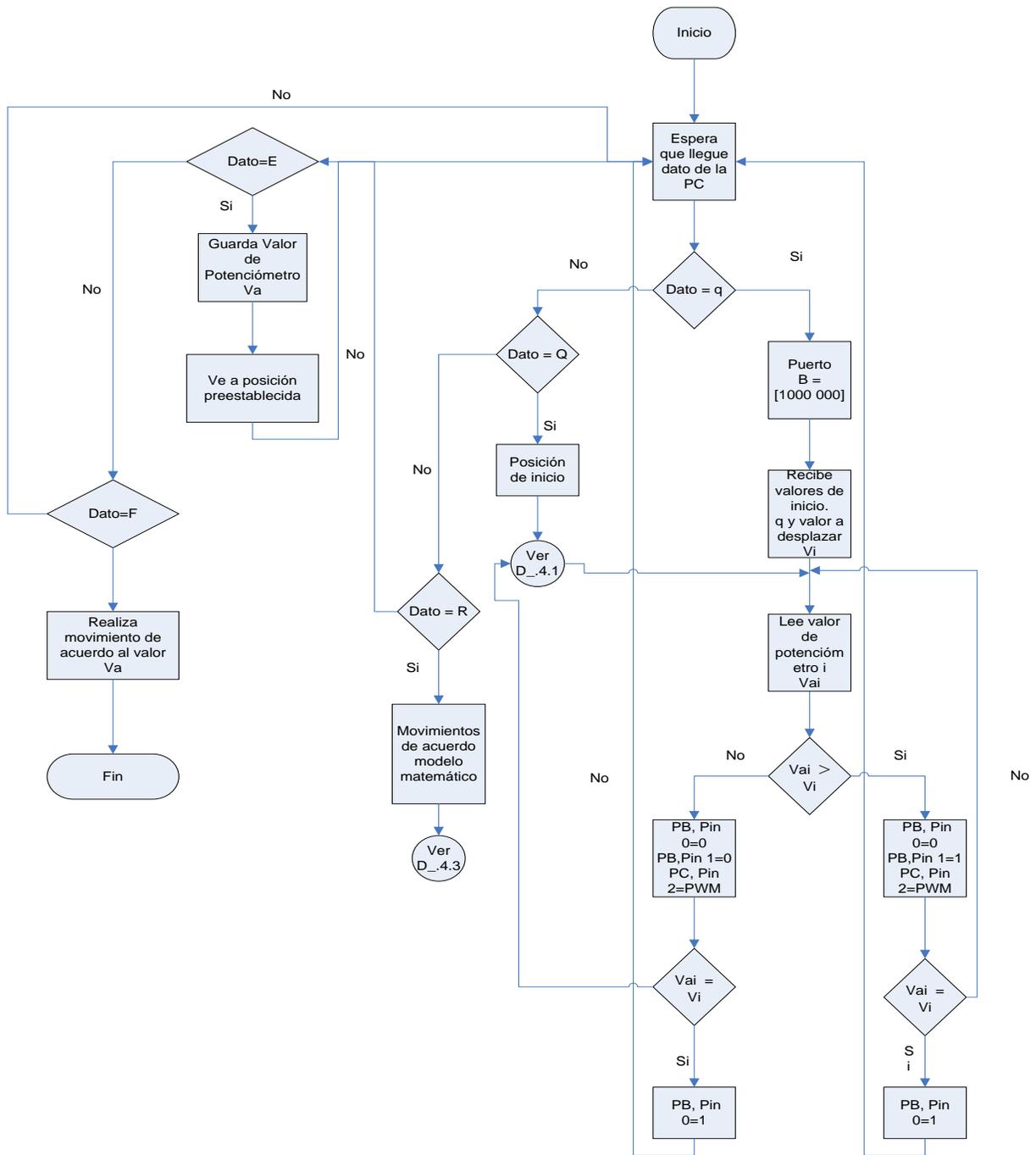


Diagrama de flujo D_4.2

Para realizar el moviendo de forma automática, con sólo darle las posiciones en coordenadas cartesianas, el programa en Visual Basic se encarga de realizar las operaciones necesarias, para posteriormente sólo mandar los valores en caracteres ASCII. Con lo cual el microcontrolador al recibir dichos valores seguirá su rutina de trabajo.

Posición por medio de coordenadas cartesianas.

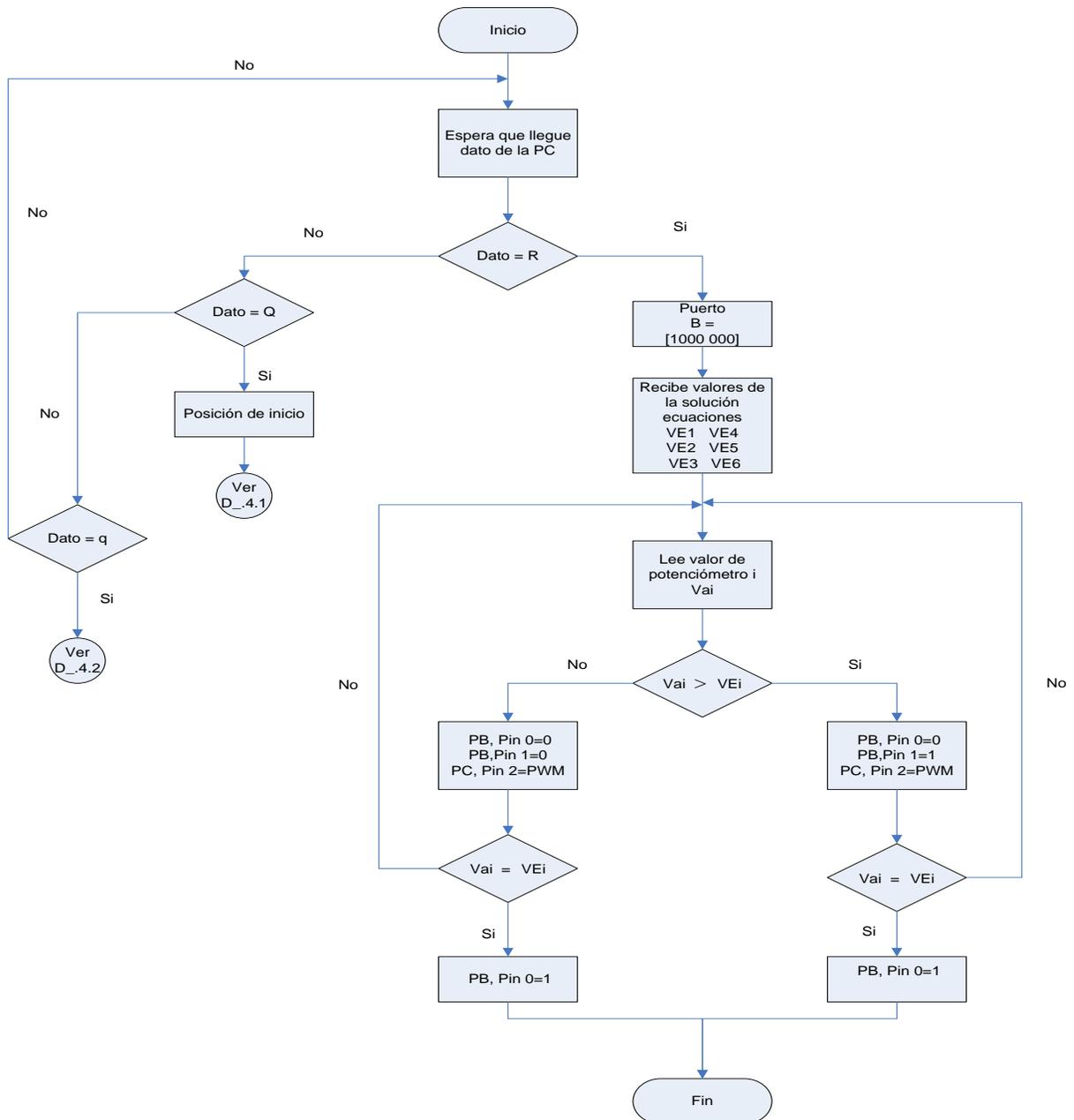


Diagrama de flujo D_4.3

El programa fue codificado de acuerdo con los diagramas de flujo D_4.1 al D_4.3, en Visual Basic y en lenguaje C, para el caso del microcontrolador. El programa para el caso de Visual Basic se probó en Windows XP. La codificación de dicho programa se puede observar en el apéndice B.

Capítulo 5.

Simulación, Pruebas y Resultados.

5.1 Simulación y Pruebas

Del análisis cinemático del robot manipulador paralelo delta híbrido, se obtuvieron las ecuaciones que describen la posición del manipulador, tomando dichas ecuaciones se realizó la simulación para cotejar los resultados obtenidos de la cinemática inversa. Se realizó un modelo virtual y se construyó un prototipo piloto del robot manipulador paralelo delta híbrido para observar el comportamiento de dicho mecanismo. En la figura 5.1 se muestra el modelo virtual final del manipulador paralelo delta híbrido realizado en Solid Edge.

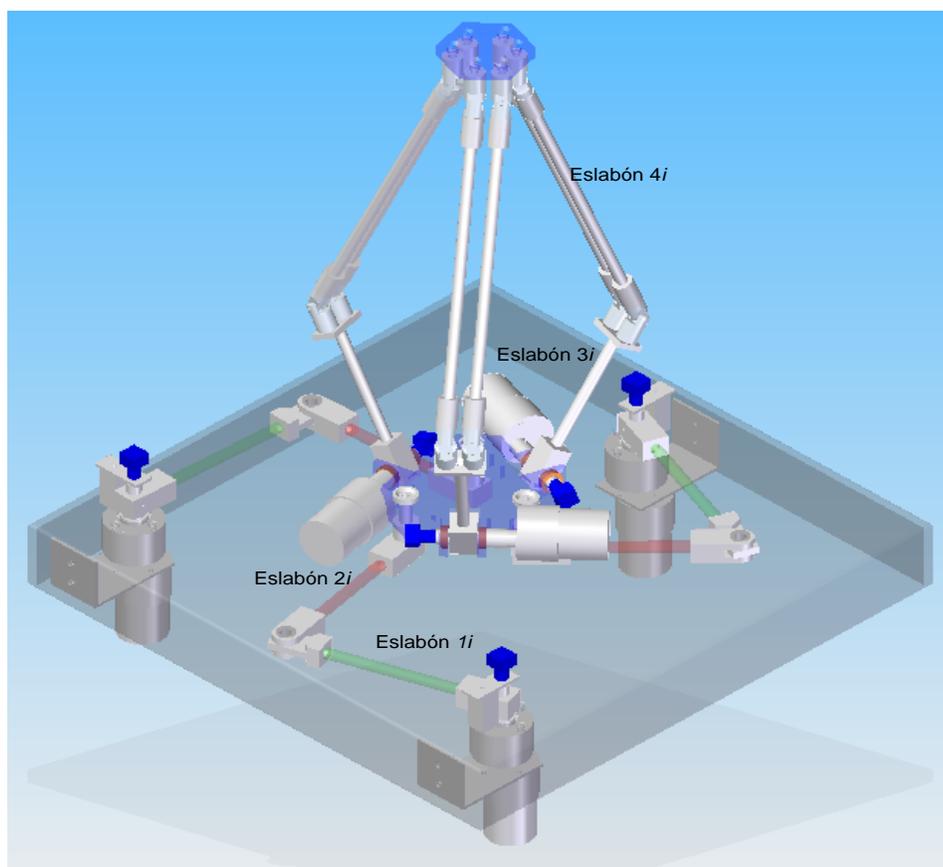


Figura 5.1 Modelo virtual del robot manipulador paralelo delta híbrido

5.2 Simulación gráfica.

El efector final del manipulador paralelo delta híbrido seguirá la trayectoria que se establezca.

Las ecuaciones de las variables articulares para el robot manipulador paralelo delta plano son:

Eslabón 1 (actuado) robot manipulador paralelo delta híbrido.

$$\begin{aligned}
 ka_{1i} = & 2a_i y_f - 2a_i y_p - 2a_i c_i S(\mu_i + \phi) + 1/2 \text{Sqrt}(16a_i^2(-y_f + y_p + c_i S(\mu_i + \phi))^2 \\
 & - 4(a_i^2 - b_i^2 + c_i^2 + 2a_i x_f + x_f^2 - 2a_i x_p - 2x_f x_p + x_p^2 + y_f^2 - 2y_f y_p + y_p^2 - \\
 & 2c_i(a_i + x_f - x_p)(C(\mu_i + \phi) - 2c_i(y_f - y_p)S(\mu_i + \phi))(a_i^2 - b_i^2 + c_i^2 - 2a_i x_f \\
 & + x_f^2 + 2a_i x_p - 2x_f x_p + x_p^2 + y_f^2 - 2y_f y_p + y_p^2 + 2c_i(a_i - x_f + x_p)C(\mu_i + \phi) \\
 & - 2c_i(y_f - y_p)S(\mu_i + \phi)))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ka_{2i} = & a_i^2 - b_i^2 + c_i^2 + 2a_i x_f + x_f^2 - 2a_i x_p - 2x_f x_p + x_p^2 + y_f^2 - 2y_f y_p + y_p^2 \\
 & - 2c_i(a_i + x_f - x_p)C(\mu_i + \phi) - 2c_i(y_f - y_p)S(\mu_i + \phi)
 \end{aligned}$$

$$\theta_{ai} = \pm 2 \text{ArcTan} \left[\frac{ka_{1i}}{ka_{2i}} \right] \quad (5.1)$$

Eslabón 2 (no actuado) robot manipulador paralelo delta híbrido.

$$\begin{aligned}
 Kb_{1i} = & (2a_i y_f - 2a_i y_p - 2a_i c_i S(\mu_i + \phi) + 1/2 \text{Sqrt}(16a_i^2(-y_f + y_p + c_i S(\mu_i + \phi))^2 \\
 & - 4(a_i^2 - b_i^2 + c_i^2 + 2a_i x_f + x_f^2 - 2a_i x_p - 2x_f x_p + x_p^2 + y_f^2 - 2y_f y_p + y_p^2 \\
 & - 2c_i(a_i + x_f - x_p)C(\mu_i + \phi) - 2c_i(y_f - y_p)S(\mu_i + \phi))(a_i^2 - b_i^2 + c_i^2 - 2a_i x_f \\
 & + x_f^2 + 2a_i x_p - 2x_f x_p + x_p^2 + y_f^2 - 2y_f y_p + y_p^2 + 2c_i(a_i - x_f + x_p)C(\mu_i + \phi) \\
 & - 2c_i(y_f - y_p)S(\mu_i + \phi)))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Kb_{2i} = & (a_i^2 - b_i^2 + c_i^2 + 2a_i x_f + x_f^2 - 2a_i x_p - 2x_f x_p + x_p^2 + y_f^2 - 2y_f y_p + y_p^2 - \\
 & 2c_i(a_i + x_f - x_p)C(\mu_i + \phi) - 2c_i(y_f - y_p)S(\mu_i + \phi)) + \\
 & \text{ArcTan} \left[\frac{(x_f - x_p - a_i C \theta_{ai} - c_i C(\mu_i + \phi))}{b_i}, \frac{y_f - y_p - a_i S \theta_{ai} - c_i S(\mu_i + \phi)}{b_i} \right]
 \end{aligned}$$

$$\theta_{bi} = \pm 2 \text{ArcCos} \left[\frac{kb_{1i}}{kb_{2i}} \right] \quad (5.2)$$

Eslabón 3i (actuado) robot manipulador paralelo delta híbrido.

$$\begin{aligned}
 Ke_{1i} = & -d_i e_i^2 + e_i^2 g_i + e_i^2 x_f C \mu_i C \phi - e_i^2 x_l C \mu_i C \phi - 2d_i e_i f_i C \theta_{2i} S \theta_{3i} + 2e_i f_i g_i C \theta_{2i} S \theta_{3i} \\
 & + 2e_i f_i x_f C \theta_{2i} C \mu_i C \phi S \theta_{3i} - 2e_i f_i x_l C \theta_{2i} C \mu_i C \phi S \theta_{3i} - d_i f_i^2 C \theta_{2i}^2 S \theta_{3i}^2 \\
 & + f_i^2 g_i C \theta_{2i}^2 S \theta_{3i}^2 + f_i^2 x_f C \theta_{2i}^2 C \mu_i C \phi S \theta_{3i}^2 - f_i^2 x_l C \theta_{2i}^2 C \mu_i C \phi S \theta_{3i}^2 \\
 & + e_i^2 y_f C \phi S \mu_i - e_i^2 y_l C \phi S \mu_i + 2e_i f_i y_f C \theta_{2i} C \phi S \theta_{3i} S \mu_i - 2e_i f_i y_l C \theta_{2i} C \phi S \theta_{3i} S \mu_i \\
 & + f_i^2 y_f C \theta_{2i}^2 C \phi S \theta_{3i}^2 S \mu_i - f_i^2 y_l C \theta_{2i}^2 C \phi S \theta_{3i}^2 S \mu_i + e_i^2 y_f C \mu_i S \phi - e_i^2 y_l C \mu_i S \phi \\
 & + 2e_i f_i y_f C \theta_{2i} C \mu_i S \theta_{3i} S \phi - 2e_i f_i y_l C \theta_{2i} C \mu_i S \theta_{3i} S \phi + f_i^2 y_f C \theta_{2i}^2 C \mu_i S \theta_{3i}^2 S \phi \\
 & - f_i^2 y_l C \theta_{2i}^2 C \mu_i S \theta_{3i}^2 S \phi - e_i^2 x_f S \mu_i S \phi + e_i^2 x_l S \mu_i S \phi - 2e_i f_i x_f C \theta_{2i} S \theta_{3i} S \mu_i S \phi \\
 & + 2e_i f_i x_l C \theta_{2i} S \theta_{3i} S \mu_i S \phi - f_i^2 x_f C \theta_{2i}^2 S \theta_{3i}^2 S \mu_i S \phi + f_i^2 x_l C \theta_{2i}^2 S \theta_{3i}^2 S \mu_i S \phi - \\
 & \frac{1}{\sqrt{2}} (f_i S \theta_{2i} S \theta_{3i} \\
 & \left[\begin{aligned}
 & ((e_i + f_i C \theta_{2i} S \theta_{3i})^2 (-2d_i^2 + 2e_i^2 + f_i^2 + 4d_i g_i - 2g_i^2 - x_f^2 + 2x_f x_l \right. \\
 & - x_l^2 - y_f^2 + 2y_f y_l - y_l^2 - f_i^2 C(2\theta_{3i}) + 4(d_i - g_i)(x_f - x_l)C(\mu_i + \phi) - \\
 & x_f^2 C(2\mu_i + \phi) + 2x_f x_l C(2\mu_i + \phi) - x_l^2 C(2\mu_i + \phi) + y_f^2 C(2\mu_i + \phi) \\
 & - 2y_f y_l C(2\mu_i + \phi) + y_l^2 C(2\mu_i + \phi) - 2e_i f_i S(\theta_{2i} - \theta_{3i}) + 2e_i f_i \\
 & S(\theta_{2i} + \theta_{3i}) + 4d_i y_f S(\mu_i + \phi) - 4g_i y_f S(\mu_i + \phi) - 4d_i y_l \\
 & S(\mu_i + \phi) + 4g_i y_l S(\mu_i + \phi) - 2x_f y_f S(2\mu_i + \phi) + 2x_l y_f S(2\mu_i + \phi) \\
 & \left. + 2x_f y_l S(2\mu_i + \phi) - 2x_l y_l S(2\mu_i + \phi) \right) \Big] \\
 ke_{2i} = & (e_i + f_i C \theta_{2i} S \theta_{3i})(e_i^2 + 2e_i f_i C \theta_{2i} S \theta_{3i} + f_i^2 C \theta_{2i}^2 S \theta_{3i}^2 + f_i^2 S \theta_{2i}^2 S \theta_{3i}^2) \\
 \theta_{ei} = & \pm 2 \text{ArcCos} \left[\frac{ke_{1i}}{ke_{2i}} \right] \tag{5.3}
 \end{aligned}
 \end{aligned}$$

Eslabón 4i (no actuado) robot manipulador paralelo delta híbrido.

$$\begin{aligned}
 Kf_{1i} = & \frac{1}{(2e_i f_i)} \text{Csc}(\theta_{3i})(d_i^2 - e_i^2 - f_i^2 - 2d_i g_i + g_i^2 + x_f^2 - 2x_f x_l + x_l^2 + y_f^2 - 2y_f y_l \\
 & + y_l^2 + z_f^2 - 2d_i x_f C(\mu_i + \phi) + 2g_i x_f C(\mu_i + \phi) \\
 Kf_{2i} = & 2d_i x_l C(\mu_i + \phi) - 2g_i x_l C(\mu_i + \phi) - 2d_i y_f S(\mu_i + \phi) + 2g_i y_f S(\mu_i + \phi) \\
 & + 2d_i y_l S(\mu_i + \phi) - 2g_i y_l S(\mu_i + \phi)
 \end{aligned}$$

$$\theta_{fi} = \pm \text{ArcCos}[kf_{1i} + kf_{2i}] \quad (5.4)$$

$$\theta_{gi} = \pm \text{ArcCos} \left[\frac{y_f C(\mu_i + \phi) - y_l C(\mu_i + \phi) - x_f S(\mu_i + \phi) + x_l S(\mu_i + \phi)}{f_i} \right] \quad (5.5)$$

5.2.1 Simulación de trayectorias cíclicas simples

Las ecuaciones parametrizadas que describen las trayectorias cíclicas simples están dadas de la siguiente forma:

$$x = Kx + [A * \text{Sin}(P(t) * w + \xi)] \quad (5.6)$$

$$y = Ky + [-B * \text{Sin}(P(t) * w1 + \xi1)] \quad (5.7)$$

$$z = Kz + [C * \text{Sin}(P(t) * w2 + \xi2)] \quad (5.8)$$

Donde $Kx, Ky, Kz, A, B, C, w, w1, w2, \xi, \xi1, \xi2$ son constantes y $P(t)$ es el perfil de velocidad de quinto grado definido en el capítulo 3. Se realiza la simulación utilizando las ecuaciones (5.1) a (5.8), obteniendo los siguientes resultados.

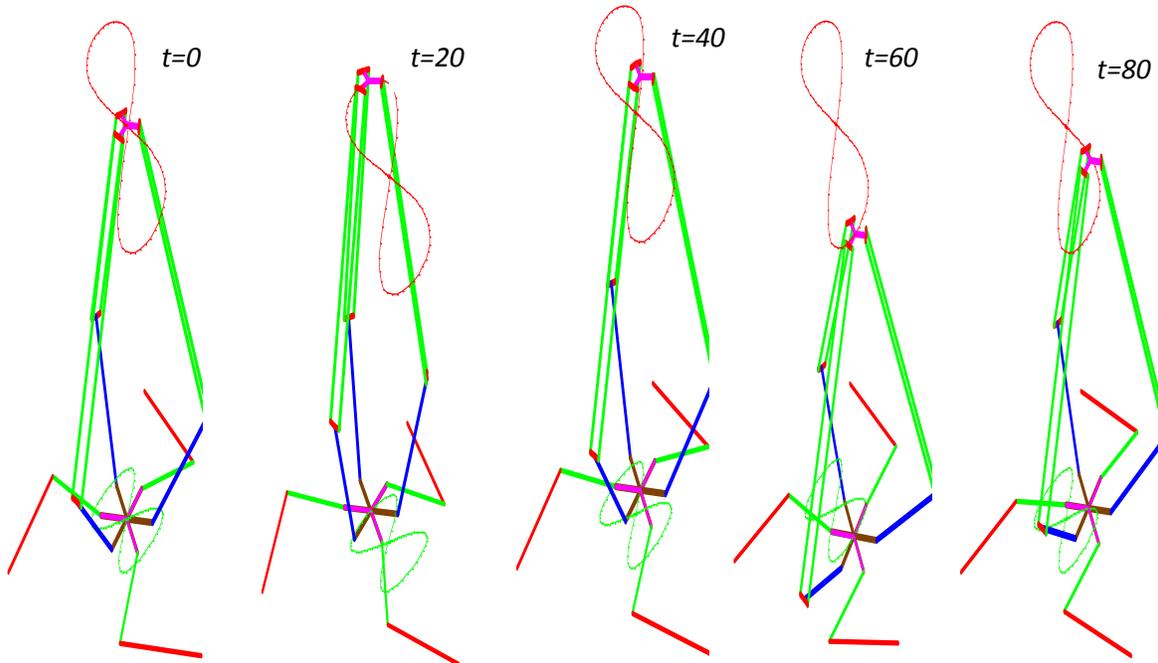
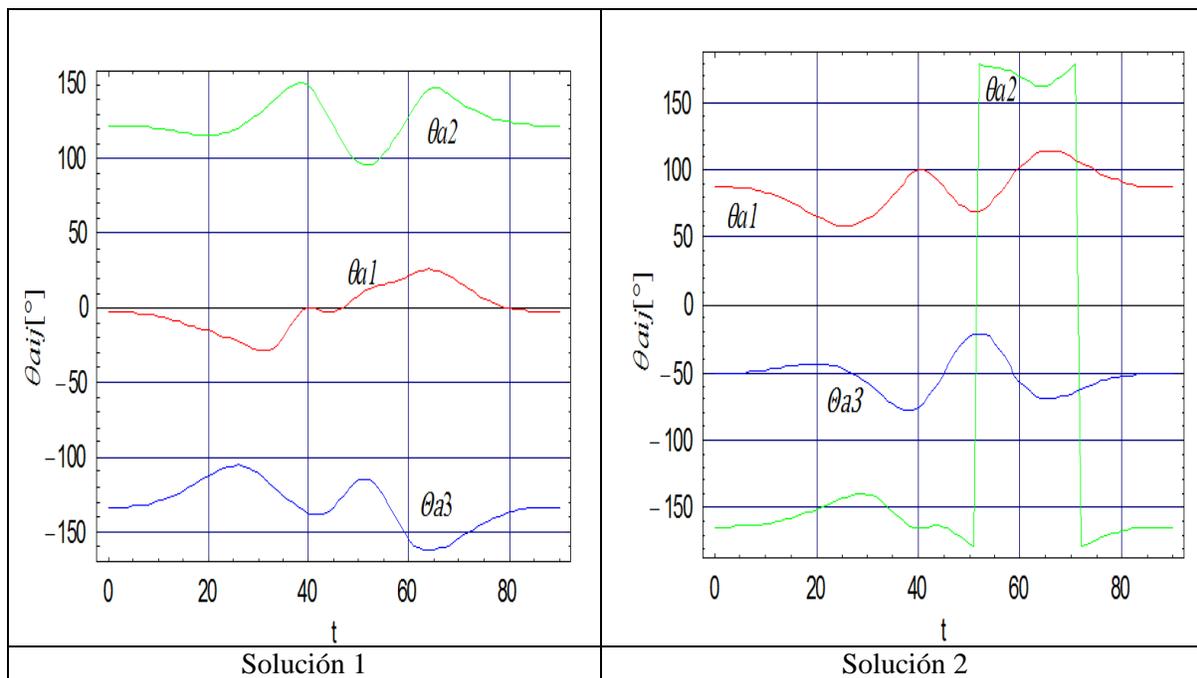


Figura 5.2 Secuencia del seguimiento de una trayectoria cíclica simple

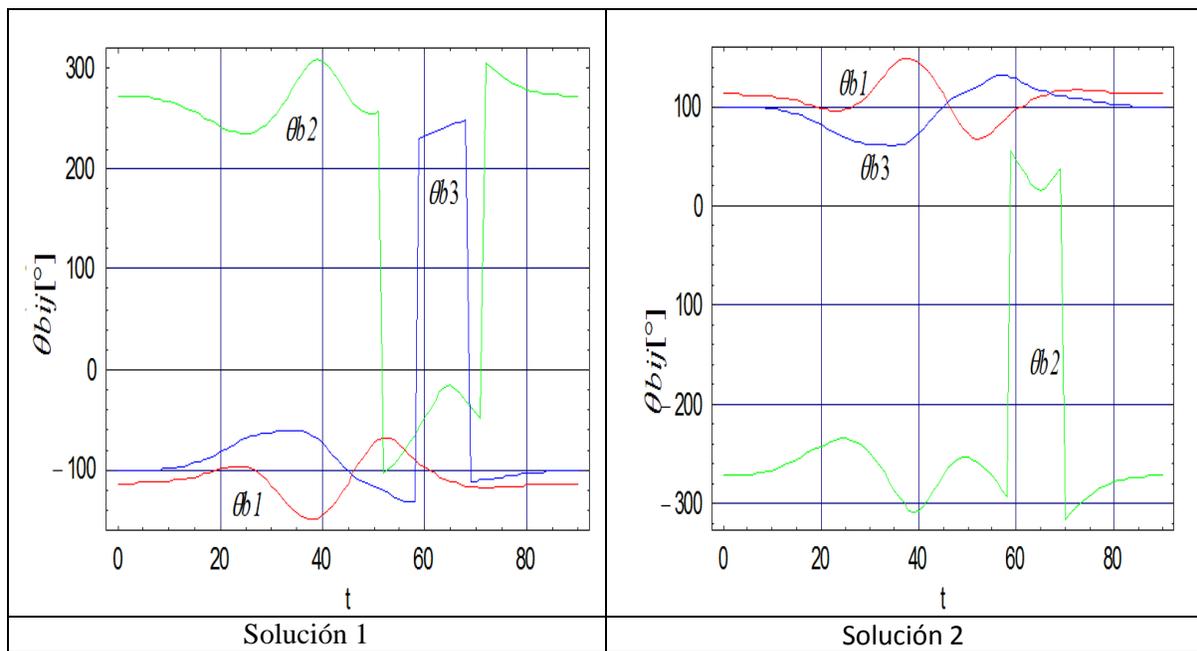
Las gráficas de la posición angular de cada junta rotacional para cada eslabón se muestran a continuación.

Para θ_{a1} , θ_{a2} , θ_{a3} se tienen las gráficas 5.1



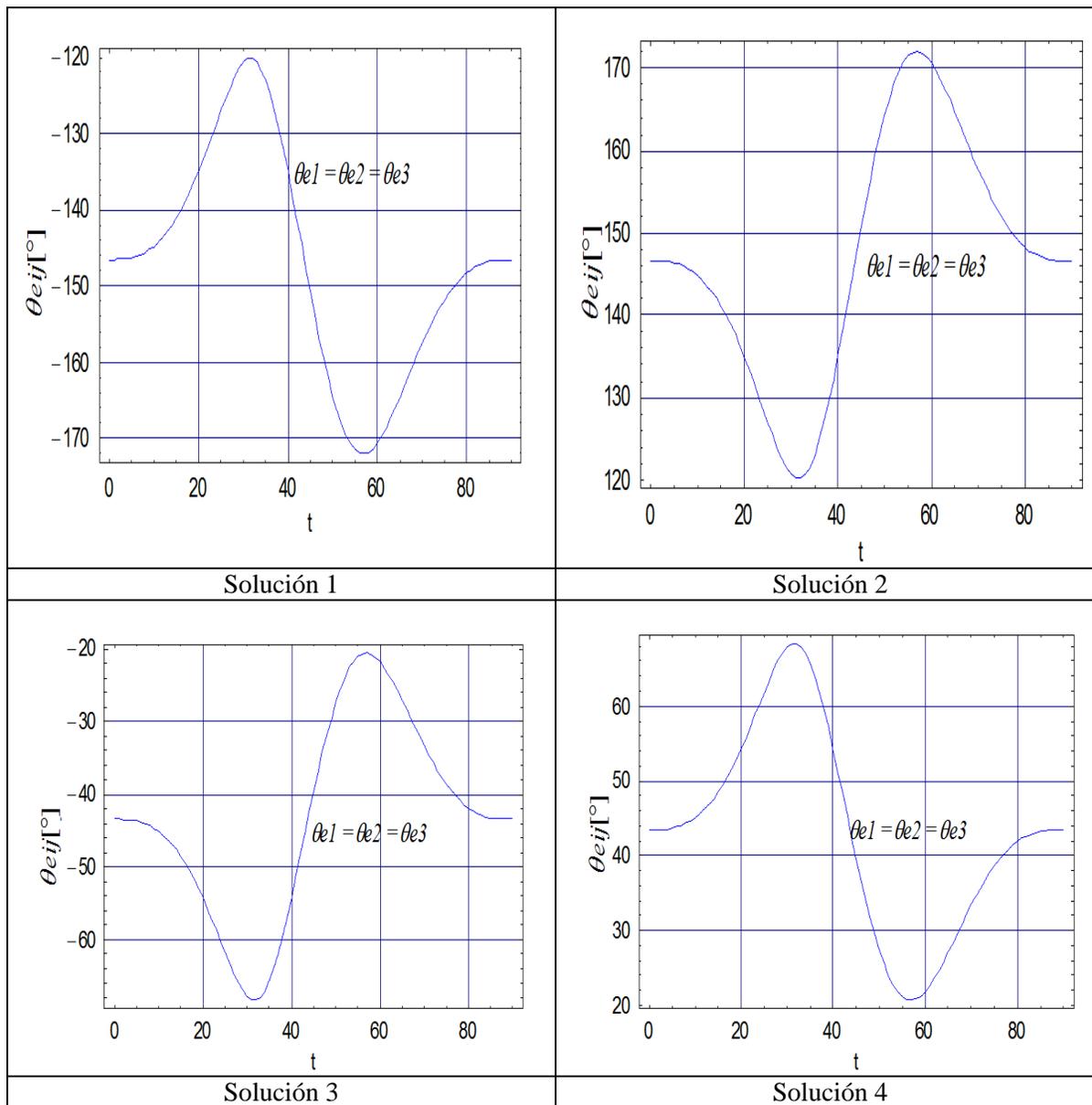
Gráfica 5.1 Variables articulares θ_{ai} actuadas del primer eslabón.

