

FABRICACIÓN Y CONTROL DE POSICIÓN DE UN ROBOT PARALELO TIPO
DELTA CON 3 GRADOS DE LIBERTAD

JAMITH BERMÚDEZ GALVIS
OMAR ANDRÉS MUÑOZ MONSALVE



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2011

FABRICACIÓN Y CONTROL DE POSICIÓN DE UN ROBOT PARALELO TIPO
DELTA CON 3 GRADOS DE LIBERTAD

JAMITH BERMÚDEZ GALVIS
OMAR ANDRÉS MUÑOZ MONSALVE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director
LUIS ÁNGEL SILVA
Doctor en Robótica y Visión por Computador

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2011

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma
Presidente del jurado

Firma
Presidente del jurado

Bucaramanga, Mayo 2011

Agradezco a Dios, a mis Padres Omar Muñoz López y Elda Monsalve Calderón por su Apoyo, Amor, Enseñanza y por aguantar tantas embarradas cometidas, y darme la oportunidad de seguir y culminar esta etapa.

OAMM

Agradezco a mis padres por esta oportunidad de vida y por todos los sacrificios que tuvieron que hacer para que pudiera salir adelante.

JBG

AGRADECIMIENTOS

A Dios gracias, por darnos fortaleza, sabiduría, alegría cuando más se necesitaba, por colocarnos en este camino que ya pronto culmina. A los familiares y amigos que nos acompañaron en todo este tiempo y a quienes aportaron para que este proyecto fuera una realidad. A las empresas Microchip y Freescale por aportar las muestras que sirvieron para desarrollar la tarjeta de control y a los estudiantes Julián Lozano y Duvan Bermúdez por su colaboración en el diseño de las piezas mecánicas.

CONTENIDO

	Pág.
OBJETIVOS.....	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1. QUE ES UN ROBOT	19
1.2. TIPOS DE ROBOTS SEGÚN LA ESTRUCTURA MECANICA.....	20
1.2.1. Tipo Serie	20
1.2.2. Tipo Paralelo	20
1.3. ESTADO DEL ARTE DE LOS ROBOTS PARALELOS	22
1.4. ROBOT TIPO DELTA	26
1.4.1. Robot Delta en el mercado.....	28
1.4.2. Robot Delta a nivel académico.....	32
2. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE UN ROBOT DELTA.....	35
2.1. MODELO GEOMÉTRICO.....	35
2.2. MODELO CINEMÁTICO INVERSO.....	38
2.3. MODELO CINEMÁTICO DIRECTO.....	40
3. DISEÑO DEL ROBOT DELTA.....	41
3.1. PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS.....	41
3.1.1. Tipos de trayectorias de los robots comerciales clásicos.....	42
3.1.2. Interpolación de trayectorias	43
3.1.3. Interpolador a tramos 6-1-6.....	43
3.2. MODELO DE SIMULACIÓN EN ADAMS	45
3.2.1. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DINÁMICA.....	53

3.3.	SIMULACIÓN DINÁMICA	55
3.3.1.	Simulaciones realizadas.....	56
3.4.	SELECCIÓN COMERCIAL DE LOS MOTORES.....	68
3.5.	DRIVER DEL MOTOR DC	70
3.6.	SENSORES.....	72
3.6.1.	Codificador Rotatorio con sensor de Efecto Hall	72
3.6.2.	Final de Carrera	73
3.7.	HARDWARE DE CONTROL	74
3.8.	DISEÑO CAD DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA.....	75
3.9.	PROTOTIPO CONSTRUIDO.....	78
3.10.	TARJETA DE CONTROL	82
4.	CONTROL DE POSICIÓN DEL ROBOT DELTA.....	86
4.1.	ARQUITECTURA DE CONTROL	86
4.2.	SEÑAL DE REALIMENTACIÓN	90
4.3.	CONTROL MONOARTICULAR.....	92
5.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	95
5.1.	INTERFAZ GRAFICA EN LABVIEW.....	95
5.2.	POSICIONES OBTENIDAS.....	99
	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	106
	BIBLIOGRAFÍA.....	107
	ANEXO 1	113

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Robot Serie IRB 6400RF	20
Figura 2. Plataforma Gough-Stewart	21
Figura 3. Plataforma de Stewart	23
Figura 4. Plataforma de Stewart (a) 6-SPS, (b) 6-UPS.....	24
Figura 5. Robot paralelo para mecanizado	25
Figura 6. Prototipo de Robot Delta Patentado en EEUU por Clavel	27
Figura 7. Robot Delta Paloma-D2 Tipo Top Loader de Bosch	28
Figura 8. SurgiScope en la Universidad Humbolt en Berlín	29
Figura 9. Robots Delta Hitachi Seiki para empaquetado y perforación.....	30
Figura 10. FlexPicker IRB 340 y 360	31
Figura 11. Célula robotizada Delfi tipo Feed Placer de Bosch	32
Figura 12. Robot NUWAR, construido en la University of Western Australia.....	33
Figura 13. Sistema RoboTenis.....	34
Figura 14. Detalle del Robot Delta.....	36
Figura 15. Modelo Geométrico del Robot Delta.....	36
Figura 16. Parámetros Geométricos del Robot Delta.	37
Figura 17. Posibles Soluciones del Modelo Cinemático Inverso para la articulación $i=1$	39
Figura 18. Ocho Posibles Soluciones del Problema Cinemático Inverso.....	39
Figura 19. Posible Solución del Problema Cinemática Directa, Intersección de tres esferas.	40
Figura 20. Bloques de diseño	41
Figura 21. Perfiles del Interpolador 6-1-6.....	44
Figura 22. Entorno de Trabajo ADAMS 2010	46
Figura 23. Procedimiento para cargar el Modelo de Simulación.....	47
Figura 24. Dimensiones del Robot Delta	48
Figura 25. Vista Frontal.....	49
Figura 26. Selección de Eslabón	50
Figura 27. Modificación de Pesos	50
Figura 28. Selección de Trayectoria	51
Figura 29. Archivo de Trayectoria	52
Figura 30. Selección de Articulaciones	52
Figura 31. Paleta de Herramientas de ADAMS.....	53
Figura 32. Posición Inicial del Modelo de Simulación	54

Figura 33. Posición Final del Modelo de Simulación.....	54
Figura 34. Ventana del PostProcessor	55
Figura 35. Movimiento del Efecto final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (0,0,340)	56
Figura 36. Movimiento del Efecto final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (100,0,120)	58
Figura 37. Movimiento del Efecto final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (100,0,340)	60
Figura 38. Movimiento del Efecto final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (-50,50,340).....	62
Figura 39. Movimiento del Efecto final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (0,0,180)	64
Figura 40. Movimiento del Efecto final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (0,0,180)	66
Figura 41. Motorreductor de metal con relación 131:1.....	69
Figura 42. Puente H MC33932 de Freescale.....	71
Figura 43. Esquemático de Conexiones MC33932.....	72
Figura 44. Codificador en cuadratura de 64 CPR	73
Figura 45. Final de Carrera.....	74
Figura 46. Diagrama de Pines dsPIC33FJ128.....	75
Figura 47. Piezas diseñadas en SolidWorks.....	76
Figura 48. Brazo con articulaciones.....	77
Figura 49. Antebrazo	77
Figura 50. Ensamble final en SolidWorks	78
Figura 51. Prototipo Construido	79
Figura 52. Antebrazo	79
Figura 53. Barras que conforman el Brazo	79
Figura 54. Plataforma Móvil.....	80
Figura 55. Detalle de las Articulaciones.....	80
Figura 56. Detalle de los motores	81
Figura 57. Cableado y Final de Carrera.....	81
Figura 58. Esquemático de Conexiones Microcontrolador Maestro.....	82
Figura 59. Esquemático de Conexiones Microcontrolador Esclavo	83
Figura 60. Esquemático de Conexiones Regulación de Voltaje	83
Figura 61. Esquemático de Conexiones Controlador de los Motores 1 y 2	84
Figura 62. Esquemático de Conexiones Controlador del Motor 3.....	84
Figura 63. Conexiones Mediante Conector RJ45	85
Figura 64. Baquelita del Modulo de Control.....	85
Figura 65. Arquitectura de Control	87

Figura 66. Diagrama de Transición de Estados	88
Figura 67. Rutina Ejecutada por el Maestro.....	89
Figura 68. Rutina Ejecutada por el Esclavo	90
Figura 69. Señales en cuadratura (rotación en sentido horario)	91
Figura 70. Control de Posición.....	92
Figura 71. Esquema de Control Para un Motor.....	92
Figura 72. Entorno de LabVIEW	95
Figura 73. Diagrama de Bloques de la Interfaz en LabVIEW.....	96
Figura 74. Bandera de Petición de Datos	97
Figura 75. Envío de coordenadas al dsPIC	97
Figura 76. Configuración Puerto Serie.....	98
Figura 77. Conversor USB a RS232	98
Figura 78. Esquema del Conversor USB a RS232	99
Figura 79. Prueba Experimental 1	100
Figura 80. Prueba Experimental 1	101
Figura 81. Prueba Experimental 3	102
Figura 82. Prueba Experimental 4	103
Figura 83. Prueba Experimental 5	104

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Pesos, Longitudes y Radios de los Eslabones	48
Tabla 2. Trayectorias Simuladas.....	68
Tabla 3. Características de los Motores Seleccionados	69
Tabla 4. Resistencia de Armadura e Inductancia de Armadura	70
Tabla 5. Conexiones del Codificador Rotatorio	73
Tabla 6. Características dsPIC33FJ128MC802	74
Tabla 7. Pesos de la Estructura	82
Tabla 8. Diagrama de estados para rotación horaria	91
Tabla 9. Diagrama de estados para rotación anti-horaria	91
Tabla 10. Errores Articulares Experimentales.....	105
Tabla 11. Errores de Posición Espacial	105

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1	113

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Construir y controlar un robot paralelo tipo Delta.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener los modelos cinemáticos del robot.
- Simular el comportamiento dinámico del robot empleando el software de simulación MSC ADAMS.
- Desarrollar un planificador de trayectorias basado en la cinemática del robot.
- Seleccionar comercialmente los motores y materiales con los que se construirá la estructura mecánica del prototipo.
- Implementar el control de posición con microcontroladores (dsPIC de Microchip) en una configuración Maestro-Esclavo y garantizar su precisión y velocidad.
- Desarrollar una interfaz gráfica mediante LabVIEW capaz de realizar una comunicación dúplex con el microcontrolador.
- Ensamblar el prototipo y analizar su comportamiento, verificar que sea acorde a lo simulado.
- Realizar los cambios en el control del robot para que funcione dentro de los parámetros establecidos.

RESUMEN

TITULO: FABRICACIÓN Y CONTROL DE POSICIÓN DE UN ROBOT PARALELO TIPO DELTA CON 3 GRADOS DE LIBERTAD

AUTORES: JAMITH BERMÚDEZ GALVIS
OMAR ANDRÉS MUÑOZ MONSALVE

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR: LUIS ÁNGEL SILVA

En este proyecto se presenta la fabricación de un prototipo de robot paralelo tipo delta con 3 grados de libertad y la implementación del control digital de posición de lazo cerrado implementando un PI.

Inicialmente se desarrolló un modelo de simulación en ADAMS partiendo de unas dimensiones establecidas y unos pesos máximos. Se realizó un análisis de trayectorias que permitió encontrar las trayectorias críticas donde los pares son máximos y se eligieron motores comerciales capaces de desarrollar ese par. Después de la compra de los motores se diseñaron las piezas mecánicas en el software de diseño SolidWorks, y se procedió a su fabricación, seguidamente se implementó el control digital en microcontroladores dsPIC de Microchip en una configuración Maestro-Esclavo empleando comunicación serial. Para la visualización de las variables controladas, se diseñó una interfaz gráfica en LabVIEW.

El prototipo busca motivar el desarrollo tecnológico de la región y la construcción de máquinas para automatizar procesos industriales a un costo inferior al del mercado, proporcionando a los empresarios métodos para mejorar sus líneas de producción.

PALABRAS CLAVE: ROBOTS PARALELOS, MICROCONTROLADORES, CONTROL DIGITAL, MOTORES DC.

ABSTRACT

TITLE: FABRICATION AND CONTROL OF POSITION OF ROBOT
PARALLEL TYPE DELTA WITH 3 DEGREES OF FREEDOM

AUTHORS: JAMITH BERMÚDEZ GALVIS
OMAR ANDRES MUÑOZ MONSALVE

FACULTY: FACULTY OF ENGINEERING ELECTRONIC

DIRECTOR: LUIS ANGEL SILVA

This project presents the fabrication of a prototype parallel robot type delta with 3 degrees of freedom and the implementation of a digital position control by implementing a closed loop PI.

Initially it was developed a simulation model in ADAMS based on set dimensions and maximum weights. It performed a trajectory analysis that allowed find critical paths where the torques are maximum and it chose commercial motors that they can develop this torque. After the purchase of motors, mechanical parts were designed in the design software SolidWorks, and it was proceeded to manufacture, then it implemented the digital control in dsPIC microcontrollers from Microchip in a Master-Slave configuration using serial communication. For the visualization of the controlled variables, it was designed a graphical interface in LabVIEW.

The prototype seeks encourage the technological development in the region and the construction of machines to automate industrial processes at a cost below the market, providing business methods to improve their production lines.

KEYWORDS: PARALLEL ROBOTS, MICROCONTROLLERS, DIGITAL CONTROL, DC MOTORS.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la tecnología avanza muy rápido y la implementación de robots en la industria ha sido de gran utilidad. Los robots realizan tareas que los humanos no pueden o que son repetitivas, realizándolas con mayor precisión, exactitud y rapidez. Las aplicaciones robóticas son muchas y variadas, en todos los campos de la industria se ven robots especializados, un ejemplo es la industria farmacéutica, donde se necesitan estructuras robóticas de bajo peso y alta rigidez, con actuadores que alcancen altas velocidades y procesadores rápidos que tomen en cuenta la dinámica no lineal del sistema.

Dado el mundo globalizado en el que vivimos donde la tecnología está en auge y los tratados de libre comercio entre los países son cada vez más frecuentes, se hace necesario la modernización de la industria en Colombia, una alternativa está en la robótica, por lo cual se propone la implementación de robots para mejorar la eficiencia de la industria y la calidad de sus productos que la lleve a ser más competitiva a nivel mundial y a unos costos razonables.

En Colombia como en muchos otros países, existen campos como el agroindustrial y el alimenticio que necesitan estructuras robóticas automatizadas para mejorar la calidad de sus productos y con capacidad de realizar tareas que requieren características de velocidad, fuerza, aceleración y rigidez, como la selección y empaquetado de productos en serie, la soldadura de piezas, el ensamblaje de productos, entre otros.

Siguiendo esta premisa, dentro del Grupo de Investigación en Control Industrial, en la línea de investigación de sistemas robóticos industriales, se planteó construir un prototipo de robot industrial tipo delta con tres grados de libertad, para ser empleado en la industria Colombiana, en el campo agroindustrial o en el campo alimenticio.

El diseño del prototipo llevo las siguientes fases: Simulación dinámica a partir de unas dimensiones determinadas, selección de los motores comercialmente, diseño de la estructura mecánica, compra de los elementos requeridos, diseño del controlador con una estructura Maestro-Esclavo y el control de posición. El robot es simulado en MSC ADAMS, un software de simulación dinámica, con el fin de verificar que se cumplan las condiciones del espacio de trabajo deseado y se seleccionen los motores idóneos, ya que cumplen un papel fundamental en el desarrollo del proyecto, por lo cual se realiza un planificador de trayectorias para hacer el análisis dinámico de par promedio y par máximo para diferentes

trayectorias. Posteriormente se modela cada componente de la estructura mecánica del robot en SolidWorks, un software CAD de modelado 3D, en el cual se diseña la estructura mecánica final. Y finalmente el control de posición se realiza mediante la implementación de una arquitectura monoarticular.

En el hardware de control se emplean dos microcontroladores en una estructura Maestro-Esclavo, cada uno de los controladores individuales emplea un control PI digital realimentado para el control de los motores pudiendo controlar su posición y mejorando la precisión del sistema. Para el control de los motores, se implementó un driver constituido por un puente H para cada uno, controlados por modulación de ancho de pulso desde el microcontrolador Maestro, el cual supervisa la posición y velocidad de cada motor se comunica con un microcontrolador Esclavo encargado de la generación de trayectorias.

Se obtuvo como resultado un prototipo capaz de desarrollar trayectorias puntuales, multipunto y velocidades hasta 600 mm/s. El prototipo fue validado mediante resultados experimentales en el laboratorio y en campo.

Para trabajos futuros se plantea la implementación de un control visual e la incorporación de una pinza en la plataforma móvil, desarrollo de estrategias y algoritmos de control más robustos.

El prototipo gracias a sus prestaciones y servicios será dado a conocer en el sector industrial de la región mediante exposiciones en congresos y muestras empresariales, como un proyecto viable para la automatización de las empresas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. QUE ES UN ROBOT

Un robot es una máquina diseñada para ejecutar una o más tareas repetidamente, con velocidad y precisión. Hay tantos tipos diferentes de robots como de tareas que pueden desempeñar.

La palabra robot proviene del término checo *robota* (trabajador, siervo) con el que el escritor Karel Capek los designó en 1920, primero en su novela y tres años después en su obra teatral R.U.R: (Robots Universales de Rossum) (Capek, 2004). En la obra, los robots eventualmente derrocan a sus creadores humanos (Zunt, 2005).

Un robot puede ser controlado por un operador humano, a veces desde una gran distancia. Pero la mayoría de los robots son controlados por un computador. La Primera generación de robots data de la década de 1970 y consta de dispositivos estacionarios, electromecánicos, no programables y sin sensores. La Segunda generación de robots fue desarrollada en la década de 1980 y pueden contener sensores y controladores programables. La Tercera generación de robots se desarrolló aproximadamente desde 1990 hasta la actualidad. Estas máquinas pueden ser fijas o móviles, con programación sofisticada, reconocimiento de voz y/o síntesis, y otras características avanzadas. La Cuarta generación de robots se encuentra en fase de desarrollo e investigación, e incluyen características como la inteligencia artificial, la auto-replicación, el auto-ensamblaje y un tamaño de nanoescalas (dimensiones físicas del orden de nanómetros, o en unidades de 10^{-9} metros).

Algunos robots avanzados son llamados androides por su semejanza superficial con los seres humanos. Los androides son móviles, por lo general se mueven sobre ruedas o una unidad de seguimiento (los robots con piernas son inestables y difíciles de diseñar). El androide no es necesariamente el punto final de la evolución del robot.

Algunos de los robots más enigmáticos y poderosos, no se ven ni se comportan como los seres humanos. Lo último en inteligencia robótica y sofisticación puede adoptar formas inimaginables (Midmarket CIO Definitions).

1.2. TIPOS DE ROBOTS SEGÚN LA ESTRUCTURA MECANICA

Basicamente existen dos tipos de robots según su estructura mecanica, los serie y los paralelos.

1.2.1. Tipo Serie

Los robots tipo serie están formados por una cadena cinemática abierta, con una estructura similar al brazo humano (antropomórficos), como el desarrollado por el Grupo ABB, el cual posee 3 grados de libertad (Figura 1).