Para θ_{b1} , θ_{b2} , θ_{b3} se tienen las gráficas 5.2:



Gráfica 5.2 Variables articulares θ_{bj} no actuadas del segundo eslabón.

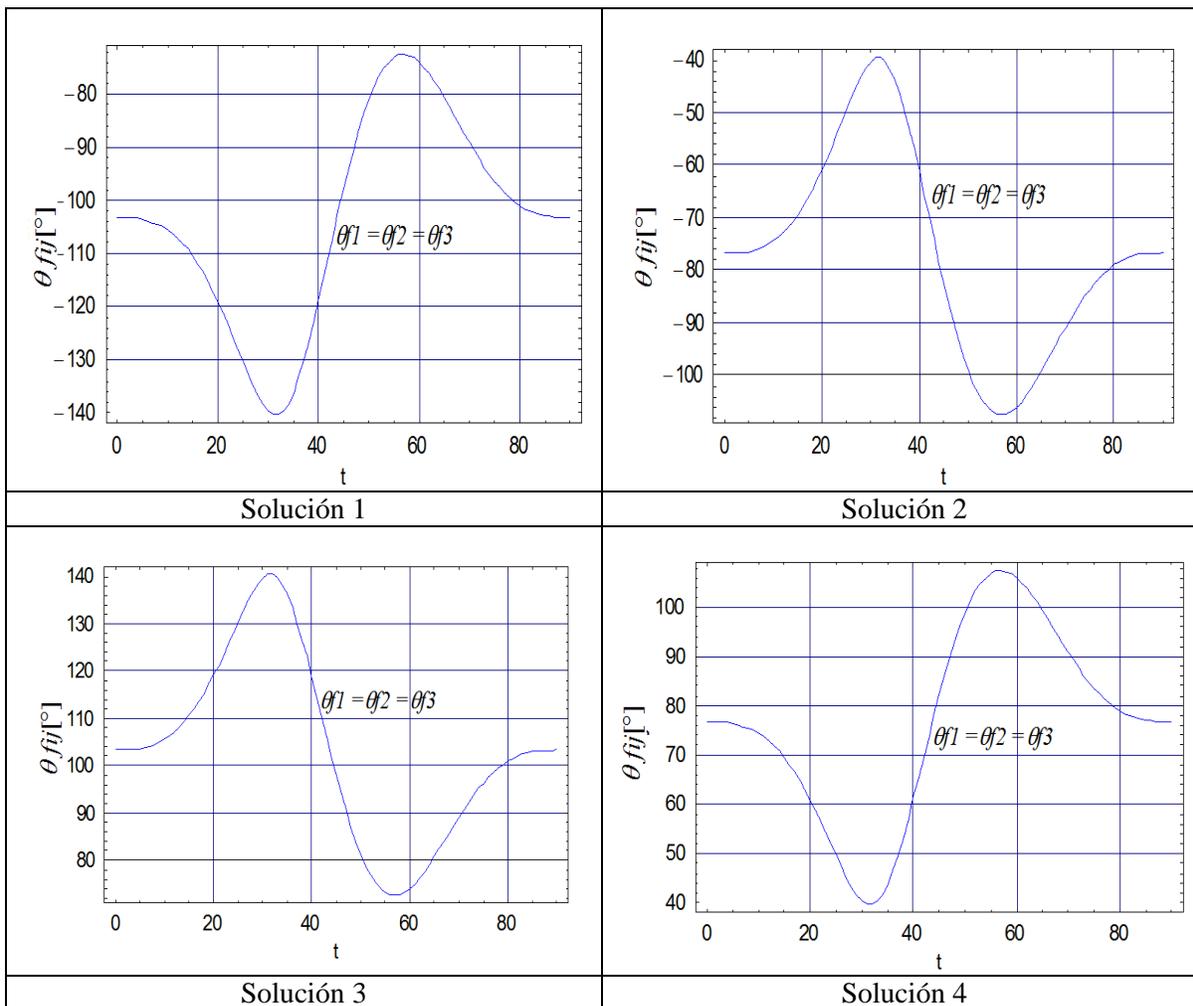
Para θ_{e1} , θ_{e2} , θ_{e3} se tienen las gráficas 5.3:



Gráfica 5.3 Variables θ_{e_i} articulares actuadas del tercer eslabón.

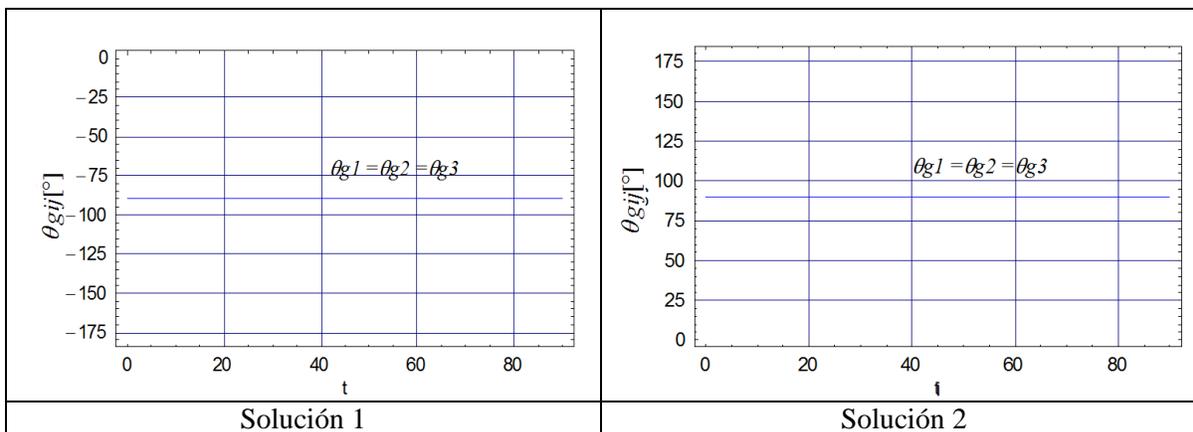
De la gráfica 5.3 se observa que se tienen cuatro posibles soluciones para el tercer eslabón del robot manipulador paralelo delta híbrido. De las cuales sólo dos de ellas satisfacen al sistema.

Para θ_{f1} , θ_{f2} , θ_{f3} se tienen las gráficas 5.4:



Gráfica 5.4 Variables articulares θ_{fi} no actuadas del cuarto eslabón.

Para θ_{g1} , θ_{g2} , θ_{g3} se tienen las siguientes graficas 5.5:



Gráfica 5.5 Variables articulares θ_{gi} no actuadas del cuarto eslabón.

5.2.2 Simulación de trayectorias cíclicas compuestas.

Las ecuaciones parametrizadas que describen las trayectorias cíclicas compuestas están definidas de la siguiente forma:

Para el robot manipulador paralelo delta plano se tienen las siguientes ecuaciones para la trayectoria.

$$x = Kx + [A1 * \text{Sin}(P(t) * (w + A1) + \xi2)] \quad (5.9)$$

$$y = Ky + [-B * \text{Sin}(P(t) * (w1 * B) + \xi1)] \quad (5.10)$$

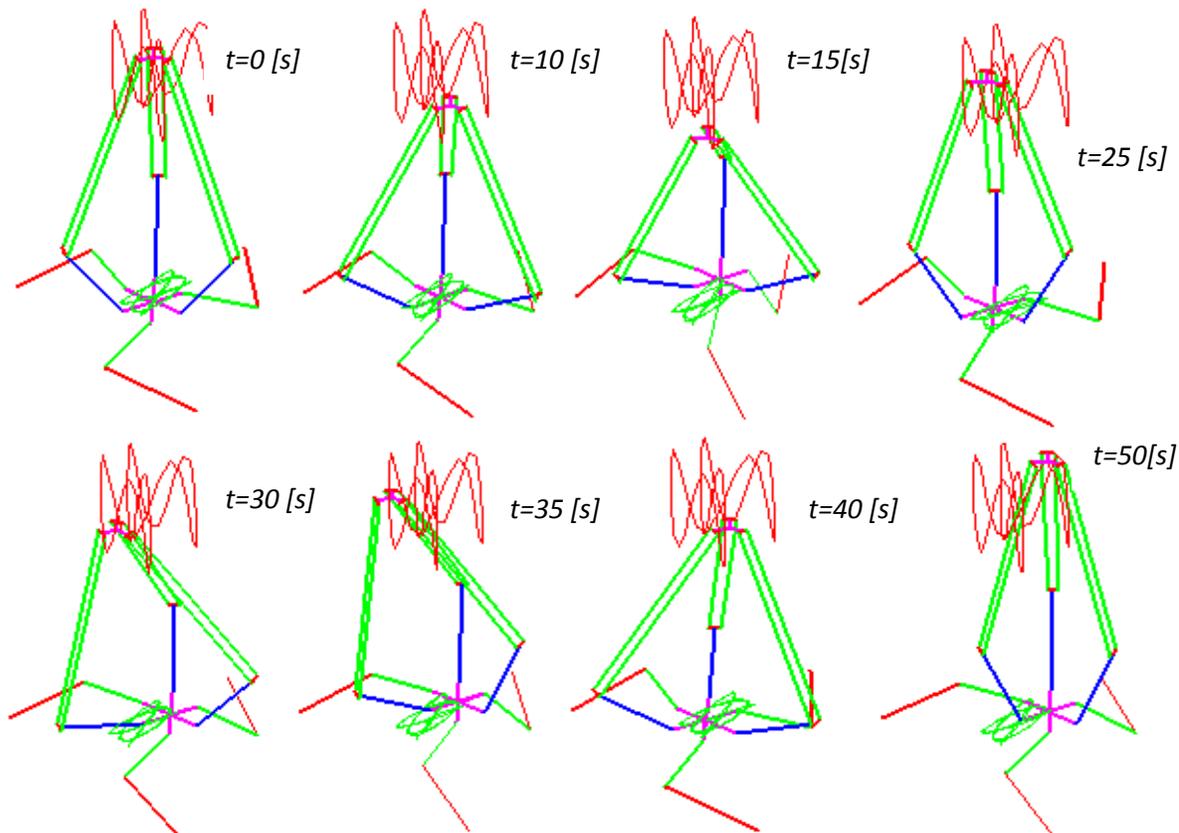
Para el robot manipulador paralelo delta en el espacio se tienen las siguientes ecuaciones para la trayectoria.

$$x = Kx + [A * \text{Sin}(P(t) * w + \xi2)] \quad (5.11)$$

$$y = Ky + [-B * \text{Sin}(P(t) * w1 + \xi1)] \quad (5.12)$$

$$z = Kz + [C * \text{Sin}(P(t) * w2 + \xi2)] \quad (5.13)$$

Donde $Kx, Ky, Kz, A, A1, B, C, w, w1, w2, \xi, \xi1, \xi2$ son constantes que modifican a la trayectoria según el valor propuesto y $P(t)$ es el polinomio de quinto grado para la velocidad.



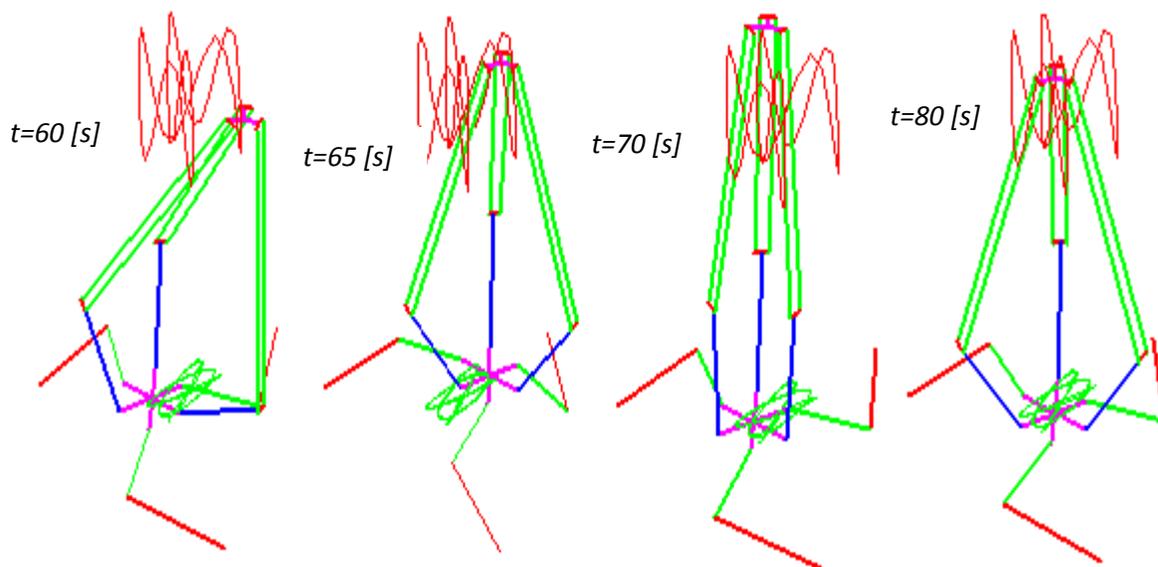
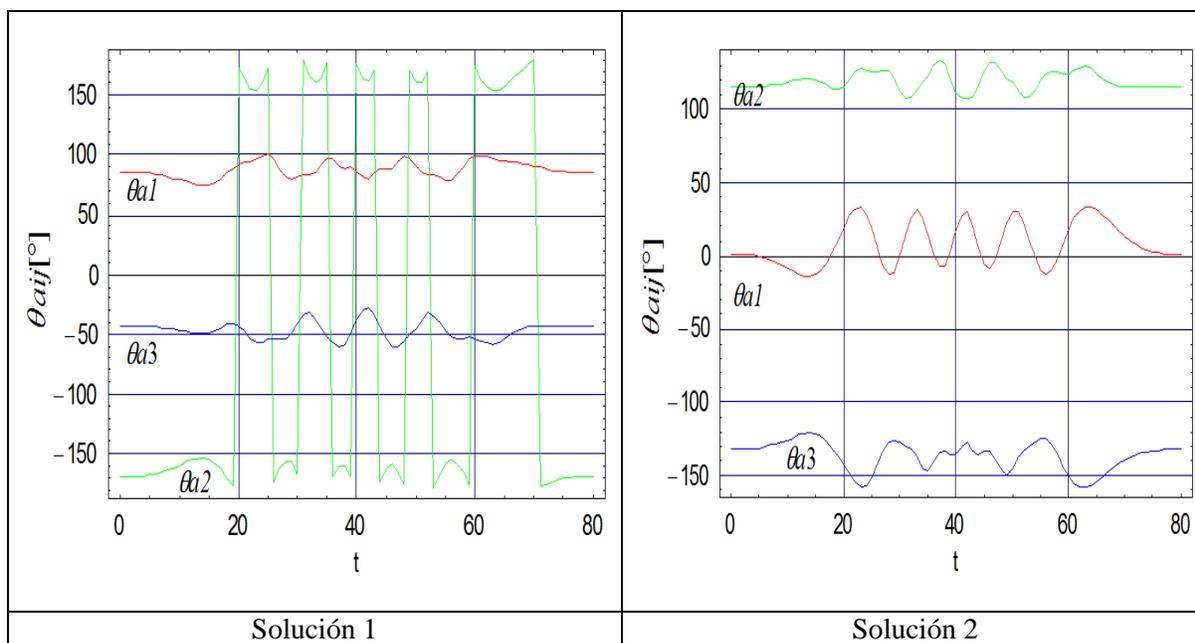


Figura 5.3 Secuencia del seguimiento de la trayectoria cíclica compuesta.

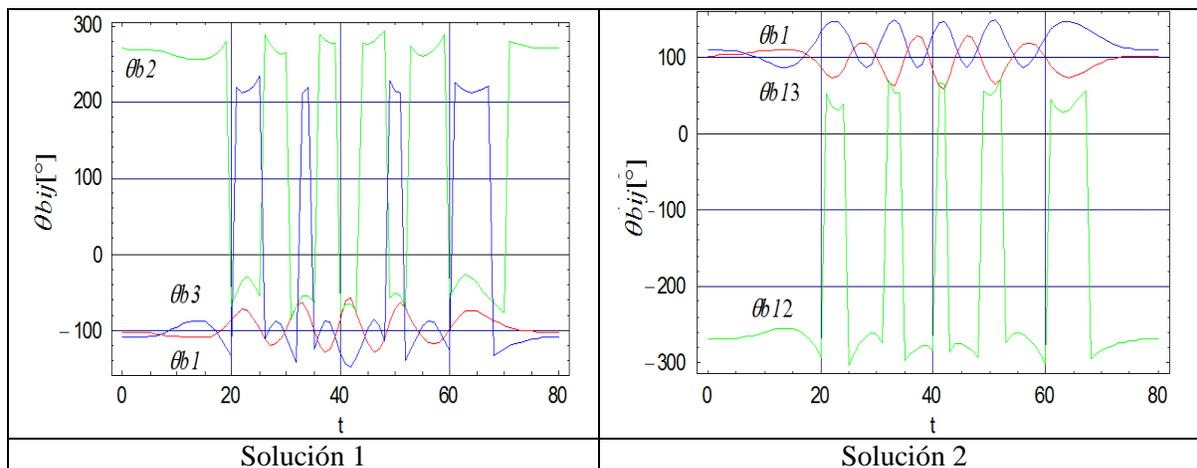
Las gráficas de la posición angular de cada junta rotacional para cada eslabón se muestran a continuación.

Para θ_{a1} , θ_{a2} , θ_{a3} se tienen las siguientes gráficas 5.6:



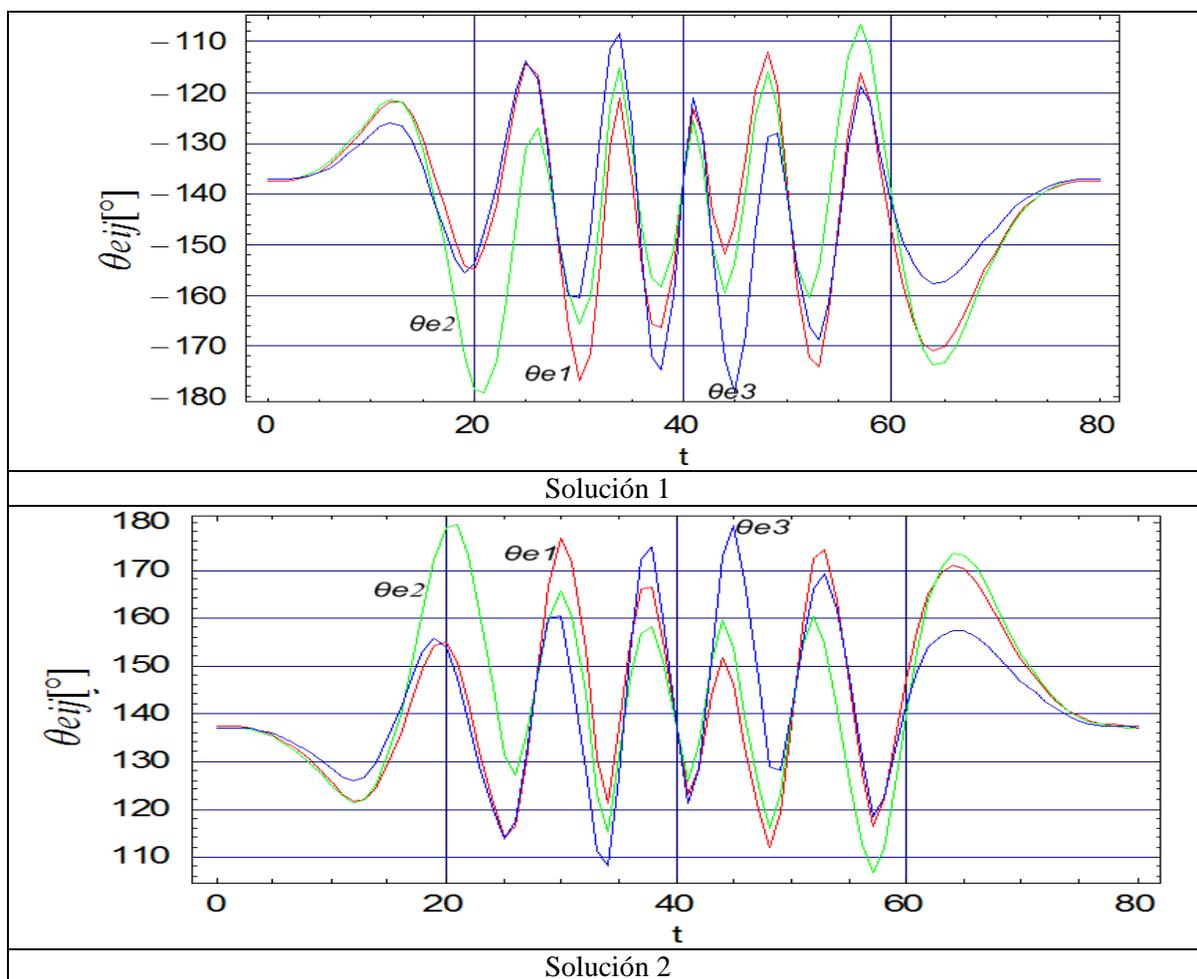
Gráfica 5.6 Variables articulares θ_{ai} actuadas del primer eslabón.

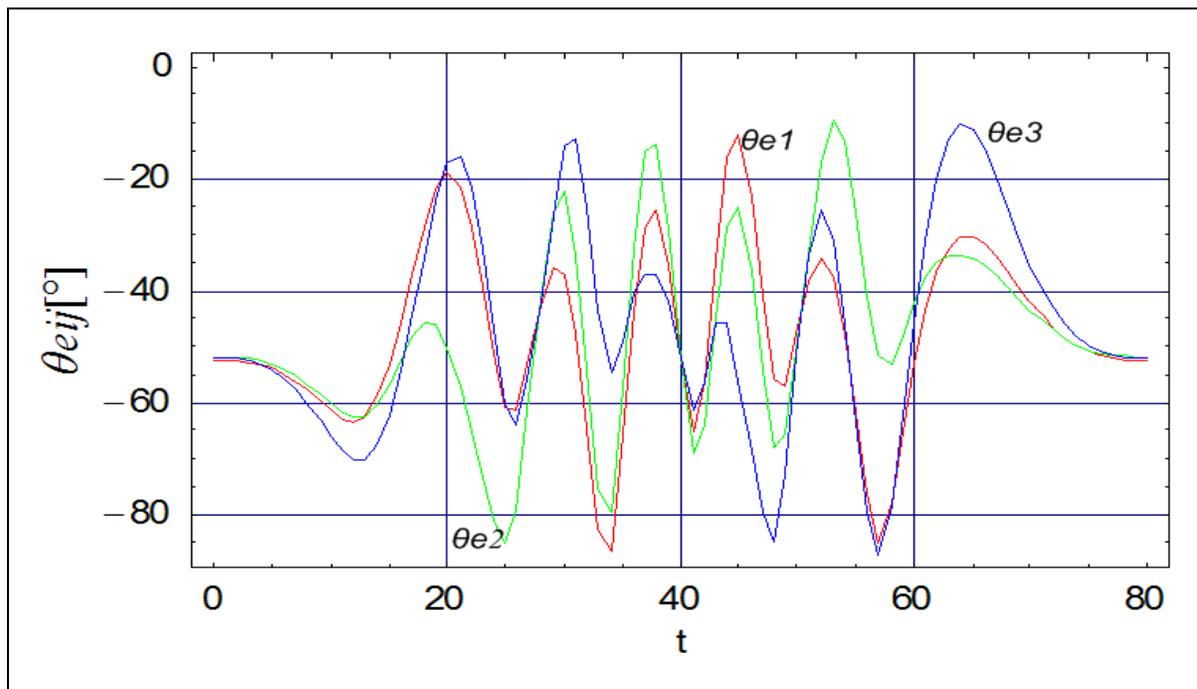
Para θ_{b1} , θ_{b2} , θ_{b3} se tienen las siguientes gráficas 5.7



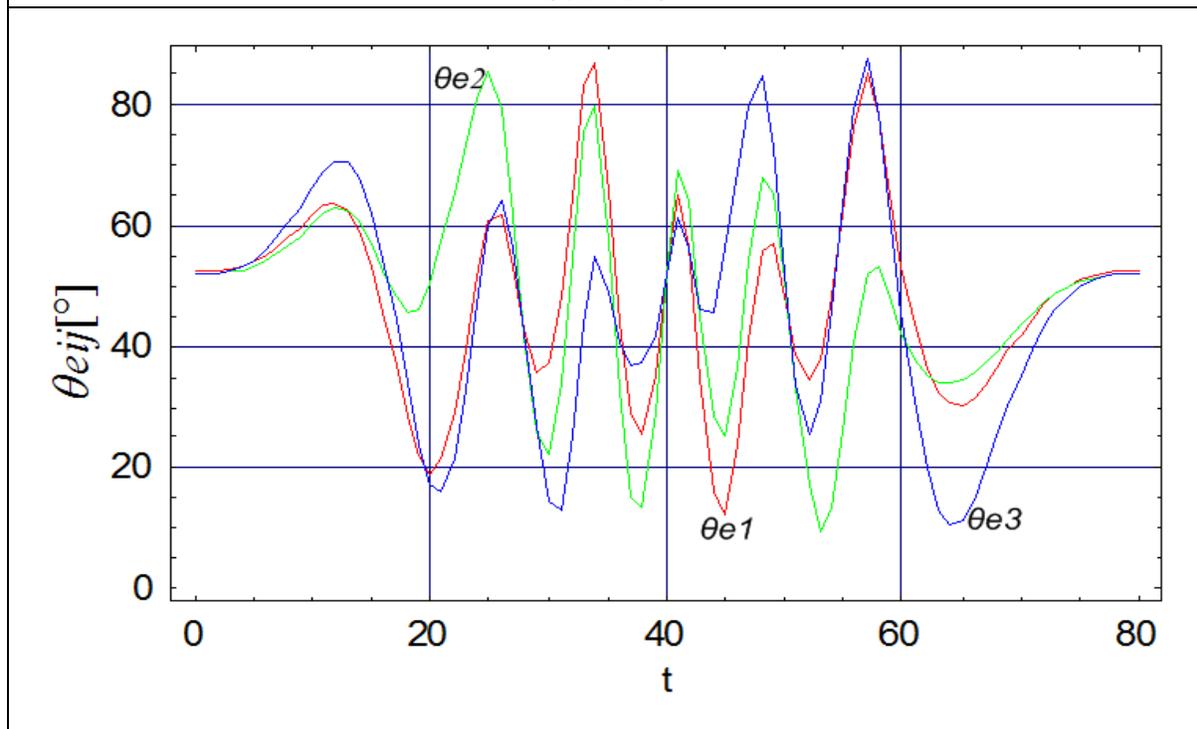
Gráfica 5.7 Variables articulares θ_{bi} no actuadas del segundo eslabón.

Para θ_{e1} , θ_{e2} , θ_{e3} se tienen las siguientes gráficas 5.8:





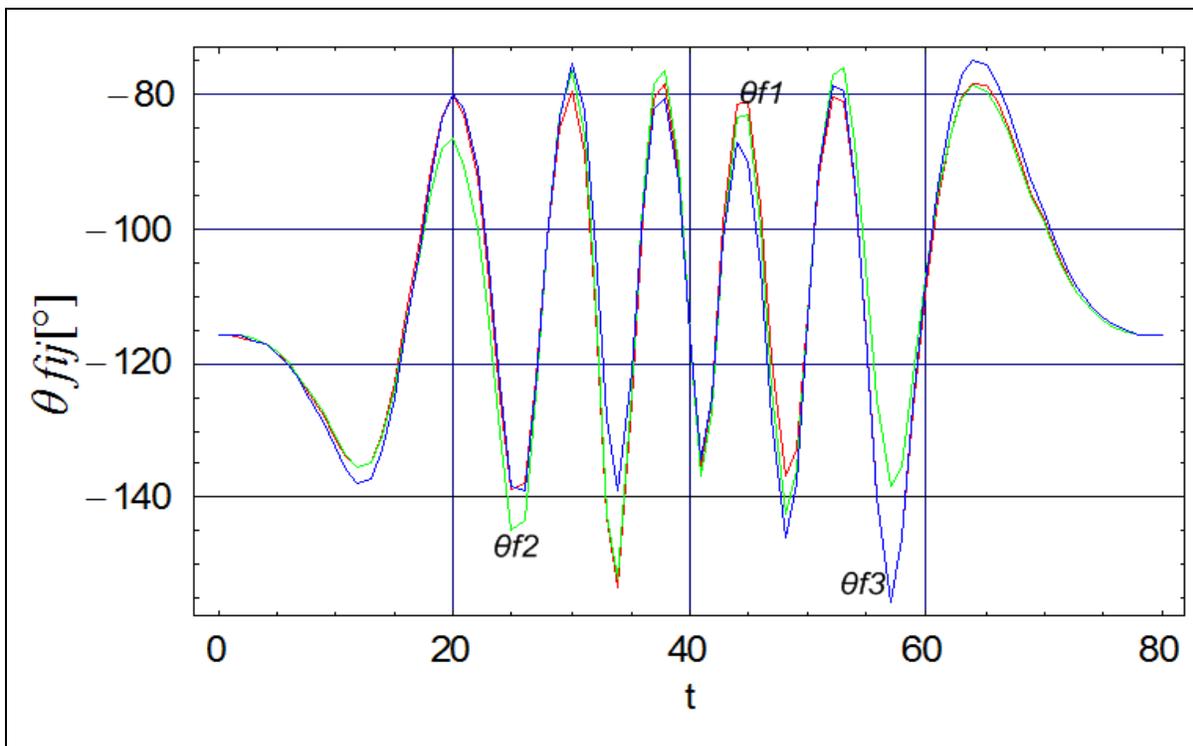
Solución 3



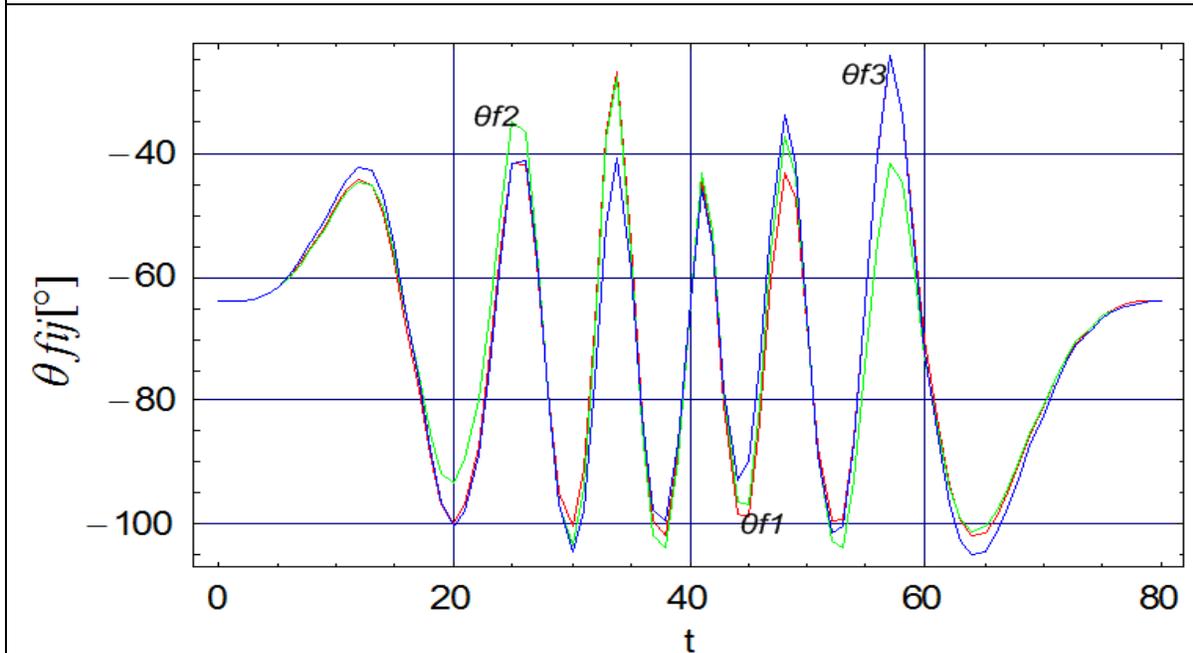
Solución 4

Gráfica 5.8 Variables articulares θ_{ei} actuadas del tercer eslabón.

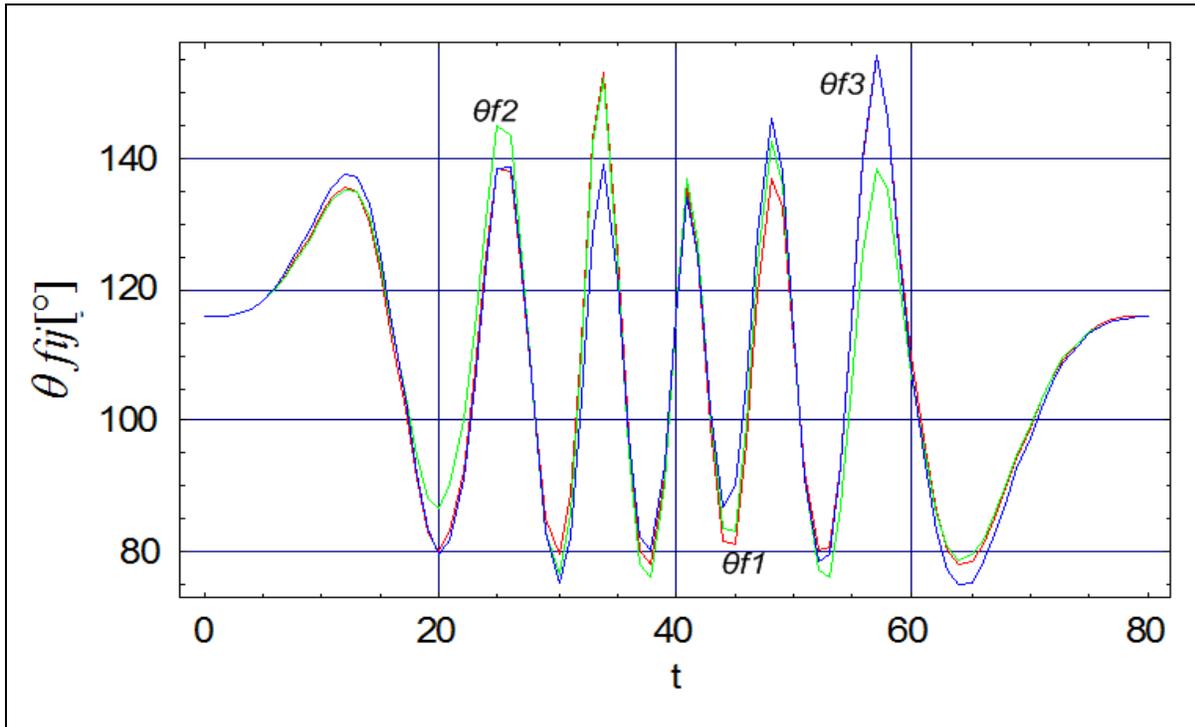
Para θ_{f1} , θ_{f2} , θ_{f3} se tienen las siguientes gráficas 5.9:



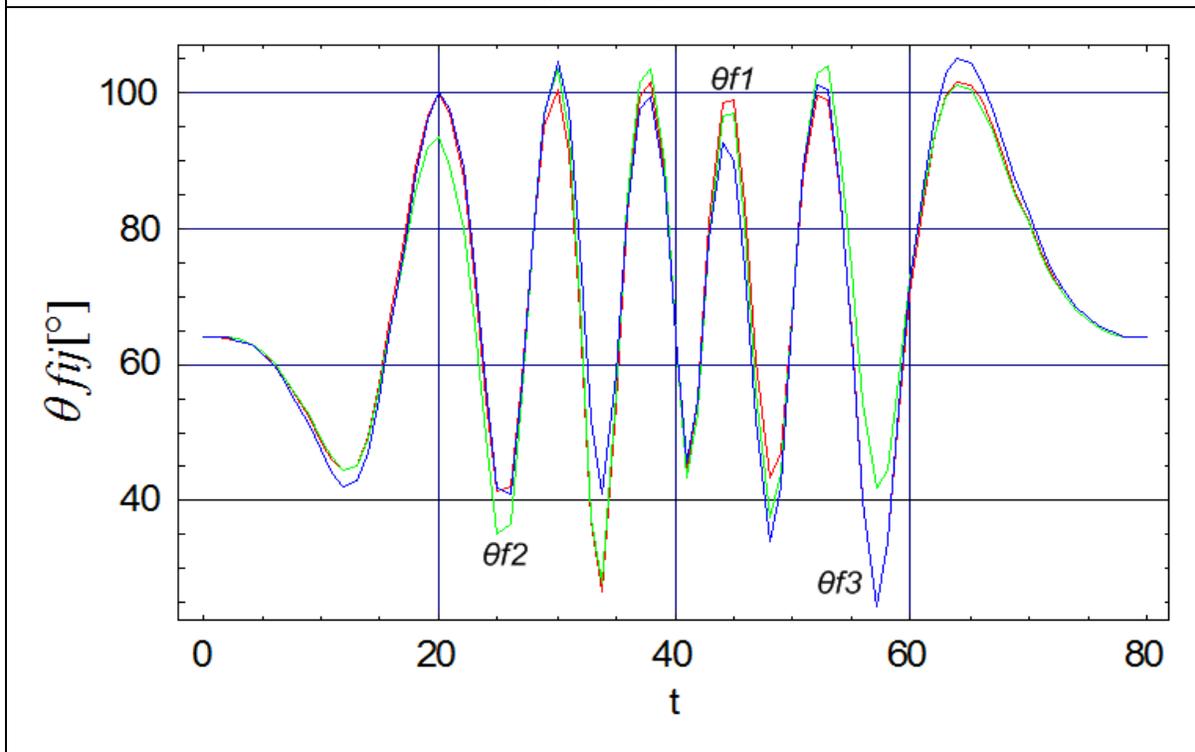
Solución 1



Solución 2



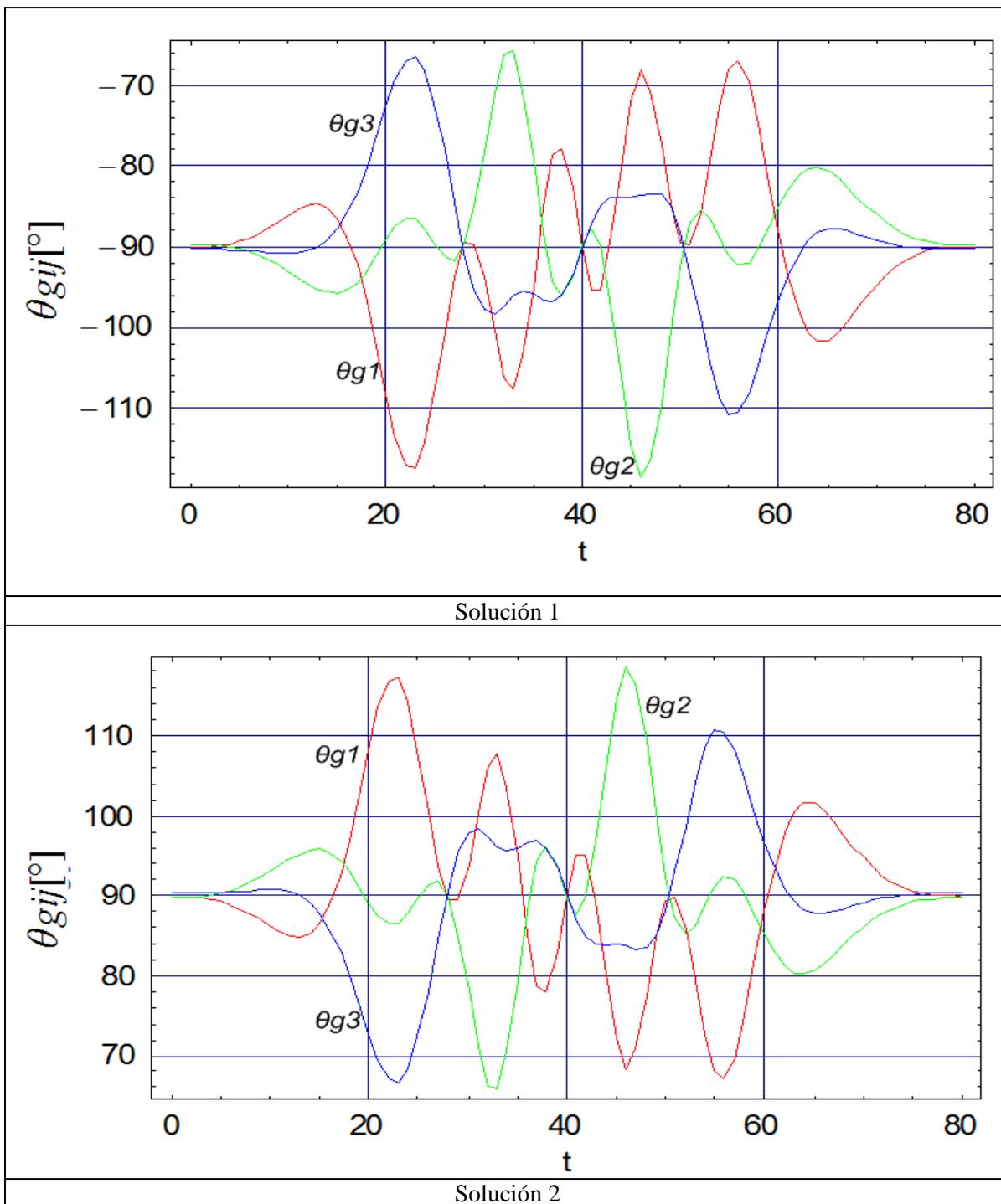
Solución 3



Solución 4

Gráfica 5.9 Variables articulares θ_{fi} no actuadas del cuarto eslabón.

Para θ_{g1} , θ_{g2} , θ_{g3} se tienen las siguientes gráficas 5.10:



Gráfica 5.10 Variables articulares θ_{gi} no actuadas del cuarto eslabón.

5.2.3 Simulación Trayectoria en línea recta.

Se conoce un punto inicial $PI(x_1, y_1, z_1)$ y un punto final $P2(x_2, y_2, z_2)$, la trayectoria a seguir es una línea recta. Donde el robot manipulador paralelo delta plano describirá la trayectoria en el plano mientras que el robot manipulador paralelo delta en el espacio seguirá la trayectoria en el espacio.

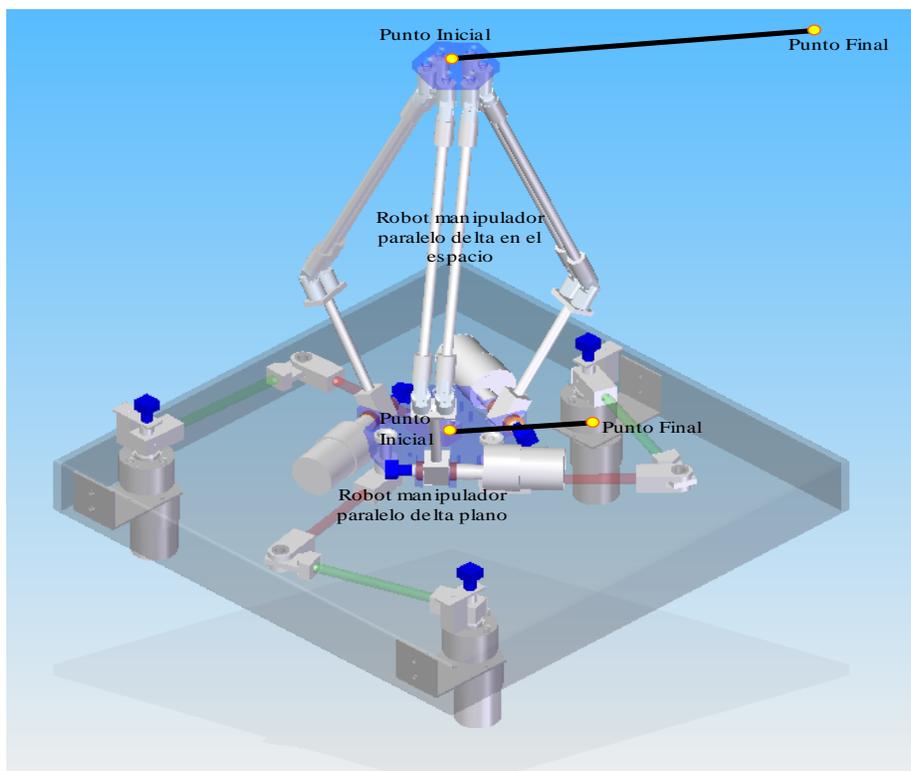


Figura 5.4 Robot manipulador paralelo delta híbrido trayectoria línea recta

Para este caso el manipulador paralelo delta plano seguirá una proporción de la trayectoria es decir mientras el robot paralelo delta híbrido sigue una trayectoria de línea recta desde un punto inicial hasta un punto final el robot paralelo delta plano sólo recorre la mitad de la trayectoria.

En la figura 5.5 se puede apreciar la simulación gráfica, donde se muestran de manera esquemática los eslabones que componen al mecanismo en su totalidad, se tomaron las ecuaciones que describen la posición de cada una de las articulaciones que se obtuvieron del análisis cinemático en el capítulo dos y se programaron de tal forma que se pueda observar el comportamiento de cada uno de los eslabones.

El robot manipulador paralelo delta híbrido puede realizar movimientos del tipo uno a uno o movimientos simultáneos, definidos en el capítulo tres. Al realizar la simulación gráfica empleando las ecuaciones obtenidas en el capítulo dos, se simulan los dos tipos de movimientos.

En las gráficas 5.11 a 5.15 se observan el comportamiento de cada junta rotacional que componen al mecanismo.

Para el seguimiento de una línea recta.

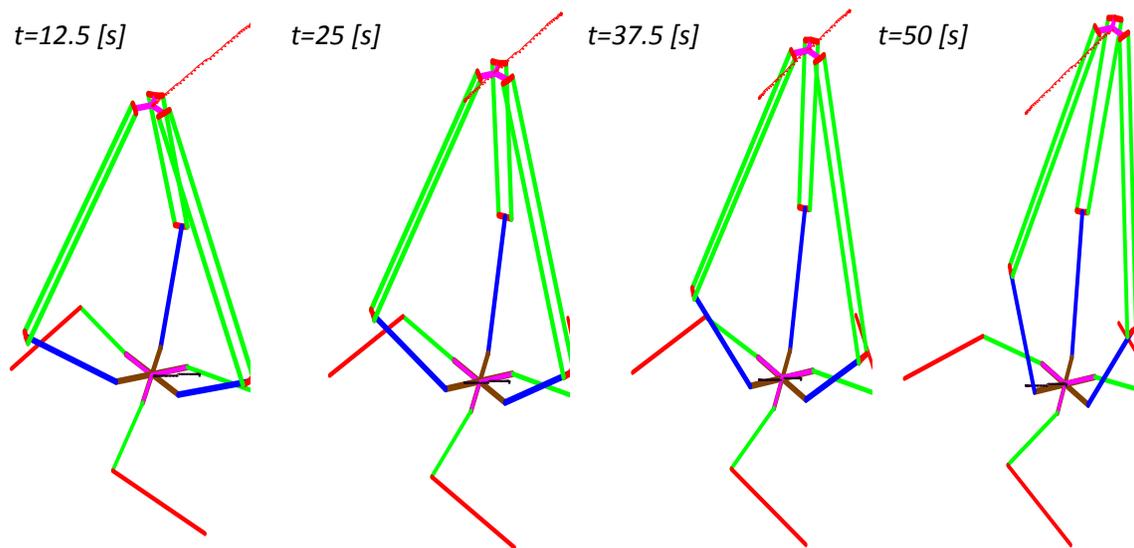
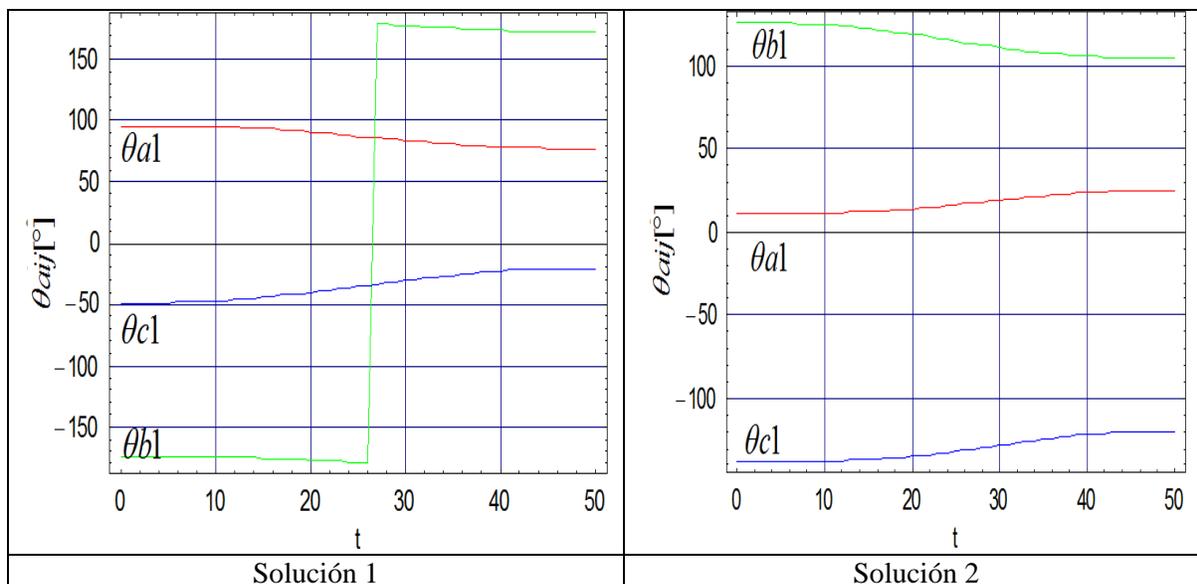


Figura 5.5 Simulación gráfica.

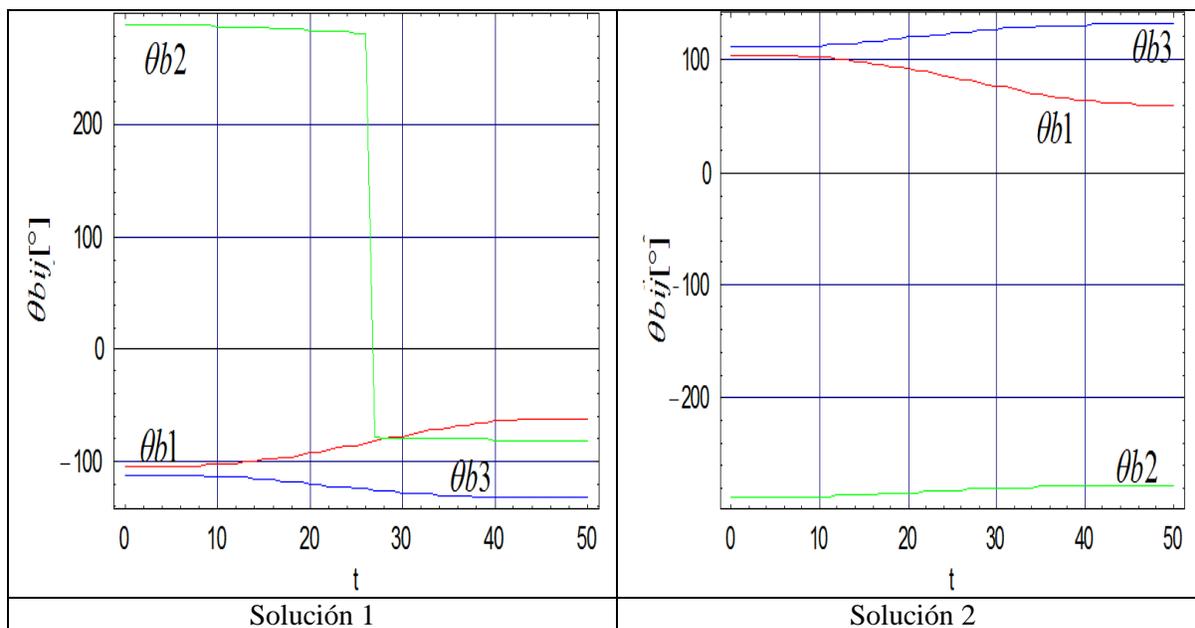
Para las tres primeras juntas de rotación que definen al robot delta plano hay dos posibles soluciones.

Para θ_{a1} , θ_{a2} , θ_{a3} se tienen las siguientes gráficas 5.11:



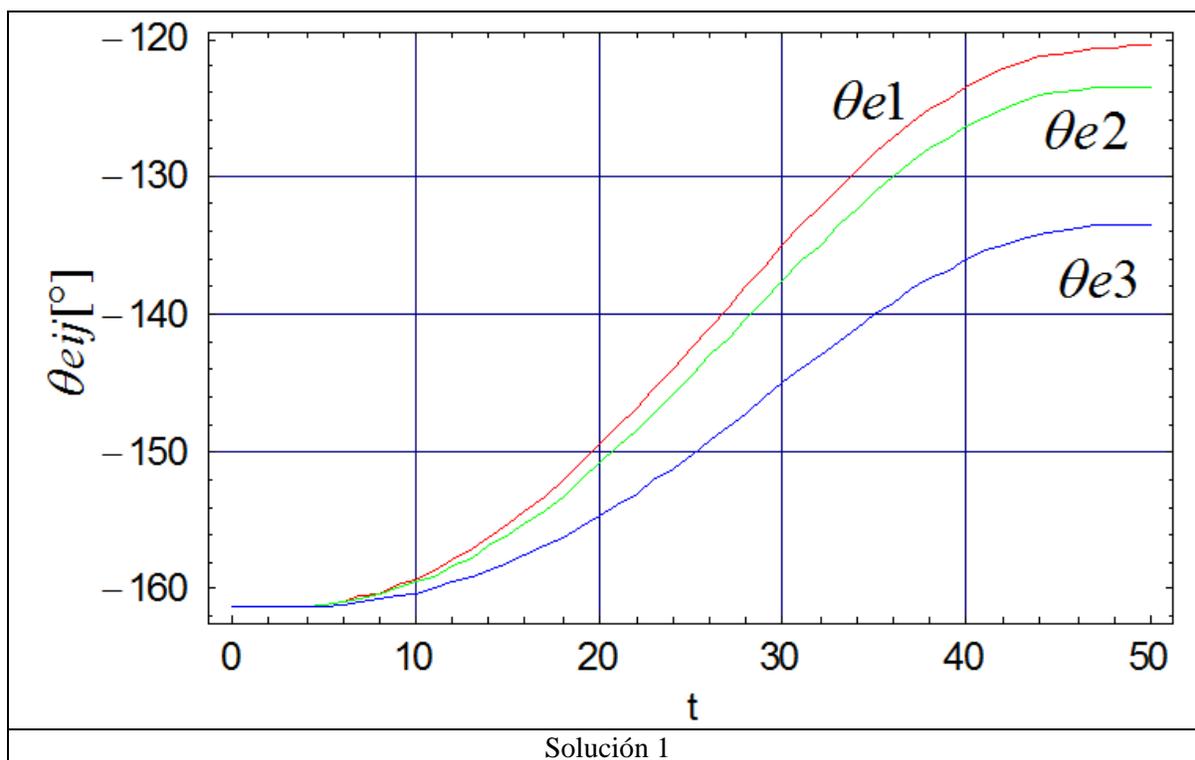
Gráfica 5.11 Variables articulares θ_{ai} actuadas del primer eslabón.

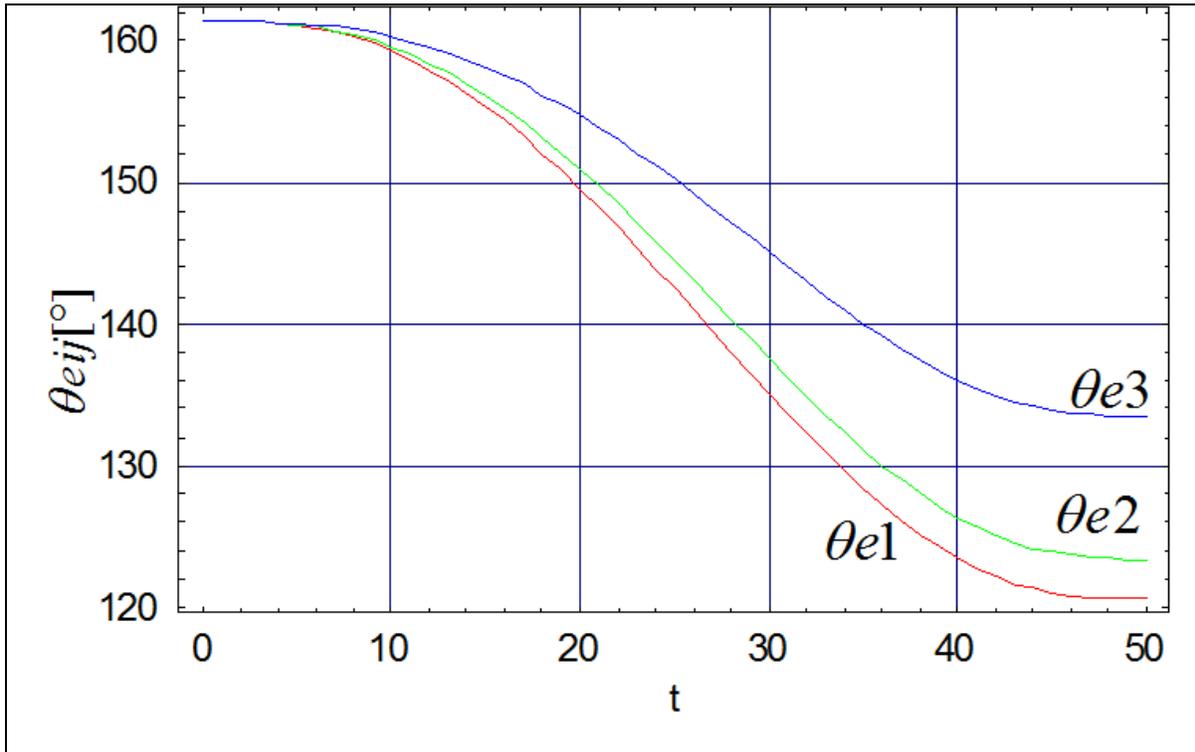
Para θ_{b1} , θ_{b2} , θ_{b3} se tienen las siguientes gráficas 5.12:



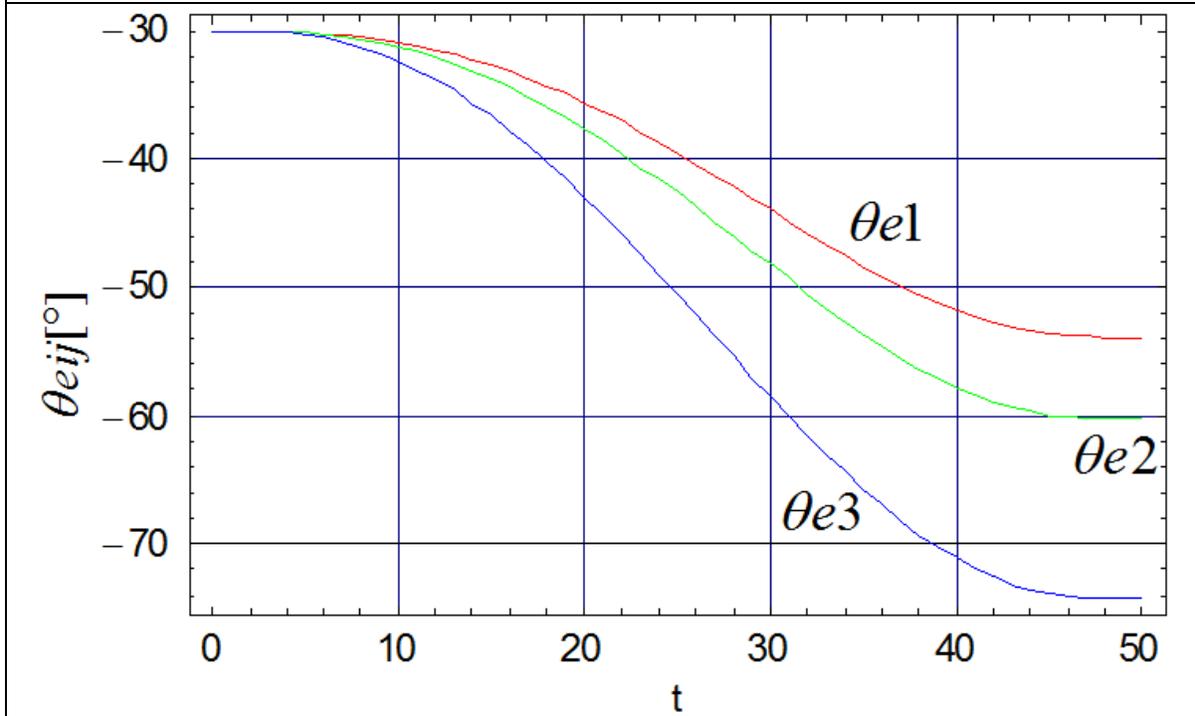
Gráfica 5.12 Variables articulares θ_{bi} no actuadas del segundo eslabón

Para θ_{e1} , θ_{e2} , θ_{e3} se tienen las siguientes gráficas 5.13:

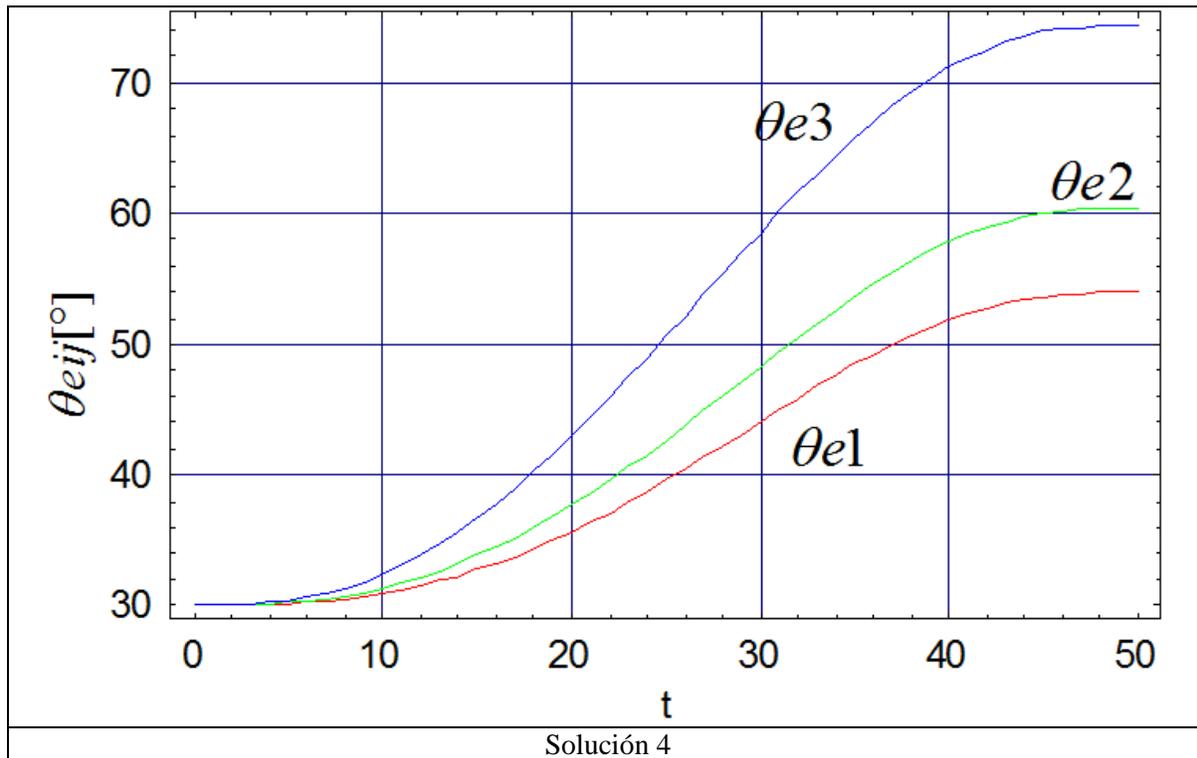




Solución 2

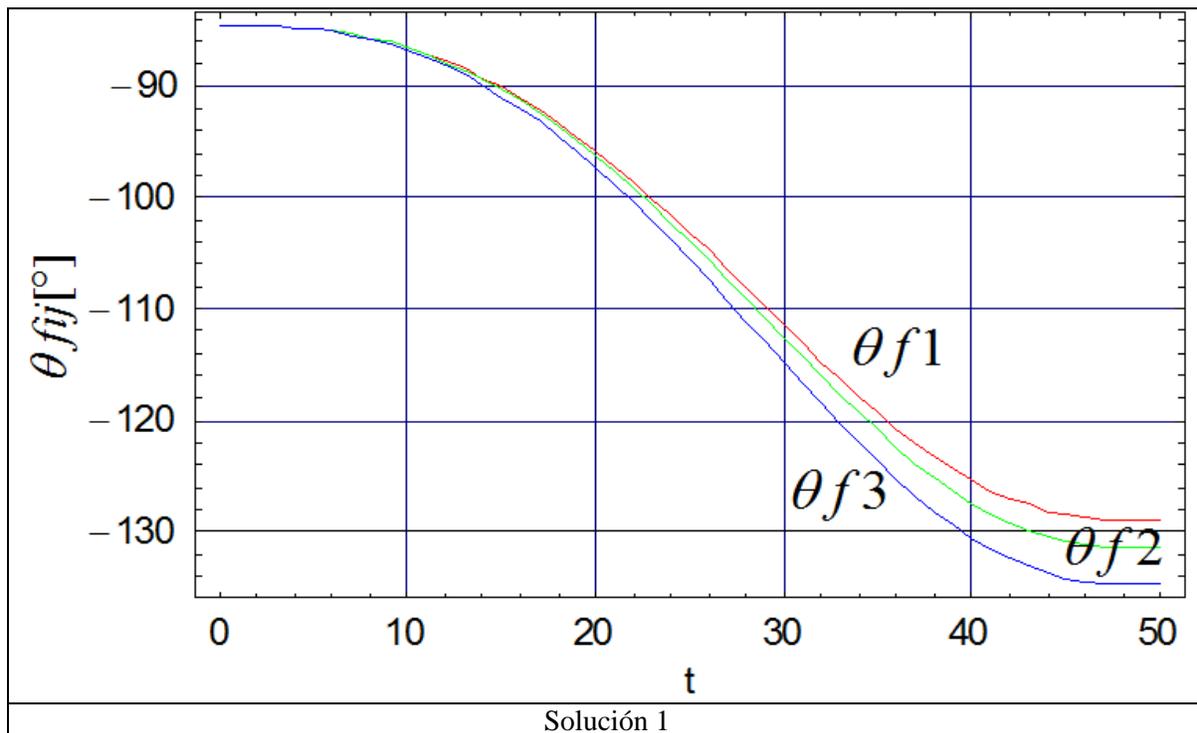


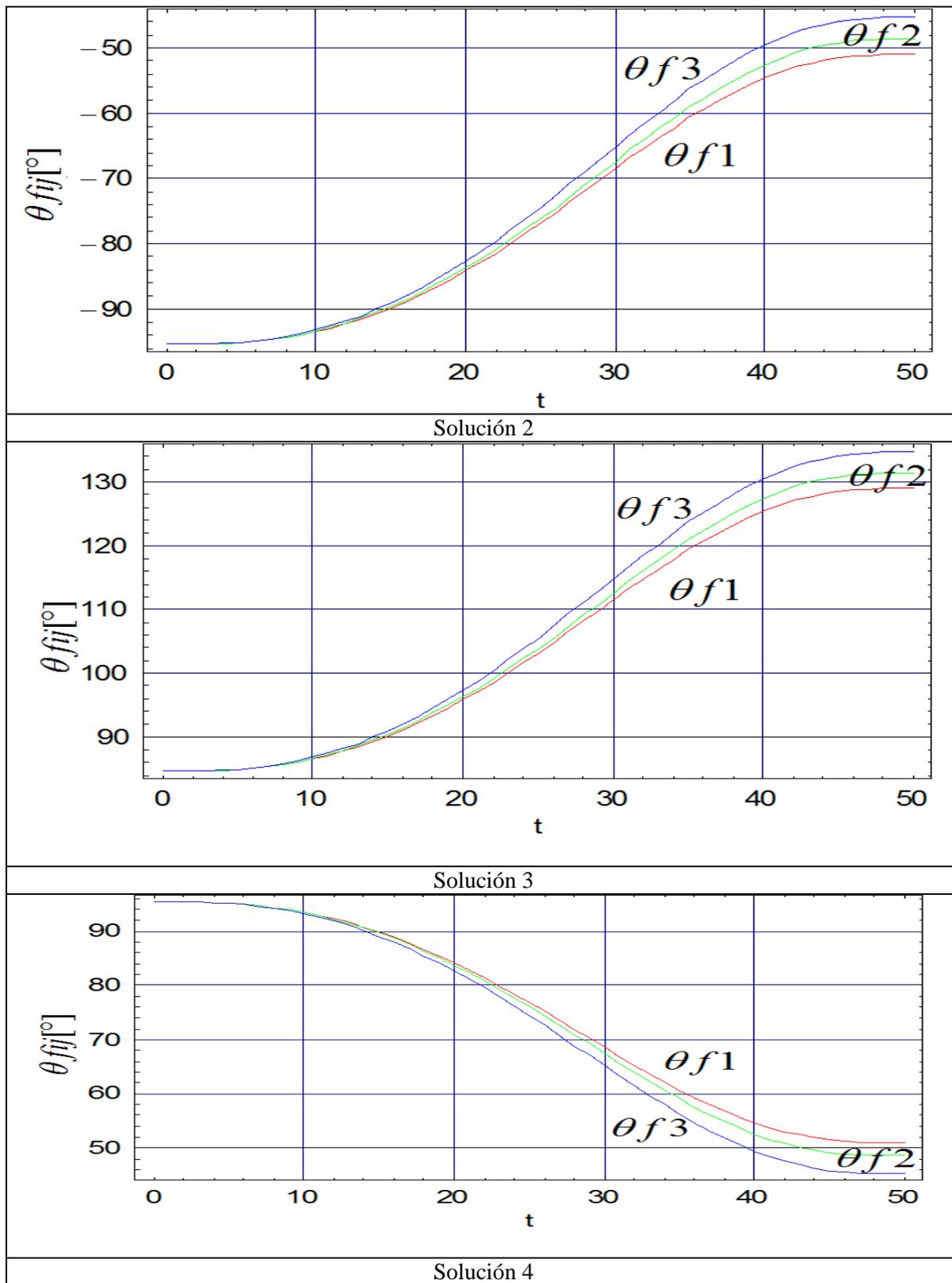
Solución 3



Gráfica 5.13 Variables articulares θ_{ei} actuadas del tercer eslabón.