Figura 1. Robot Serie IRB 6400RF



Fuente: (The ABB Group)

1.2.2. Tipo Paralelo

Un robot paralelo es aquel cuya estructura mecánica está formada por un mecanismo de cadena cerrada y donde el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes. Estos robots normalmente

disponen de un único actuador, reduciendo su complejidad y permitiendo canalizar mejor la energía de los actuadores para mejorar las prestaciones del robot en cuanto a velocidad y capacidad de carga. De las arquitecturas paralelas la más común es la plataforma Gough-Stewart (Figura 2) que cuenta con seis grados de libertad.

Figura 2. Plataforma Gough-Stewart



Fuente: (Hydra-Power Systems, Inc.)

Las principales ventajas que presentan las plataformas paralelas con respecto a los robots serie en cuanto a prestaciones de carga y potencia son las siguientes:

- Los accionamientos de potencia conectan directamente la base del robot al efector final. Debido a esto, los accionamientos sirven de elementos estructurales y actúan de manera simultánea, lo que les da la capacidad de manipular cargas muy superiores a su propio peso. Por tanto, el elevado ratio carga/potencia de estos mecanismos proporciona una alta eficiencia energética.
- Las estructuras paralelas son mecanismos que ofrecen una alta rigidez y muy bajo peso. Esto hace que presenten unas características en cuanto a precisión claramente superiores a las de los robots serie.
- Presentan altas velocidades de operación, en comparación con cualquier otro tipo de estructura robótica.

Sin embargo, presentan otras características que según la aplicación, pueden considerarse desventajas:

- La cinemática de los mecanismos paralelos es más compleja. En ocasiones esto obliga a recurrir a sensores redundantes para poder establecer un lazo de control.
- El espacio de trabajo suele ser pequeño. Además, su cálculo no es sencillo, pues la posición y la orientación están fuertemente acopladas.
- El problema de las configuraciones singulares es más complejo, y debe resolverse específicamente para cada topología.
- No existe, como ocurre con los robots en serie, un modelo dinámico general para los mismos. Esto dificulta el desarrollo de algoritmos de control y hace que los robots existentes en la actualidad se controlen de forma desacoplada.

1.3. ESTADO DEL ARTE DE LOS ROBOTS PARALELOS

La estructura cinemática de los robots paralelos se conoce desde hace mucho tiempo. Ya en 1813, Cauchy estudió la rigidez de un octaedro articulado. Sin embargo, fue mucho más tarde cuando Gough y Whitehall (1962) propusieron un mecanismo similar para el ensayo de neumáticos.

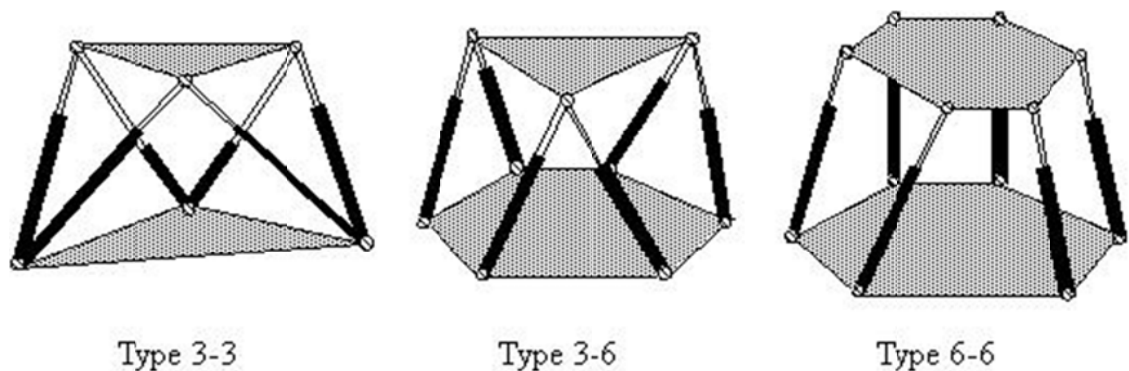
En 1965, Stewart propuso el uso de una estructura paralela de seis grados de libertad para generar movimiento en el espacio, como la solución más práctica en la construcción de simuladores de vuelo. La elección de este tipo de mecanismo se justifica por la buena relación carga admisible/peso propio. De hecho, en una plataforma de Gough se distribuye la carga, de modo que cada uno de sus 6 actuadores soporta aproximadamente $1/6$ de los esfuerzos totales, siendo además, estos esfuerzos de tracción y compresión, lo que proporciona gran rigidez al mecanismo. Esto queda ilustrado con el ejemplo de un prototipo de robot paralelo que con 35 kg de peso tiene una carga nominal de 600 kg.

El mecanismo de Stewart, consistía en una plataforma triangular unida mediante articulaciones esféricas a tres actuadores lineales ajustables en longitud, que se conectaban a su vez, a una base fija mediante articulaciones universales. A pesar de que el mecanismo de Stewart es menos representativo que el de Gough, los robots paralelos son llamados frecuentemente plataformas de Stewart. Con el tiempo, la arquitectura de la plataforma de Stewart fue sufriendo modificaciones. La plataforma de Stewart tal como se la conoce hoy día, consiste en dos plataformas (la base y la plataforma móvil) unidas a través de seis actuadores

extensibles mediante articulaciones esféricas en ambos lados, o con articulaciones esféricas a un lado y universales al otro.

Hasta mediados de la década de los 80, la mayoría de los diseños se centraron en dos configuraciones. Una con la base y el efector final con forma triangular y los actuadores de dos en dos coincidiendo en los vértices de cada triángulo; y otra, con la plataforma móvil de forma triangular y los actuadores coincidiendo dos a dos en los vértices el triángulo y con seis puntos distintos contenidos en el plano de la base con forma hexagonal. Estas configuraciones se denotan como plataforma de Stewart 3-3 (Figura 3 Type 3.3) y plataforma de Stewart 6-3 (Figura 3 Type 3-6), respectivamente. Muy pronto se observó que la coincidencia de las articulaciones esféricas restringía de forma severa la movilidad del manipulador, sin embargo la configuración 6-3 todavía se mantuvo popular por algún tiempo. Otra configuración que empezó a ser muy popular es la que tenía hexágonos semi-irregulares como puntos de conexión tanto en la base como en el efector final (plataforma de Stewart 6-6) (Figura 3 Type 6-6). (Stewart, 1965-1966).

Figura 3. Plataforma de Stewart

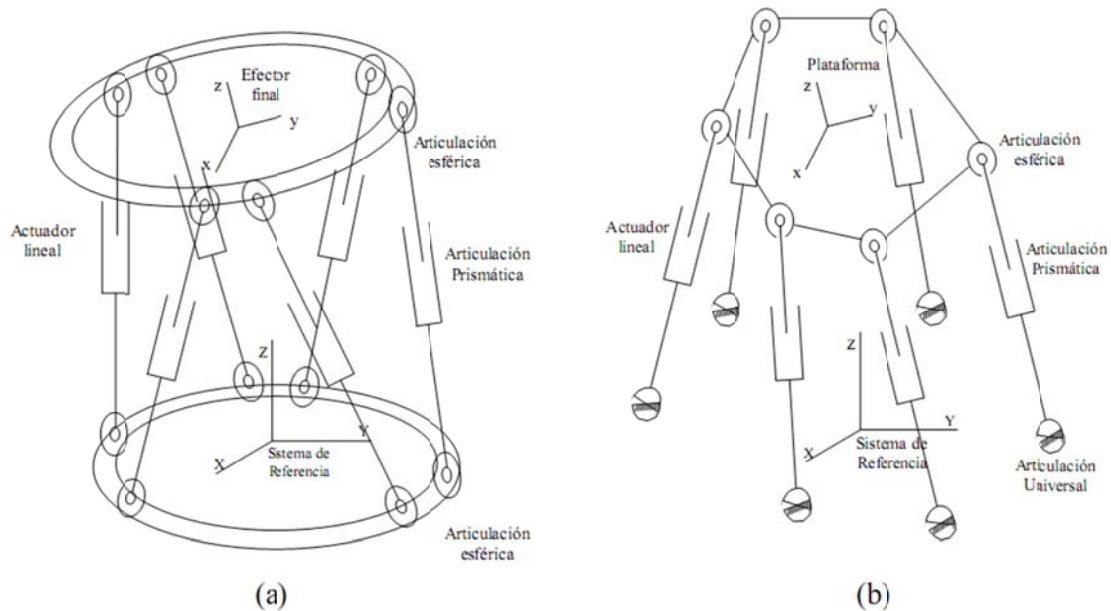


Fuente: (Technion - Israel Institute of Technology)

Existe una gran variedad de configuraciones mecánicas para este tipo de robots, según sea la estructura de las cadenas cinemáticas que unen la base con el efector final. La estructura cinemática con articulaciones esféricas a ambos lados de cada actuador (Figura 4 (a)), se denota como plataforma de Stewart 6-SPS, donde 6 se refiere al número de grados de libertad del robot y SPS viene del inglés (Spherical – Prismatic – Spherical). De igual forma, la estructura con articulaciones universales en la base y esféricas en el efector final se denota como plataforma de Stewart 6-UPS (Universal – Prismatic – Spherical) (Figura 4 (b)). Estas dos estructuras son idénticas salvo que la plataforma 6-SPS presenta seis

grados de libertad pasivos que permite la rotación de cada cadena cinemática sobre su eje.

Figura 4. Plataforma de Stewart (a) 6-SPS, (b) 6-UPS



Fuente: (Ángel Silva, 2005)

Más tarde en 1978, Hunt sugirió que los mecanismos actuadores de forma paralela de los simuladores de vuelo, se usaran como robots manipuladores y destacó, que los manipuladores paralelos requerían de un estudio más detallado en el contexto de las aplicaciones robóticas a la vista de las ventajas en cuanto rigidez y precisión respecto a los robots serie convencionales.

Además de la excelente relación carga admisible/peso propio, los robots paralelos presentan otras características interesantes. En 1979, McCallion y Pham propusieron usar la plataforma de Stewart como un manipulador paralelo dentro de una célula de ensamblaje robotizada (Figura 5) fundamentalmente porque la posición del efector final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares de los robots en serie. La gran rigidez asegura que las deformaciones de los actuadores sean mínimas. Esta característica contribuye en gran manera a la precisión en el posicionamiento del manipulador.

Earl y Rooney (1983) analizaron la estructura cinemática para aplicaciones robóticas y las dualidades entre mecanismos serie y paralelos, presentando métodos de síntesis de nuevas estructuras cinemáticas. Hunt (1983) estudió la

estructura cinemática de los manipuladores paralelos basándose en la “teoría screw”, y enumeró varias estructuras cinemáticas con futuro prometedor.

Figura 5. Robot paralelo para mecanizado



Fuente: (Ángel Silva, 2005)

También analizó las singularidades en términos geométricos clasificándolas en “configuraciones estacionarias” y en “configuraciones con incertidumbre”, discutiendo las diferentes formas de ensamblaje de los manipuladores paralelos.

Según la estructura mecánica existen diferentes grados de libertad para los robots paralelos, los más empleados son los de 6 grados, 4 grados y 3 grados de libertad.

Según la estructura cinemática, los manipulantes paralelos de tres grados de libertad, se clasifican en cuatro tipos: planar, esférico, espacial y mixto. Robots paralelos con dos grados de libertad rotacionales y uno traslacional han sido propuestos por (Agrawal, 1991), (Fang & Huang, 1997), (Lee & Shah, Kinematic analysis of a three degrees of freedom in-parallel actuated manipulator, 1987), (Lee & Arjuman, A 3-DOF micromotion inparallel actuated manipulator, 1991), (Pfreundschuh, Kumar, & Sugar, 1991), (Song & Zhang, 1995), (Waldron, Raghavan, & Roth, 1989). Manipuladores paralelos planares y esféricos han sido estudiados por (Asada & Cro Granito, 1985), (Cox & Tesar, 1989), (Gosselin, Sefrioui, & Richard, Solutions polynomiales au problème de la cinématique directe

des manipulateurs parallèles plans à trois degrés de liberté, 1992), (Gosselin & Lavoie, 1993), (Wang & Gosselin, Kinematic Analysis and Singularity Loci of Spatial Four-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator, 1996), (Carretero, Podhorodeski, & Gosselin, 2000), (Vischer & Clavel, 2000). Las estructuras mixtas son empleadas como simuladores de movimiento, muñecas en robots híbridos serie-paralelo y en sistemas mixtos de posicionamiento y orientación (Lee & Shah, 1988), (Waldron, Raghavan, & Roth, 1989), (Carretero, Podhorodeski, & Gosselin, 2000), (Di Gregorio & Parenti-Castelli, 2001).

Recientemente, se han presentado varios manipuladores paralelos de 4 grados de libertad con cadenas cinemáticas no simétricas. Hesselbach et al. (1998) desarrolla un manipulador paralelo de 4 grados de libertad, con dos cadenas cinemáticas asimétricas para el corte los paneles convexos de cristal.

Un manipulador con cadenas cinemáticas no simétricas, da lugar a un espacio de trabajo no simétrico, lo cual, puede complicar el planeamiento de la tarea. En este aspecto, varios investigadores han hecho grandes esfuerzos en diseñar manipuladores paralelos de 4 grados de libertad con cuatro cadenas cinemáticas idénticas.

Hasta la fecha, se han propuesto muy pocos manipuladores paralelos de 5 grados de libertad. Wang y Gosselin (1997) investigaron la cinemática y las singularidades de un manipulador paralelo 5 grados de libertad con cinco cadenas RUS (Rotational - Universal - Spherical) y una cadena pasiva US (Universal - Spherical). Lee and Park (1999) investigan la cinemática y la dinámica de un manipulador paralelo de 5 grados de libertad. Merlet et al., (2000) investigaron el problema asociado al planeamiento de trayectorias de una máquina-herramienta de cinco ejes, basada en un manipulador paralelo de 6 grados de libertad. El algoritmo propuesto, hace uso del grado de libertad adicional para la evitar las posiciones singulares. Recientemente, Huang and Li (2002) presentaron dos manipuladores paralelos de 4 grados de libertad y dos manipuladores paralelos de 5 grados de libertad con estructuras idénticas de cada cadena cinemática.

1.4. ROBOT TIPO DELTA

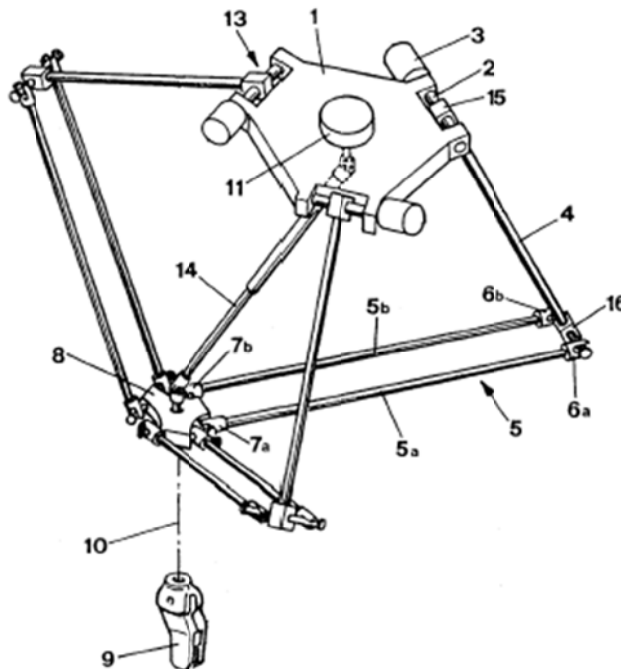
En 1988, Clavel, profesor en EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) irrumpe con la idea brillante de usar paralelogramos para construir una estructura paralela robusta con tres grados de libertad de translación y un rotatorio. Al contrario de las publicaciones científicas hasta el momento, su inspiración era

verdaderamente original y no viene de un mecanismo paralelo patentado por Willard L. Pollard en 1942. A esta estructura se le dio el nombre de robot Delta, sin sospechar que al final de siglo, sería uno de los diseños paralelos más acertados con varios cientos de estructuras activas en todo el mundo. En 1999, el Dr. Clavel es premiado con el “Golden Robot Award” (patrocinado por ABB) por su trabajo innovador en el robot paralelo Delta.

En la Figura 6, se muestra un esquema mecánico del robot Delta. En ella, se pueden observar las tres cadenas cinemáticas idénticas, que unen la plataforma fija y la móvil, además del brazo central que dota al sistema de un 4º grado de libertad rotativo.

La idea básica que estaba detrás del diseño del robot paralelo Delta era el uso de paralelogramos. El uso de tres de estos paralelogramos restringe totalmente la orientación de la plataforma móvil, que permanece con sólo 3 grados de libertad puramente traslacionales. Los acoplamientos de entrada de los tres paralelogramos están montados en ejes rotativos (3) y estos ejes pueden ser actuados mediante actuadores eléctricos de C.C o C.A, o actuadores lineales.

Figura 6. Prototipo de Robot Delta Patentado en EEUU por Clavel



Fuente: (Clavel, Device for the Movement and Positioning of an Element in Space, 1990)

Finalmente, un cuarto brazo puede ser utilizado para transmitir el movimiento rotatorio de la base a un efector final montado en la plataforma móvil.

El uso de actuadores montados en la base y la escasa masa de los acoplamientos permiten aceleraciones en la plataforma móvil de hasta 50g en entornos experimentales y de 12g en aplicaciones industriales. Esto hace del Delta el perfecto candidato para operaciones de “pick and place” de objetos ligeros (desde 10 gr hasta 1 kg). Los robots Delta disponibles en el mercado tienen un espacio de trabajo cilíndrico con 1 m de diámetro y 0.2 m de altura.

1.4.1. Robot Delta en el mercado

La historia del marketing del robot Delta es larga. Todo comenzó en 1983, cuando los hermanos suizos Marc-Olivier y Pascal Demarex crearon la compañía Demarex con base en Laussane (Suiza). Después de obtener una licencia para el robot Delta en 1987, su mayor objetivo era llegar a comercializar el robot paralelo para la industria del empaquetado (Figura 7). Después de varios años, Demarex ocupaba un importante lugar en este mercado. Cuatro versiones eran comercializadas bajo los nombres de: Pack-Place, Line-Placer, Top-Placer, y Presto.

Figura 7. Robot Delta Paloma-D2 Tipo Top Loader de Bosch



Fuente: (DirectIndustry)

La patente del robot Delta fue comprada por los hermanos Demareux de EPFL en 1996. Sin embargo, antes de que se llevara a cabo la transacción, EPFL había vendido ya dos licencias. El primer referente a robots de pequeña dimensión (brazo + paralelogramo < 800 mm) fue atribuido exclusivamente a Demareux en 1987. El segundo, referente a robots de mayores dimensiones fue vendido a AID y después revendido a DeeMed. Esta compañía, comprada después por la sueca Elekta, se especializa en intervenciones quirúrgicas y diseña el robot Delta para llevar un microscopio pesado (unos 20 Kg), (Figura 8). La tecnología del robot Delta fue consecuentemente vendida a Medtronic al final de 1999.