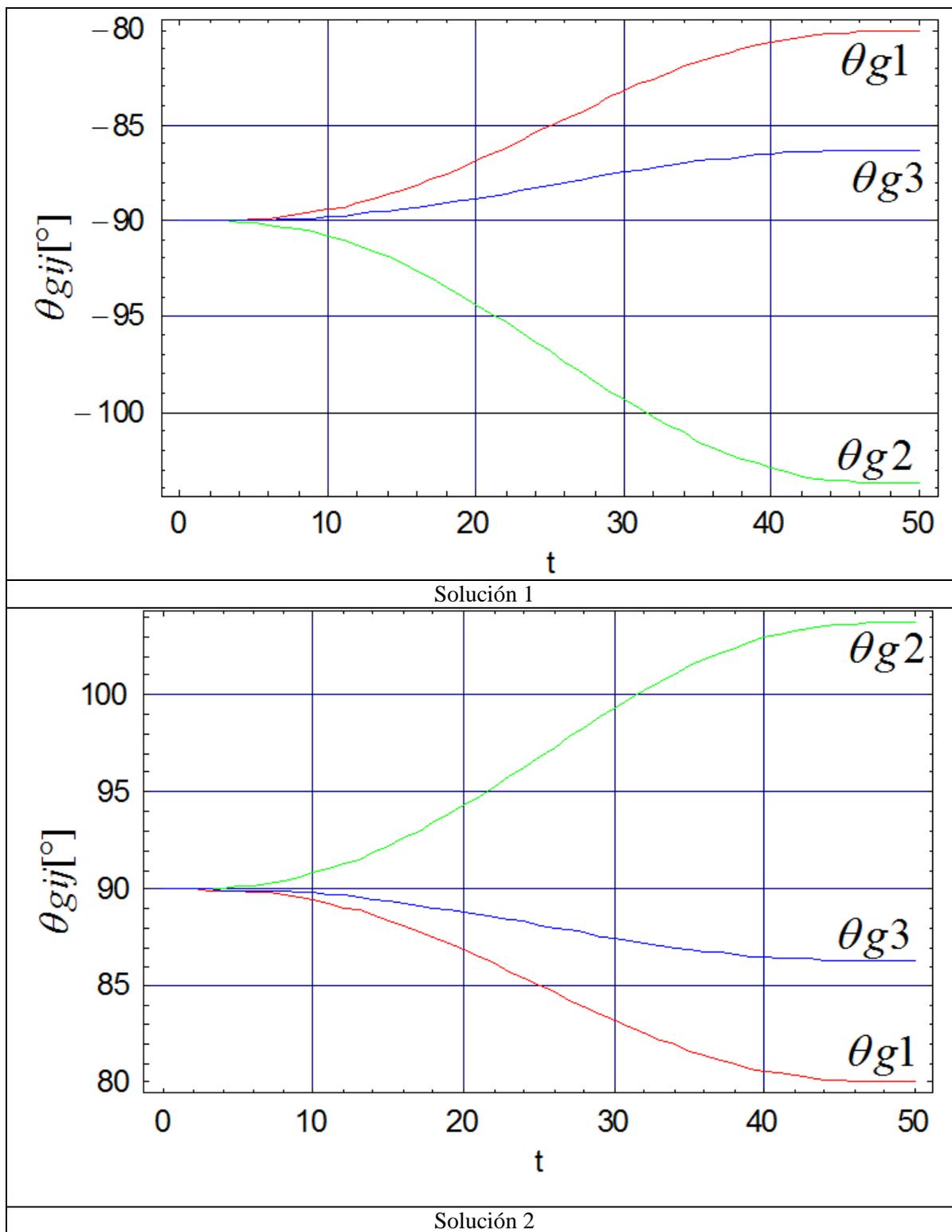
Para θ_{f1} , θ_{f2} , θ_{f3} se tienen las siguientes gráficas:





Gráfica 5.14 Variables articulares θ_{fi} no actuadas del cuarto eslabón.

Para θ_{g1} , θ_{g2} , θ_{g3} se tienen las siguientes gráficas 5.15:



Gráfica 5.15 Variables articulares θ_{gi} no actuadas del cuarto eslabón.

5.2.4 Prueba del prototipo piloto para el seguimiento de una trayectoria en línea recta.

Se realizó el análisis cinemático de la posición para el robot manipulador paralelo delta híbrido, así como la simulación empelando las ecuaciones de las variables articulares obtenidas de la cinemática inversa para el manipulador.

Finalmente parte de toda esta teoría se lleva a la práctica. Se construyó un prototipo piloto para comprender más de cerca el comportamiento que este mecanismo puede tener. Ahora el problema consiste en interpretar las ecuaciones y programar al prototipo piloto de tal forma que los actuadores que componen al mecanismo sigan una trayectoria en línea recta como la que se muestra en la simulación de la figura 5.5.

Se emplean potenciómetros lineales como sensores para conocer la posición de cada articulación del manipulador paralelo delta híbrido, se deben de caracterizar los potenciómetros para poder hacer coincidir a cada potenciómetro lineal con un valor angular, con ayuda del convertidor analógico digital del microcontrolador PIC16F877.

Cada potenciómetro es de una vuelta, pero realmente sólo tiene un área de trabajo de 300° lo cual no presenta problema alguno con respecto al funcionamiento del manipulador, dado que todos los eslabones que componen al manipulador trabajan dentro del rango de operación del potenciómetro.

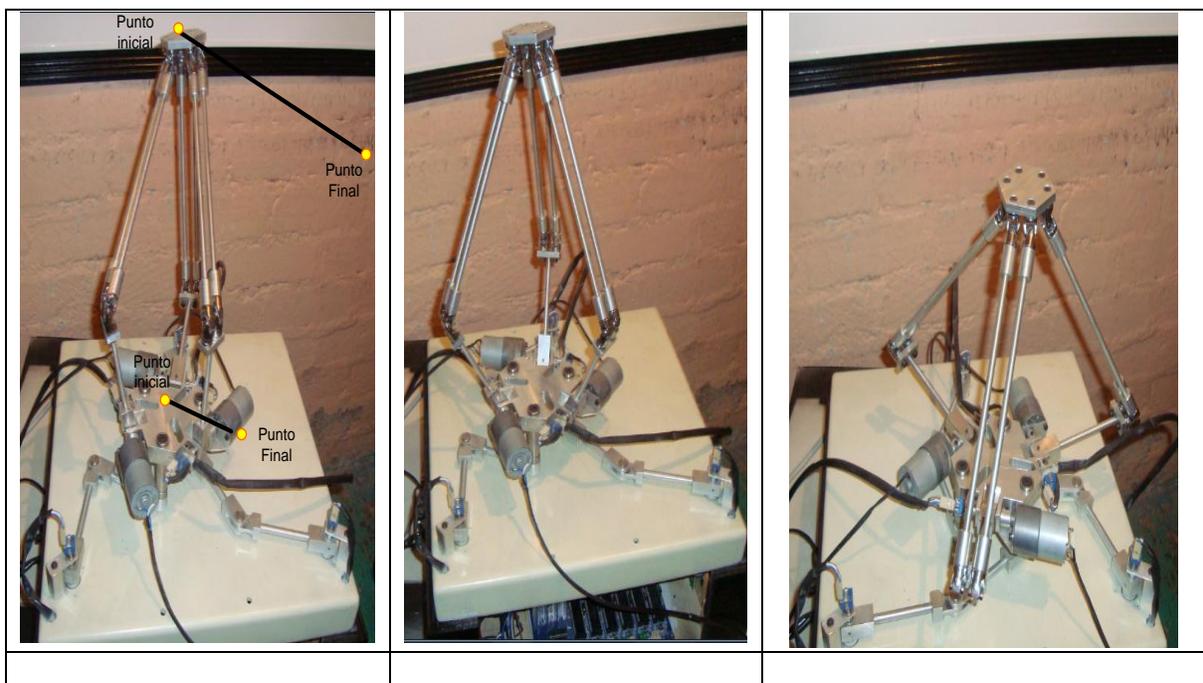


Figura 5.6 Seguimiento de una trayectoria en línea prototipo piloto

Con los resultados obtenidos de la solución de la cinemática ver ecuaciones 5.1 y 5.3 de la cinemática inversa y con la ecuación que describe la trayectoria, y la ecuación del perfil de velocidad se obtienen los puntos por donde el manipulador tiene que pasar así como su respectivo valor de las variables articulares para lograr la meta que es seguir una trayectoria en línea recta, ahora el problema consiste en programar cada microcontrolador para lograr posicionar a cada eslabón en el punto que le corresponde. El programa para el control se realizó en lenguaje C para el microcontrolador y la interfaz gráfica en Visual Basic con ayuda de la computadora.

Como resultados de esta prueba se tienen los siguientes:

El robot manipulador paralelo delta híbrido sigue la trayectoria en línea recta. Con algunas variantes dentro de la trayectoria.

Conclusiones.

Por ser un mecanismo híbrido, para esta configuración se tienen cuatro variables (x, y, z, ϕ) y cinco incógnitas $\theta a_{li}, \theta b_{li}, \theta e_{li}, \theta f_{li}, \theta g_{li}$, para cada cadena, para el caso de la cinemática inversa.

De acuerdo en el capítulo dos el problema para la cinemática directa e inversa para este manipulador fue definido dando una posición inicial y final del efector final, obteniendo el conjunto de ángulos que permiten al efector final alcanzar dicha posición.

Al resolver las ecuaciones de lazo de cada cadena se observa en el capítulo 5 que se pueden obtener múltiples soluciones, pero sólo algunas de ellas son solución al problema que se tiene.

Fueron analizados y caracterizados los movimientos completos del robot y dichos movimientos se utilizaron para generar los criterios de la simulación del seguimiento de trayectorias. Para este trabajo de tesis se definieron tres trayectorias para resolver las ecuaciones de lazo que se obtuvieron de cada cadena. Pero el robot puede seguir cualquier trayectoria que se encuentre dentro de su espacio de trabajo.

Se tienen los siguientes movimientos para el robot delta híbrido:

- Movimiento uno a uno
- Movimientos simultáneos
- Movimientos combinados

El estudio de las propiedades cinemáticas de un robot manipulador delta plano en serie con un robot manipulador delta en el espacio, proporciona nuevas técnicas y conocimientos en el área de los robots manipuladores.

Se construyó un prototipo piloto para probar las técnicas y conocimientos generados del robot manipulador paralelo delta híbrido.

Al unir dos robots paralelos en serie se obtiene un espacio de trabajo más amplio y por consiguiente se tienen características de robots tipo serie y paralelo.

APÉNDICE A

IDENTIDADES TRIGONOMÉTRICAS

De las identidades trigonométricas del capítulo 2 (Tsai 1999). Se tiene, que para eliminar el seno y el coseno a veces es necesario transformar funciones para poderlas sumar libremente, en estos casos es posible eliminar senos y cosenos en tangentes.

Utilizando el parámetro t se tiene:

$$t = \text{Tan} \left[\frac{1}{2} \theta \right] \quad (1)$$

Sustituyendo el parámetro t en las identidades trigonométricas (3) y (4).

$$\text{Sin}[\theta] = 2 * \text{Sin} \left[\frac{1}{2} \theta \right] * \text{Cos} \left[\frac{1}{2} \theta \right] \quad (2)$$

$$\text{Sin}[\theta] = \frac{2 * \text{Tan} \left[\frac{1}{2} \theta \right]}{1 + \text{Tan}^2 \left[\frac{1}{2} \theta \right]} \quad (3)$$

$$\text{Cos}[\theta] = \frac{1 - \text{Tan}^2 \left[\frac{1}{2} \theta \right]}{1 + \text{Tan}^2 \left[\frac{1}{2} \theta \right]} \quad (4)$$

Se tiene:

$$\text{Sin}(\theta) = \frac{2t}{1+t^2} \dots\dots\dots \text{Identidad}_1$$

$$\text{Cos}(\theta) = \frac{1-t^2}{1+t^2} \dots\dots\dots \text{Identidad}_2$$

APÉNDICE B

CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA.


```

{
flag2 = 1;
datos1[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto2: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos1[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto2;
}while(dato_in!=2);

dato_in= 0;
flag2 = 0;
}
//-----
--
If (rxdato=='E')
{
flag2 = 1;
}

//-----
--
If (rxdato=='F')
{
flag2 = 1;
}
//-----
--

If (rxdato=='G')
{
flag2 = 1;
}
//-----
--

If (rxdato=='H')
{
flag2 = 1;
}
//-----
else
{
flag2 = 1;
goto checar;
}}
//***** FIN DE LA INTERRUPCION POR
RECEPCION EN LA USART *****/

void main()
{
output_low(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);

habil_int:
enable_interrupts(global);
enable_interrupts(int_rda);

do{
//restart_wdt();//*** Refresco al Perro
guardian ***.
}

while(flag2 != 1);
set_tris_c(0x80);
setup_port_a(ALL_ANALOG);
setup_adc (adc_clock_internal);
setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1, 255, 1);
output_high(PIN_B0);

//-----
--
if (datos[0]=='Q')
{
disable_interrupts(int_ext);
Digitalizador();
}

```

```

}
//-----
--
if (datos1[0]=='q')
{
disable_interrupts(int_ext);
Rutina_1_Ecu();
}
//-----
--

if (rxdato=='E')
{
disable_interrupts(int_ext);
Home();
}
//-----
--
if (rxdato=='F')
{
disable_interrupts(int_ext);
Rutina_1();
}
//-----
--

if (rxdato=='G')
{
disable_interrupts(int_ext);
ciclo();
}
//.....

if (rxdato=='H')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_cpu();
}
//.....
datos[0]=0;
datos[1]=0;
datos[2]=0;
datos[3]=0;

datos1[0]=0;

datos1[1]=0;
datos1[2]=0;
datos1[3]=0;

flag2=0;
rxdato=0;
goto habil_int;
}
//-----
--

void manda_cpu()
{
putc('a');
delay_ms(500);
putc('b');
delay_ms(500);
putc('b');
delay_ms(500);
putc('v');
}
//-----
--

void Digitalizador()
{
int detener;
detener=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos[1])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(150);
output_low(PIN_B3);
}
}
}

```

```

if(valor1>datos[1])
output_low(PIN_B4);
if(valor1<datos[1])
output_high(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}
//-----
--
void Digi_3_mot()
{
int detener;
detener=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();
if(valor1==datos[1])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(150);
output_low(PIN_B3);
}
if(valor1>datos[1])
output_low(PIN_B4);
if(valor1<datos[1])
output_high(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}
//-----
--
void Home()
{
int detener;
detener=0;
Pos_ini=170;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==Pos_ini)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(120);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>Pos_ini)
output_low(PIN_B4);

```

```

if(valor1<Pos_ini)
output_high(PIN_B4);
}while(detener!=1);
//-----Posicion Final-----
delay_ms(100);
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==Pos_fin)
{
output_high(PIN_B3);
detener_1=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(120);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>Pos_fin)
output_low(PIN_B4);
if(valor1<Pos_fin)
output_high(PIN_B4);
}while(detener_1!=1);
}
//-----
void Rutina_1_Ecu()
{
int detener;
int detener_1;
Pos_ini=datos1[1];
Pos_fin=datos1[2];
detener=0;
detener_1=0;
//-----Posicion inicial-----
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==Pos_ini)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(110);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>Pos_ini)
output_low(PIN_B4);
if(valor1<Pos_ini)
output_high(PIN_B4);
}while(detener!=1);
//-----Posicion Final-----
-
delay_ms(500);
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==Pos_fin)
{
output_high(PIN_B3);
detener_1=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(110);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>Pos_fin)
output_low(PIN_B4);
if(valor1<Pos_fin)
output_high(PIN_B4);
}while(detener_1!=1);
}

//-----
--
void ciclo()
{
int i;

```

```

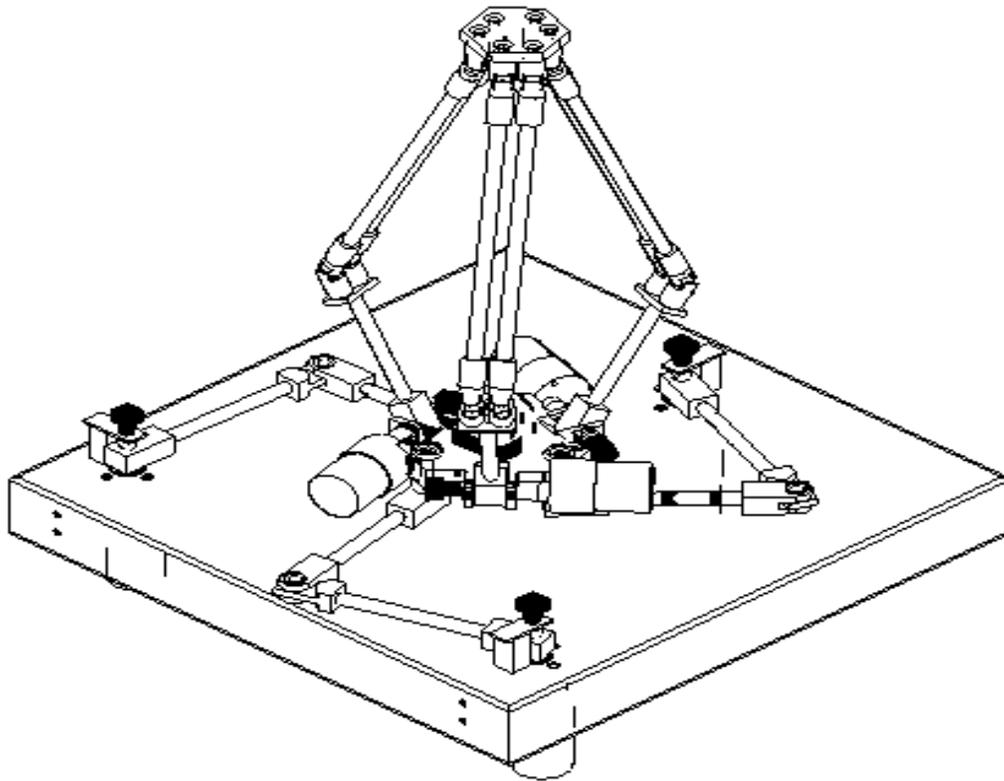
int detener;
int detener1;
int val;
int vi;
int vf;
int suma;
int Increm;
int x1;
int x2;
int tp;
int T;
int ttp;
int pwm1;
int pwm2;
detener=0;
detener1=0;
suma=20+70;
vi=suma;
val=suma;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

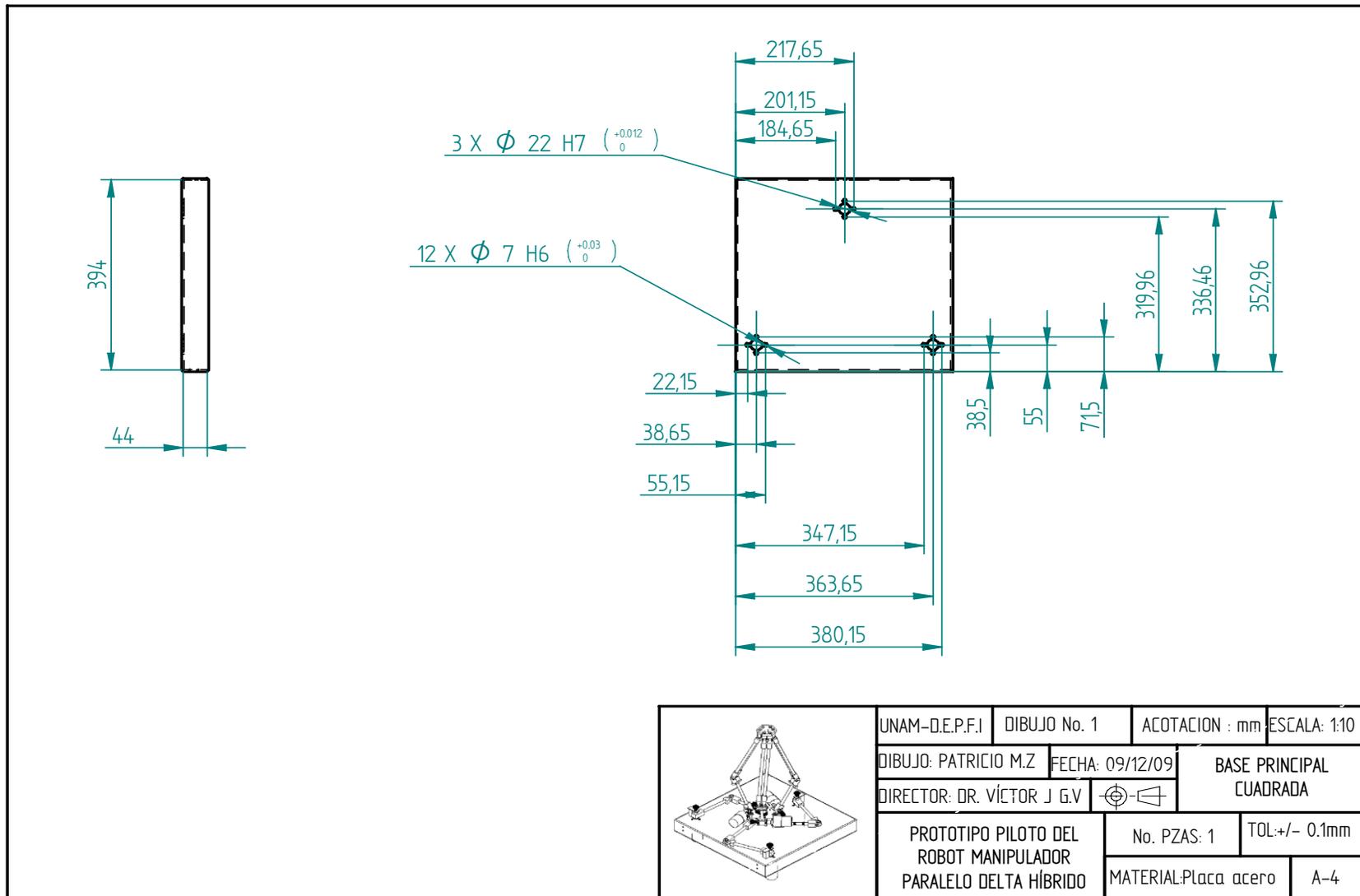
if(valor1==val)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(125);
output_low(PIN_B3);
}
}
if(valor1>val)
output_low(PIN_B4);
if(valor1<val)
output_high(PIN_B4);
}while(detener!=1);
x1=80;
x2=90;
pwm1=120;
pwm2=160;
tp = 16;
T = 70;
for (i=0;i<=tp;++i)
{
ttp = (i/tp)*T;
//P[i] = (10 * (ttp / T) ^ 3 - 15 * (ttp / T) ^ 4 +
6 * (ttp / T) ^ 5);
P[i]=10*pow((ttp/T),3)-
15*pow((ttp/T),4)+6*pow((ttp/T),5);
x[i]=x1+((x2-x1)*P[i]);
vf=x[i];
PWM[i]=pwm1+(pwm2-pwm1)*P[i];
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();
if(valor1>vf)
set_pwm1_duty(PWM[i]);
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
if(valor1<vf)
set_pwm1_duty(PWM[i]);
output_low(PIN_B3);
output_high(PIN_B4);} }

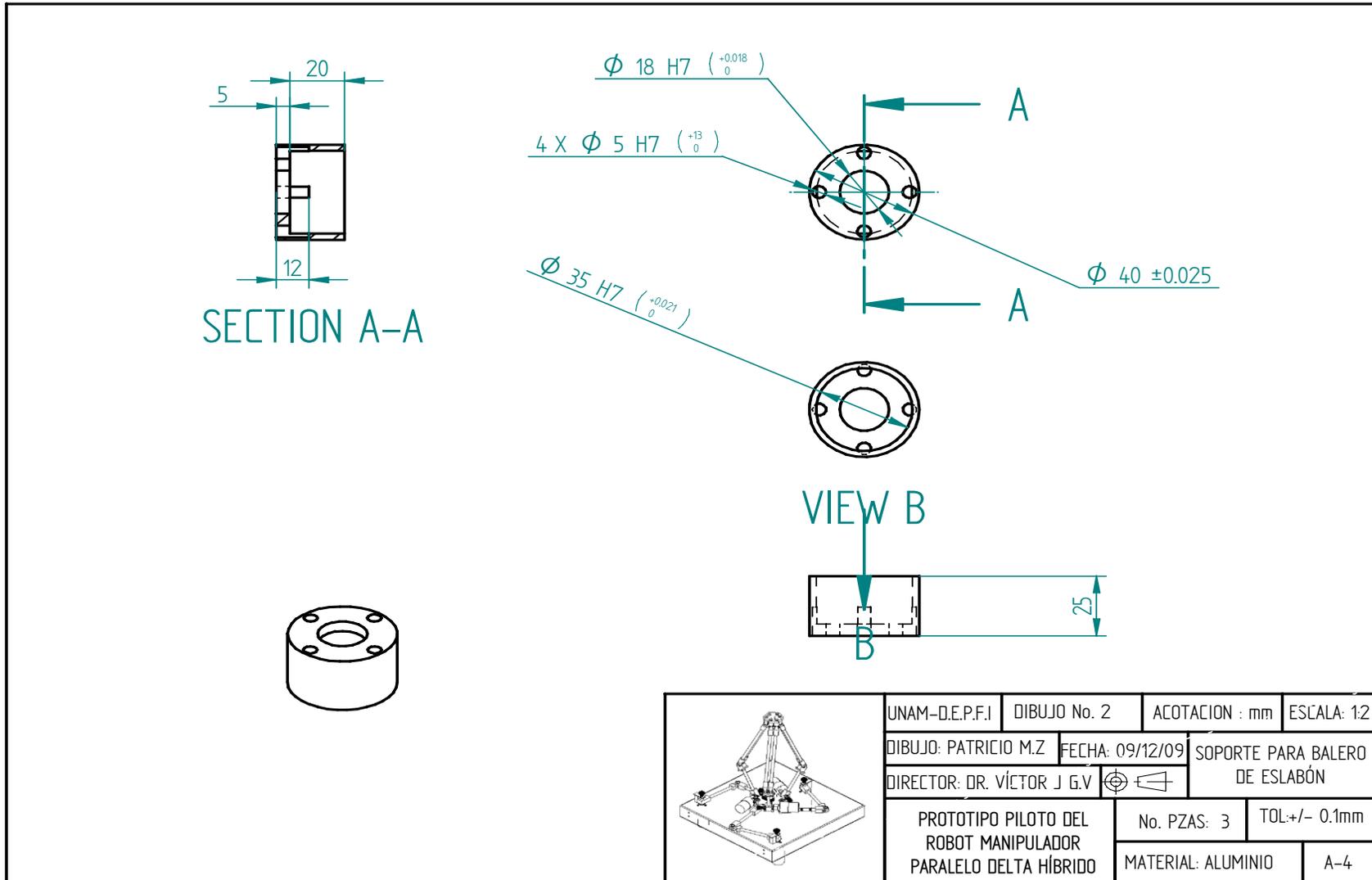
```

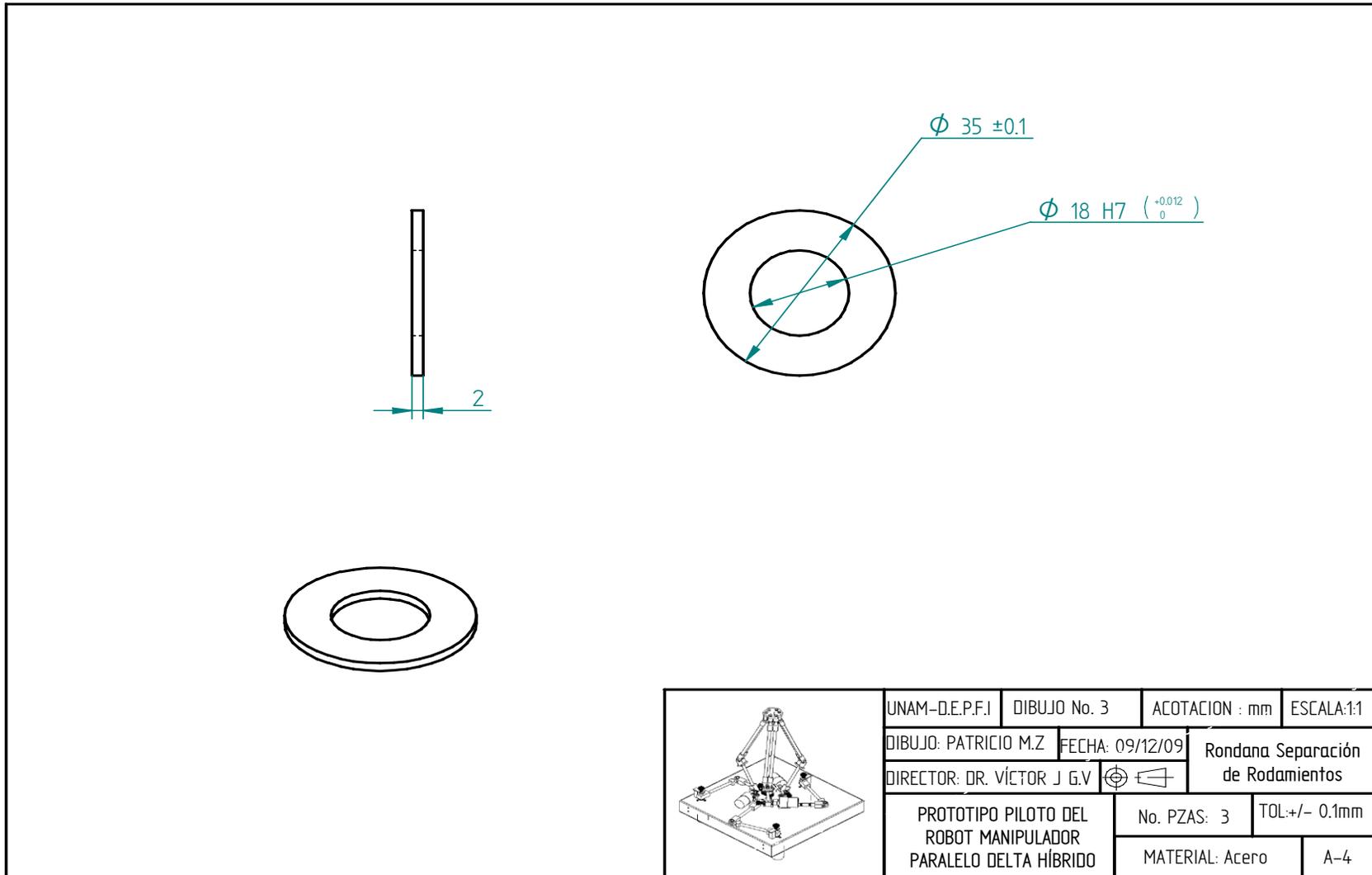
APÉNDICE C

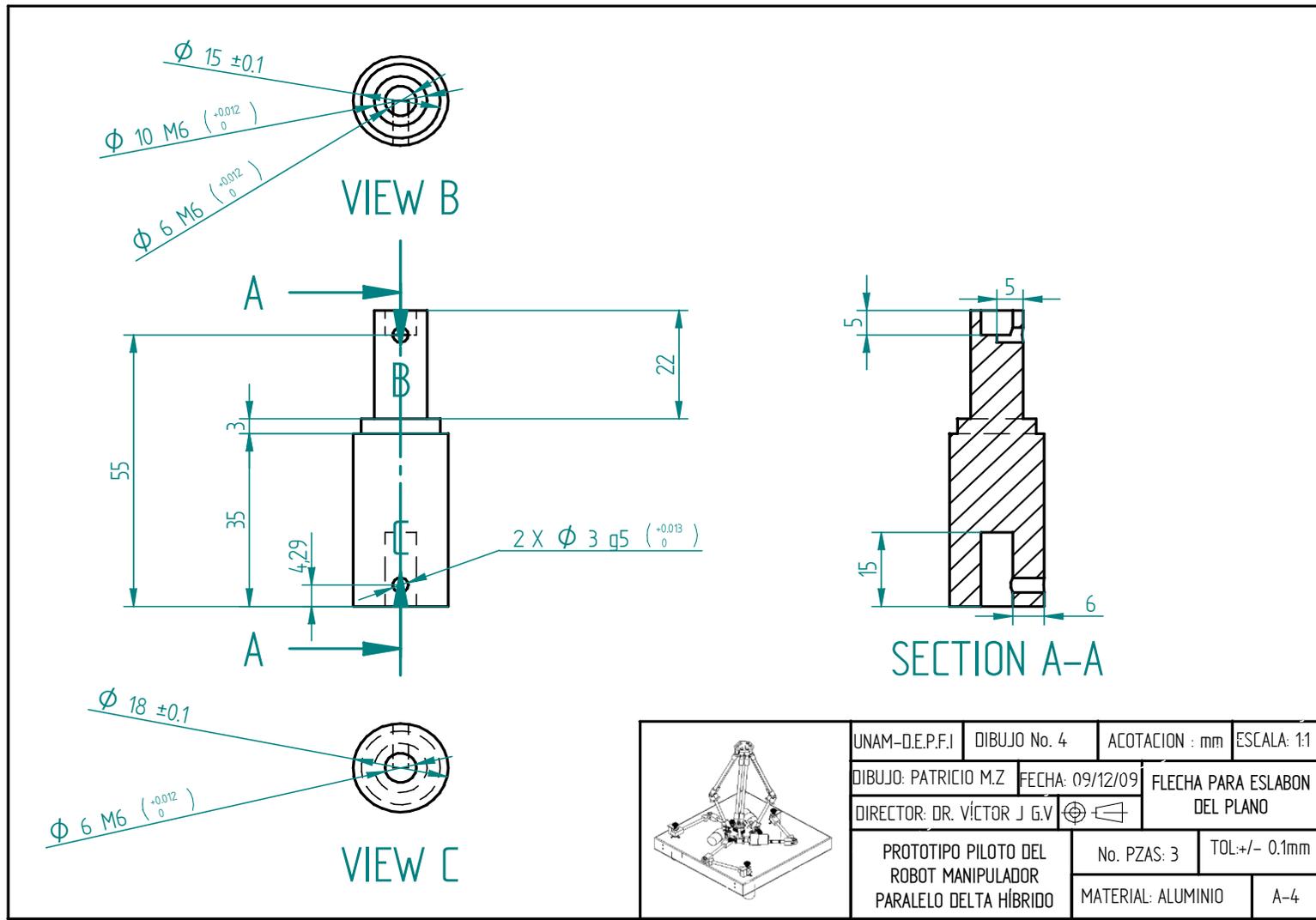
DIBUJOS DE LOS ELEMENTO MECÁNICOS DEL ROBOT MANIPULADOR PARALELO DELTA HÍBRIDO.

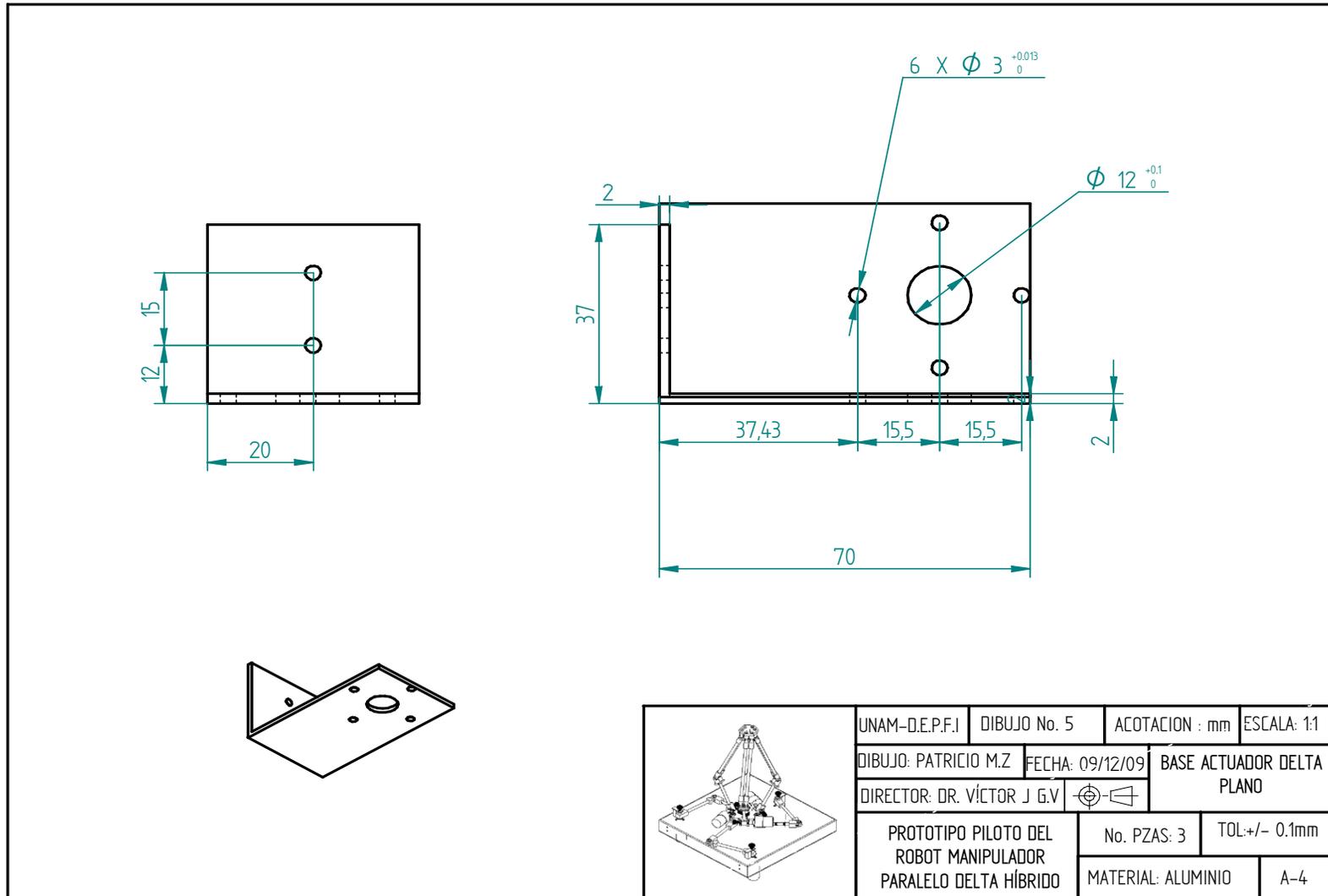


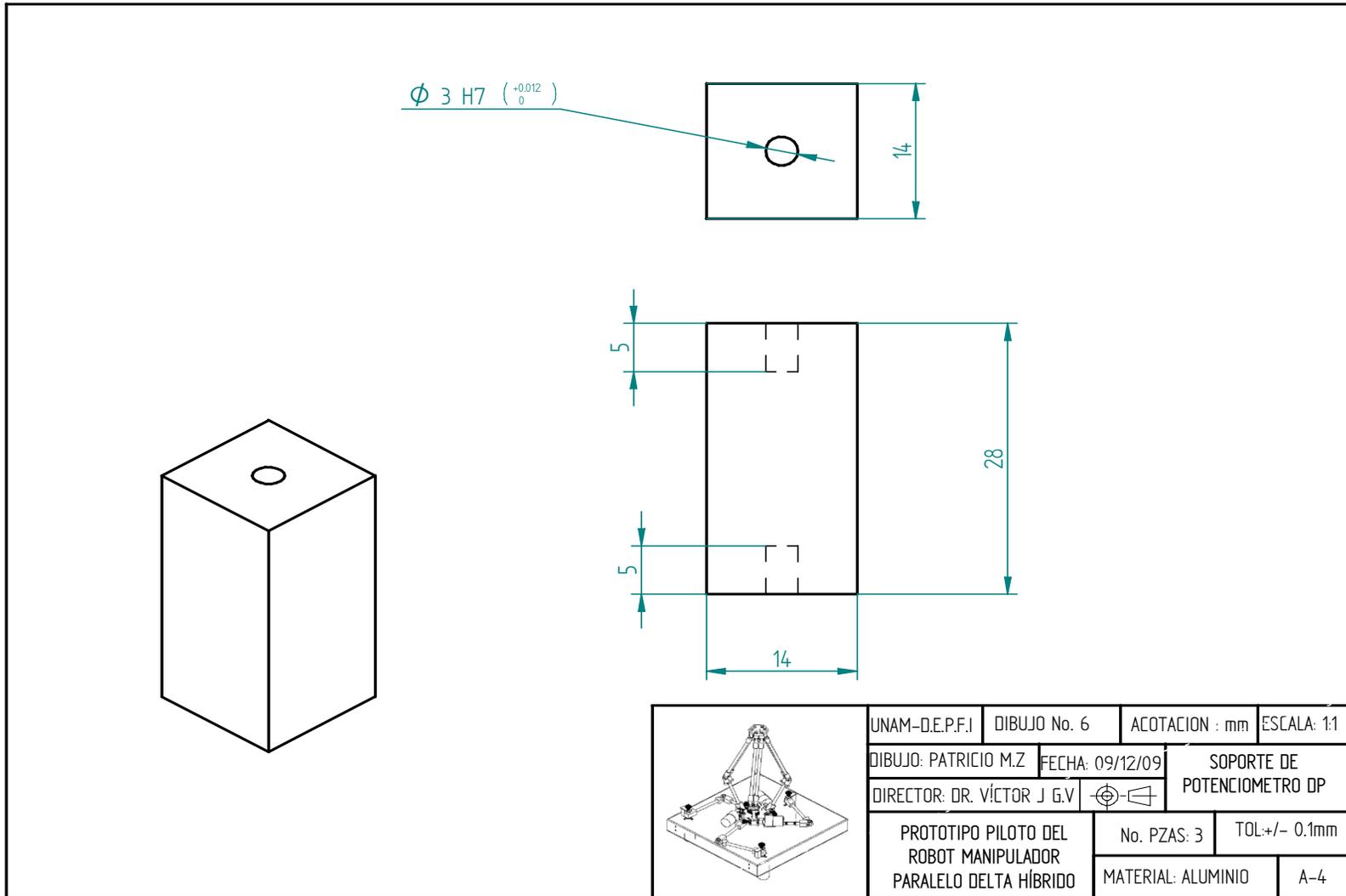


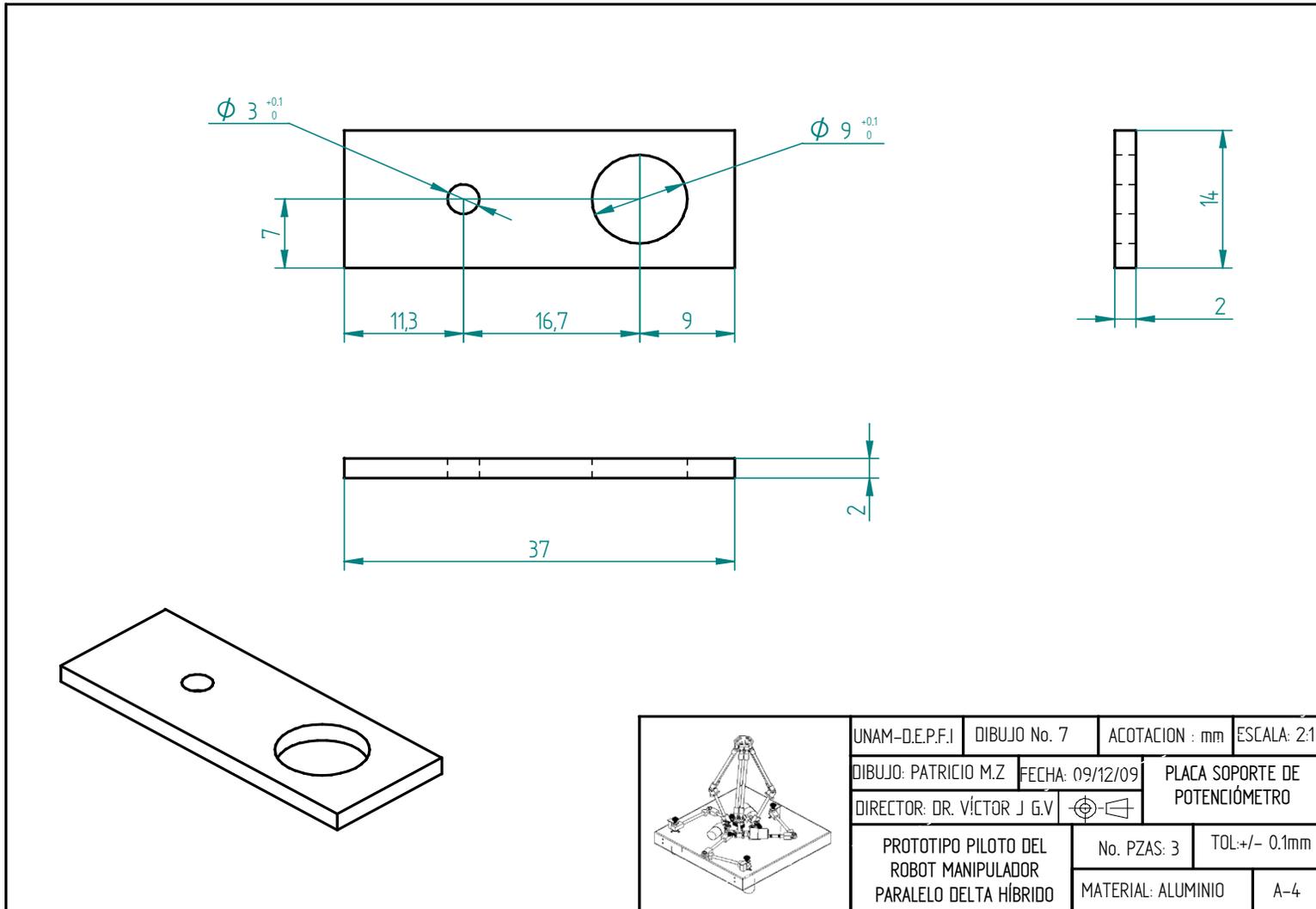


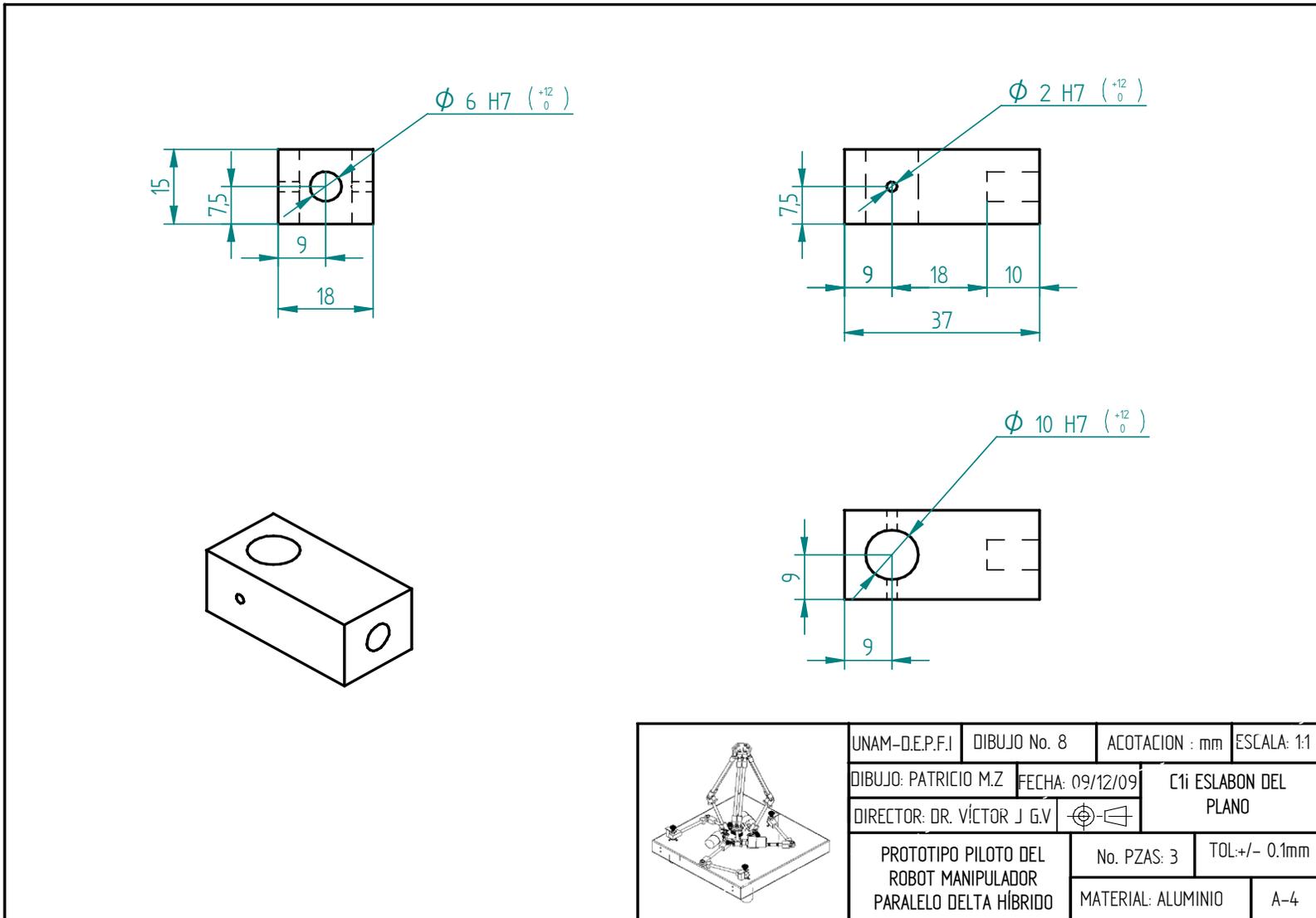


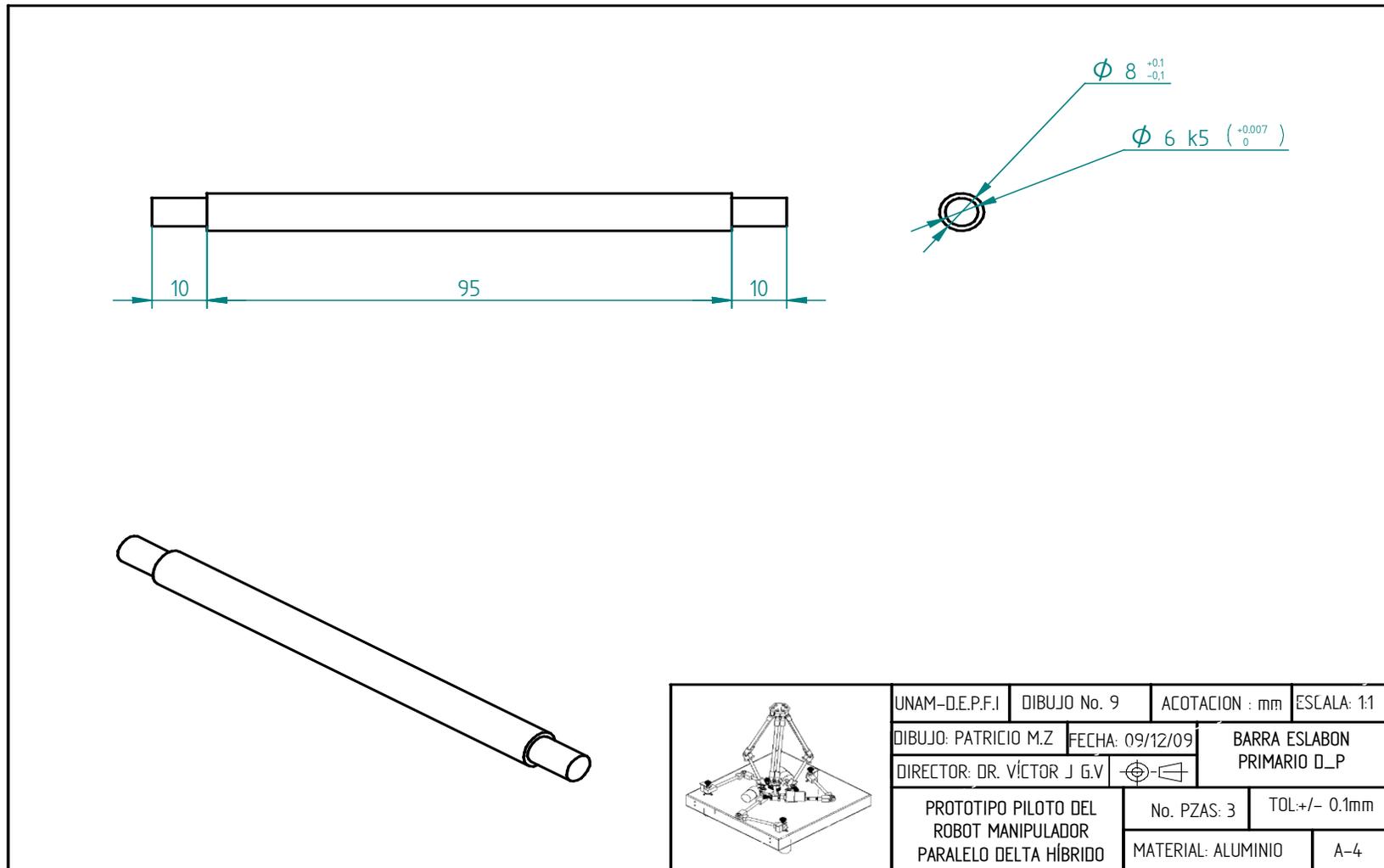


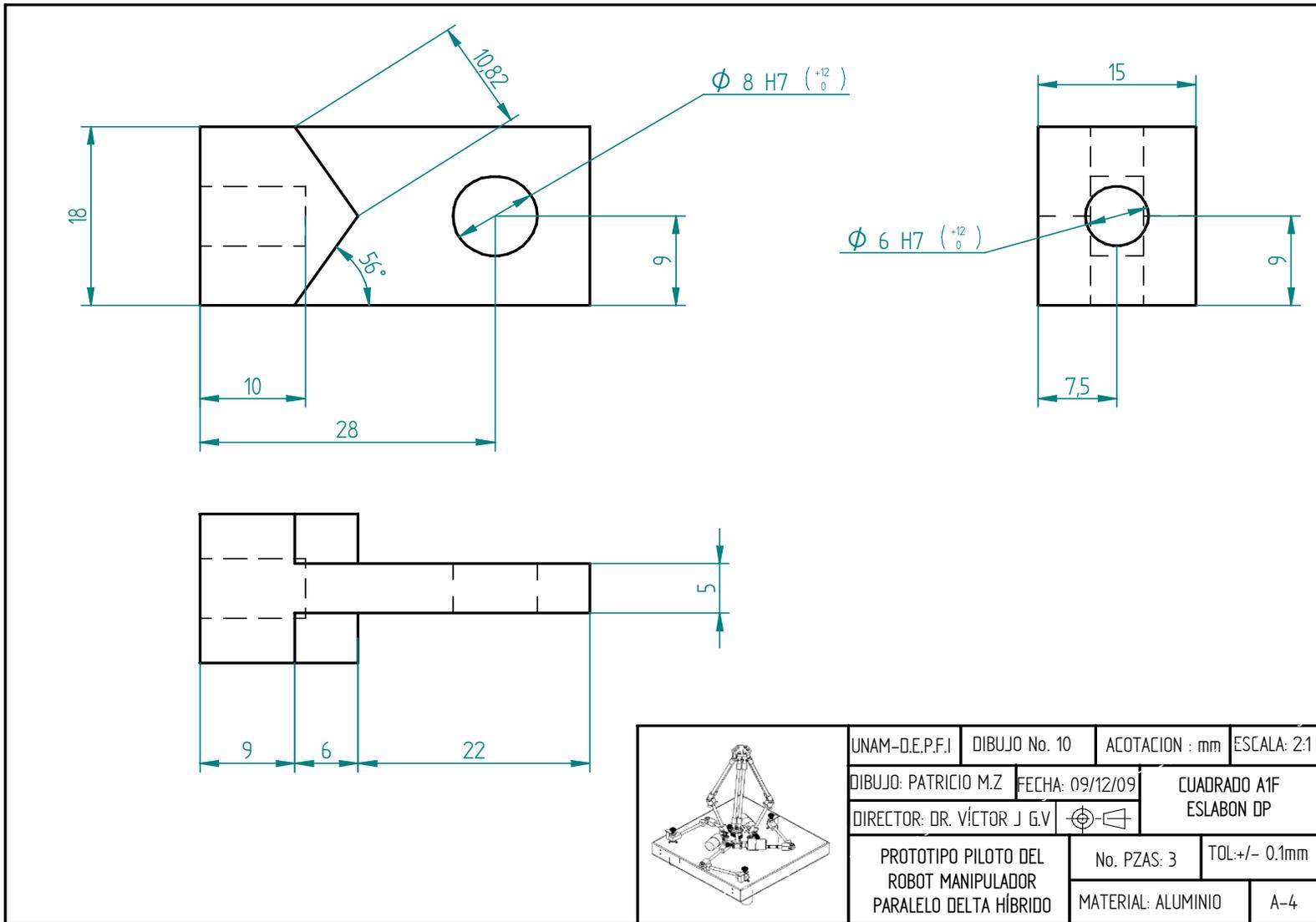


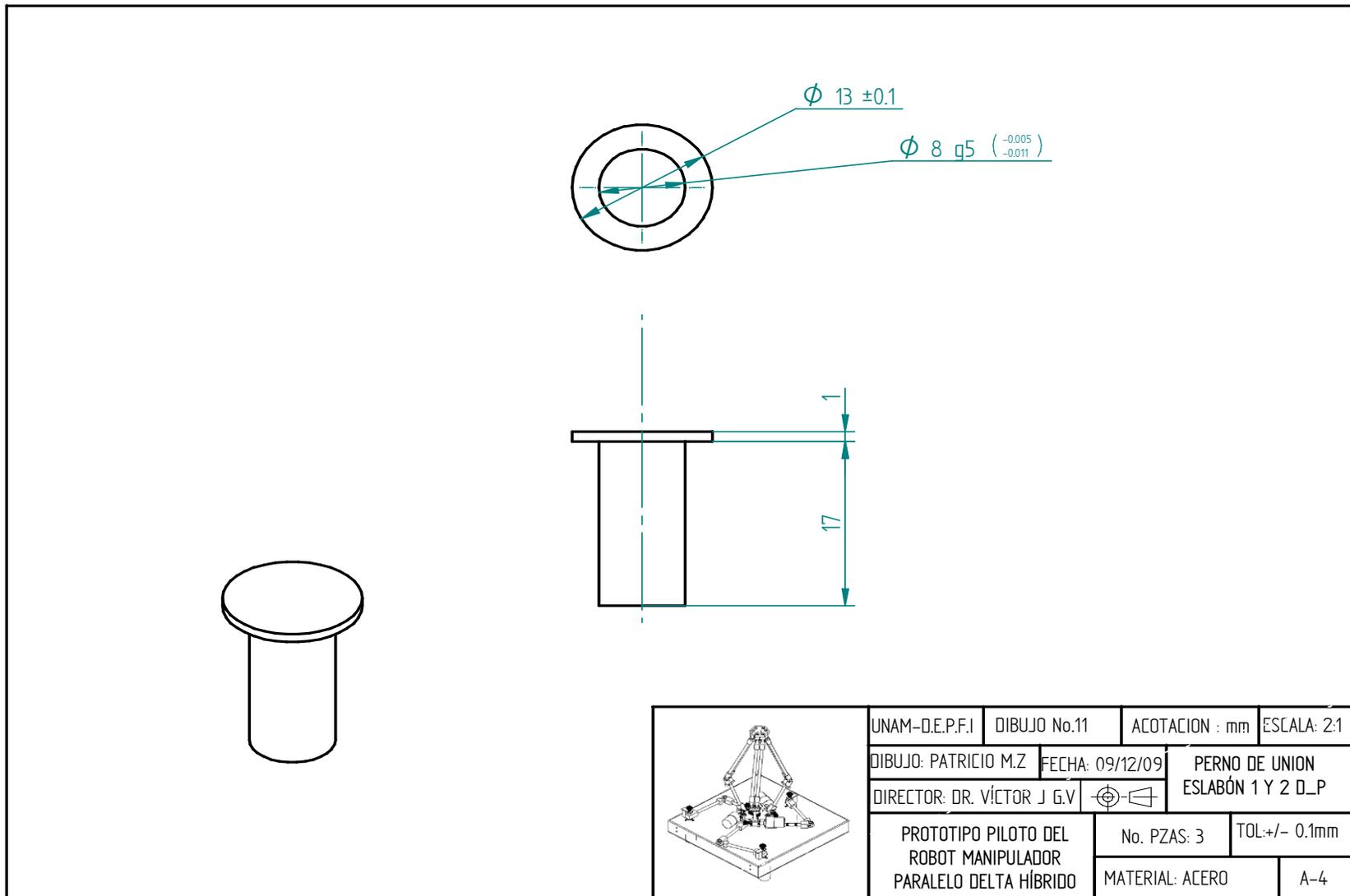


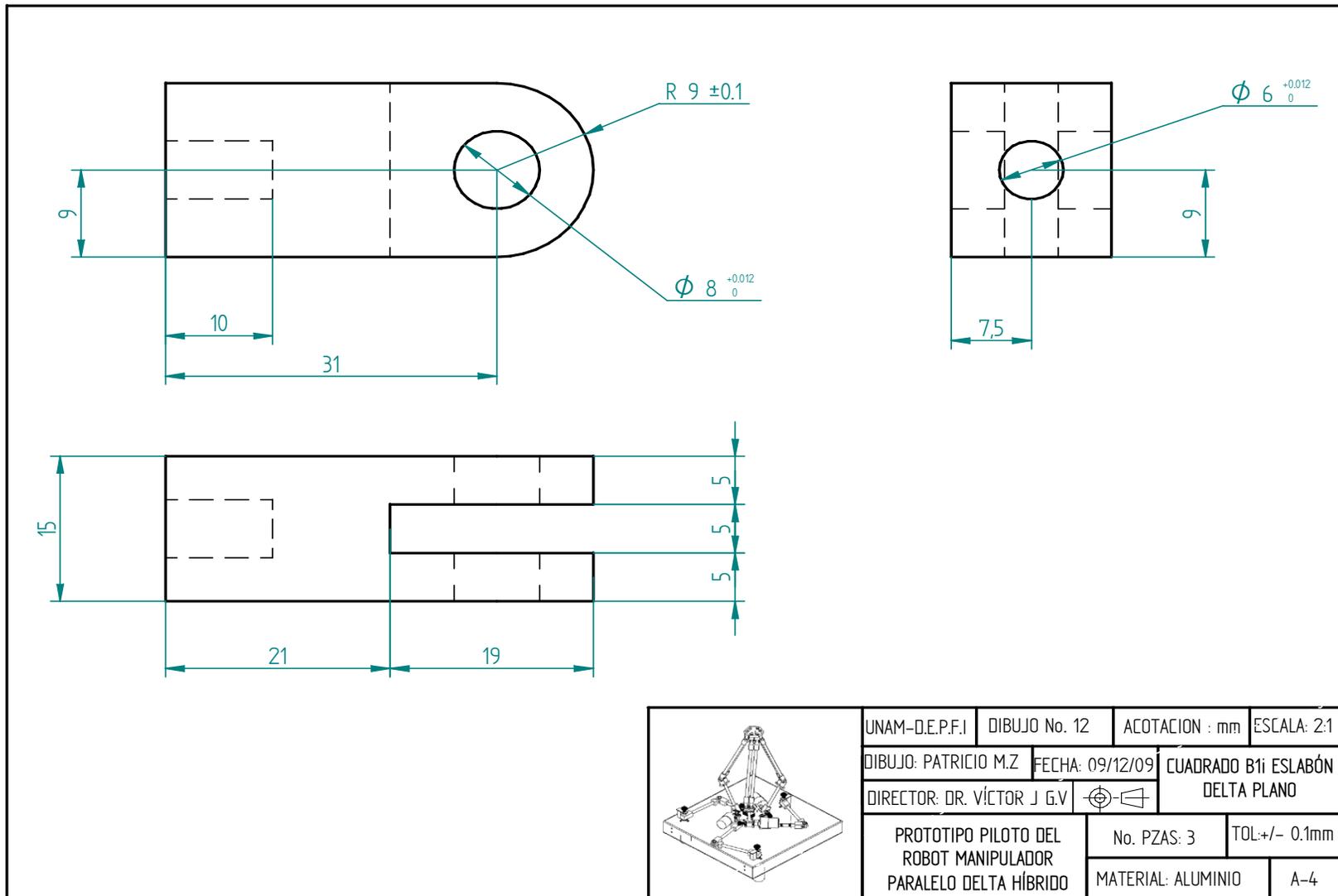


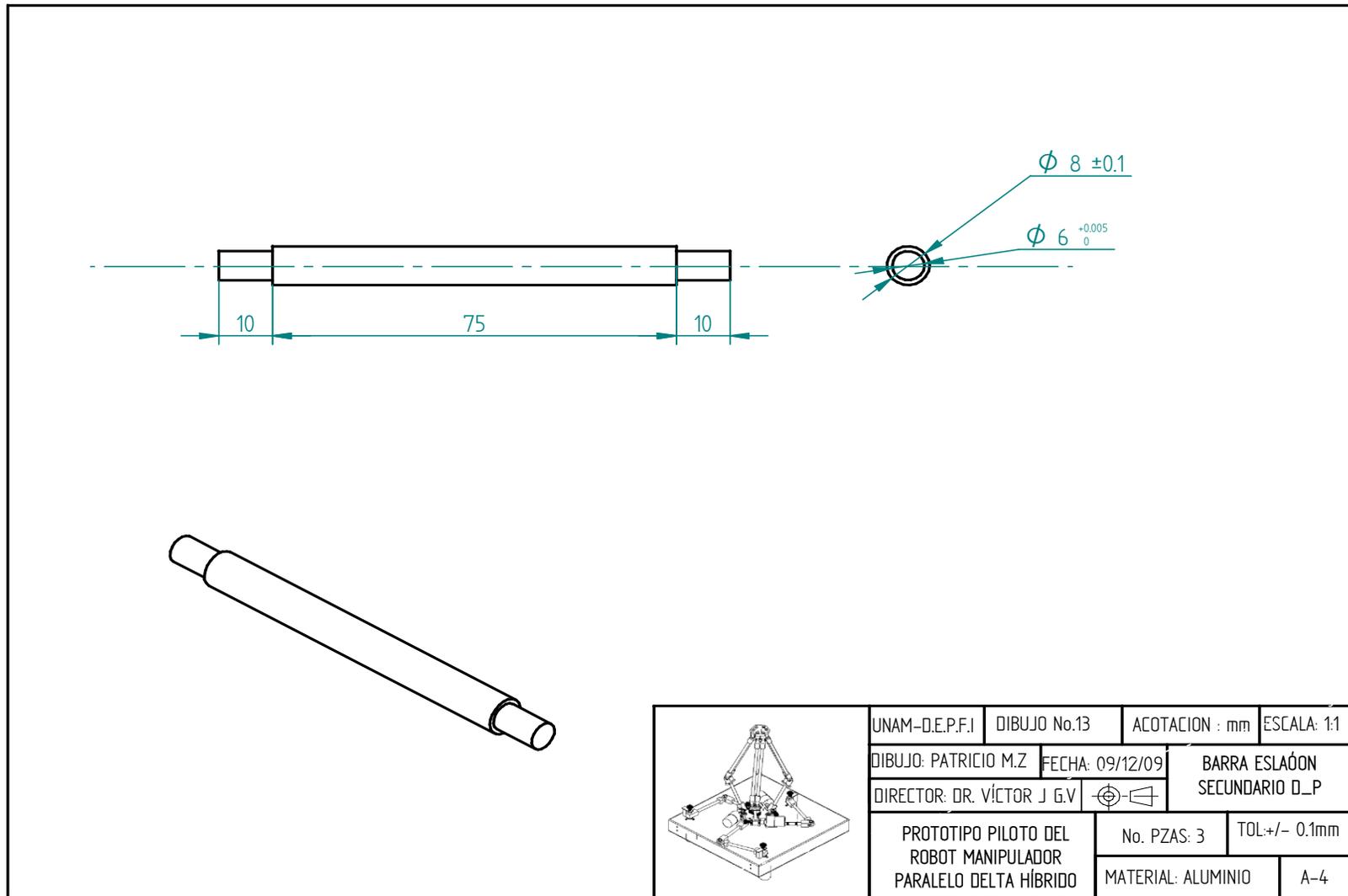


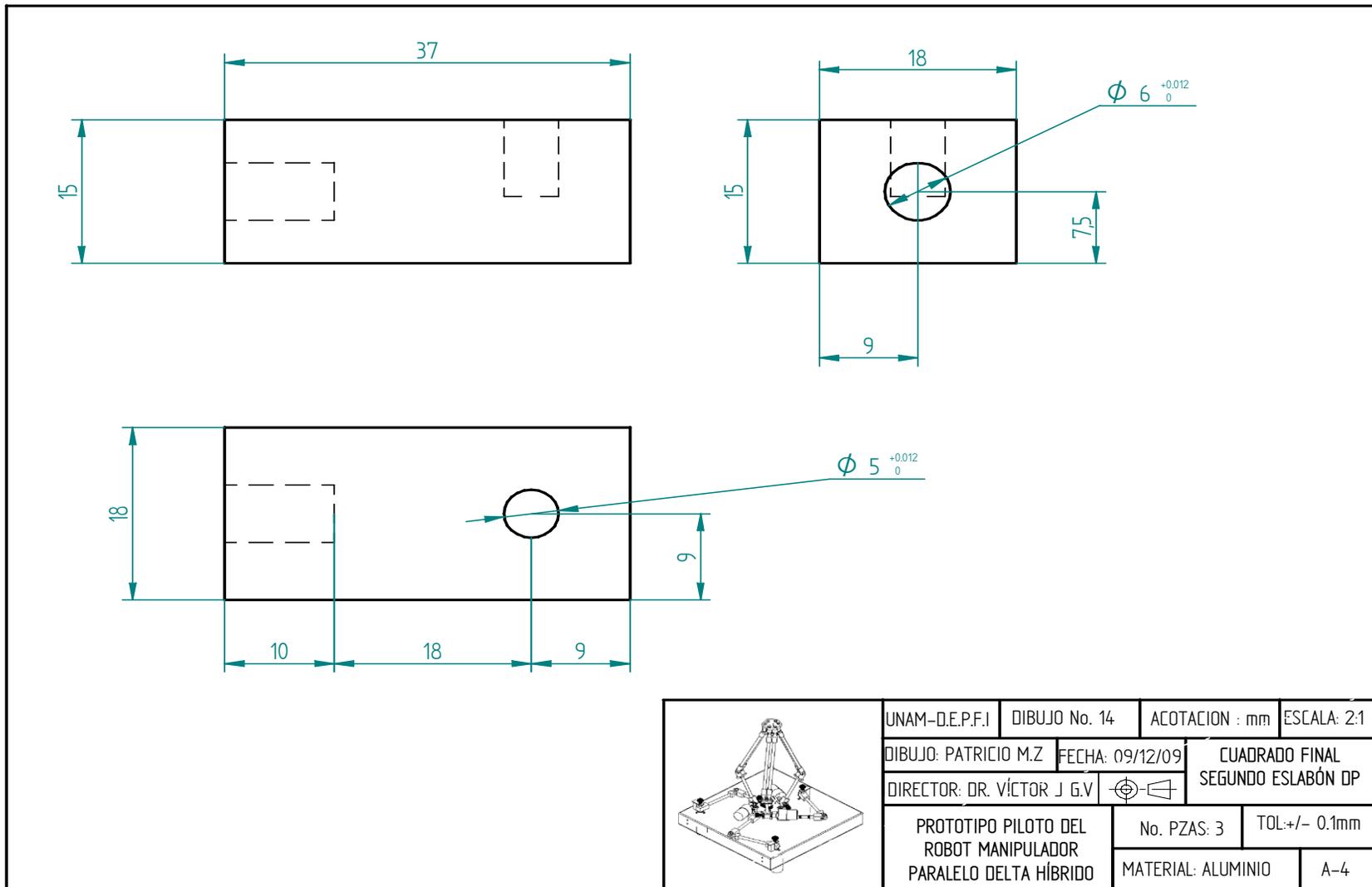


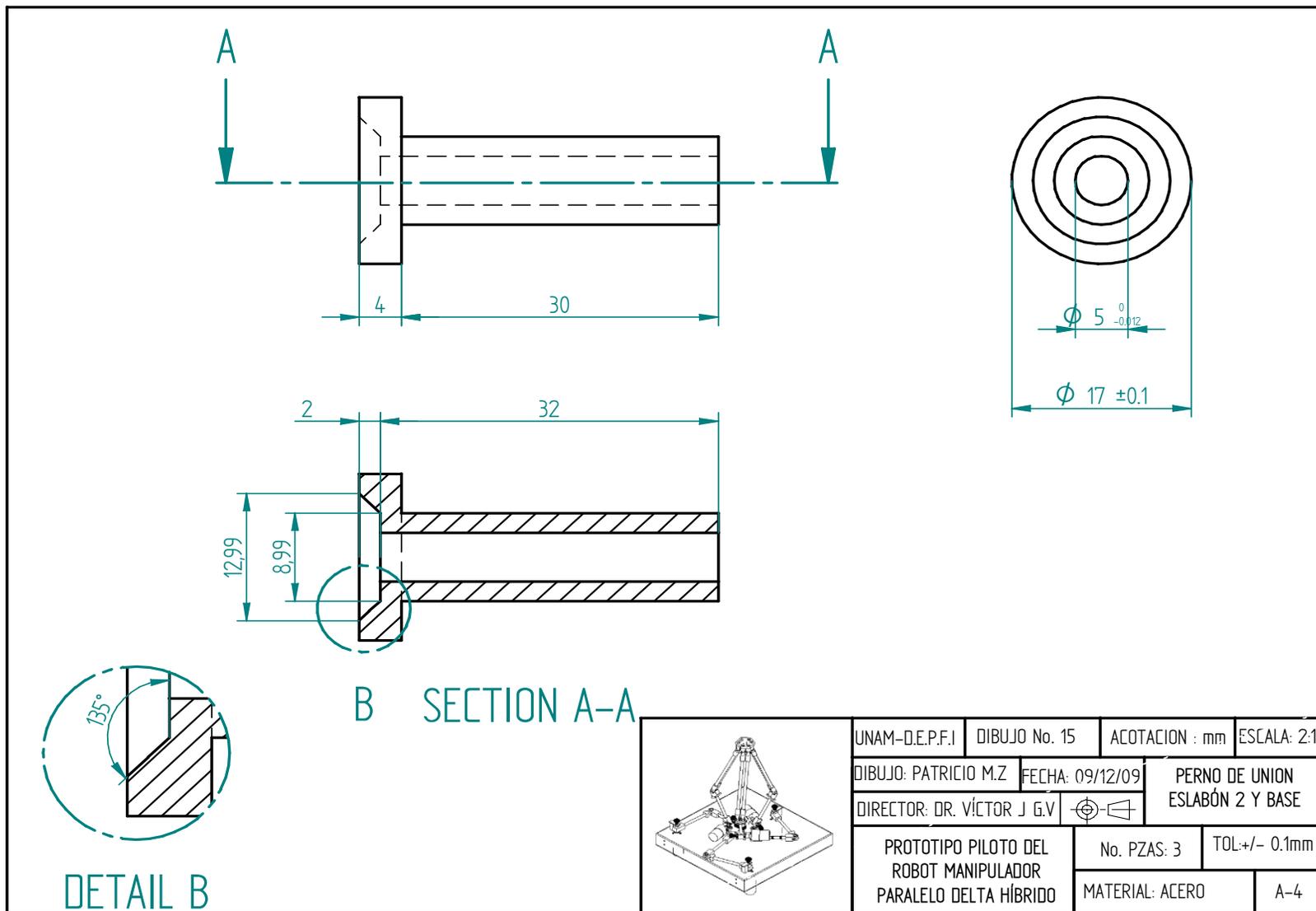


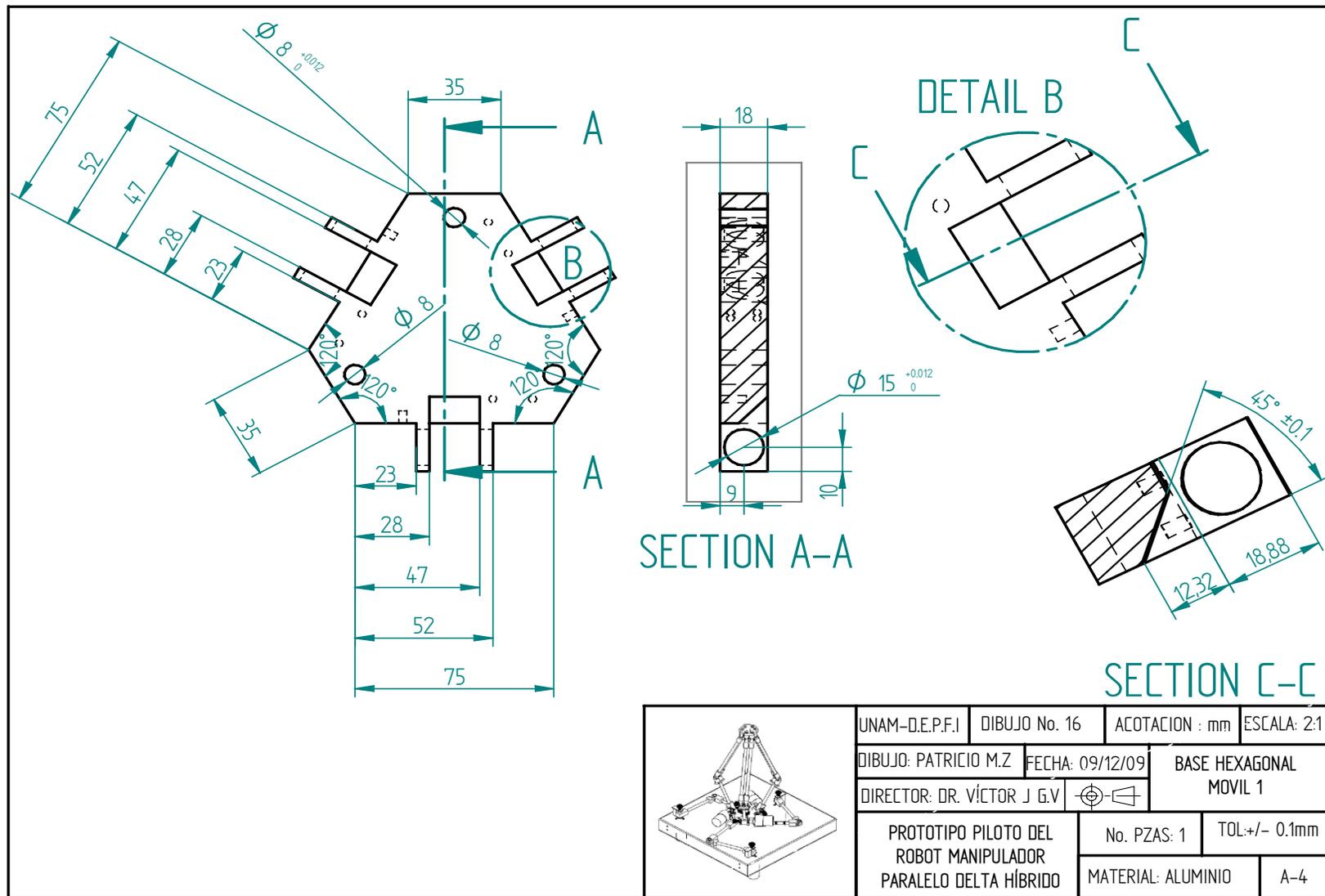


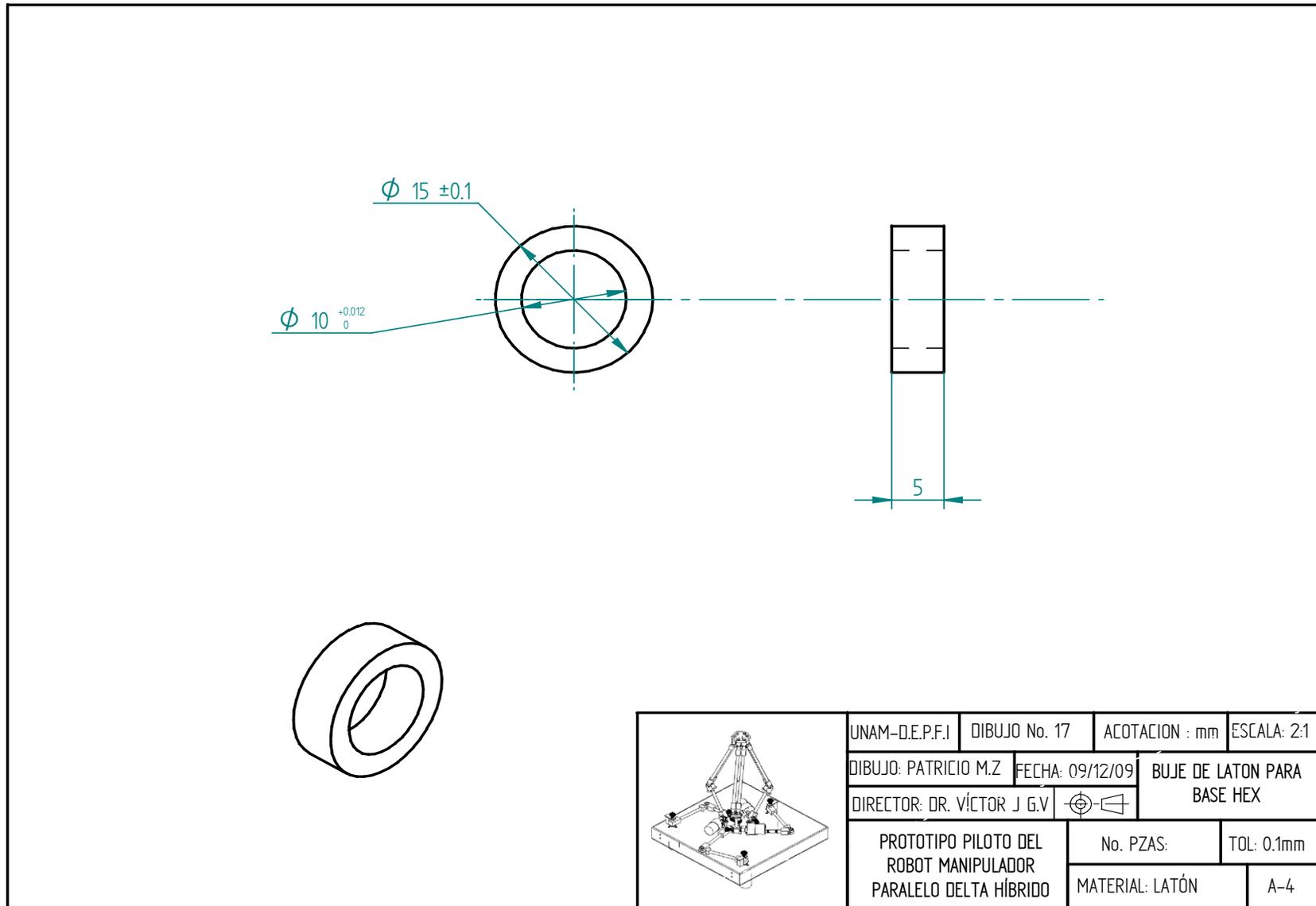


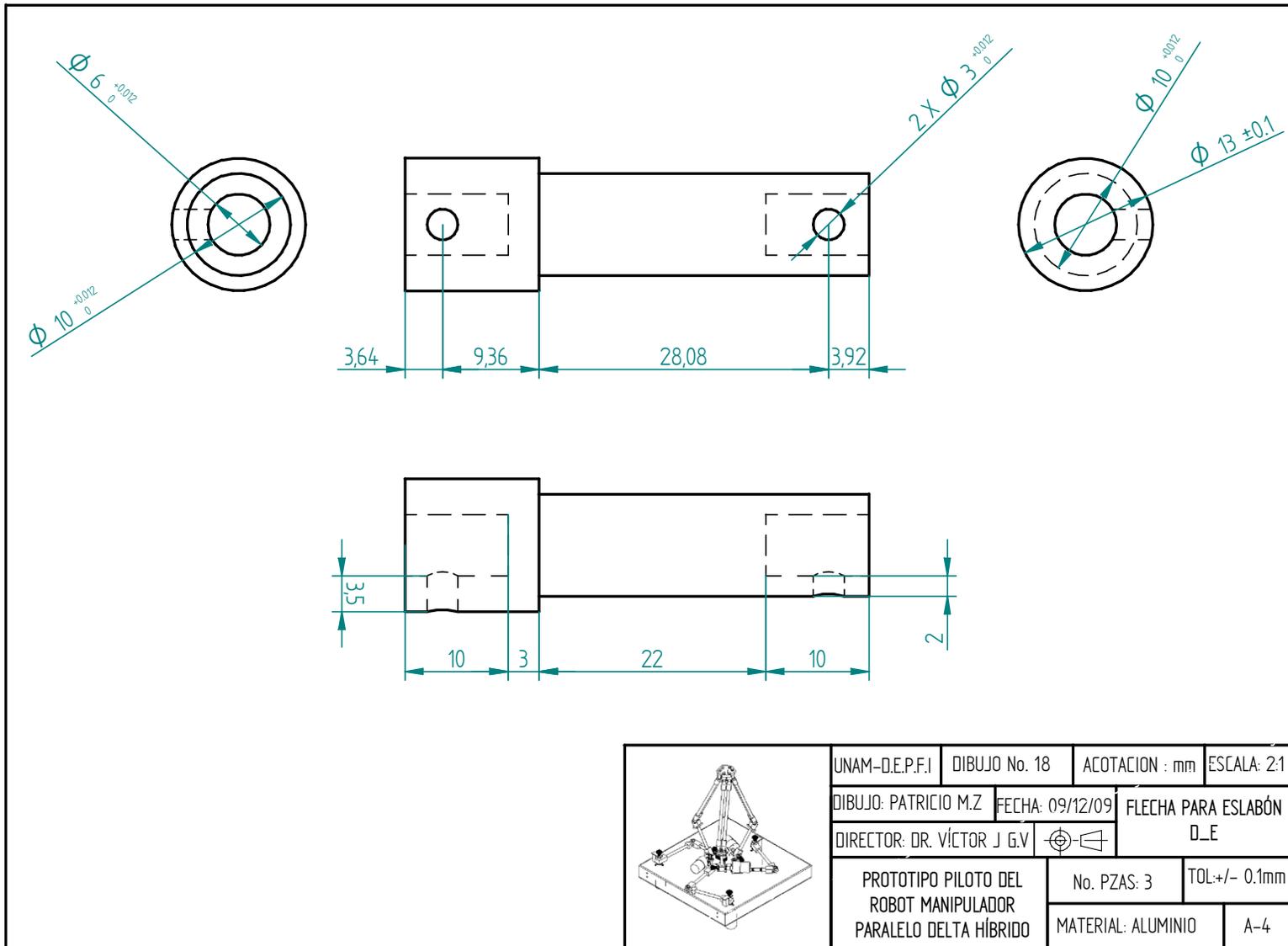


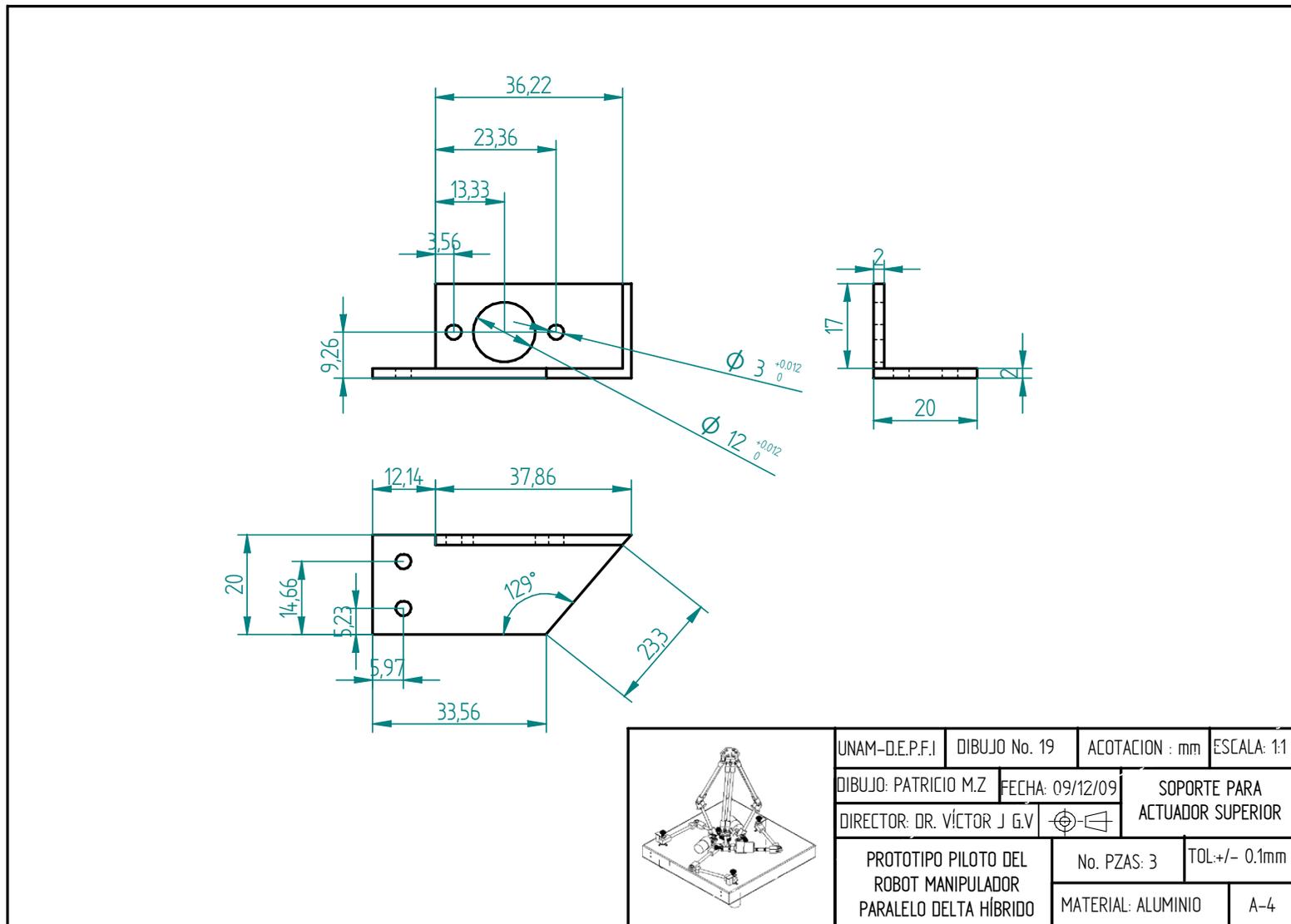


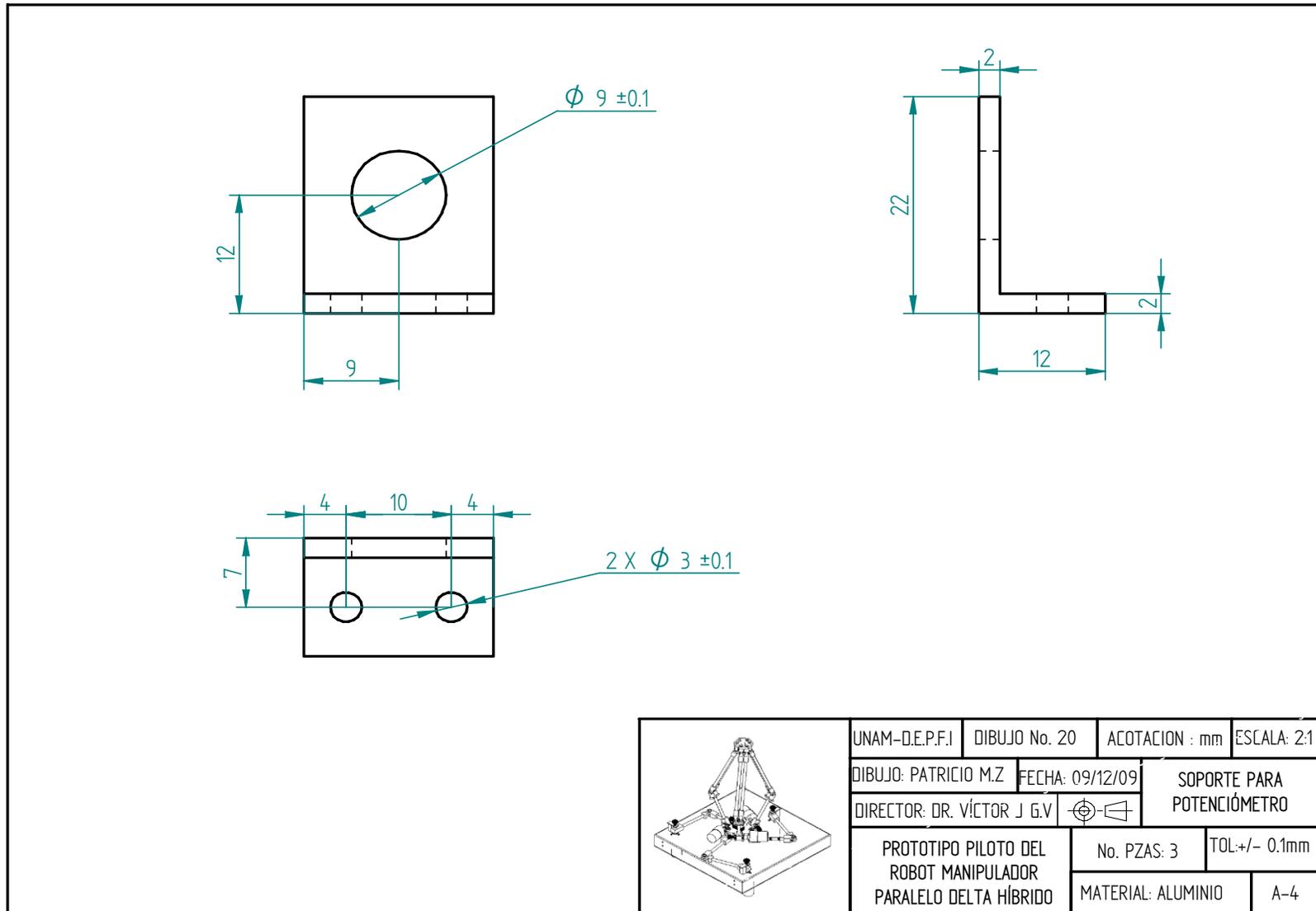


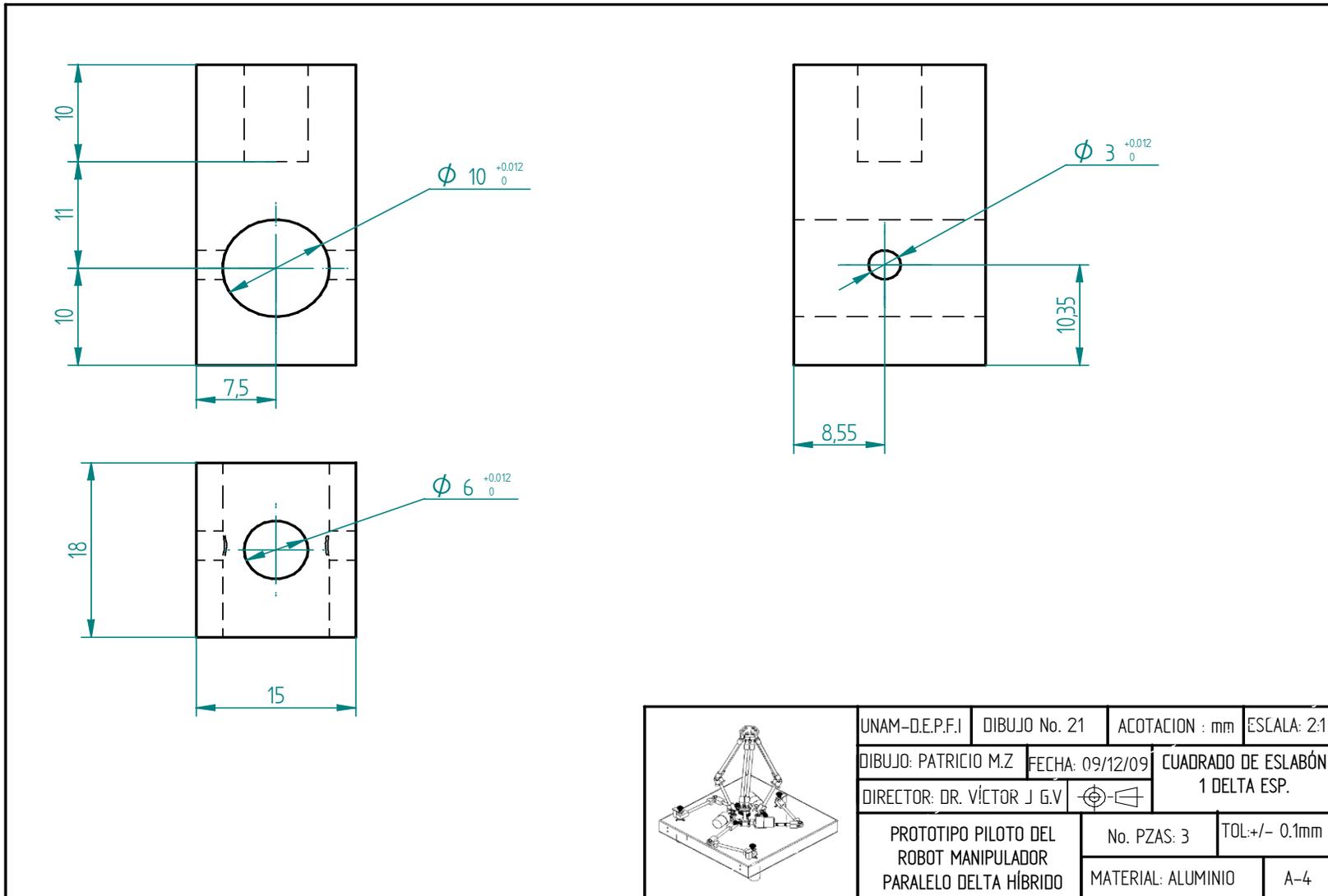


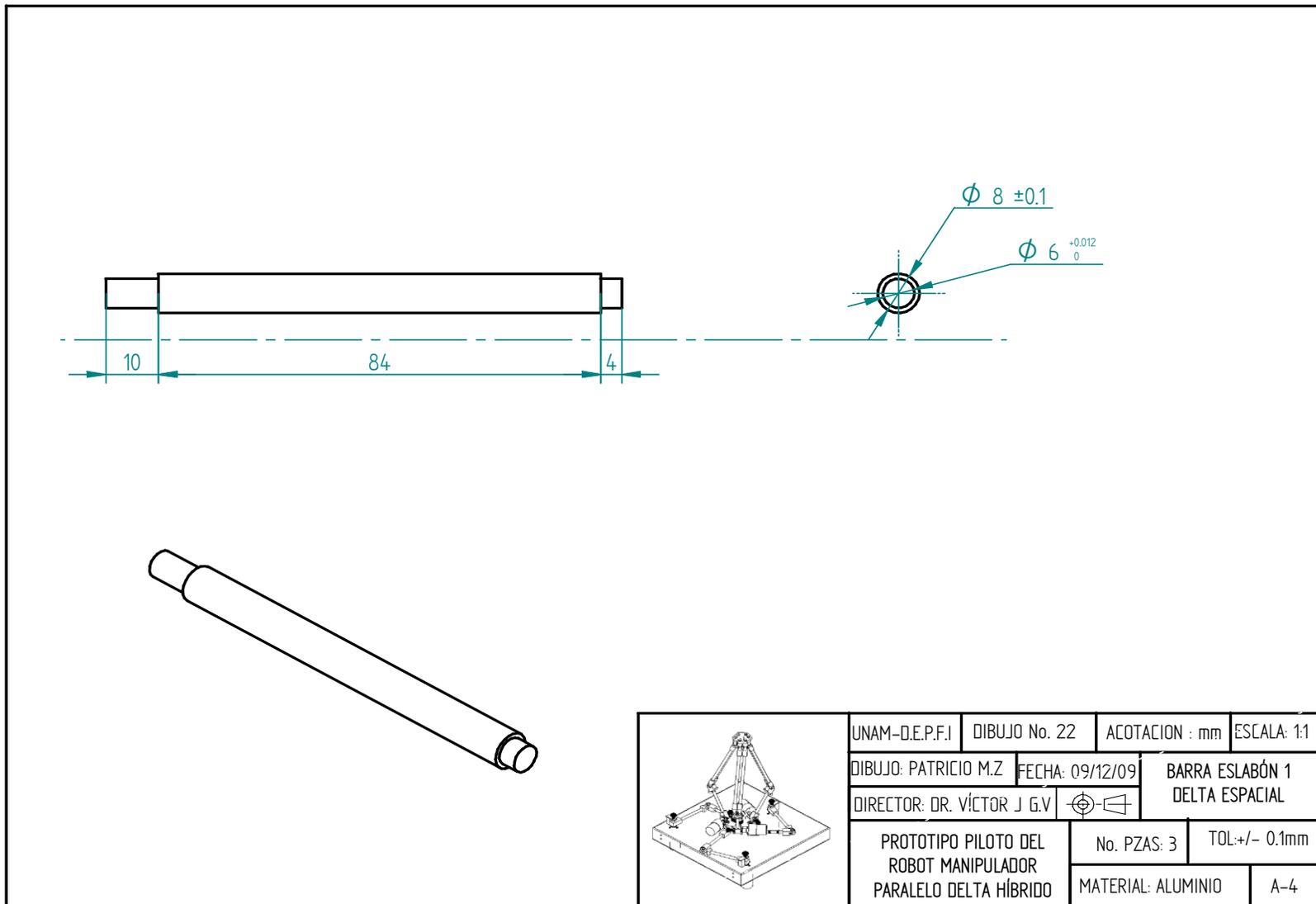


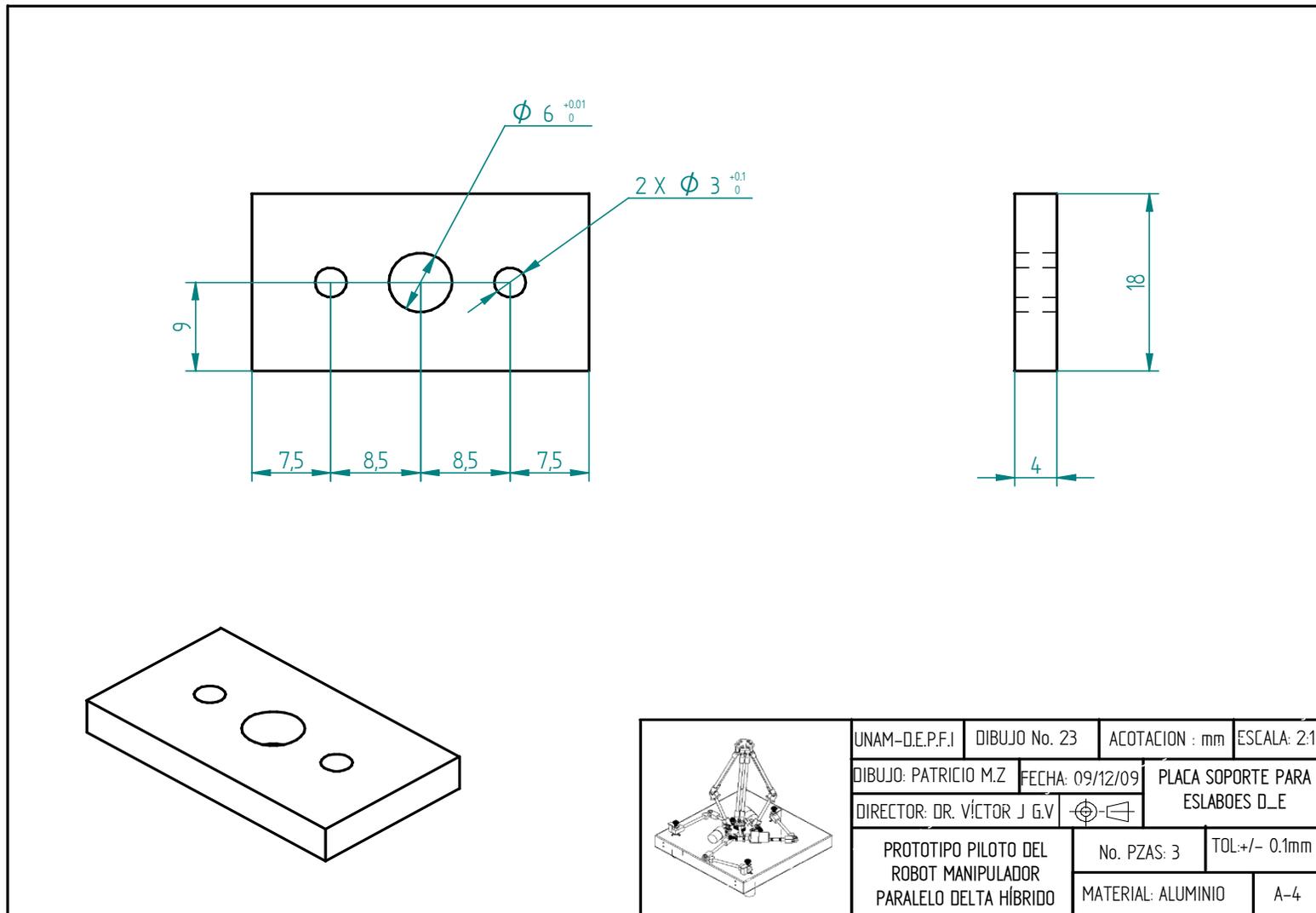


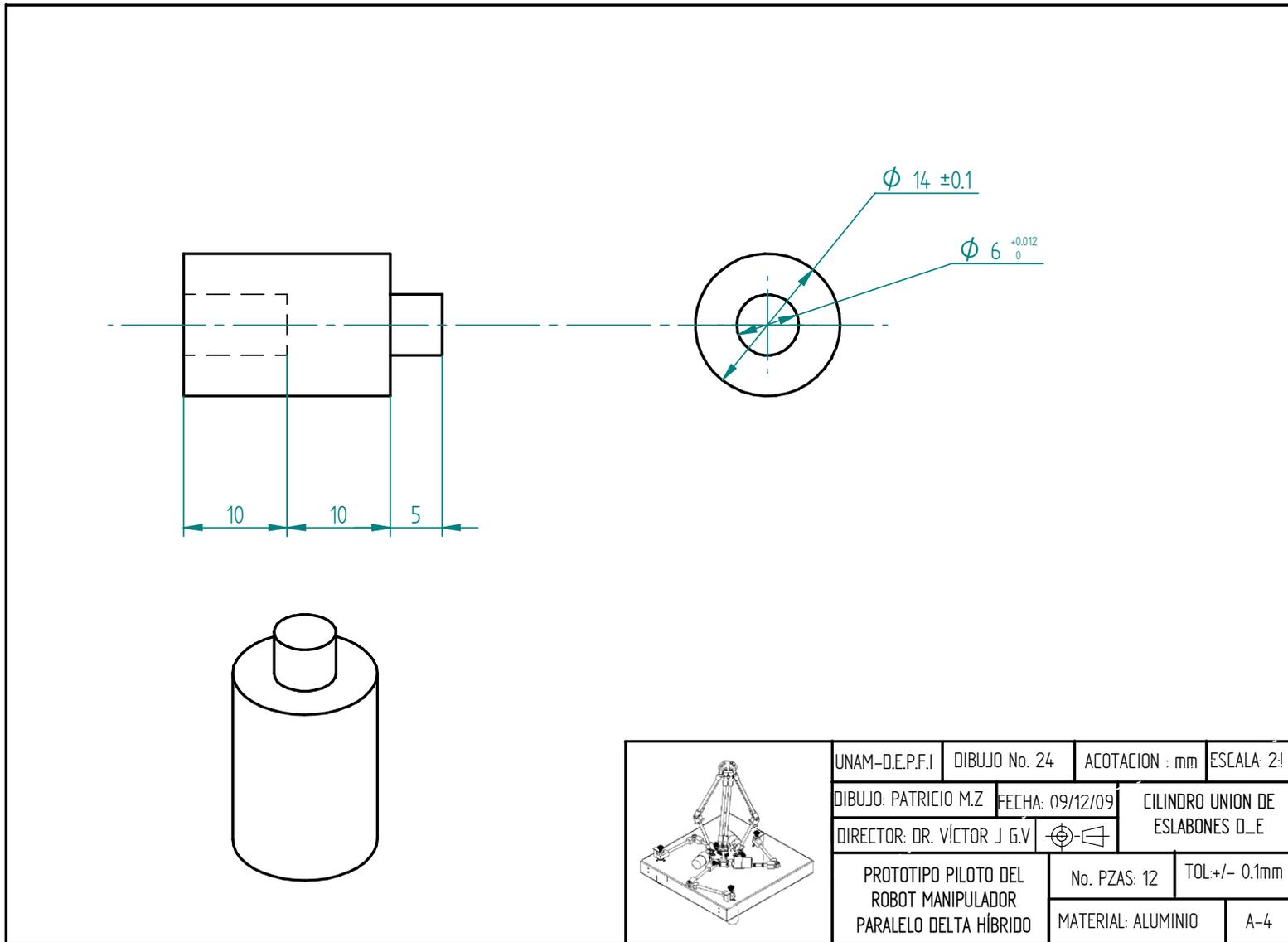


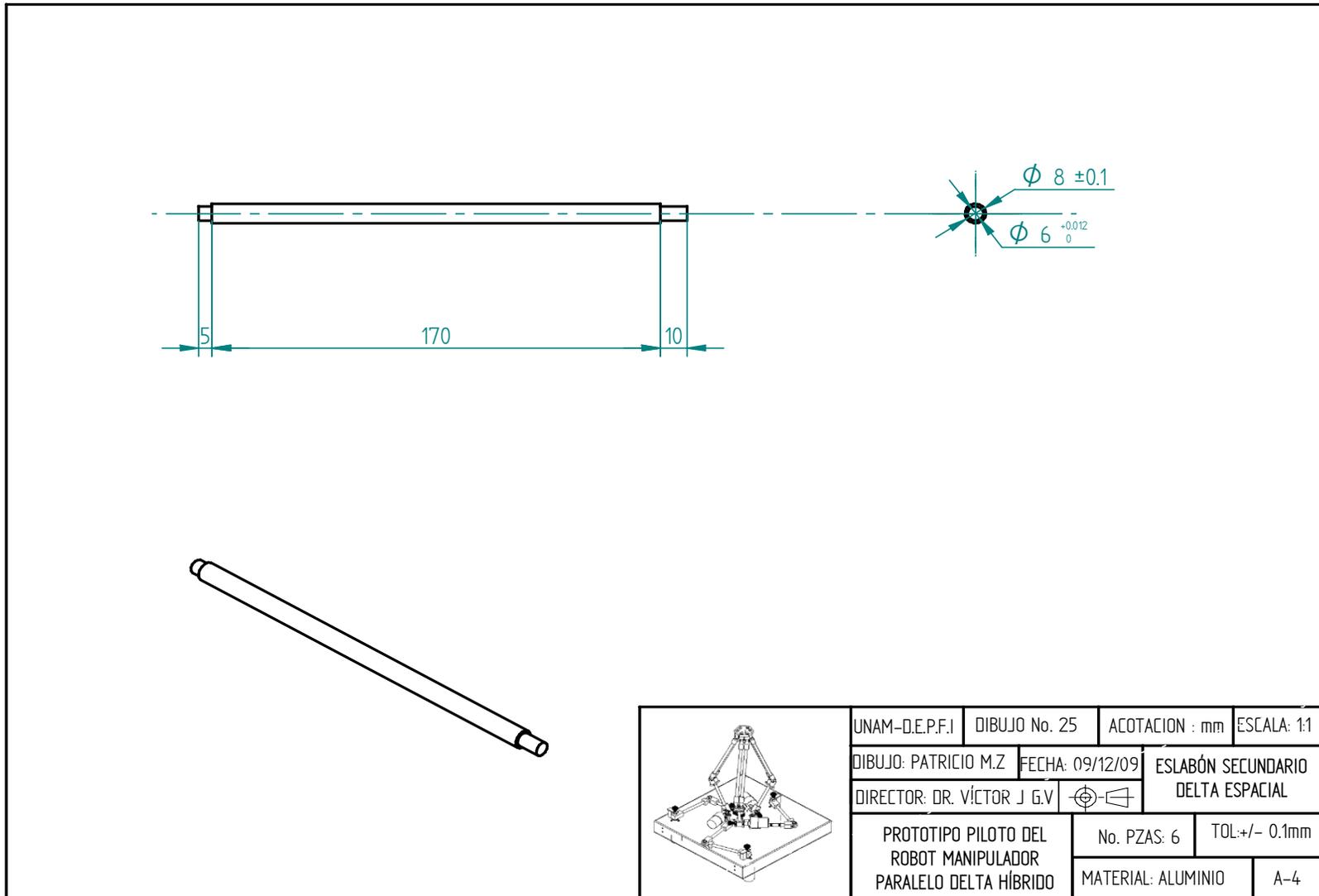


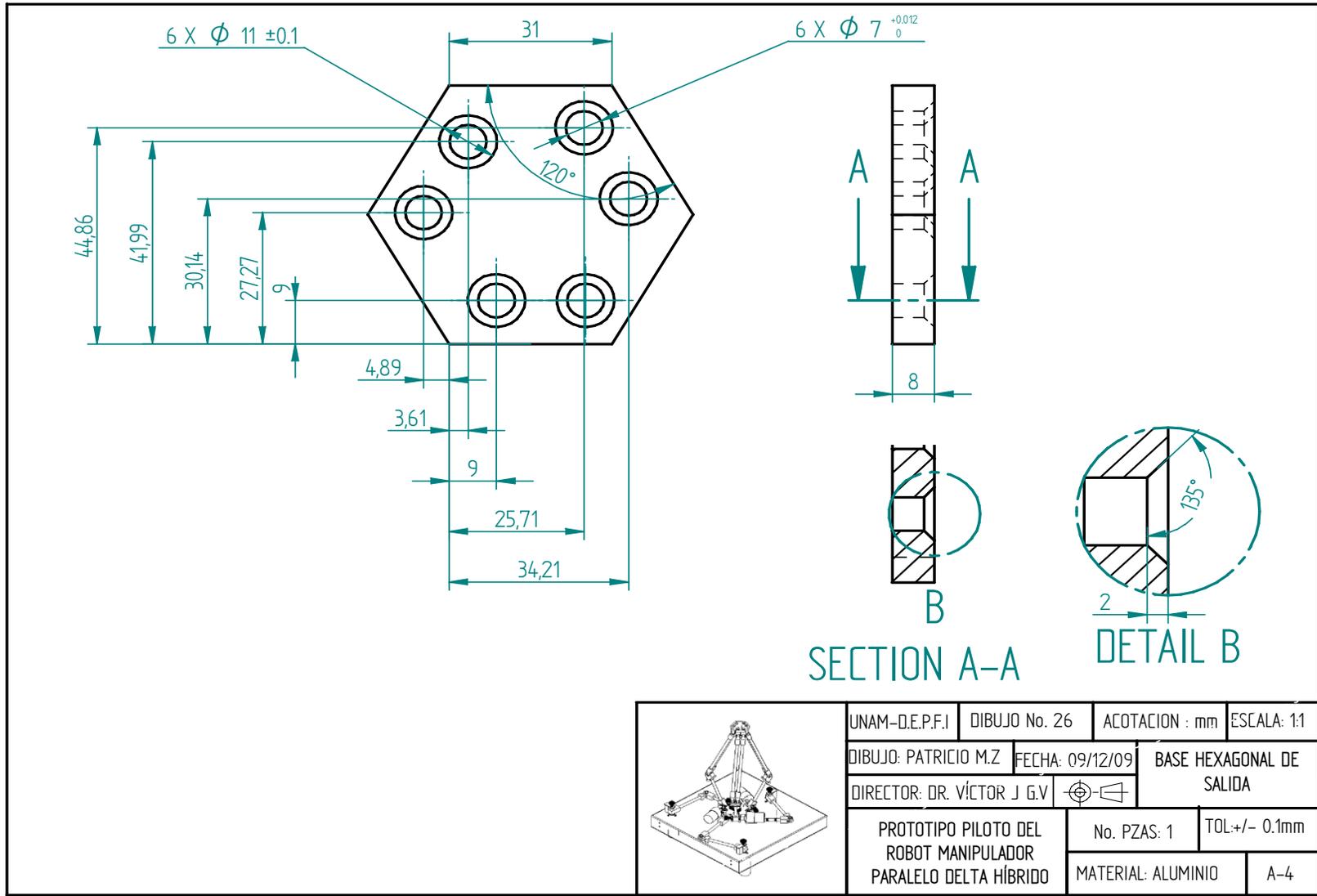












	UNAM-D.E.P.F.I	DIBUJO No. 26	ACOTACION : mm	ESCALA: 1:1
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA: 09/12/09	BASE HEXAGONAL DE SALIDA	
	DIRECTOR: DR. VÍCTOR J G.V		No. PZAS: 1	TOL: +/- 0.1mm
	PROTOTIPO PILOTO DEL ROBOT MANIPULADOR PARALELO DELTA HÍBRIDO	MATERIAL: ALUMINIO	A-4	

APÉNDICE D

ARTÍCULO PUBLICADO EN CONGRESO

ANÁLISIS CINEMÁTICO DE UN ROBOT MANIPULADOR PARALELO DELTA HÍBRIDO

Patricio Martínez Zamudio, Víctor Javier González Villela*, Marcelo López Parra**,
Depto. de Mecatrónica,
División de Ingeniería Mecánica e Industrial,
Facultad de Ingeniería, UNAM, CU.
patomz_mem@yahoo.com.mx
vjgv@unam.mx*, lopez@unam.mx**

ABSTRACT

This work discusses the geometry and kinematic analysis of a hybrid delta parallel robot manipulator, which consists of the union of two parallel robots connected in series configuration. This allows the robot to have a wider working space. In this paper we show how solved the inverse kinematic to track a trajectory.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la geometría y el análisis cinemático de un robot manipulador paralelo delta híbrido. Se compone de la unión de dos robots manipuladores paralelos conectados en una configuración serie. Esto permite que el robot tenga un espacio de trabajo más amplio. En este trabajo se presenta el análisis de la cinemática inversa donde el robot manipulador paralelo delta híbrido sigue una trayectoria.

1. INTRODUCCIÓN

Los robots paralelos tienen como principal propiedad que su órgano terminal está conectado a una base a través de varias cadenas cinemáticas. Esto permite a los mecanismos paralelos soportar grandes cargas, alta velocidad de operación. El inconveniente que presentan es un espacio de trabajo reducido a comparación con los manipuladores seriales.

Un manipulador híbrido es una combinación de cadenas cinemáticas cerradas o cadenas cinemáticas abiertas, en la cual se trata de una

secuencia de mecanismos paralelos, seriales o ambos, conectados o unidos entre sí. El robot manipulador híbrido puede proporcionar características de robots manipuladores serie y paralelo.

Los manipuladores paralelos se han estudiado por varios investigadores entre ellos Ángeles[1], Kumar[2], Merlet[3], Gosselin [4], entre otros.

Los manipuladores híbridos poseen las ventajas de robots en serie y paralelo, con la rigidez de trabajo que tienen los robots paralelos, estos pueden ser conectados en serie diseñados por mecanismos paralelos o de geometría variable.

Sin embargo el estudio de los manipuladores paralelos híbridos se han presentado en pocos trabajos por ejemplo.

Waldron, K.J., M. Raghavan, and B. Roth [5], propusieron el análisis de un sistema de muñeca y un micro manipulador que es robot serie-paralelo de 6 GDL.