Figura 8. SurgiScope en la Universidad Humbolt en Berlín



Fuente: (Parallel Mechanisms Information Center)

Antes de la transacción de SurgiScope, Elekta IGS inició negociaciones acerca de la licencia de su Delta con el grupo ABB de Zurich. Como resultado, ABB obtuvo

una licencia para fabricar robots Delta de grandes dimensiones. Al mismo tiempo, Demarex anunció su decisión de producir robots de mayores dimensiones (en torno a 1200 mm). Sin embargo, Demarex no puede producir robots de mayor tamaño, ya que la compañía tiene la obligación de no entrar en el mercado de dimensiones superiores a 1200 mm.

Demarex también dio licencia a la compañía japonesa Hitachi Seiki para fabricar robots Delta de pequeñas dimensiones, para empaquetado (DELTA) y para perforación (PA35), (Figura 9). De hecho, Hitachi Seiki representa a Demarex en Japón.

Figura 9. Robots Delta Hitachi Seiki para empaquetado y perforación



Fuente: (Parallel Mechanisms Information Center)

ABB Flexible Automation, lanzó su robot Delta en 1999 bajo el nombre FlexPicker IRB 340 (Figura 10 (a)). Tres sectores de la industria eran su objetivo: el alimentario, farmacéutico y las industrias electrónicas. Posteriormente en 2008, ABB introdujo la segunda generación del robot para aplicaciones de pick y place, el FlexPicker IRB360 (Figura 10 (b)), con una velocidad aumentada, mayor capacidad de carga y un menor tamaño. El FlexPicker está equipado con un sistema de vacío capaz de transportar objetos de un punto a otro con un peso de más de 3 Kg. El robot está guiado con un sistema de visión diseñado por Cognex y un controlador IRC5 de ABB. Las velocidades alcanzables con este sistema son

de 10 m/s (unos 150 movimientos por minuto), y unas aceleraciones de hasta 150 m/s². El robot está disponible en dos versiones, una de las cuales es sellada, resistente a la corrosión y diseñada para su uso en ambientes extremadamente limpios. Actualmente ABB cuenta con más de 2000 robots delta instalados alrededor del mundo. (The ABB Group)

Después de más de quince años como única empresa en el mercado, Demarex se encontró repentinamente con la decisión del gigante sueco ABB de entrar en este mercado. En un intento de asegurar su estabilidad a largo plazo, Demarex cambió su línea de producción y comenzó a fabricar robots con células completas. Sin embargo, con el objetivo de hacerse con un mercado mundial, el “pequeño” Demarex comenzó a buscar un socio. Y tanto es así, que a finales de 1999, fue adquirido por el grupo suizo SIG.

Figura 10. FlexPicker IRB 340 y 360



Fuente: (Parallel Mechanisms Information Center)

Demarex desarrolló una estrategia basada en el desarrollo de máquinas estándar enfocadas en brindar automatización flexible a los productores de gama baja. Es así como desarrolló sus productos Top Loaders y Feed Placers (Figura 11).

En 2004 el Grupo Bosch compró la división SIG PACK del Grupo SIG y Demarex se incorporó a la división de Tecnología de Empaquetado de Bosch.

En 2009 Demarex fue completamente integrada en la División de Empaquetado del grupo Bosch y se convirtió en "Bosch Packaging Technology SA". A esa fecha se habían vendido más de 1300 robots delta a nivel mundial. (Robert Bosch GmbH)

Figura 11. Célula robotizada Delfi tipo Feed Placer de Bosch



Fuente: (DirectIndustry)

1.4.2. Robot Delta a nivel académico

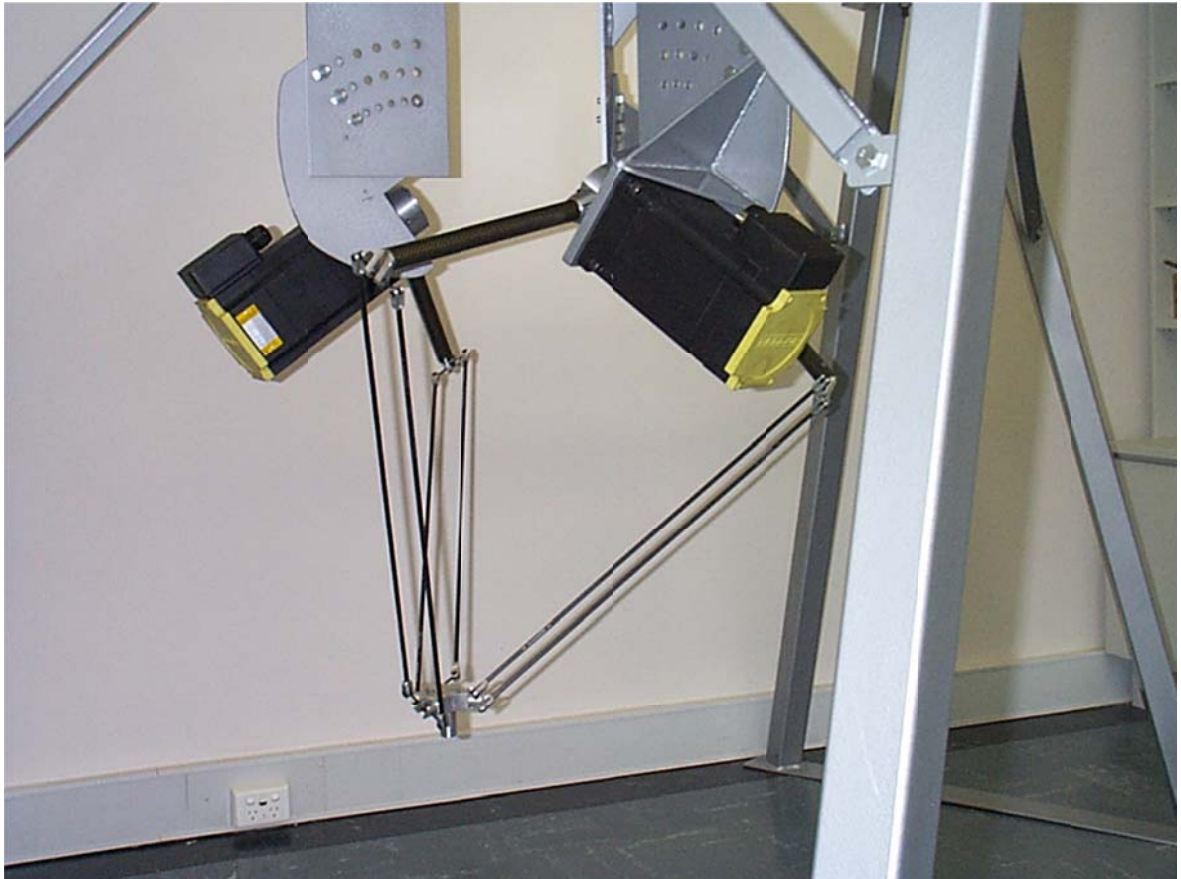
El diseño del robot Delta ha atraído gran interés no sólo en el mundo de la industria sino también en laboratorios académicos. Un gran número de variantes han sido propuestas pero la mayoría de esos prototipos son muy similares al modelo original. Uno de estos robots modificados fue construido en la Universidad de Maryland (Stamper & Tsai, 1988). Otra versión modificada, el prototipo PRIDE fue construida en la Universidad de Genova, (Bruzzzone, Molfino, Zoppi, & Zurlo, 2003).

Otra versión más optimizada, el NUWAR (Figura 12), está en construcción en el Departamento de Mecánica y Materiales (University of Western Australia). Este robot forma parte de la próxima generación de los robots paralelos y cuando esté terminado se espera que sea el más rápido del mundo. El diseño del NUWAR está basado en el robot Delta, capaz de alcanzar aceleraciones de hasta 500 m/s², y

su configuración trae consigo mejoras en dos aspectos: el espacio de trabajo, y la rigidez que presenta el sistema (Miller, 1995).

Tres versiones del robot Delta con motores lineales, han sido construidas en Ferdinand-von Steinbeis Schule, ETH Zúrich, y la Universidad de Stuttgart. Otras versiones lineales fueron fabricadas para la realización de proyectos de final de carrera en la Universidad de Michigan.

Figura 12. Robot NUWAR, construido en la University of Western Australia.

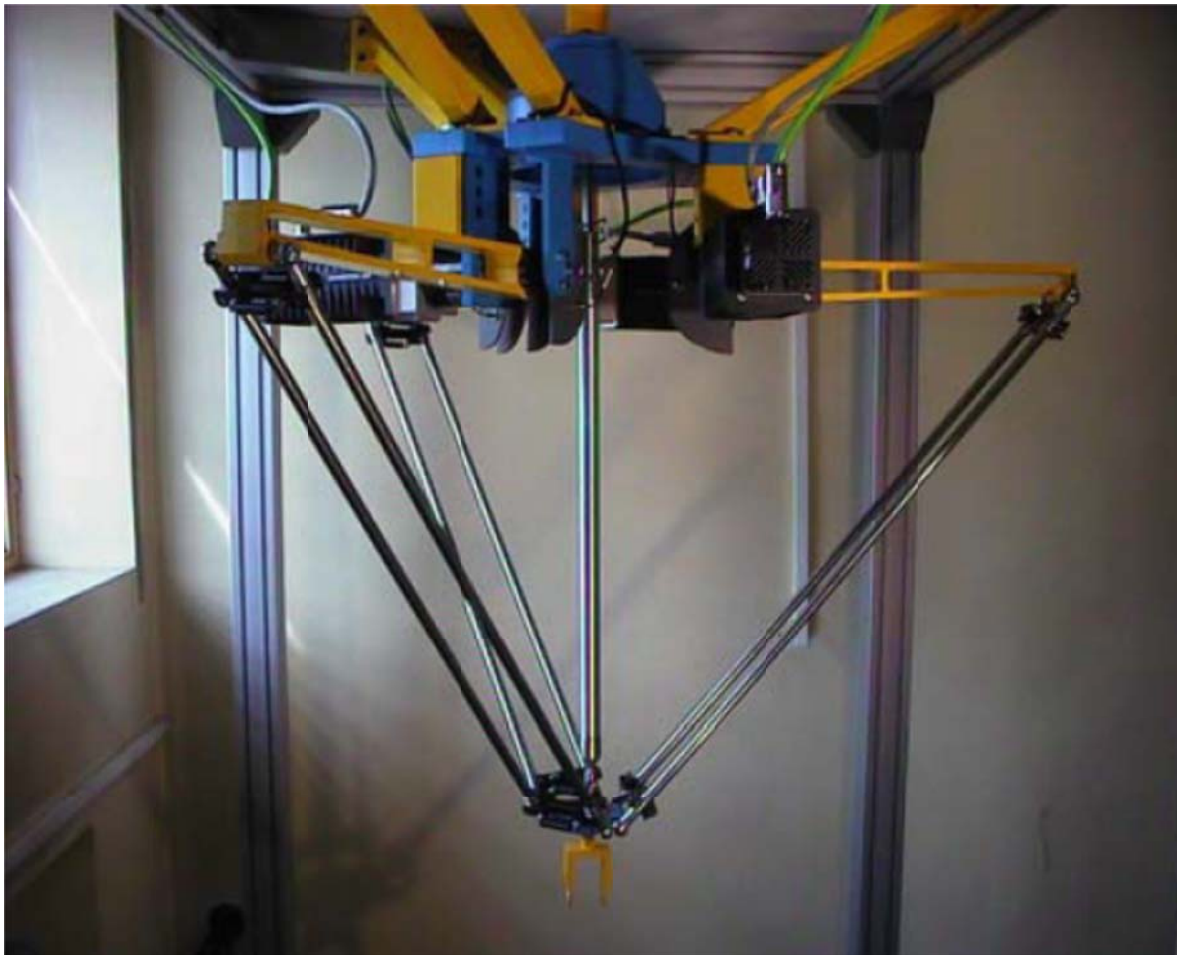


Fuente: (University of Western Australia)

Como es natural, la mayor parte de los miembros de la familia de robots Delta se encuentra en su lugar de nacimiento, EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne). Además varias estructuras Delta (Delta 720 y Microdelta 240), han sido construidas por el grupo de robótica paralela dirigido por el profesor Reymond Clavel. (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006)

En el 2005, se construyó la plataforma RoboTenis (Figura 13) en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid como parte de la tesis doctoral del Ingeniero Luis Ángel Silva. La plataforma RoboTenis consta de un robot Delta con cuatro grados de libertad controlado por un sistema de visión capaz de alcanzar una velocidad de trabajo de 1 m/s. Se puede afirmar que fue el primer sistema en plantear el control de un robot paralelo de alta velocidad mediante realimentación visual. (Ángel Silva, 2005)

Figura 13. Sistema RoboTenis



Fuente: (Ángel Silva, 2005)

2. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE UN ROBOT DELTA

La cinemática estudia los movimientos que puede realizar un mecanismo sujeto por un lado, a las restricciones geométricas del mismo, y por otro, a las restricciones que imponen las articulaciones que unen los cuerpos que lo constituyen. El análisis cinemático resuelve dos problemas, el problema cinemático inverso y el problema cinemático directo. La cinemática inversa permite determinar los valores de las coordenadas articulares, a partir de una posición y orientación dada del efector final. El problema cinemático directo, permite calcular la posición y orientación del efector final dadas las coordenadas articulares.

El análisis cinemático en el espacio de sistemas mecánicos con un elevado número de grados de libertad ya implica cierta complejidad, el hecho de que el sistema mecánico incluya cadenas cinemáticas cerradas (robots paralelos), lo acentúa mucho más. De hecho, un problema sencillo en robots serie como es la cinemática directa, es complicado en los robots paralelos y viceversa.

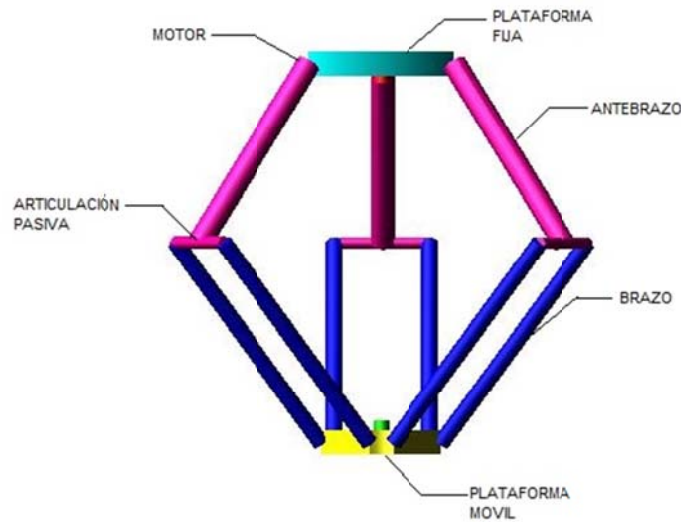
A continuación se presentan los modelos geométricos y cinemáticos del Robot Delta que describe las posibilidades que existen para la cinemática inversa y la cinemática directa.

2.1. MODELO GEOMÉTRICO

El robot paralelo tipo Delta está constituido por dos plataformas, una fija y otra móvil, y tres cadenas cinemáticas iguales y cerradas separadas por un ángulo de 120 grados. Cada cadena cinemática está formada por dos eslabones, el brazo y el antebrazo y tres articulaciones pasivas. Los motores están colocados en la plataforma fija y transfieren el movimiento a la plataforma móvil mediante la combinación de movimientos de cada cadena cinemática cerrada (Figura 14). La posición fija de los motores permite que la carga inercial sea reducida logrando mayores velocidades y aceleraciones en el efector final.

El modelo geométrico del robot se desarrolla a partir de la Figura 15. El sistema de referencia global Σ (X, Y, Z) está ubicado sobre el centro de la plataforma fija, con el eje Z perpendicular a la misma y el eje X perpendicular al eje del motor 1. Un segundo sistema de coordenadas Σ_{eff} (X_{eff} , Y_{eff} , Z_{eff}) es colocado en el centro de la plataforma móvil y representa la posición espacial del robot con respecto al sistema Σ .

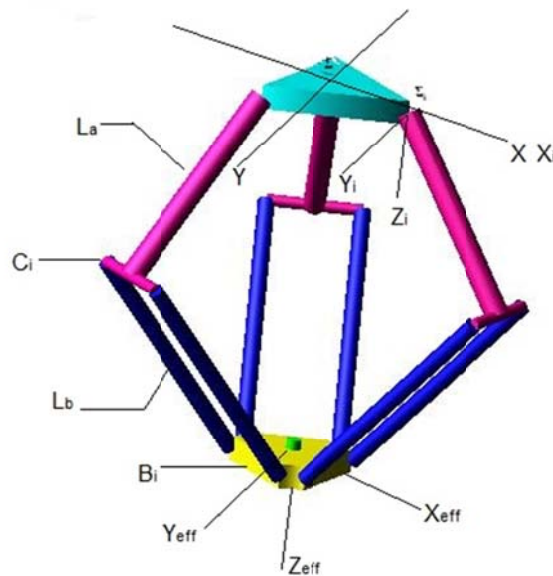
Figura 14. Detalle del Robot Delta



Fuente: Autores

Dada la triple simetría del robot, cada cadena cinemática (brazo + antebrazo) puede ser tratada por separado. Las longitudes de cada brazo y antebrazo son L_a y L_b , respectivamente. Sobre cada brazo, se selecciona un sistema de coordenadas $\Sigma_i(X_i, Y_i, Z_i)$ localizado a una distancia R del sistema de referencia global Σ , y rotado un ángulo θ_i (0° , 120° y 240°).

Figura 15. Modelo Geométrico del Robot Delta.



Fuente: Autores

Las articulaciones ubicadas en los sistemas Σ_i son activas y sus posiciones articulares se representan por α_i . Las articulaciones en los puntos B_i y C_i son pasivas. Los radios de las plataformas fija y móvil son R y r , respectivamente.

De la Figura 16, los parámetros geométricos del robot son ($i = 1,2,3$):

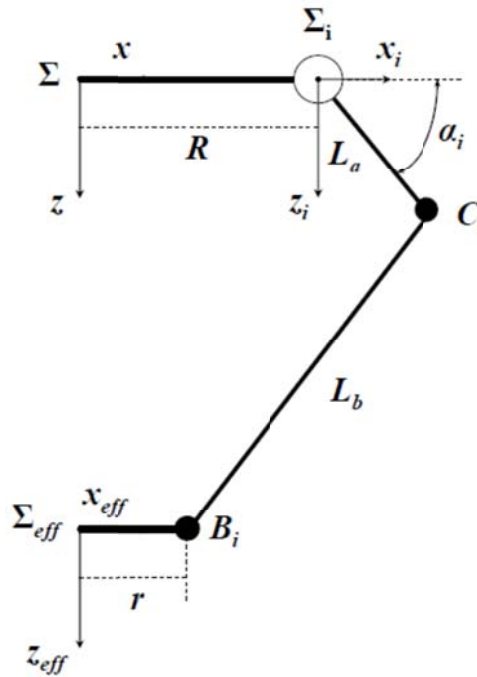
$$|\Sigma\Sigma_i| = R, |\Sigma_{eff}B_i| = r, |B_iC_i| = L_b, |\Sigma_iC_i| = L_a \quad (1)$$

La ecuación cinemática para cada cadena, está dada por la relación vectorial:

$$B_iC_i = C_{i\Sigma} - B_{i\Sigma}, \quad i = 1,2,3, \quad (2)$$

donde, $C_{i\Sigma}$ y $B_{i\Sigma}$ representan los vectores de posición de las articulaciones esféricas no actuadas $C_{i\Sigma}$ y B_i , con respecto al sistema de referencia global Σ .