Shahinpoor, M. [6] muestra un estudio sobre la cinemática de un robot manipulador híbrido que tiene la forma de dos robots paralelos conectados en serie de 3 GDL.

Huang, M.Z., S.-H. Ling and Y. Sheng [7], estudiaron la cinemática de manipuladores híbridos de configuración serie paralelo.

Shusheng, B [8], realizó el análisis de la exactitud de un manipulador serie-paralelo de micro movimientos. El mecanismo serie paralelo se emplea en un manipulador de micro

movimientos. Está compuesto por dos plataformas paralelas de 3GDL. La parte superior se compone de un mecanismo paralelo 3RPS. La parte inferior es un mecanismo paralelo plano 3RRR.

Tanev, T.K [9], realizó el análisis de la cinemática de un robot manipulador híbrido (paralelo serie). En este trabajo se presenta el análisis cinemático de un nuevo tipo de robot manipulador híbrido (paralelo serie). El cual consta de dos mecanismos paralelos conectados en serie. Cada mecanismo tiene tres grados de libertad, de modo que el conjunto de grados de libertad del robot es de seis.

Ouarda and Wisama [10], realizaron el modelado dinámico inverso de un robot manipulador híbrido serie paralelo. Este trabajo presenta una solución recursiva para el modelado dinámico inverso de robots híbridos conectados en serie de módulos en paralelo

Sellaouti, R. and F.B. Ouezdou [11], realizaron el Diseño y control de un mecanismo paralelo actuado para la aplicación de un bípedo. Teniendo tres grados de libertad se diseñan mecanismos de robots humanoides. En lugar de mecanismos seriales se utilizan mecanismos más sólidos como los mecanismos paralelos. Este tipo de estructura da a la terminal cuerpo la capacidad de moverse dentro de un cono de la posición nominal ilimitado y permite la rotación sobre el eje del cono.

Ping-Lang and Chi-Chung[12], desarrollaron un manipulador paralelo híbrido cartesiano para cirugía de rodilla.

Ramadan [13], realizó el estudio un micro nano manipulador híbrido de mano de dos dedos.

Li and Jin[14], realizaron el análisis cinemático de un brazo mecánico híbrido de 3GDL

1. PLANTEAMIENTO

En este trabajo se proponen unir dos robots manipuladores paralelos en serie con el fin de

estudiar el comportamiento de este nuevo mecanismo.

La estructura del robot manipulador híbrido que se presenta en este trabajo, aún no ha sido estudiada.

El robot híbrido está formado por dos manipuladores paralelos tipo delta conectados en una configuración en serie, en la base se tiene un robot paralelo delta plano del tipo 3RRR, sobre la base móvil del robot plano se encuentra el robot delta en el espacio.

En la figura 1, se muestra el esquema del robot manipulador delta híbrido. Dado que el concepto de manipuladores híbridos es muy reciente, hay muchos problemas teóricos por resolver.

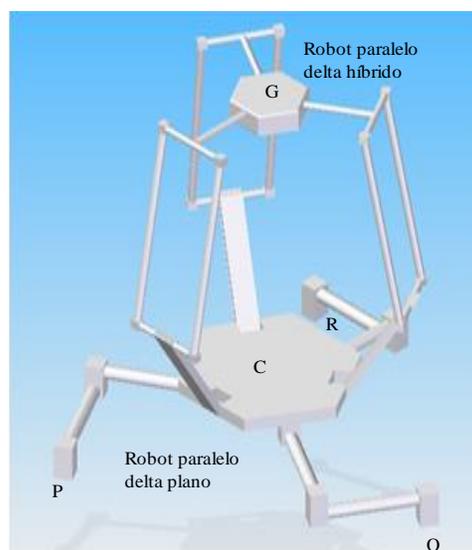


Figura 1 Esquema del robot manipulador paralelo delta híbrido.

El manipulador delta plano está formado por los pivotes P, Q y R, los cuales definen la geometría de la base fija de todo el sistema, y los pivotes A, B y C definen la geometría de la plataforma móvil, ver figura 2.

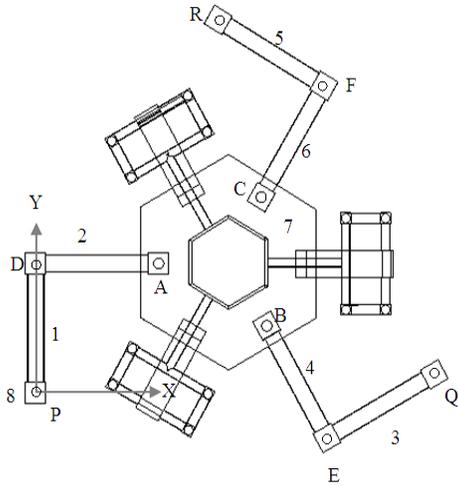


Figura 2 Esquema del manipulador delta plano.

Las tres cadenas que conectan los puntos A, B y C con los puntos P, Q y R están unidos por juntas de rotación, cada cadena está formada por dos eslabones conectados por una junta de rotación.

El robot delta en el plano está formado por 8 cuerpos incluyendo la tierra del sistema, el robot delta en el espacio está formado por 17 cuerpos, por lo que el mecanismo en conjunto estará formado por 25 elementos en total.