Figura 16. Parámetros Geométricos del Robot Delta.



Fuente: (Ángel Silva, 2005)

La ecuación (2) puede ser expresada en términos de los parámetros geométricos del robot (1) y de la posición espacial de la plataforma móvil (x, y, z) con respecto al sistema de referencia global Σ , como

$$B_i C_i = {}^{\Sigma}R_{\Sigma_i} \begin{bmatrix} L_a \cos(\alpha_i) \\ 0 \\ L_a \sin(\alpha_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_a \cos(\theta_i) \\ \Delta_a \sin(\theta_i) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

donde, $\Delta r = R - r$, y ${}^{\Sigma}R_{\Sigma_i}$ es la matriz de rotación entre los sistemas Σ_i y Σ .

Considerando los antebrazos como cuerpos rígidos y de longitud constante, las ecuaciones de restricción para el robot están dadas por:

$$\|B_i C_i\|^2 = L_b^2, i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

las cuales pueden ser expresadas como

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = L_b^2 \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

con,

$$\begin{aligned} x_i &= (\Delta r + L_a \cos(\alpha_i)) \cos(\theta_i) \\ y_i &= (\Delta r + L_a \cos(\alpha_i)) \sin(\theta_i) \\ z_i &= L_a \sin(\alpha_i) \end{aligned} \quad (6)$$

2.2. MODELO CINEMÁTICO INVERSO

El modelo cinemático inverso encuentra los ángulos de entrada al robot (α_i) para una posición dada del efector Σ_{eff} . El modelo usa el resultado encontrado por Clavel (1991). En este caso, la ecuación (5) representa una esfera de radio L_b , centrada en B_i , la cual da el lugar geométrico de C_i . Una segunda restricción es impuesta por la trayectoria circular de C_i centrada en Σ_i y con radio L_a :

$$(x - R)^2 + z^2 = L_a^2 \quad (7)$$

El punto C_i se localiza sobre la intersección de la esfera (5) y el círculo (7) en el plano

$$y = 0 \quad (8)$$

Las ecuaciones (5), (7) y (8) generan una ecuación cuadrática en x , necesaria para encontrar

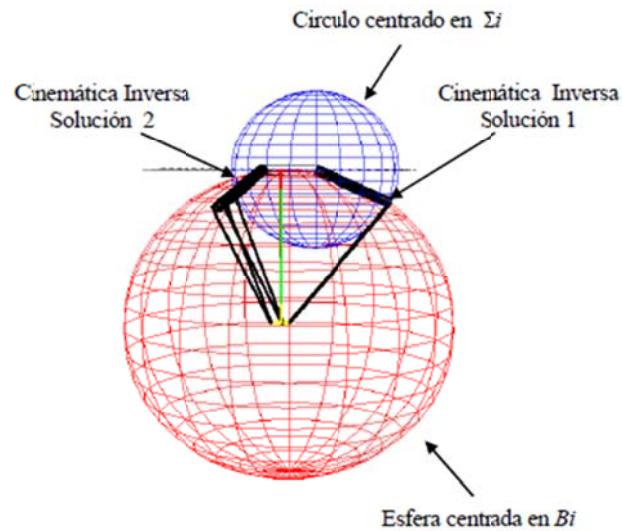
$$\alpha_i = \sin^{-1}\left(\frac{z}{L_a}\right) \quad (9)$$

La ecuación (9) define dos posibles soluciones para cada articulación. Solo una de ellas puede ser alcanzada físicamente por el manipulador, como se muestra en la Figura 17. Esto resultado permite concluir que existen ocho soluciones posibles del modelo cinemático inverso para una posición operacional dada (Figura 18). Con el fin de evitar singularidades y asegurar una realización práctica, la elección de cada posición articular está sujeta a las siguientes condiciones geométricas:

Si $x - R \geq 0$ α_i esta dada por la ecuación (9)

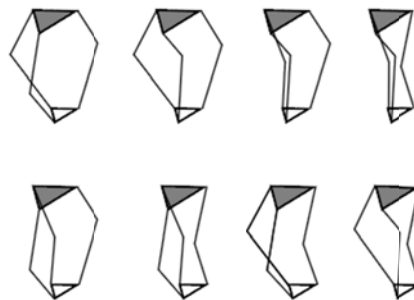
y si $x - R < 0$ α_i es corregida por $\alpha_i = \pi - a_i$

Figura 17. Posibles Soluciones del Modelo Cinemático Inverso para la articulación $i=1$.



Fuente: (Ángel Silva, 2005)

Figura 18. Ocho Posibles Soluciones del Problema Cinemático Inverso.



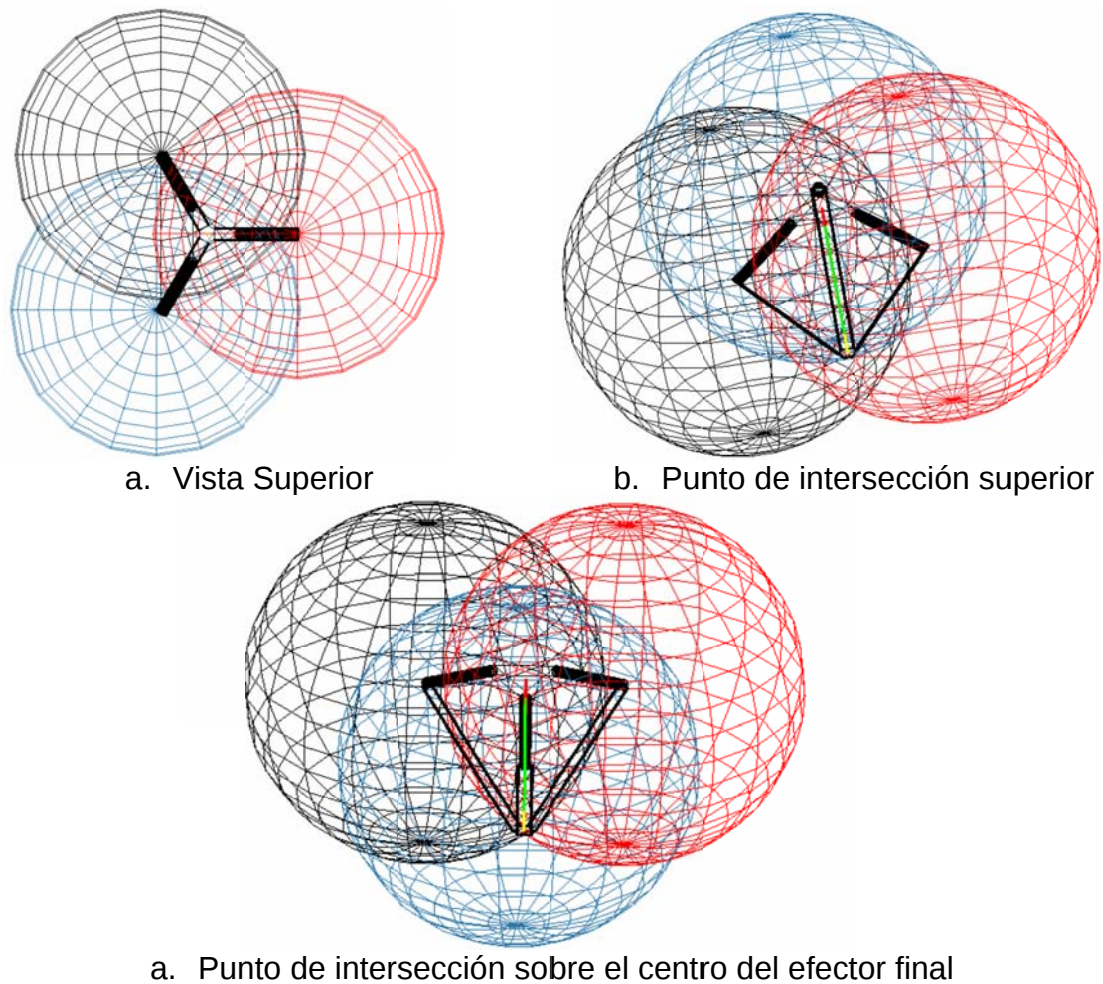
Fuente: (Ángel Silva, 2005)

2.3. MODELO CINEMÁTICO DIRECTO

Para la solución del problema cinemático directo se utilizan algoritmos basados en información sensorial de las articulaciones pasivas y el algoritmo de iteración numérica de Newton-Raphson para las simulaciones.

Aquí, los ángulos α_i son dados y se debe determinar la posición del punto Σ_{eff} . El centro del anillo móvil es la intersección de tres esferas (ecuación (5)) centradas en C_i y con radios Lb . Existen dos posibles puntos de intersección, pero solamente uno se puede alcanzar físicamente (Figura 19). La solución analítica del modelo cinemático directo, tiene un planteamiento similar a al empleado en la técnica de posicionamiento global, GPS.

Figura 19. Posible Solución del Problema Cinemática Directa, Intersección de tres esferas.

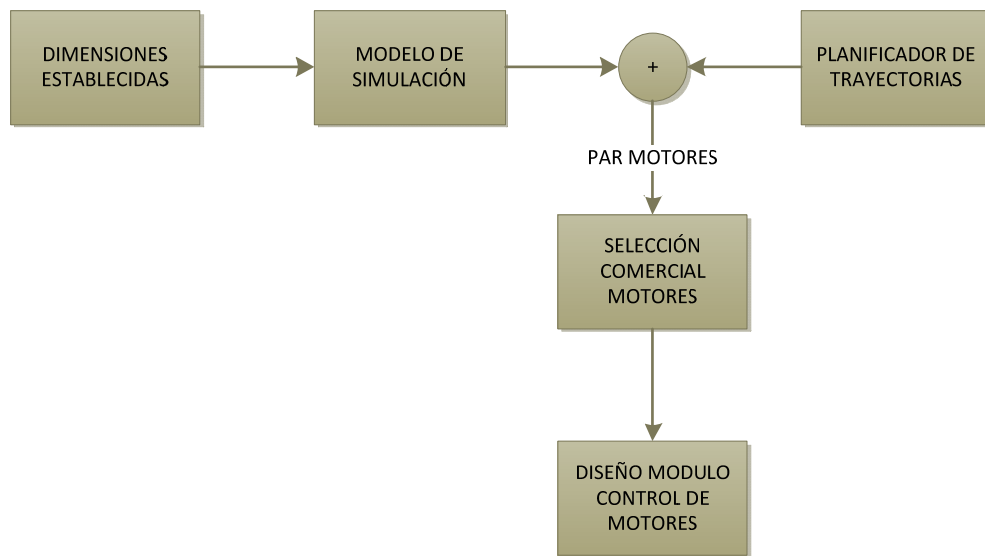


Fuente: (Ángel Silva, 2005)

3. DISEÑO DEL ROBOT DELTA

En este capítulo se introduce el modelo de simulación en ADAMS desarrollado para esta tesis, que permite validar tanto el modelo cinemático como el modelo dinámico del robot. Como se observa en el diagrama de bloques de la Figura 20, se parte del modelo de simulación que al apoyarse en las dimensiones establecidas y un planificador de trayectorias para simular el movimiento de las articulaciones, permite seleccionar comercialmente los motores y a la vez diseñar el módulo de control. Seguidamente se introduce el diseño CAD de la estructura mecánica en SolidWorks.

Figura 20. Bloques de diseño



Fuente: Autores

3.1. PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS

El planificador de trayectorias se trabajó en base al desarrollado en la Tesis Doctoral de Luis Ángel Silva (Ángel Silva, 2005) en la Universidad Politécnica de Madrid y en la Tesis de Grado de Jhonathan Rueda Flórez (Rueda Florez, 2008) en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

Obtenidos los modelos cinemáticos del robot se procede a trabajar el control de movimiento, el cual implica controlar el robot de manera que siga un camino o

trayectoria pre-planificada. El objetivo es por tanto establecer las trayectorias que debe seguir cada articulación del robot a lo largo del tiempo para conseguir que el efector final siga la trayectoria pre-planificada.

El planificador de trayectorias establece la trayectoria que debe seguir cada articulación del robot para lograr los objetivos fijados por el usuario (punto inicial, punto final, trayectoria cartesiana del efector final del robot, velocidad y aceleración, etc.). Estas trayectorias se seleccionan atendiendo a las restricciones físicas propias de los motores y a ciertos criterios de calidad de trayectoria, como suavidad o precisión de la misma. (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 1997)

El planificador de trayectorias deberá realizar las siguientes funciones:

1. Convertir la especificación de movimiento del punto inicial al punto final en una trayectoria en el espacio cartesiano.
2. Muestrear la trayectoria cartesiana obteniendo un número finito de puntos de dicha trayectoria.
3. Utilizando la cinemática inversa, convertir cada uno de estos puntos en sus correspondientes coordenadas articulares.
4. Interpoliar los puntos articulares, generando para cada articulación una función continua realizable por los actuadores.
5. Muestrear la referencia articular para generar referencias al control dinámico.

3.1.1. Tipos de trayectorias de los robots comerciales clásicos

Los avances tecnológicos han permitido que los robots puedan realizar trayectorias cada vez más complejas, ya que éstas pueden ser calculadas con antelación.

- **Trayectorias punto a punto**

En este tipo de trayectoria cada articulación se mueve independientemente, sin considerar el efecto del resto de las articulaciones. Dentro de este tipo se engloban las trayectorias con movimiento eje a eje y las de movimiento simultáneo de ejes. En las trayectorias, con movimiento eje a eje en primer lugar se actúa sobre un motor, y cuando este ha finalizado su recorrido se activa el siguiente motor. La única ventaja que posee este tipo de trayectoria es menor consumo de potencia instantánea. En la trayectoria con movimiento simultáneo los motores

comienzan a mover las articulaciones simultáneamente a una velocidad específica para cada una de ellas.

- **Trayectorias coordinadas**

En este tipo de trayectorias se trata que el movimiento de todos los motores sea coordinado. Esto quiere decir que el motor que tarde más tiempo en alcanzar la posición requerida ralentizará el resto de los motores, de manera que todos los motores ejecutan su movimiento en el mismo intervalo de tiempo.

- **Trayectoria continúa**

En este tipo de trayectoria se pretende que el camino a seguir por el extremo del robot sea conocido. Para ello las trayectorias articulares deben acomodarse conjuntamente. Cada articulación por separado parece tener un movimiento desordenado pero el resultado es que se mueven siguiendo el camino previsto.

3.1.2. Interpolación de trayectorias

Una de las funciones del planificador de trayectorias es la de unir una sucesión de puntos en el espacio articular por los que se quiere que pasen las articulaciones del robot en un instante determinado. Además junto con las condiciones de posición-tiempo, es conveniente añadir restricciones en la velocidad y la aceleración de paso por los puntos, de manera que se asegure la suavidad de las trayectorias y se limiten las velocidades y las aceleraciones máximas. Estas restricciones garantizan que los actuadores estén capacitados para implementar la trayectoria final.

Para ello se deberá seleccionar algún tipo de función (frecuentemente polinómica) cuyos parámetros o coeficientes se ajustaran al imponer las condiciones de contorno: posiciones, velocidades y aceleraciones.

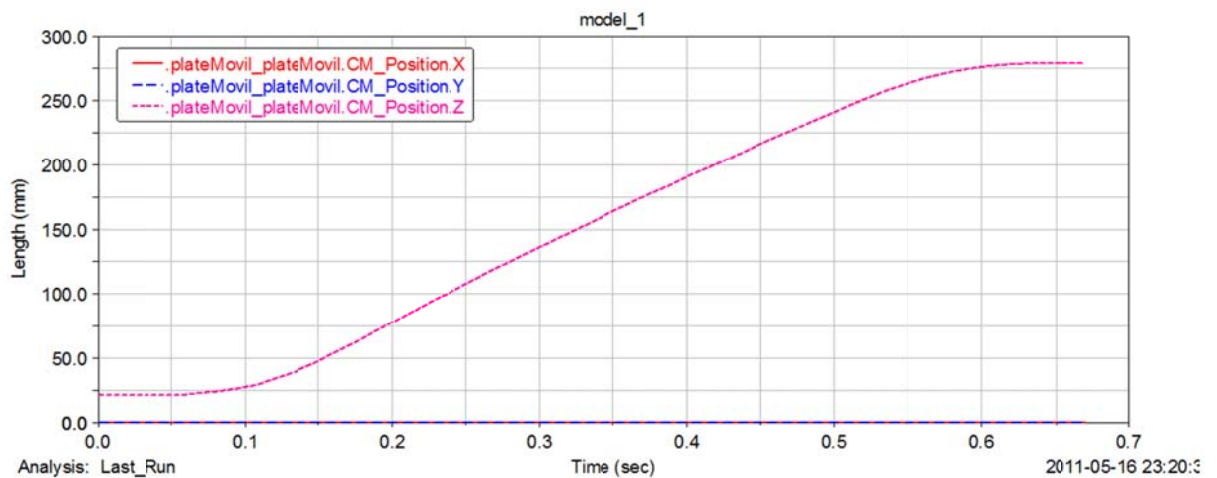
3.1.3. Interpolador a tramos 6-1-6

Consiste en descomponer en tres tramos consecutivos la trayectoria que une dos puntos espaciales o articular. El tramo uno corresponde a la aceleración del motor, el tramo dos corresponde a velocidad constante del motor, y el tramo tres a la desaceleración del motor. En el tramo dos se utiliza un interpolador lineal, y por lo tanto la velocidad se mantiene constante, no siendo preciso imprimir velocidad alguna al actuador. En el tramo inicial y final se utiliza un polinomio de sexto

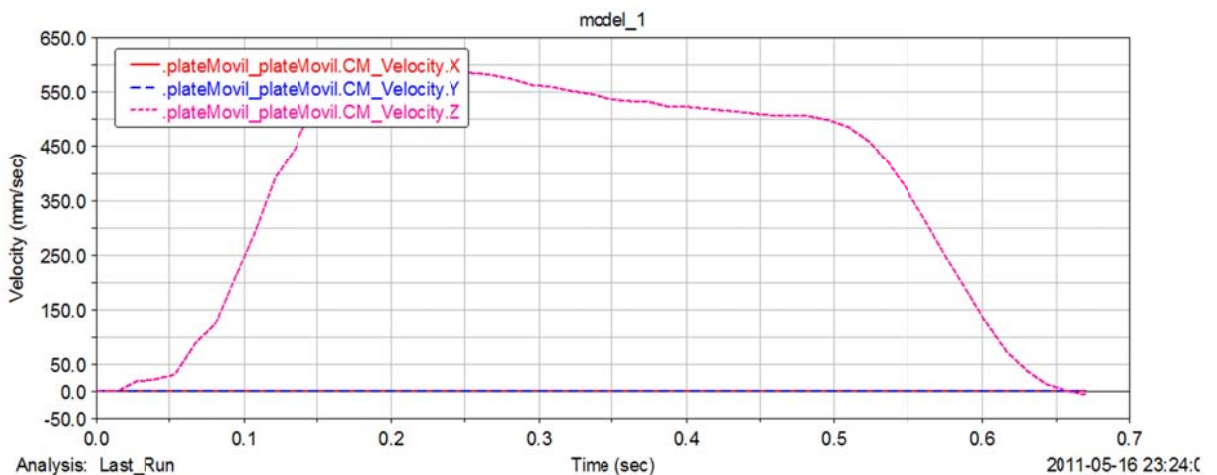
grado, de modo que en el tramo 1 la velocidad varíe suavemente desde cero hasta la velocidad máxima del motor, y en el tramo tres varíe desde la velocidad máxima hasta cero. Se tiene entonces que en el tramo inicial y final la aceleración toma valores constantes distintos de cero mientras que en el tramo intermedio la aceleración es nula. En este proyecto se ha empleado un planificador cartesiano, donde se da una posición cartesiana inicial y una posición cartesiana final.

En la Figura 21 se puede observar los perfiles de Posición, Velocidad, Aceleración y Par obtenidos en ADAMS para el interpolador 6-1-6. El movimiento es lineal entre los puntos espaciales inicial y final a una velocidad de 400 mm/s.

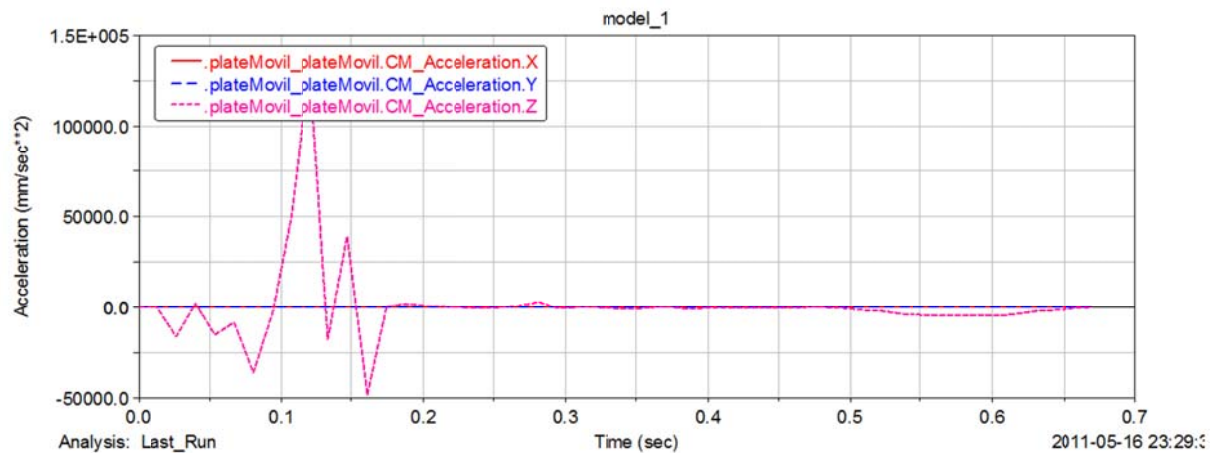
Figura 21. Perfiles del Interpolador 6-1-6



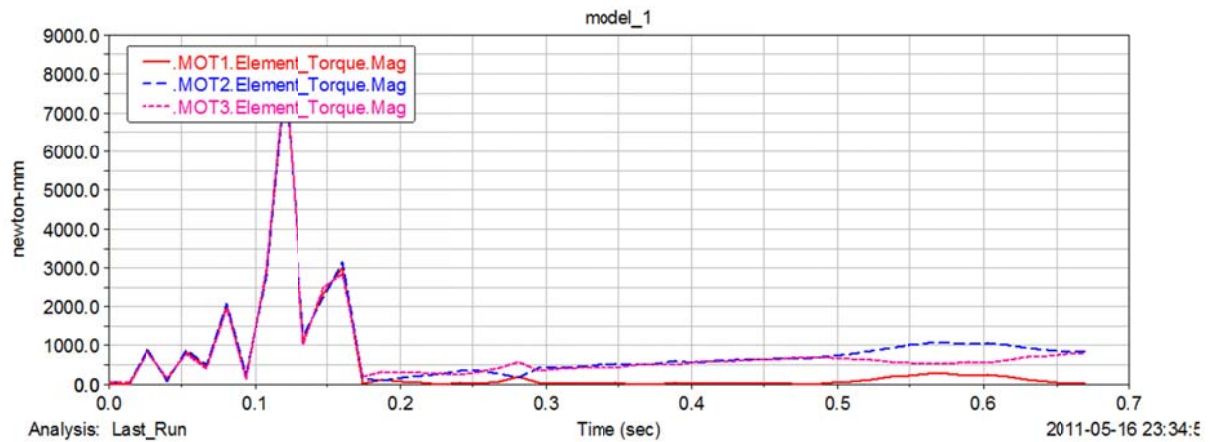
(a) Perfil de Posicion



(b) Perfil de Velocidad



(c) Perfil de Aceleracion



(d) Perfil de Par
Fuente: Autores

3.2. MODELO DE SIMULACIÓN EN ADAMS

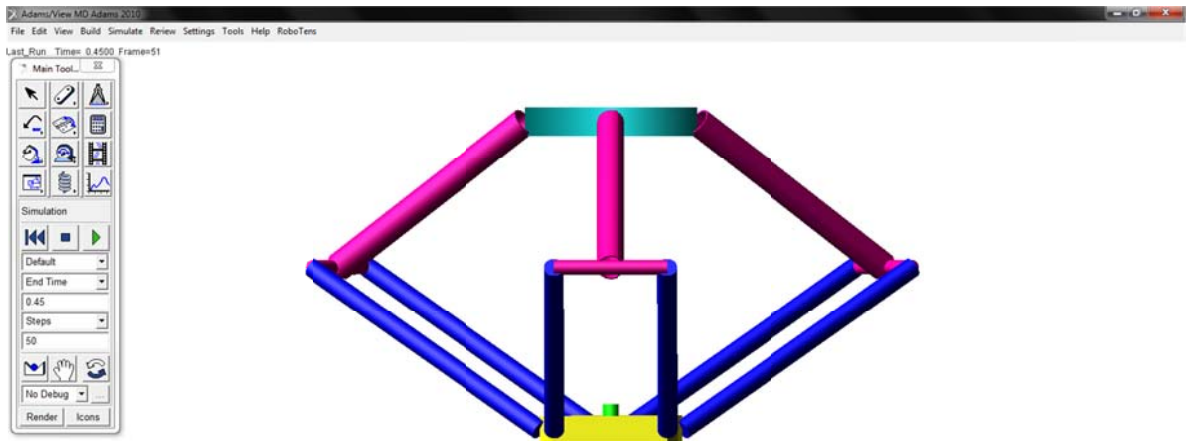
La simulación de sistemas robóticos está íntimamente ligada a la potencia computacional de los procesadores de cálculo. El gran avance producido con los microprocesadores actuales, ha permitido el desarrollo de diferentes paquetes de simulación dinámica capaces de simular el comportamiento dinámico de casi cualquier mecanismo multicuerpo. En esta tesis, se utilizó parte del modelo de simulación empleado en la tesis doctoral del Ing. Luis Angel Silva, el cual está diseñado en ADAMS, un software comercial empleado para la simulación dinámica de sistemas multicuerpo, fabricado por Mechanical Dynamics Inc.

Normalmente, el desarrollo de cualquier modelo de simulación en ADAMS es un proceso tedioso que implica un tiempo considerable, sobre todo en los casos de

Análisis Cinemático del Sistema y Optimización, en los que el diseño de un prototipo requiere de numerosas modificaciones del modelo. Para el modelo de simulación, la librería desarrollada en ADAMS previamente permite construir el modelo en un tiempo relativamente corto, reduciendo considerablemente el tiempo de simulación y validación empleado en el proceso de diseño. El entorno de trabajo y el modelo conceptual del robot en ADAMS se muestran en la Figura 22.

La librería llamada RoboTennis, está ubicada en la barra de herramientas del espacio de trabajo de ADAMS y permite tres opciones: Dimensions, Path y Joint. El menú Dimensions, genera un modelo de simulación para unas dimensiones determinadas de la estructura mecánica del manipulador; y los menús Path y Joint, permiten asignar a cada actuador del modelo de simulación, un perfil de movimiento con unas características deseadas de posición, velocidad y aceleración para el efector final del robot.

Figura 22. Entorno de Trabajo ADAMS 2010



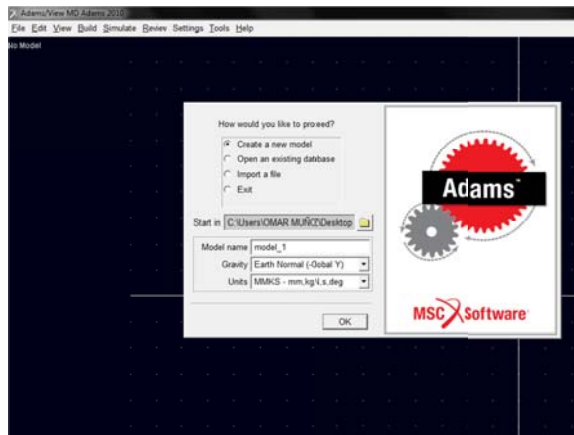
Fuente: Autores

El procedimiento para implementar un ambiente dinámico utilizando ADAMS y los pasos a seguir para cargar el modelo de simulación del robot:

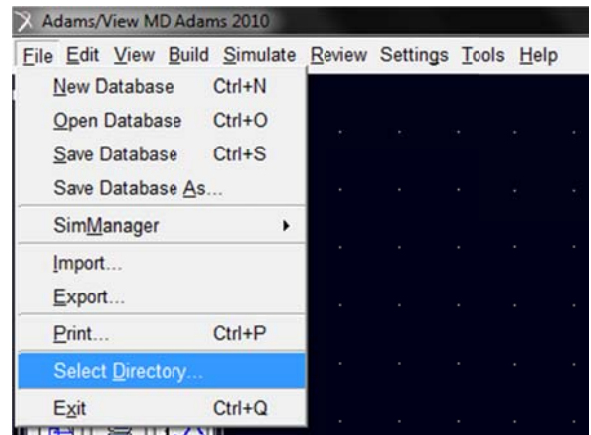
- (a) El primer paso es seleccionar Create New Model.
- (b) Seguidamente se selecciona el menú File, Select Directory.
- (c) Se elige la carpeta que contiene toda la programación.
- (d) Seguidamente se selecciona el menú File, Import.
- (e) Se importa el modelo desarrollado en ADAMS, llamado build.cmd.
- (f) Se creará un nuevo menú llamado RoboTennis.

Este procedimiento se muestra gráficamente en la Figura 23.

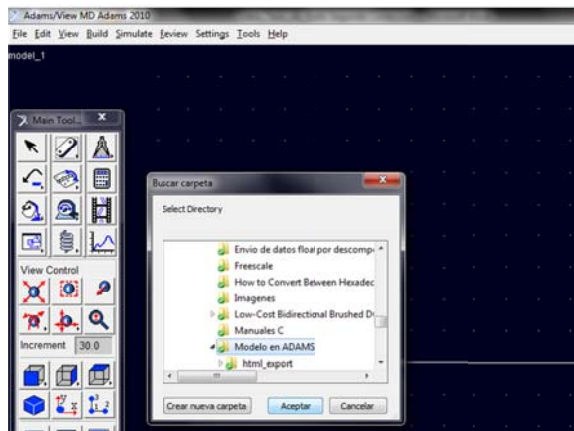
Figura 23. Procedimiento para cargar el Modelo de Simulación



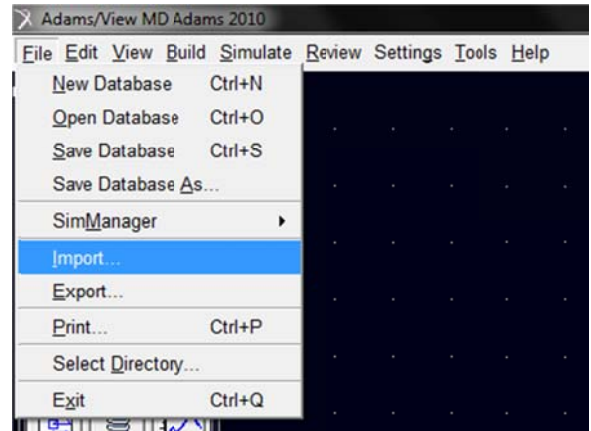
(a) Crear Nuevo Modelo



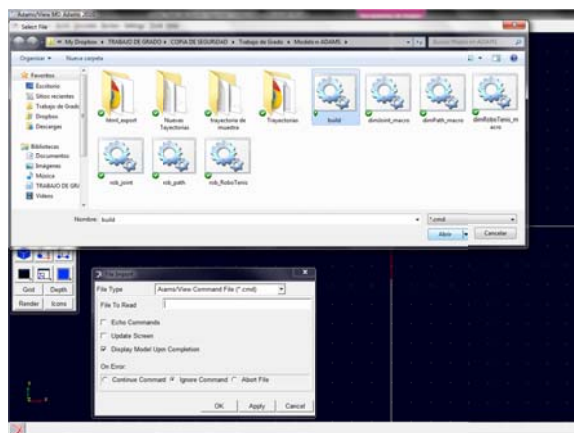
(b) Seleccionar Directorio



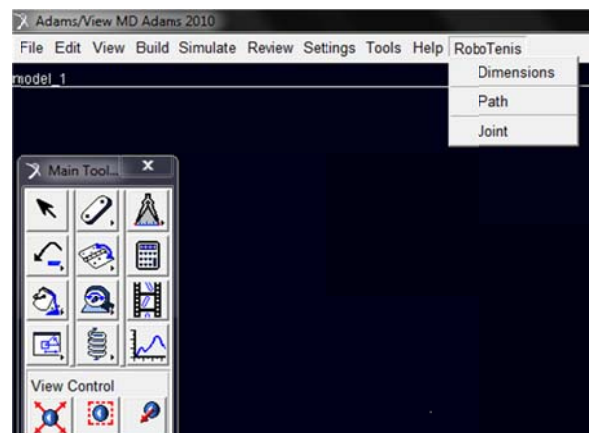
(c) Carpeta del Modelo en Adams



(d) Importar



(e) Importación del Modelo en ADAMS



(f) Menú RoboTenis

Fuente: Autores

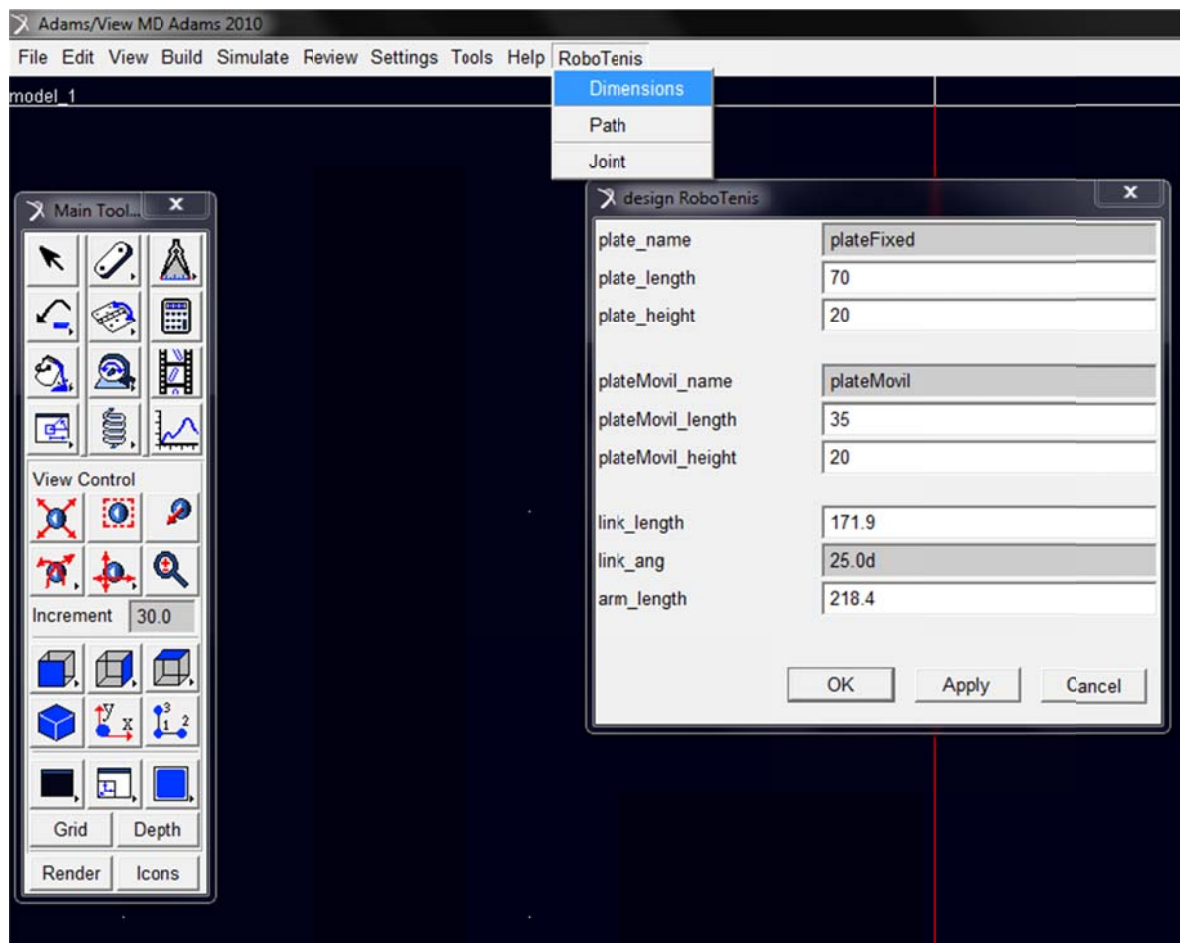
Una vez cargada la librería RoboTenis se crea el modelo de simulación con las dimensiones previamente establecidas y que se relacionan en la Tabla 1. La Figura 24 muestra cómo se cargan las dimensiones del robot mientras que en la Figura 25 se visualizan las diferentes vistas del modelo de simulación.