Para el manipulador delta en el espacio se emplean juntas universales de rotación para mover la plataforma de salida.

La base del manipulador delta en el espacio se denomina como C, la cual está fija a la base móvil del manipulador delta plano, la base móvil del manipulador delta en el espacio se denomina como G. Ver figura 1.

2. GRADOS DE LIBERTAD

El mecanismo del manipulador plano está formado por ocho eslabones y nueve juntas de revolución.

Los grados de libertad de un mecanismo pueden ser determinados por la fórmula de Chebyshev-Grübler-Kutzbach [13, 15, 16]

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i \quad (5)$$

Siendo $\lambda=3$ para mecanismos planos o esféricos, $\lambda=6$ para mecanismos espaciales, incluyendo la tierra.

De la figura 2 se observa que el robot manipulador delta plano está formado por $n=8$ eslabones, incluyendo la tierra del sistema, $j=9$ juntas, y $f_i=9$ grados de libertad. Sustituyendo estos datos en la ecuación (5), el robot manipulador delta plano tiene tres grados de libertad. Los actuadores estarán fijos en la plataforma fija formada por los puntos R, Q y P.

La figura 3 muestra los eslabones del manipulador en el espacio.

El manipulador paralelo delta en el espacio, está formado por $n=17$ eslabones, $j=21$ juntas, y $f_i=33$ grados de libertad. Sustituyendo estos datos en la ecuación (5), el robot manipulador delta en el espacio tiene tres grados de libertad.

$$F = 6(17 - 21 - 1) + 33 = 3$$

Para el manipulador delta en el espacio se tiene tres grados de libertad, los tres actuadores que moverán al mecanismo estarán fijos en la base denominada como C.

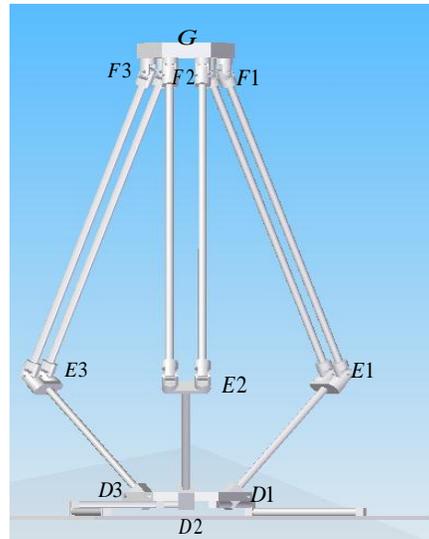


Figura 3 Robot manipulador paralelo delta híbrido

3. ANÁLISIS CINEMÁTICO

Por geometría del manipulador se entiende, como la relación entre los valores de las variables asociadas a las articulaciones del robot y la situación (posición y orientación).

Se entiende por cinemática al estudio del movimiento sin considerar las fuerzas que lo producen.

En este trabajo se presenta la cinemática inversa para lo cual dada la posición del vector del efector final (x, y, z, ϕ) se determina la orientación de los ángulos de las articulaciones de los eslabones.

La cinemática se resuelve para cada cadena del manipulador delta híbrido utilizando ecuaciones de lazo y transformaciones homogéneas. En este trabajo sólo se presenta el análisis de la posición.

3.1 ANÁLISIS DE LA POSICIÓN

En la figura 4 se observan los vectores que definen al manipulador delta híbrido. Para cada articulación se planteó un sistema coordinado.

El manipulador delta híbrido se compone de tres ecuaciones de lazo, una para cada cadena, dada la geometría de las cadenas se puede decir que son similares entre sí, lo cual permite realizar el análisis para una cadena y extrapolarlo para las demás.

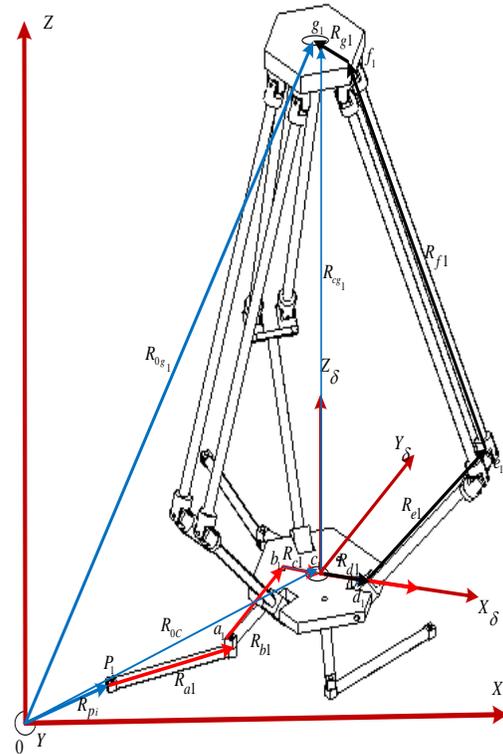


Figura 4 Vectores del Robot Manipulador Paralelo Delta Híbrido.

A continuación se muestra la ecuación de lazo. El subíndice i , puede ser $i = 1, 2, 3$, dependiendo de la cadena de la que se esté estudiando.

$$R_{0g} = R_{pi} + R_{ai} + R_{bi} + R_{ci} + R_{di} + R_{ei} + R_{fi} + R_{gi} \quad (6)$$

$$OG = OP_i + P_iA_i + A_iB_i + B_iC_i + C_iD_i + D_iE_i + E_iF_i + F_iG \quad (7)$$

De acuerdo a los vectores de la figura 4, el robot manipulador paralelo delta híbrido se puede descomponer como la suma vectorial

$$R_{0g} = R_{0c} + R_{cg} \quad (8)$$

Donde:

$$R_{0c} = R_{pi} + R_{ai} + R_{bi} + R_{ci} \quad (9)$$

$$R_{cg} = R_{di} + R_{ei} + R_{fi} + R_{gi} \quad (10)$$

La ecuación de lazo(9), corresponde al robot manipulador delta plano, mientras que la ecuación de lazo(10), corresponde al manipulador paralelo delta en el espacio.