Tabla 1. Pesos, Longitudes y Radios de los Eslabones

ESLABÓN	LONGITUD (mm)	PESO (g)
Brazo	218.4	542.4
Antebrazo	171.9	131.4
PLATAFORMA	RADIO (mm)	PESO (g)
Fija	70	3000
Móvil	35	141.7

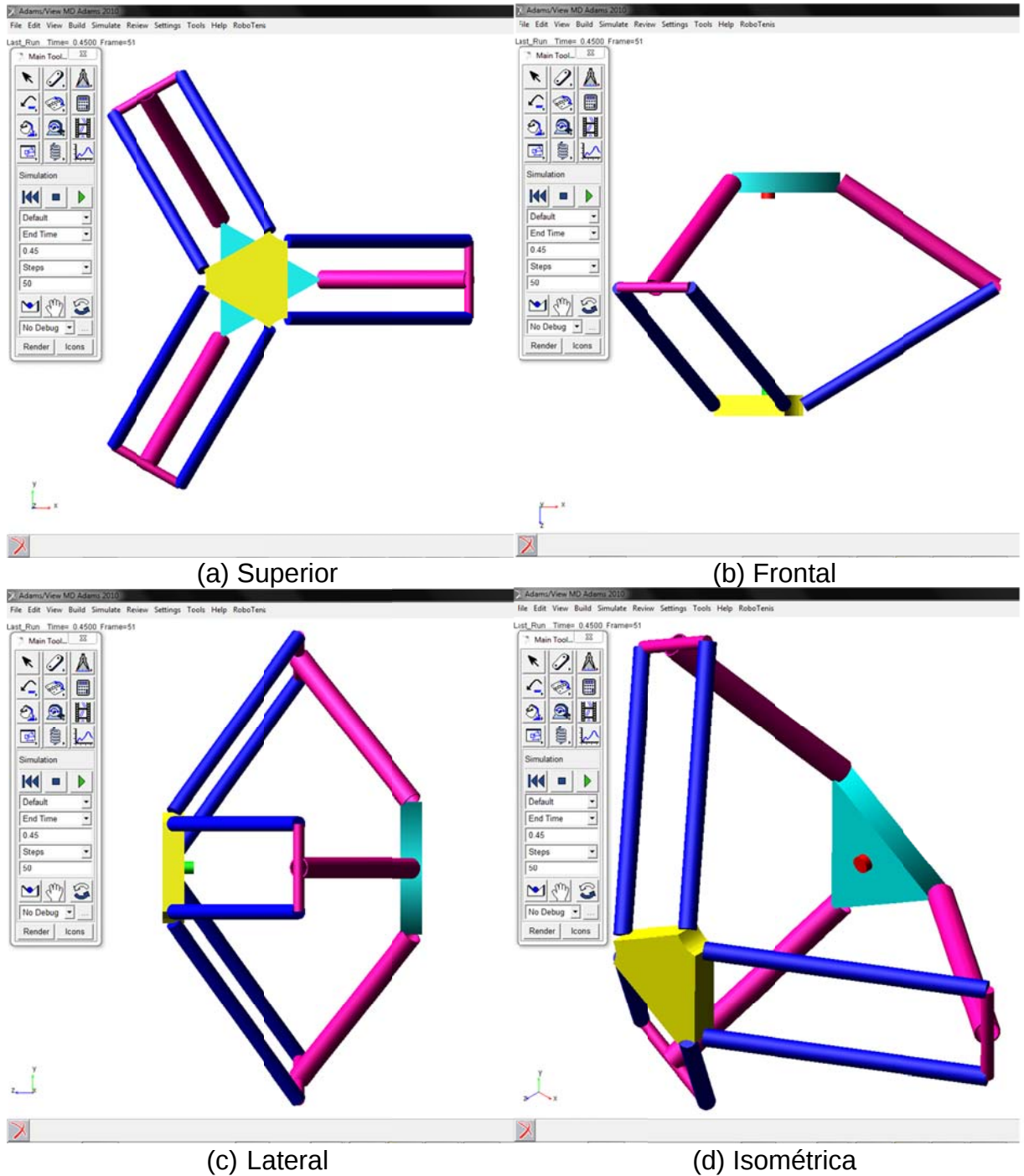
Fuente: Autores

Figura 24. Dimensiones del Robot Delta



Fuente: Autores

Figura 25. Vista Frontal

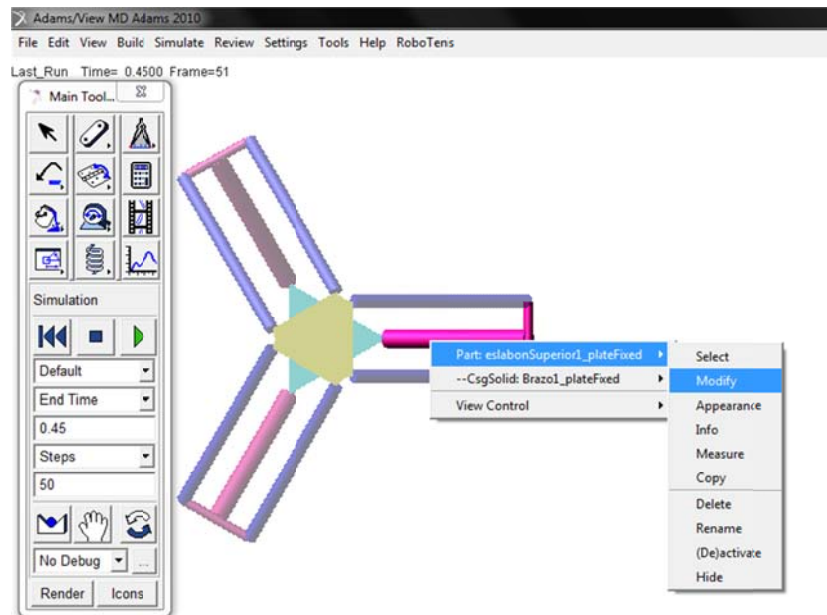


Fuente: Autores

Adicionalmente, el tipo de material y la masa de cada uno de los componentes mecánicos se pueden modificar. Para ello, se selecciona con clic derecho el

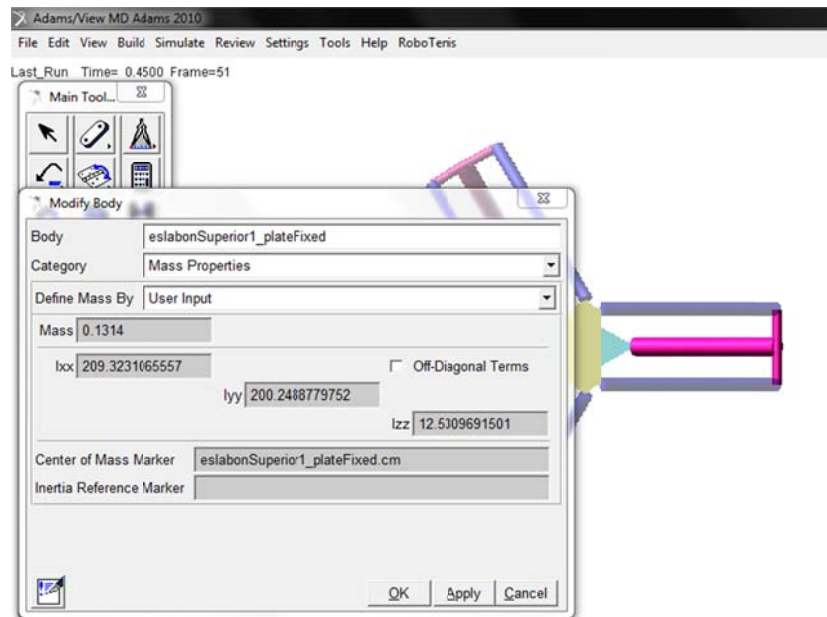
elemento a modificar y se elige el menú Modify (Figura 26). Luego en Define Mass se busca By, User Input, y en Mass se introduce la masa en kg (Figura 27).

Figura 26. Selección de Eslabón



Fuente: Autores

Figura 27. Modificación de Pesos



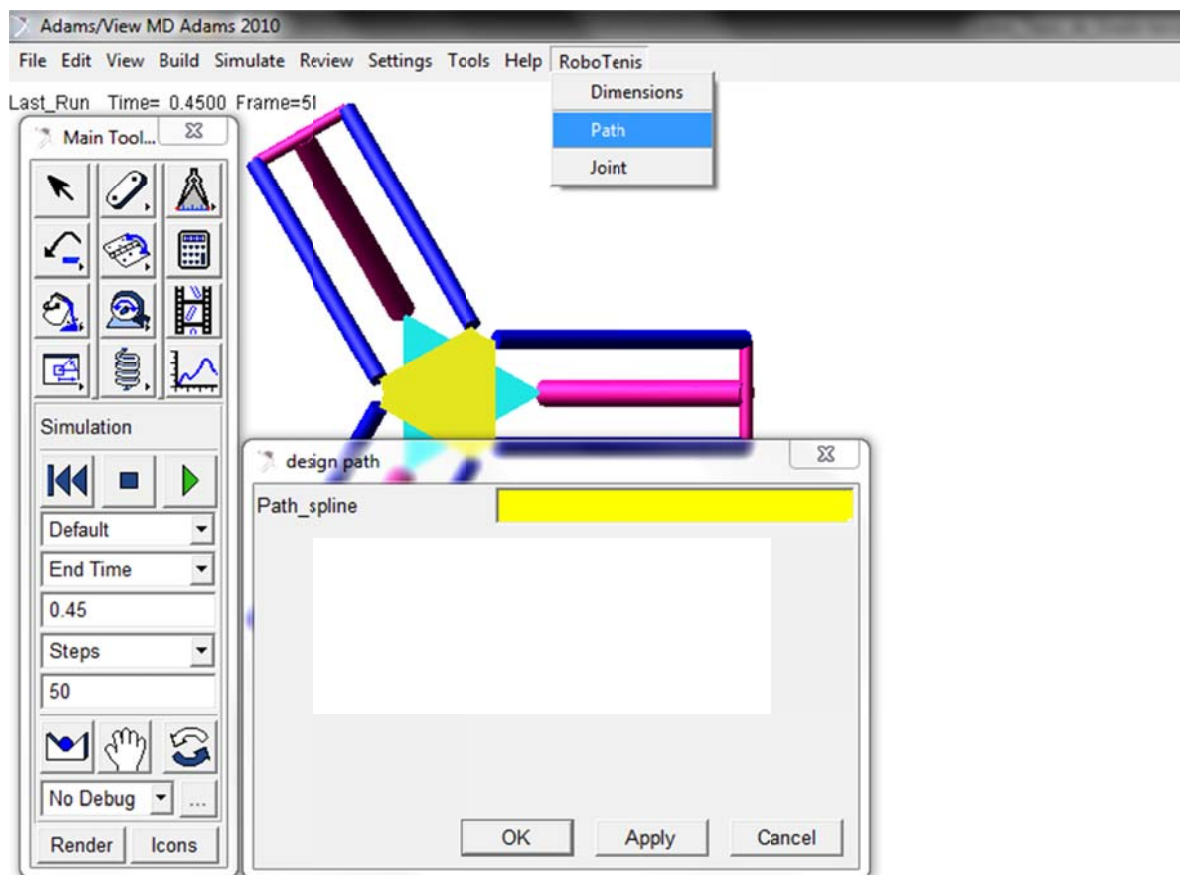
Fuente: Autores

Para realizar el análisis dinámico del modelo de simulación se carga la trayectoria previamente establecida del robot utilizando el polinomio 6-1-6 y relacionado anteriormente mediante el siguiente procedimiento:

1. Se selecciona del menú RoboTennis, el submenú Path (Figura 28).
2. Se busca el documento de texto que contiene la trayectoria y se carga (Figura 29).
3. Mediante el menú RoboTennis, submenú Joint, se seleccionan las siguientes articulaciones del robot:
 - a. JOINTrev1_plateFixed,
 - b. JOINTrev2_plateFixed y
 - c. JOINTrev3_plateFixed.

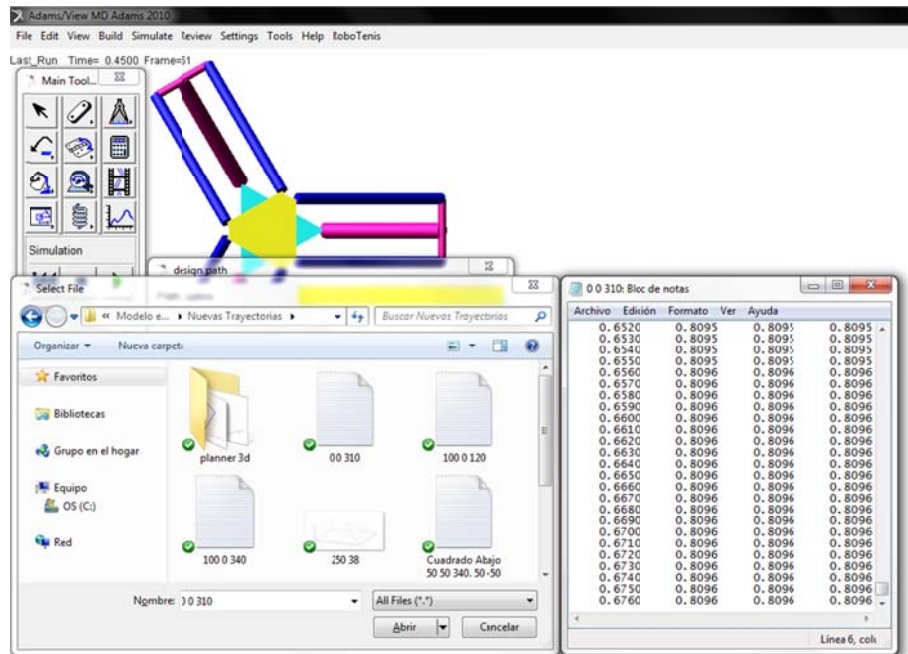
Como se observan en la (Figura 30),

Figura 28. Selección de Trayectoria



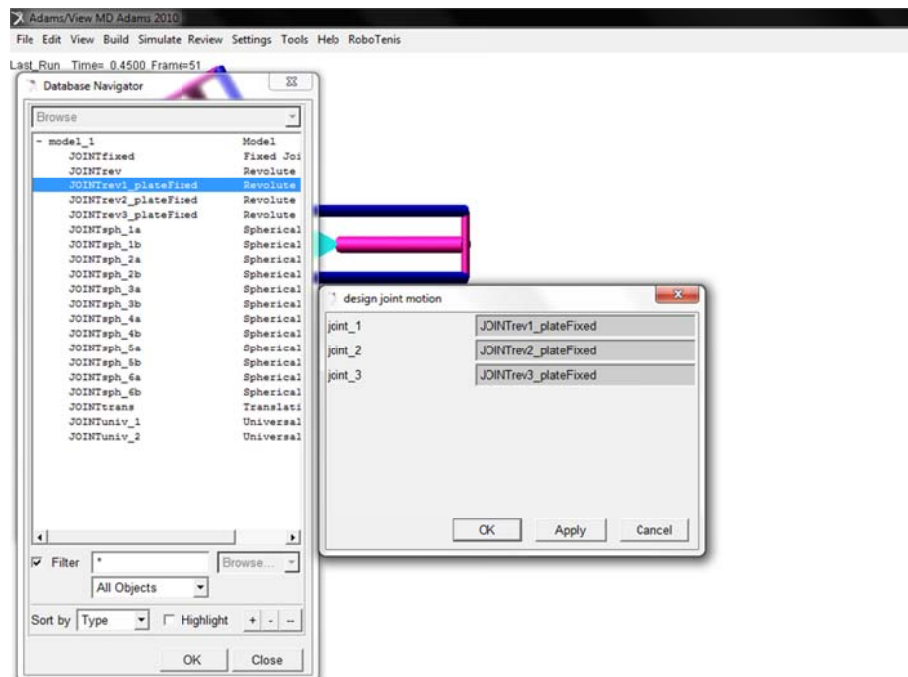
Fuente: Autores

Figura 29. Archivo de Trayectoria



Fuente: Autores

Figura 30. Selección de Articulaciones

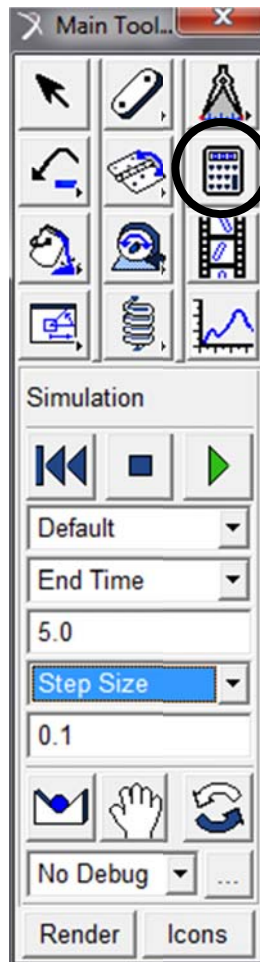


Fuente: Autores

3.2.1. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DINÁMICA

ADAMS posee una herramienta llamada **Interactive Simulation Controls** que permite realizar la simulación dinámica del modelo para una trayectoria previamente cargada (Figura 31). Para realizar la simulación es necesario primero definir el tiempo total (End time) que será el tiempo máximo que dura la trayectoria y el tamaño del paso (Step Size) que es el incremento del tiempo entre los puntos intermedios de la trayectoria.

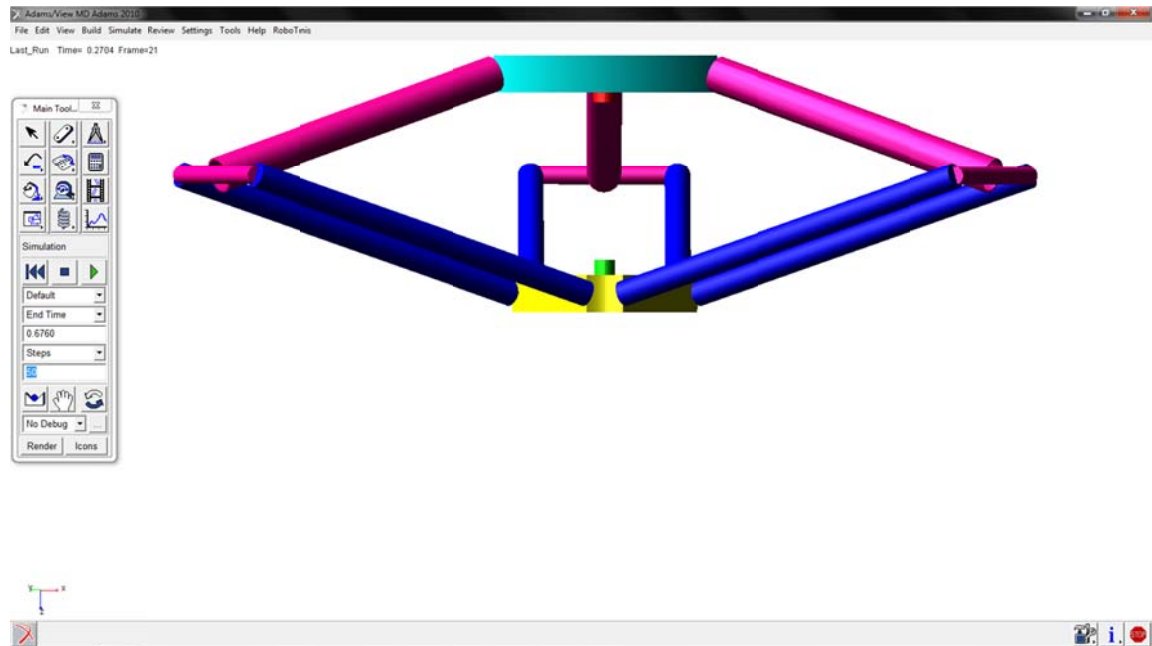
Figura 31. Paleta de Herramientas de ADAMS



Fuente: Autores

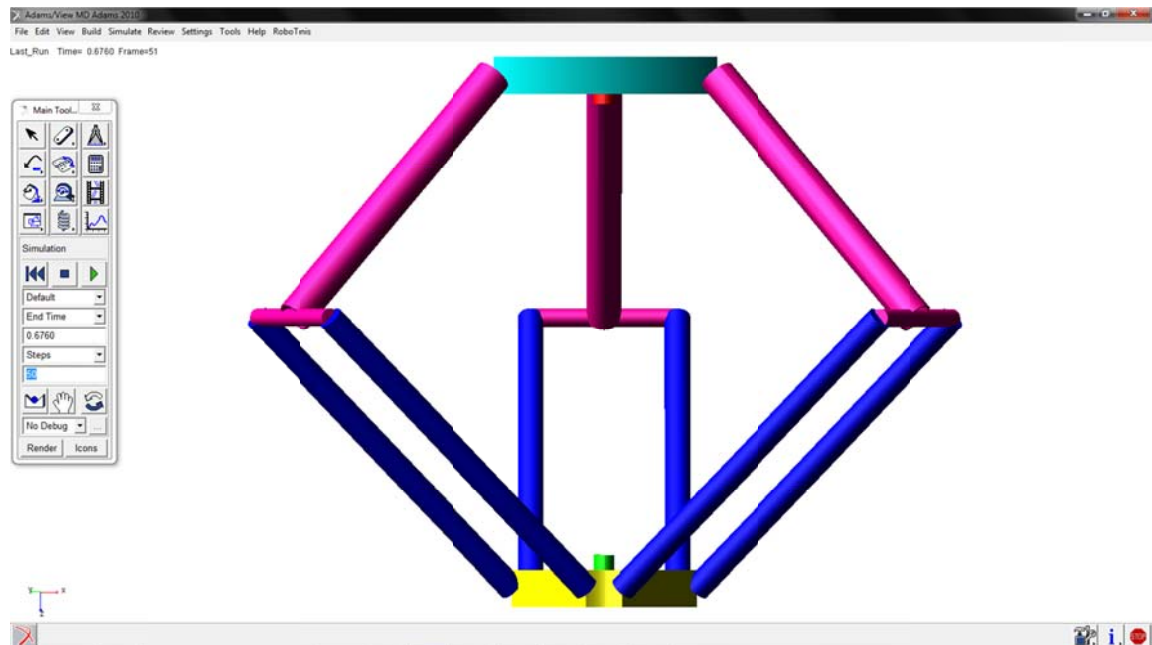
A manera de ejemplo se muestra el movimiento ejecutado por el modelo de simulación para desplazarse de la posición espacial inicial (0, 0, 120), a la posición espacial final (0, 0, 310). En la Figura 32 y la Figura 33 se observa la posición inicial y la posición final del modelo de simulación una vez ejecutado el movimiento deseado.

Figura 32. Posición Inicial del Modelo de Simulación



Fuente: Autores

Figura 33. Posición Final del Modelo de Simulación



Fuente: Autores

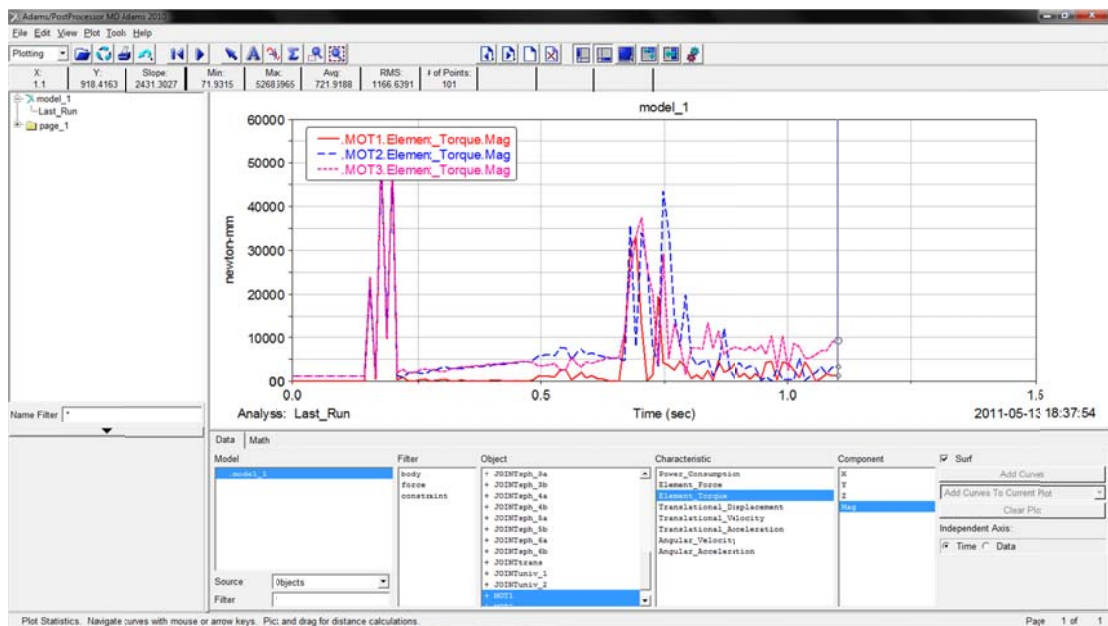
3.3. SIMULACIÓN DINÁMICA

La simulación dinámica tiene como objetivo encontrar el par máximo y el par promedio de cada motor en la ejecución de un movimiento deseado con el fin de definir comercialmente los motores del prototipo. Para encontrar esos pares se debe colocar el sistema en posiciones críticas, que son aquellas en las cuales los motores ejercen el mayor par.

Se establecieron posibles trayectorias críticas en el espacio de trabajo a partir del planificador implementado anteriormente y se cargaron en el modelo de simulación dinámica en ADAMS View. Mediante ADAMS PostProcessor se visualiza, compara y analiza las respuestas de la simulación dinámica de la trayectoria para determinar en cuál de las posiciones se obtiene el mayor par, el cual define el tamaño del motor a usar.

Para visualizar los resultados obtenidos en la simulación dinámica es necesario en ADAMS PostProcessor seleccionar el objeto del modelo y la variable que se desea analizar. Una vez seleccionado lo que se desea graficar, se selecciona Add Curves para agregarlas a la gráfica actual o Surf para visualizar cada variable seleccionada en el momento, tal como se observa en la Figura 34.

Figura 34. Ventana del PostProcessor



Fuente: Autores

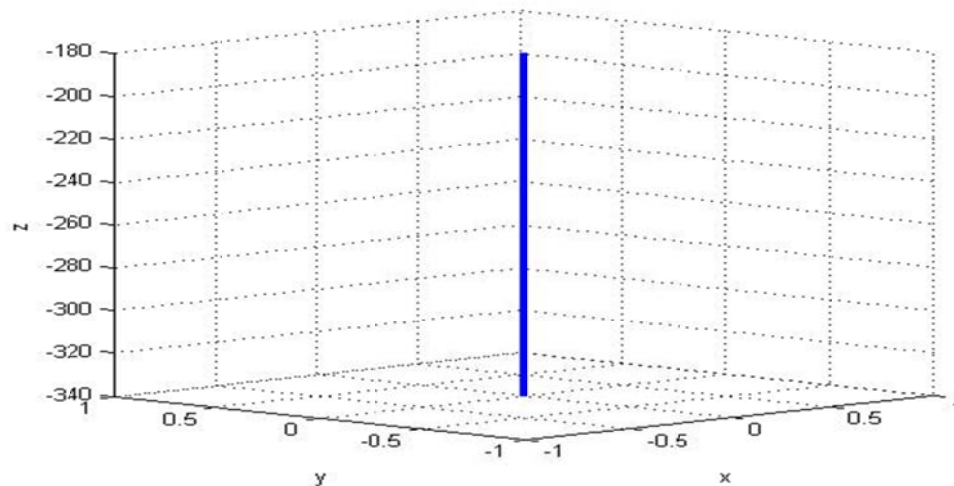
3.3.1. Simulaciones realizadas

Se probaron varias trayectorias en ADAMS para poder obtener el par máximo y par promedio para cada trayectoria. Se puede observar desde la Figura 35 a la Figura 38, varias de las simulaciones realizadas, mostrando el movimiento espacial de la plataforma móvil desde el punto inicial al punto final, las posiciones inicial y final del modelo de simulación, los perfiles de posición, velocidad y aceleración, y los pares obtenidos.

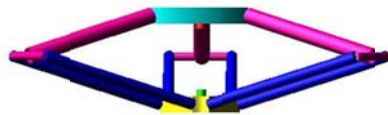
Movimiento 1:

- Punto inicial (0,0,180)
- Punto final (0,0,340)
- Velocidad del efector final (400 mm/s)

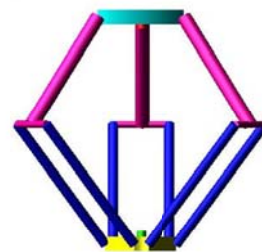
Figura 35. Movimiento del Efector final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (0,0,340)



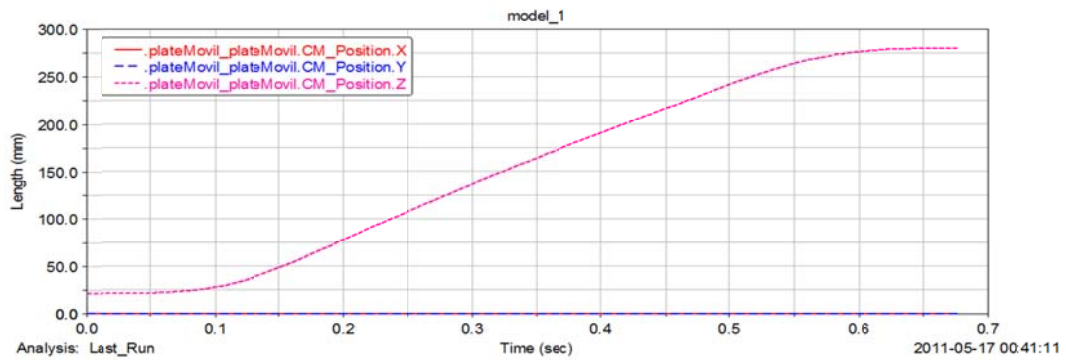
(a) Trayectoria Cartesiana



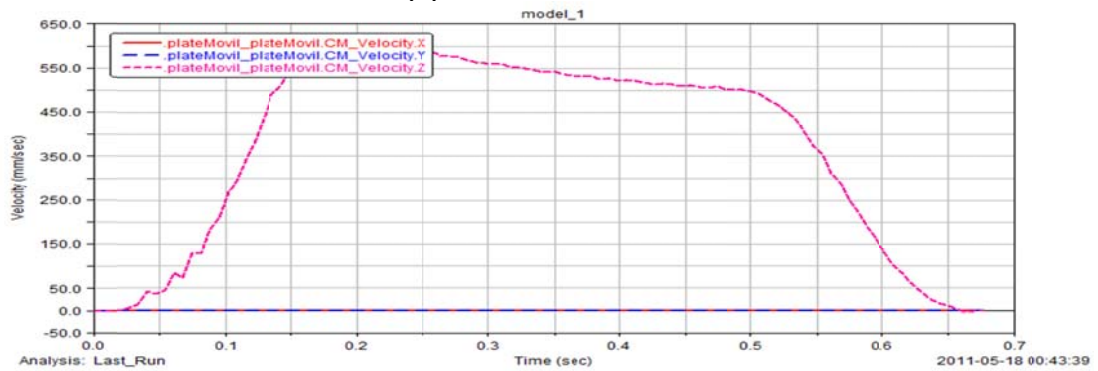
(b) Posicion Inicial Modelo ADAMS



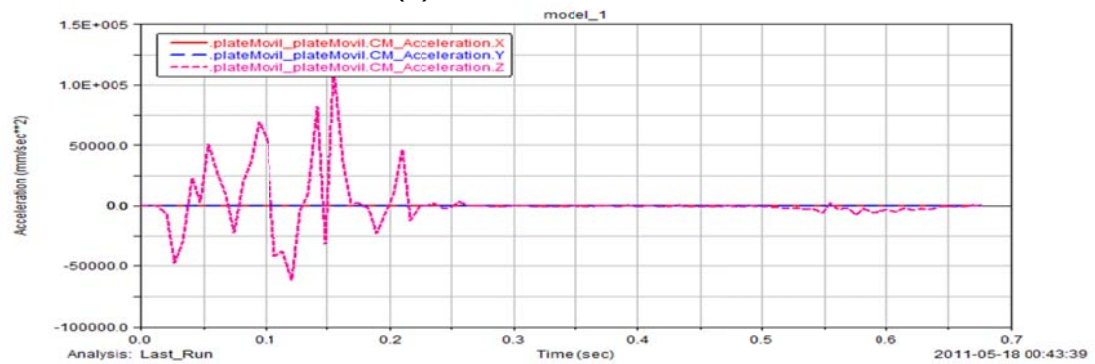
(c) Posicion Final Modelo ADAMS



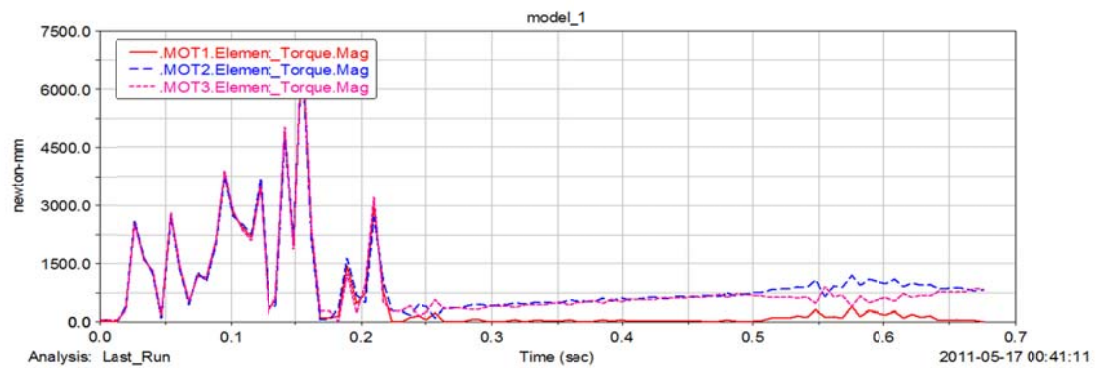
(d) Perfil de Posición



(e) Perfil de Velocidad



(f) Perfil de Aceleración

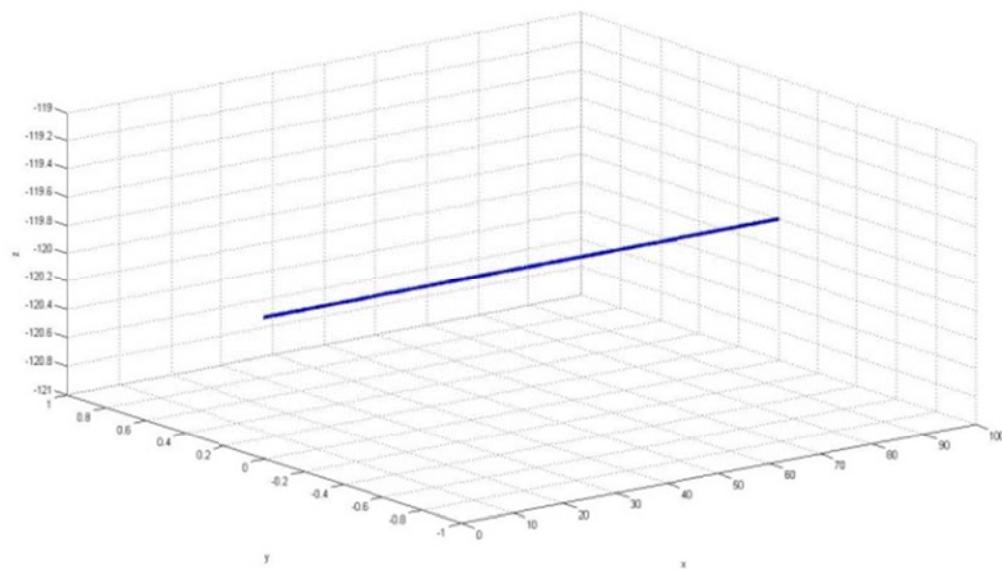


(g) Pares
Fuente: Autores

Movimiento 2:

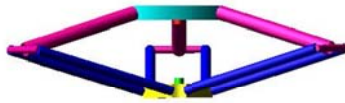
- Punto inicial (0,0,180)
- Punto final (100,0,180)
- Velocidad del efector final (400 mm/s)

Figura 36. Movimiento del Efector final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (100,0,120)