3.1.1 ROBOT DELTA PLANO.

Partiendo de la ecuación (9). Se analiza al robot delta plano, se asignan bases locales como se muestra en la figura 5. En este caso a cada articulación le corresponde un sistema coordenado.

El robot paralelo delta plano tiene tres grados de libertad, por lo que sólo se requiere conocer tres variables (coordenadas generalizadas) de las 9 variables que engloban a todo el sistema para poder definir el comportamiento en su totalidad.

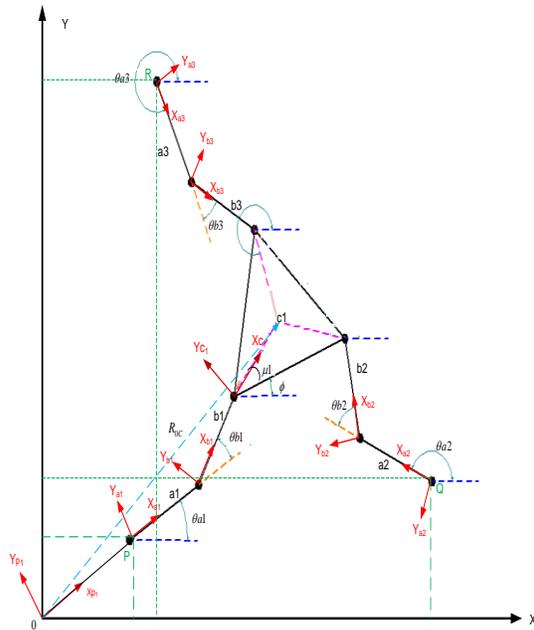


Figura 5 Bases locales del robot manipulador paralelo delta plano.

Como variables independientes se encuentran: $\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$, las cuales son accionadas por los actuadores en este caso motores.

Como variables dependientes se tienen: $\theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}, \phi, X_c, Y_c$.

Para realizar el análisis cinemático directo e inverso se considera lo siguiente:

Para la cinemática directa se conocen $\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$ y se calcula X_c, Y_c, ϕ .

Datos	Ecuaciones	Incógnitas
$\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$	6 ecuaciones	$\theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}, X_c, Y_c, \phi$

Para la cinemática inversa se conocen X_c, Y_c, ϕ y se calculan $\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$

Datos	Ecuaciones	Incógnitas
X_c, Y_c, ϕ	6 ecuaciones	$\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}, \theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}$

De la geometría del robot delta plano la ecuación de lazo (9), se puede escribir como:

$$\overline{OC} = \overline{OP_i} + \overline{P_iA_i} + \overline{A_iB_i} + \overline{B_iC} \quad (11)$$

$$\overline{OC} - \overline{OP_i} - \overline{P_iA_i} - \overline{A_iB_i} = \overline{B_iC} \quad (12)$$

3.1.2 SOLUCIÓN DEL ÁNGULO θ_{ai}

De la ecuación de lazo (11), para la cadena 1 del robot delta plano expresado en el sistema de coordenadas se tiene:

$$X_c - X_p - a1C[\theta a1] - c1C[\mu1 + \phi] = b1C[\theta a1 + \theta b1] \quad (13)$$

$$Y_c - Y_p - a1S[\theta a1] - c1S[\mu1 + \phi] = b1S[\theta a1 + \theta b1] \quad (14)$$

De las ecuaciones (13) y (14), es posible obtener el valor del ángulo θ_{a1} [16]. Se elevan al cuadrado las ecuaciones (13) y (14), posteriormente se suman y se igualan a cero. Se obtiene la ecuación:

$$(b1^2 - (-Xc + Xp + a1 \text{Cos}[\theta a1] + c1 \text{Cos}[\mu1 + \phi])^2 - (-Yc + Yp + a1 \text{Sin}[\theta a1] + c1 \text{Sin}[\mu1 + \phi])^2 = 0 \quad (15)$$

De la ecuación (15), al simplificar y agrupar términos semejantes, se puede representar de la siguiente forma:

$$k1 * S[\theta a1] + k2 * C[\theta a1] + k3 = 0 \quad (16)$$

Donde:

$k1$, $k2$ y $k3$ son constantes.

Para poder resolver la ecuación (16), en función de $\theta a1$, se utilizan las siguientes identidades trigonométricas:

$$\text{Sen}[\theta a1] = \frac{2 * t1}{1 + t1^2} \quad (17)$$

$$\text{Cos}[\theta a1] = \frac{1 - t1^2}{1 + t1^2} \quad (18)$$

$$t1 = \tan \left[\frac{\theta a1}{2} \right] \quad (19)$$

Sustituyendo las identidades trigonométricas (17) y (18) en la ecuación (16), se obtiene una ecuación de la forma:

$$(k3 - k2)t1^2 + 2k1t1 + (k3 - k2) = 0 \quad (20)$$

Se resuelve la ecuación (20) de segundo grado con respecto a $t1$, obteniendo dos posibles valores para el parámetro $t1$. Sustituyendo los valores de $t1$ en la ecuación (19) y resolviendo con respecto a $\theta a1$ se tiene los posibles valores para $\theta a1$.

$$\theta_{a1} = 2 * t \text{ an}^{-1} \left[\frac{-k1 \pm \sqrt{k1^2 + k2^2 - k3^2}}{k3 - k2} \right] \quad (21)$$

3.1.3 SOLUCIÓN DEL ÁNGULO θ_{bi}

Para encontrar el valor del ángulo θ_{bi} , se sustituye el valor de θ_{a1} en la ecuación (13) o (14) y se despeja a θ_{b1} .

$$\theta_{b1} = \cos^{-1} \left[\frac{Xc - Xp - a1 \text{ Cos}[\theta a1] - c1 \text{ Cos}[\mu 1 + \phi 1]}{b1} \right] - \theta a1 \quad (22)$$

Para encontrar la solución de los ángulos $\theta_{a2}, \theta_{a3}, \theta_{b2}, \theta_{b3}$. Se realizan las mismas operaciones para las cadenas 2 y 3. En total hay ocho posibles soluciones para el manipulador paralelo delta plano.

3.1.4 ROBOT DELTA EN EL ESPACIO.

La plataforma móvil del robot manipulador paralelo delta en el espacio, solo se puede orientar sobre el eje Z, por lo que siempre será perpendicular a la plataforma del robot manipulador paralelo delta plano.

De la ecuación (8) y (10) se obtiene la ecuación de lazo para la cadena 1 del robot delta en el espacio. Partiendo del origen hasta llegar al punto G.

Donde:

$$\overline{OG} = \overline{OC} + \overline{CD_i} + \overline{D_iE_i} + \overline{E_iF_i} + \overline{F_iG} \quad (23)$$

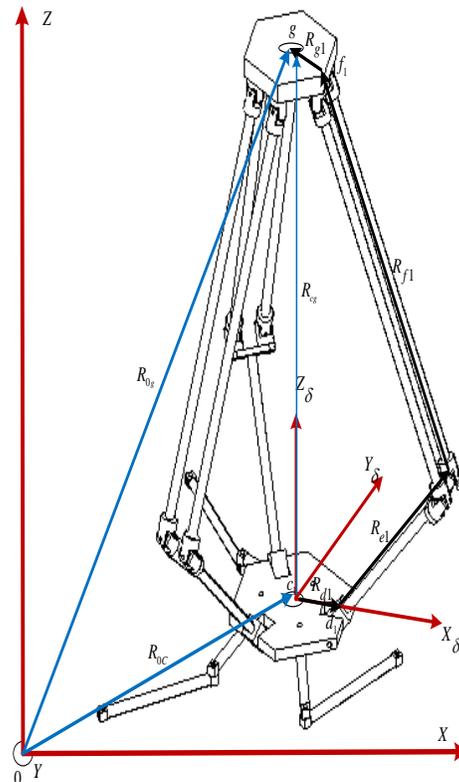


Figura 6 Vectores Robot Manipulador Paralelo Delta en el Espacio

El vector que va de $\overline{CD_i}$, tiene un ángulo asociado ϕ al cual hay que sumarle el ángulo de orientación μ_i

El vector que va de $\overline{D_iE_i}$ se encuentra el ángulo θ_{1i} , este ángulo al ser actuado mueve a toda la cadena cinemática.

Del vector que va de $\overline{E_iF_i}$ se tienen los ángulos θ_{2i}, θ_{3i} , que estarán en función del ángulo θ_{1i} , ver figura 8.

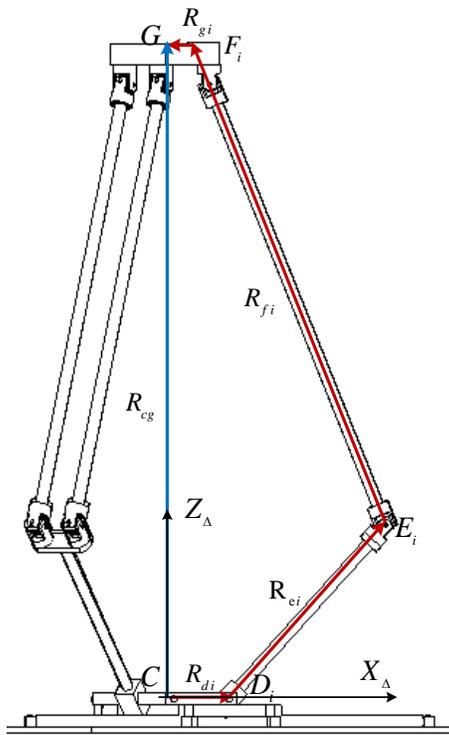


Figura 7 Vectores de la cadena 1 del RMPDE.

Como variables independientes se encuentran: $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$, que corresponde a cada cadena del robot manipulador delta en el espacio, las cuales son accionadas por los actuadores en este caso motores.

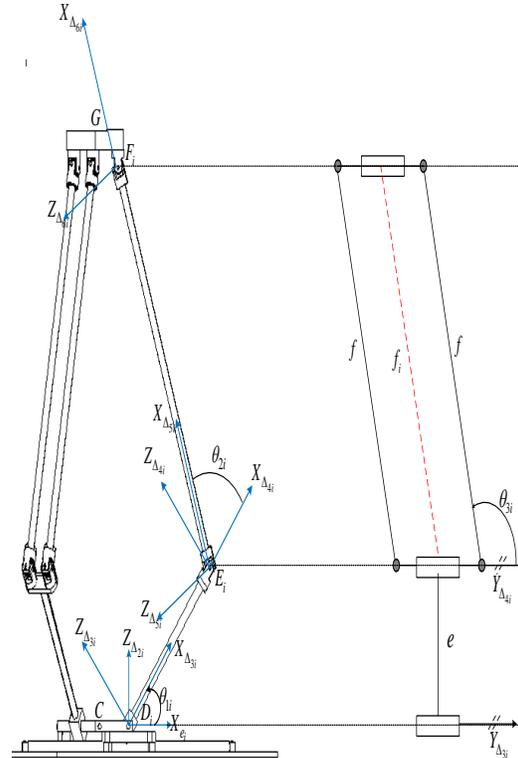


Figura 8 Descripción de los ángulos del robot manipulador delta en el espacio.

Los actuadores del robot manipulador delta en el espacio se colocarán en la plataforma móvil del robot manipulador delta plano, que es la misma plataforma para los dos manipuladores.

Como variables dependientes se tienen: $\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, X_G, Y_G, Z_G$.

Para realizar el análisis cinemático directo e inverso se puede considerar lo siguiente:

Para la cinemática directa se conocen $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$ y se calcula X_G, Y_G, Z_G .

Datos	Ecuaciones	Incógnitas
$\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$	9 ecuaciones	$\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}$ X_G, Y_G, Z_G

Para la cinemática inversa se conocen X_G, Y_G, Z_G . y se calculan $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$.

Datos	Ecuaciones	Incógnitas
X_G, Y_G, Z_G	9 ecuaciones	$\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}$ X_G, Y_G, Z_G

Para la solución de la cinemática inversa del robot manipulador delta en el espacio se toma en cuenta la orientación del ángulo $\phi + \mu_i$. que es consecuencia del robot manipulador delta plano.

3.1.5 CINEMÁTICA INVERSA DEL ROBOT PARALELO DELTA HÍBRIDO.

Para resolver la cinemática inversa del robot delta en el espacio hay que tomar en cuenta, que la posición del efector final depende de la posición del robot delta plano más la posición del robot delta en el espacio.

Se realiza el análisis de sólo una cadena cinemática, debido a que son simétricas las tres cadenas cinemáticas que componen al mecanismo.

De la geometría del robot paralelo delta híbrido, ver figura 9, la ecuación de lazo para el robot delta en el espacio se puede escribir como:

$$R_{0G} - R_{0C} + R_{di} - R_{gi} = R_{ei} + R_{fi} \quad (24)$$

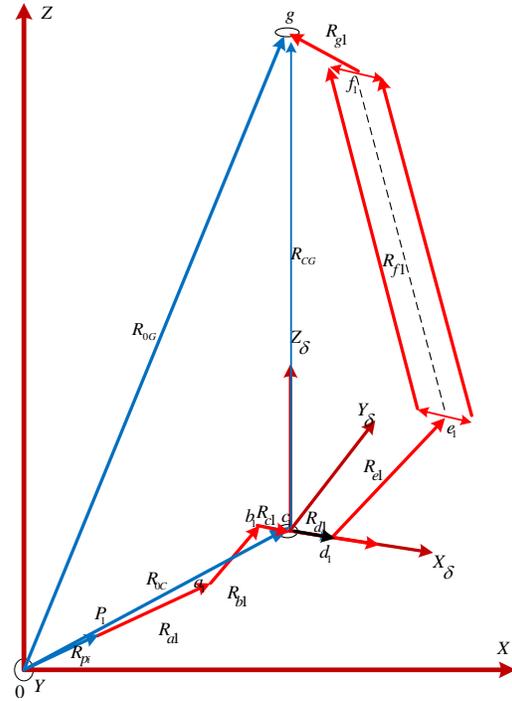


Figura 9 Vectores del robot paralelo delta híbrido.

De la figura 9, la cadena cinemática que parte del punto D y llega hasta el punto F, debido a la geometría del robot se puede analizar de la siguiente forma:

$$R_{0G} - R_{0C} + R_{di} - R_{gi} = \begin{pmatrix} ei \cos[\theta_{1i}] + fi \cos[\theta_{1i} + \theta_{2i}] \sin[\theta_{3i}] \\ fi \cos[\theta_{3i}] \\ ei \sin[\theta_{1i}] + fi \sin[\theta_{1i} + \theta_{2i}] \sin[\theta_{3i}] \end{pmatrix} \quad (25)$$

Teniendo como resultado:

$$MaI = MaD \quad (26)$$

Donde:

$$MaI = \begin{pmatrix} (X_G + X_C) \cos[\mu i + \phi] + (Y_G + Y_C) \sin[\mu i + \phi] + g_i - d_i \\ (Y_G + Y_C) \cos[\mu i + \phi] - (X_G + X_C) \sin[\mu i + \phi] \\ f_i \end{pmatrix}$$

$$MaD = \begin{pmatrix} eiCos[\theta_{1i}] + fiCos[\theta_{1i} + \theta_{2i}]Sin[\theta_{3i}] \\ fiCos[\theta_{3i}] \\ eiSin[\theta_{1i}] + fiSin[\theta_{1i} + \theta_{2i}]Sin[\theta_{3i}] \end{pmatrix}$$

Donde:

$$X_C = Yj + aiCos[\theta ai] + biCos[\theta ai + \theta bi] + ciCos[\phi + \mu_i] \quad (27)$$

$$Y_C = Yj + aiSin[\theta ai] + biSin[\theta ai + \theta bi] + ciSin[\phi + \mu_i] \quad (28)$$

$$Z_c = 0 \quad (29)$$

3.1.5.1 Solución del ángulo θ_{3i}

Se toma el segundo elemento de la ecuación matricial (26), para poder obtener el valor del ángulo θ_{3i}

$$(Y_G + Y_C)Cos[\mu_i + \phi] - (X_G + X_C)Sin[\mu_i + \phi] = fiCos[\theta_{3i}] \quad (30)$$

Al despejar el ángulo θ_{3i} . Se tienen como resultado dos posibles valores.

$$\theta_{3i} = \pm \text{ArcCos} \left(\frac{(Y_G + Y_C)Cos[\mu_i + \phi] + (X_G + X_C)Sin[\mu_i + \phi]}{fi} \right) \quad (31)$$

3.1.5.2 Solución del ángulo θ_{2i}

Una vez que se determino θ_{3i} , se puede determinar θ_{2i} , con solo sumar los cuadrados de los elementos superior e inferior, del lado izquierdo y del lado derecho de la ecuación matricial (26).

Al realizar la igualdad y simplificar se tiene una sola ecuación en función de θ_{2i} .

Sustituyendo el valor de θ_{3i} y despejando a θ_{2i} se tienen dos posibles valores θ_{2i} .

3.1.5.3 Solución del ángulo θ_{1i}

Una vez que se conocen los valores de θ_{2i}, θ_{3i} , se toma el elemento superior de la ecuación

matricial (26) y se sustituyen los valores de los ángulos conocidos.

Despejando a θ_{1i} de dicha ecuación, se obtienen cuatro posibles valores que satisfacen a la ecuación de los cuales sólo dos son reales y los demás no son validos para la solución del sistema

4. RESTRICCIONES CINEMÁTICAS PARA EL SEGUIMIENTO DE UNA TRAYECTORIA.

La solución la ecuación de lazo (24) depende de las restricciones cinemáticas.

En este trabajo se propone que el robot manipulador paralelo delta híbrido, pueda seguir diferentes trayectorias como son:

1. Trayectorias en línea recta.

El robot manipulador paralelo delta híbrido debe de seguir las trayectorias que se muestran, donde el manipulador paralelo delta plano seguirá la línea que se encuentra en el plano "X, Y", y el robot manipulador paralelo delta en el espacio seguirá la trayectoria que se encuentra en el espacio "X, Y, Z".

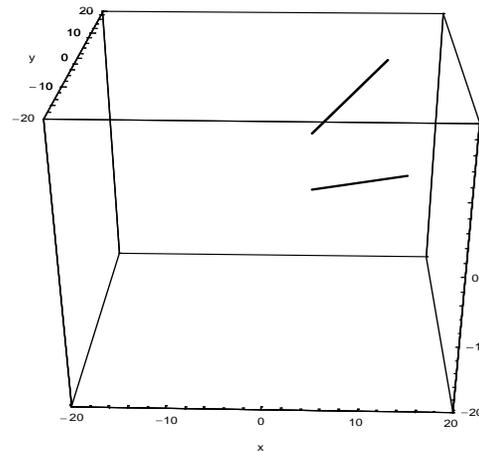


Figura 9 trayectorias de líneas rectas

4. Trayectorias cíclicas regulares.

El robot manipulador paralelo delta híbrido debe de seguir las trayectorias que se muestran, donde el manipulador paralelo delta plano seguirá la trayectoria cíclica que se encuentra en el plano

“X, Y”, y el robot manipulador paralelo delta en el espacio seguirá la trayectoria que se encuentra en el espacio “X, Y, Z”.

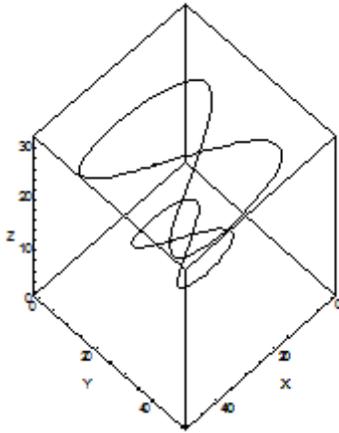


Figura 10 Trayectorias cíclica regular

5. Trayectorias irregulares.

El robot manipulador paralelo delta híbrido puede realizar cualquier tipo de trayectoria que este a su alcance. Como se observa en la figura 11, la trayectoria del robot delta plano es una figura regular mientras que la trayectoria del robot delta en el espacio es una trayectoria irregular, esta es una de las propiedades que presenta la unión de estos dos mecanismos.

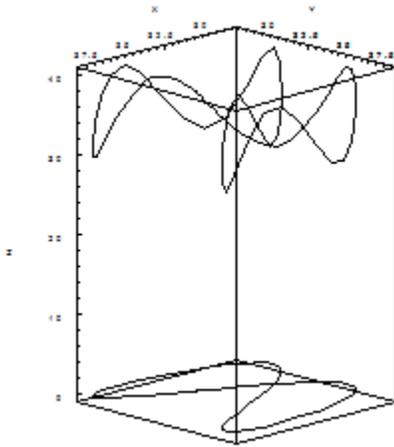


Figura 11 Trayectorias irregulares

Dado que se conocen los puntos de la trayectoria para el robot manipulador paralelo delta plano X_c, Y_c, ϕ , y los puntos, de la trayectoria para el robot manipulador paralelo delta en el espacio

X_G, Y_G, Z_G , se resuelve la ecuación de lazo(24), teniendo así los valores para las variables.

$$\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}, \theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}$$

$$\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}$$

Con lo cual es posible seguir las trayectorias que estén dentro del rango del robot manipulador paralelo delta híbrido.

6. RESULTADOS.

El robot manipulador paralelo delta plano puede seguir la trayectorias en el plano “X,””Y” y el robot manipulador paralelo delta espacial puede seguir trayectorias en el espacio.

La unión de estos manipuladores permite realizar dos movimientos distintos o iguales, al mismo tiempo.

Dado que se cuenta con la cinemática inversa es posible, mover al robot manipulador paralelo delta híbrido, realizando una serie de combinaciones entre los movimientos de cada manipulador.

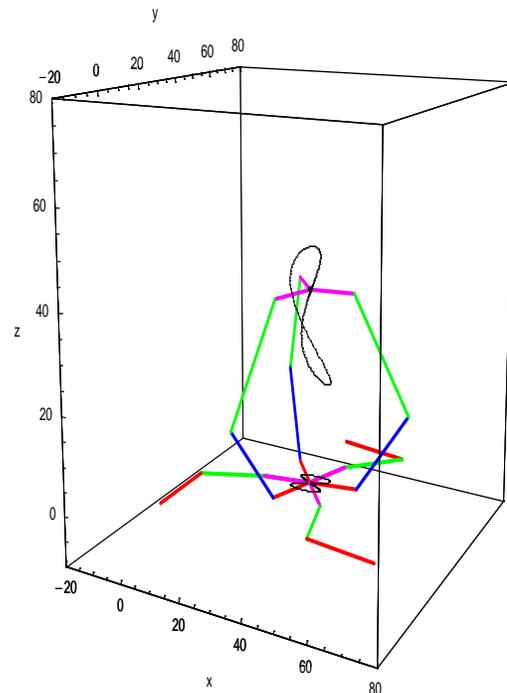


Figura 12 Simulación robot manipulador paralelo delta híbrido

Es decir al robot manipulador paralelo delta híbrido, dependiendo de las restricciones cinemáticas, se pueden tener una serie de combinaciones de movimientos, donde el robot manipulador paralelo delta plano se puede mover una parte proporcional de lo que se mueve el robot manipulador paralelo delta en el espacio, o viceversa.

Otro caso posible que mientras el robot manipulador paralelo delta plano sigue una trayectoria el robot manipulador paralelo delta en el espacio puede seguir otra trayectoria. Siempre y cuando estén dentro de su rango de operación.

7. CONCLUSIONES.

Se realizó el análisis cinemático del robot manipulador paralelo delta híbrido, para la posición.

Se propusieron algunas trayectorias para resolver las ecuaciones de lazo del robot manipulador paralelo delta híbrido.

El robot manipulador paralelo delta híbrido, tiene la característica de tener un área de trabajo mayor, en comparación con un robot manipulador paralelo tipo delta. Al tener esta configuración proporciona que el manipulador cubra una mayor área de trabajo, debido a que es una desventaja que presentan los manipuladores paralelos.

8. TRABAJO A FUTURO

Como trabajo futuro se pretende realizar:

- El análisis dinámico
- El control
- La construcción de un prototipo funcional.

9. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo proporcionado a través del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT clave 1N1108308

Agradecemos el apoyo proporcionado de CONACYT

10. REFERENCIAS

1. Angeles, J., *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods and Algorithms*. Second Edition ed, ed. F.F. Ling. 2002: Springer.
2. Kumar, V., *Characterization of workspaces of parallel manipulators*. Journal of Mechanical Design - Transactions of the ASME, 1992. **114**(3): p. 368-375.
3. J.-P.MERLET, *Parallel Robots*. Second Edition ed. 2006, INRIA, Sophia-Antipolis, France: Springer.
4. Gosselin, C.M., et al. *High-performance mechanism for a high-speed camera-orienting device*. 1994. Aachen, Germany: Pergamon Press Ltd.
5. Waldron, K.J., M. Raghavan, and B. Roth, *Kinematics of a hybrid series-parallel manipulation system*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, 1989. **111**(2): p. 211-221.
6. Shahinpoor, M., *Kinematics of a parallel-serial (hybrid) manipulator*. Journal of Robotic Systems, 1992. **9**(1): p. 17-36.
7. Huang, M.Z., S.-H. Ling, and Y. Sheng. *Study of velocity kinematics for hybrid manipulators with parallel-series configurations*. 1993. Atlanta, GA, USA: Publ by IEEE.
8. Shusheng, B., et al. *Accuracy analysis of the serial-parallel micromotion manipulator*. 1997. Orlando, FL, USA: IEEE.
9. Tanev, T.K., *Kinematics of a hybrid (parallel-serial) robot manipulator*. Mechanism and Machine Theory, 2000. **35**(9): p. 1183-1196.
10. Ouarda, I. and K. Wisama. *Inverse Dynamic Modeling of Serial-Parallel Hybrid Robots*. in *Intelligent Robots*

- and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on.* 2006.
11. Sellaouti, R. and F.B. Ouezdou, *Design and control of a 3DOFs parallel actuated mechanism for biped application.* Mechanism and Machine Theory, 2005. **40**(12): p. 1367-1393.
 12. Ping-Lang, Y. and L. Chi-Chung. *Developing a Hybrid Cartesian Parallel Manipulator for Knee Surgery.* in *Robotics, Automation and Mechatronics, 2006 IEEE Conference on.* 2006.
 13. Ramadan, A.A., et al. *Micro-Nano Two-Fingered Hybrid Manipulator Hand.* in *Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2007. MHS '07. International Symposium on.* 2007.
 14. Li, Y.B. and Z.L. Jin. *Kinematic analysis of a Novel 3-DOF hybrid mechanical arm.* in *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on.* 2008.
 15. Flores, S.M., *Análisis Cinemático y Dinámico de un Robot Delta de 3 Grados de Libertad in Mecánica Aplicada UNAM.* 2006, Universidad Nacional Autónoma de México: Mexico D.f.
 16. Tsai, L.W., *Robot Analysis, The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators* 1999. 505.

Bibliografía.

- Angeles, J. (1988). *Rational Kinematics*. Springer.
- Angeles, J. (2002). *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods and Algorithms*, Springer.
- Bonev, I. A. (2002). "What is Going on With Parallel Robots," <http://www.parallemic.org/>.
- Bonev, I. A. (2003). "The True Origins of Parallel Robots," <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>.
- Gosselin, C. M., J. F. Hamel, et al. (1994). High-performance mechanism for a high-speed camera-orienting device, Aachen, Germany, Pergamon Press Ltd.
- Huang, M. Z. and S.-H. Ling (1994). Kinematics of a class of hybrid robotic mechanisms with parallel and series modules, San Diego, CA, USA, Publ by IEEE.
- Huang, M. Z., S.-H. Ling, et al. (1993). Study of velocity kinematics for hybrid manipulators with parallel-series configurations, Atlanta, GA, USA, Publ by IEEE.
- J.-P. MERLET (2006). *Parallel Robots*. INRIA, Sophia-Antipolis, France, Springer.
- Kumar, V. (1992). "Characterization of workspaces of parallel manipulators." *Journal of Mechanical Design - Transactions of the ASME* 114(3): 368-375.
- Lee, S. and S. Kim (1993). Efficient inverse kinematics for serial connections of serial and parallel manipulators, Yokohama, Jpn, Publ by IEEE.
- Li, Y. B. and Z. L. Jin (2008). Kinematic analysis of a Novel 3-DOF hybrid mechanical arm. *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on*.
- Liu, X., J. Wang, et al. (2002). "Design of a serial-parallel 7-DOF redundant anthropomorphic arm." *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering* 13(2): 101-101.
- Ottaviano, E., C. M. Gosselin, et al. (2001). Singularity analysis of CaPaMan: A three-degree of freedom spatial parallel manipulator. *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*.
- Ouarda, I. and K. Wisama (2006). Inverse Dynamic Modeling of Serial-Parallel Hybrid Robots. *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*.
- Ping-Lang, Y. and L. Chi-Chung (2006). Developing a Hybrid Cartesian Parallel Manipulator for Knee Surgery. *Robotics, Automation and Mechatronics, 2006 IEEE Conference on*.
- Ramadan, A. A., K. Inoue, et al. (2007). Micro-Nano Two-Fingered Hybrid Manipulator Hand. *Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2007. MHS '07. International Symposium on*.
- Ricard, R. and C. M. Gosselin (1994). On the determination of the workspace of complex planar robotic manipulators, Minneapolis, MN, USA, ASME.
- Saltaren, R., R. Aracil, et al. (2007). "Field and service applications - Exploring deep sea by teleoperated robot - An Underwater Parallel Robot with High Navigation Capabilities." *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 14(3): 65-75.
- Sellaouti, R. and F. B. Oueddou (2005). "Design and control of a 3DOFs parallel actuated mechanism for biped application." *Mechanism and Machine Theory* 40(12): 1367-1393.
- Shahinpoor, M. (1992). "Kinematics of a parallel-serial (hybrid) manipulator." *Journal of Robotic Systems* 9(1): 17-36.
- Shusheng, B., Z. Guanghua, et al. (1997). Accuracy analysis of the serial-parallel micromotion manipulator, Orlando, FL, USA, IEEE.
- Staicu, S. (2009). "Recursive modelling in dynamics of Agile Wrist spherical parallel robot." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25(2): 409-416.
- Tanev, T. K. (2000). "Kinematics of a hybrid (parallel-serial) robot manipulator." *Mechanism and Machine Theory* 35(9): 1183-1196.

- Waldron, K. J., M. Raghavan, et al. (1989). "Kinematics of a hybrid series-parallel manipulation system." *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME* 111(2): 211-221.
- Yang, G., W. Chen, et al. (2002). A geometrical method for the singularity analysis of 3-RRR planar parallel robots with different actuation schemes, Lausanne, Switzerland, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Tapia, Cortés B, et. al Robot paralelo planar para ensamble, Instituto tecnológico de Puebla Clavel,(1990) R., "Device for the Movement and Positioning of an Element in Space," US Patent No. 4,976,582, December 11, 1990.
- Wenger, P. D. Chablat, Kinematic analysis of a new parallel machine-tool: the Orthoglide, ARK, pp. 305-314, Piran, 2000.
- Neumann, K.E. Robot, patente N° US 4732525, 1988.
- Tsai, L.W. Kinematic of a three-dof platform with three extensible limbs, ARK, pp. 401-410, Portaroz-Bernadin, 1996.
- Merlet, J.P. y C. Gosselin, Nouvelle architecture pour manipulateur parallèle à 6 degrés de liberté, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 16, N° 1, pp. 77-90, 1991.
- Honegger M, Codourey, M, Burdet, E, Adaptive control of the hexaglide, a 6 dof parallel manipulator, IEEE. International Conference on Robotics and Automation, pp. 21-28, Albuquerque, 1987.
- Zabalza, I. Ros, J.J. Gil, J.M. Pintor, J.M. Jimenez, Tri-Scott. A new kinematic Structure for a 6-dof decoupled parallel manipulator, Workshop on fundamental issues and future research directions for parallel mechanisms and manipulators, pp.12-15, Québec, 2002
[inter]<http://www.abb.com/product/seitp327/ab8c799c32069e15c12575c400298c24.aspx?productLanguage=es&country=MX>
- Bandyopadhyay, S., and A. Ghosal. 2004. Analytical determination of principal twists in serial, parallel and hybrid manipulators using dual vectors and matrices. *Mechanism and Machine Theory* 39 (12):1289-1305.
- Flores, S. M. 2006. Análisis Cinemático y Dinámico de un Robot Delta de 3 Grados de Libertad Mecánica Aplicada UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico D.f.
- Huang, M. Z., and S.-H. Ling. 1994. Kinematics of a class of hybrid robotic mechanisms with parallel and series modules, at San Diego, CA, USA.
- Jin-Ho, K., H. Hyung-Suk, P. Chan-Hoon, H. Young-Ho, and P. Jeong-Hoon. 2006. Dynamics of a Hybrid Serial-Parallel Robot for Multi-Tasking Machining Processes. Paper read at SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference.
- Li, Y. B., and Z. L. Jin. 2008. Kinematic analysis of a Novel 3-DOF hybrid mechanical arm. Paper read at Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on.
- Ramadan, A. A., K. Inoue, T. Arai, T. Takubo, and I. Hatta. 2007. Micro-Nano Two-Fingered Hybrid Manipulator Hand. Paper read at Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2007. MHS '07. International Symposium on.
- Tsai, L. W. 1999. *Robot Analysis, The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*