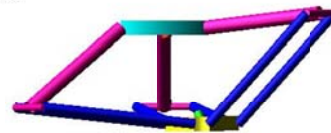


(a) Trayectoria Cartesiana

Time= 0.0000 Frame=01

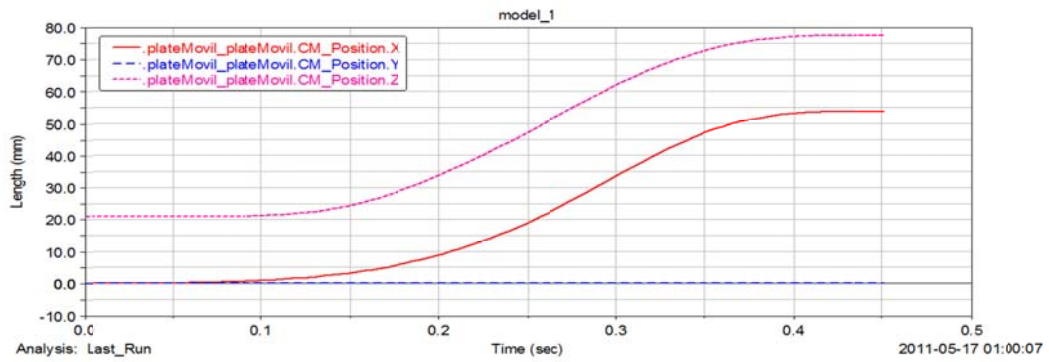


_Run Time= 0.3400 Frame=35

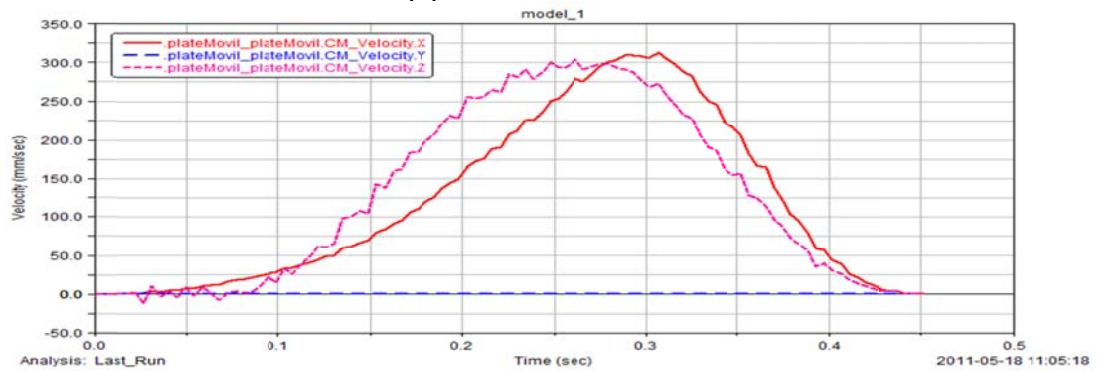


(b) Posicion Inicial Modelo ADAMS

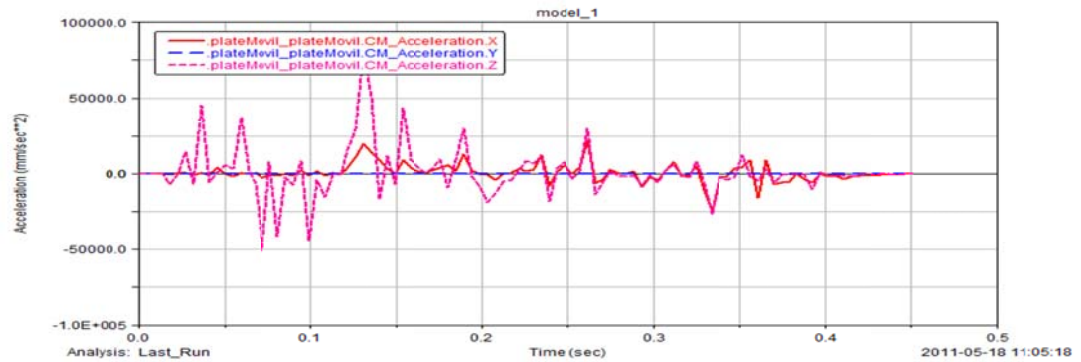
(c) Posicion Final Modelo ADAMS



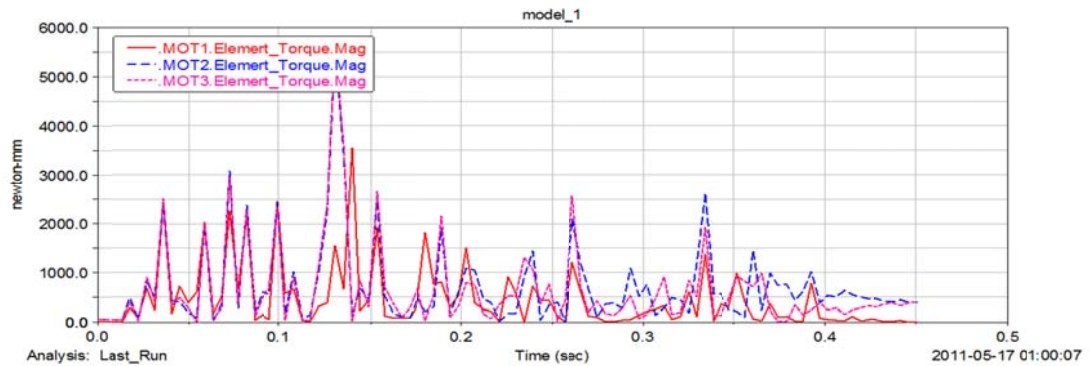
(d) Perfil de Posición



(e) Perfil de Velocidad



(f) Perfil de Aceleración

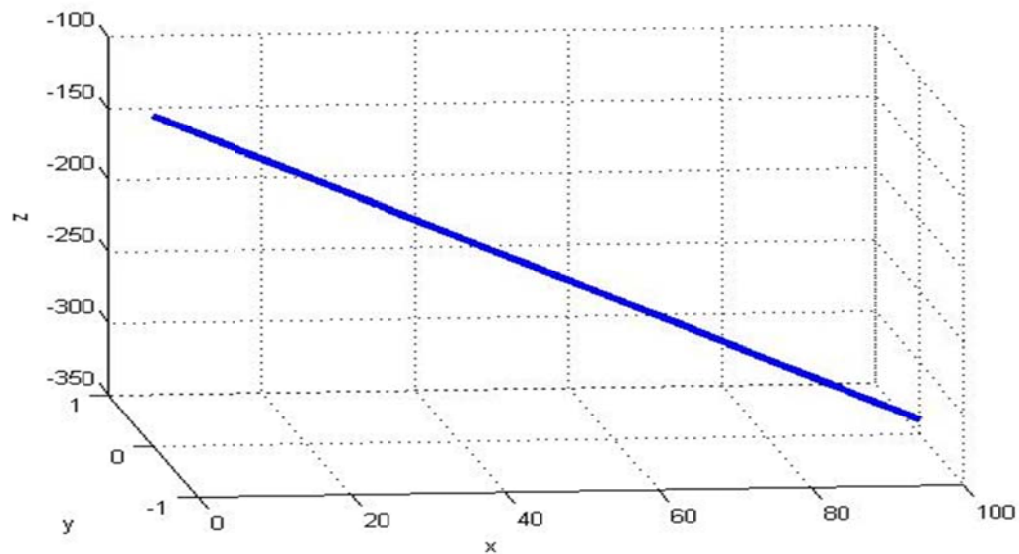


(g) Pares
Fuente: Autores

Movimiento 3:

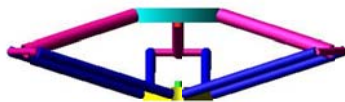
- Punto inicial (0,0,180)
- Punto final (100,0,340)
- Velocidad del efector final (400 mm/s)

Figura 37. Movimiento del Efector final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (100,0,340)



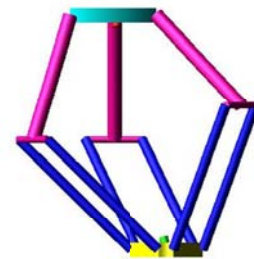
(a) Trayectoria Cartesiana

in Time= 0.0000 Frame=001

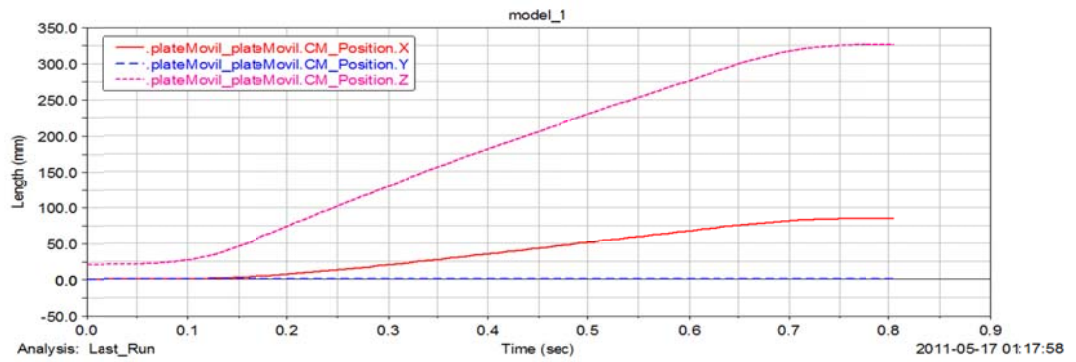


(b) Posicion Inicial Modelo ADAMS

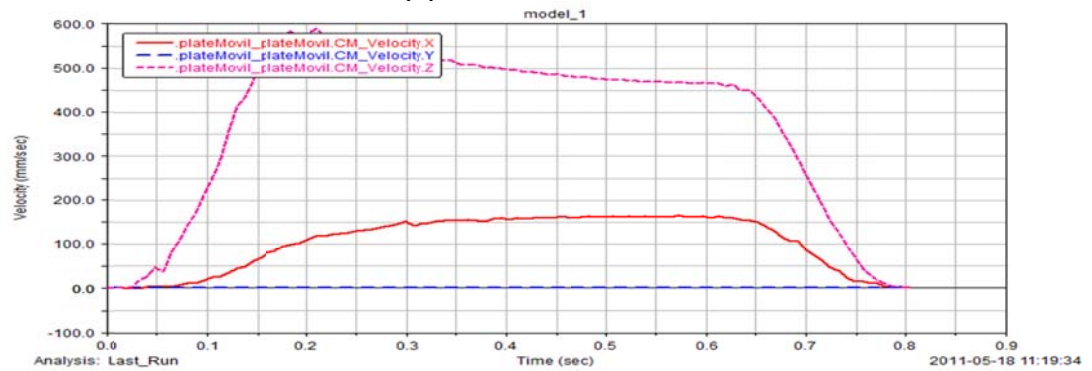
1 Time= 0.6720 Frame=301



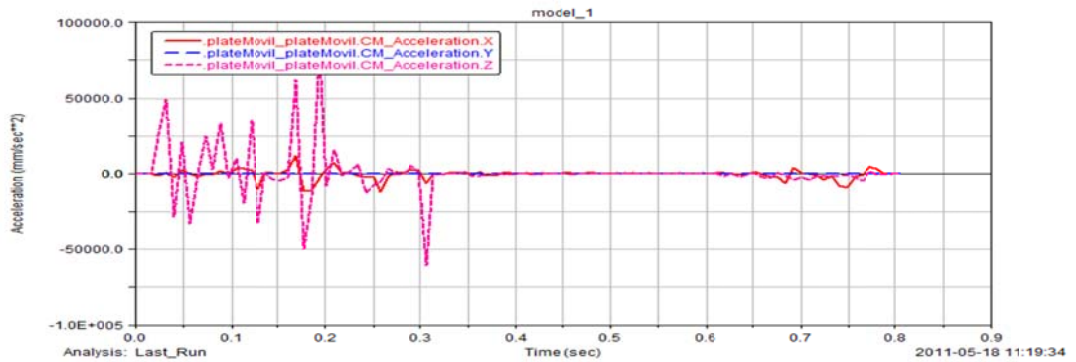
(c) Posicion Final Modelo ADAMS



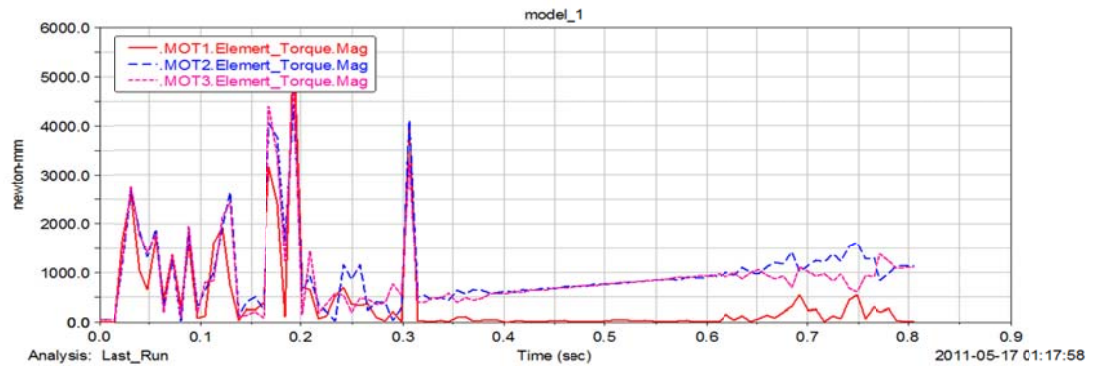
(d) Perfil de Posición



(e) Perfil de Velocidad



(f) Perfil de aceleración



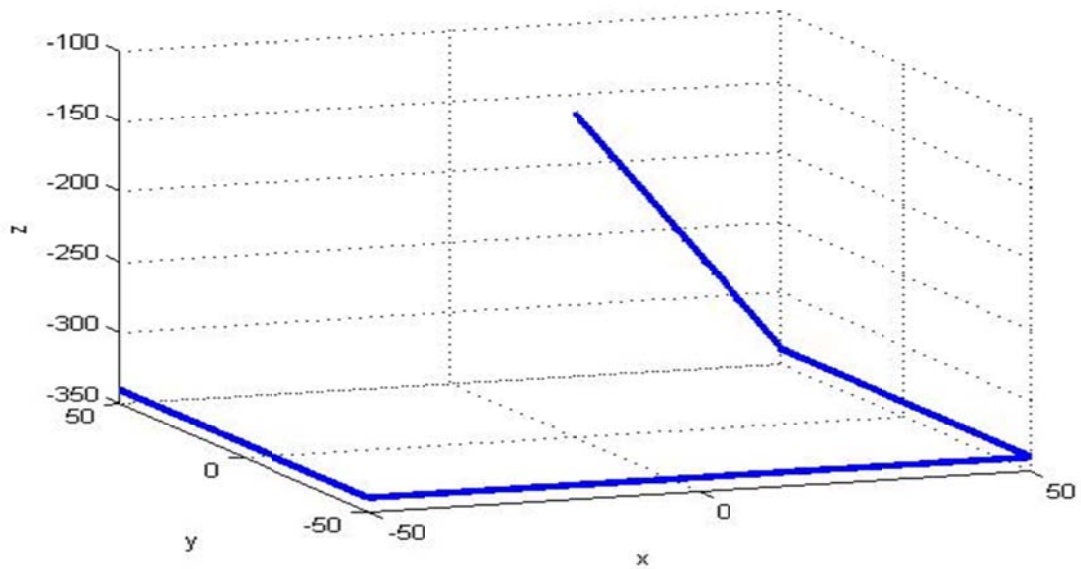
(g) Pares

Fuente: Autores

Movimiento 4 (multipunto):

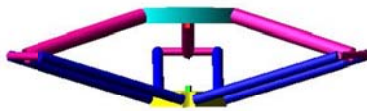
- Punto inicial (0,0,180)
- Puntos Intermedios (50,50,340), (50,-50,340), (-50,-50,340)
- Punto final (-50,50,340)
- Velocidad del efector final (400 mm/s)

Figura 38. Movimiento del Efector final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (-50,50,340)

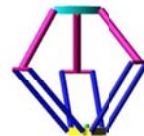


(a) Trayectoria Cartesiana

Time= 0.0000 Frame=01



Time= 0.0000 Frame=01



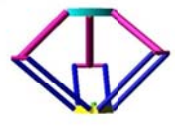
Time= 0.0000 Frame=01



Time= 0.0000 Frame=01

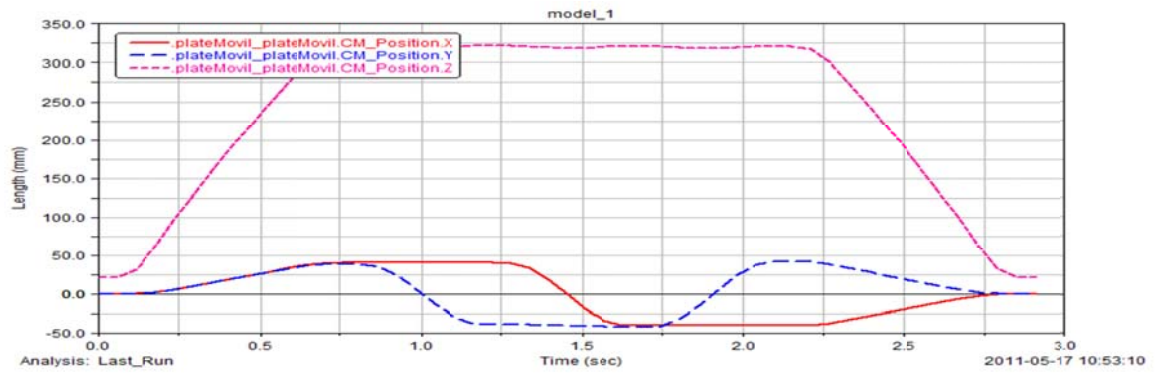


Time= 0.0000 Frame=01

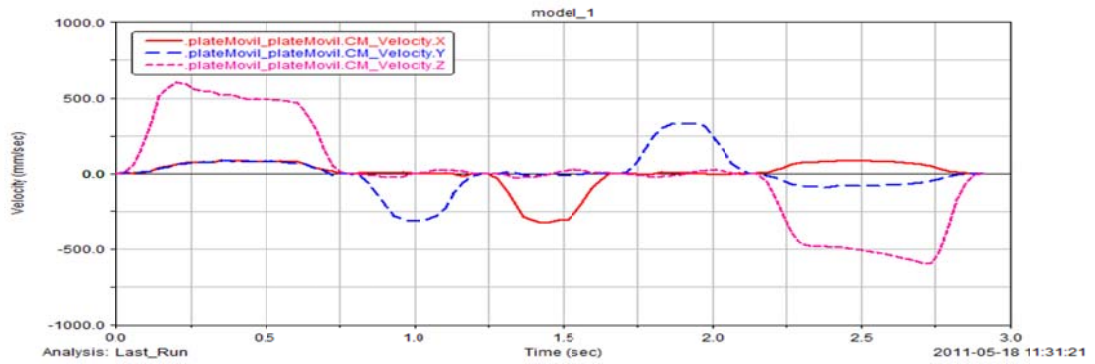


(b) Posición Inicial Modelo ADAMS

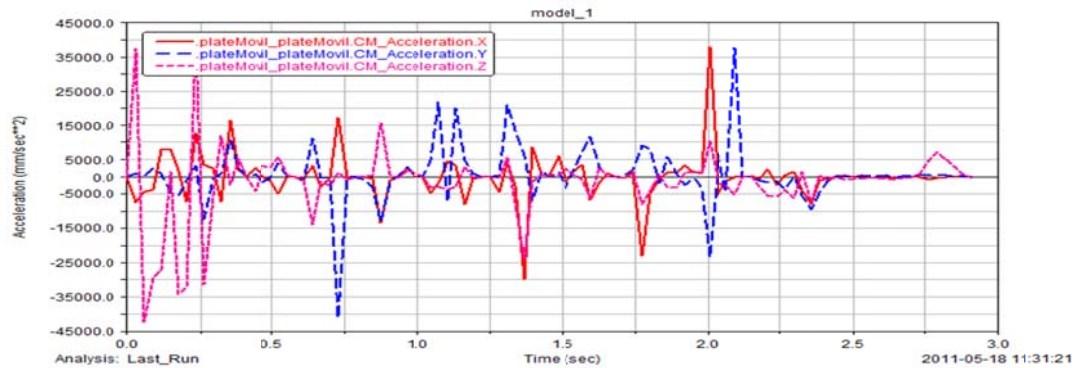
(c) Posiciones intermedias y Final



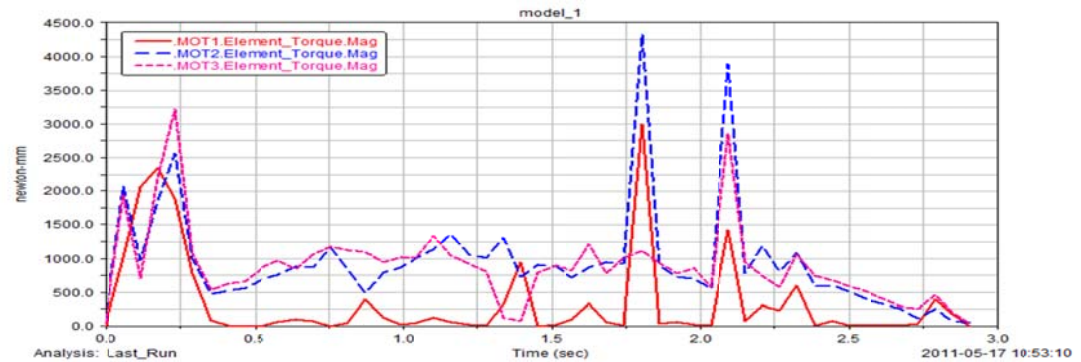
(d) Perfil de Posición



(e) Perfil de Velocidad



(f) Perfil de Aceleración

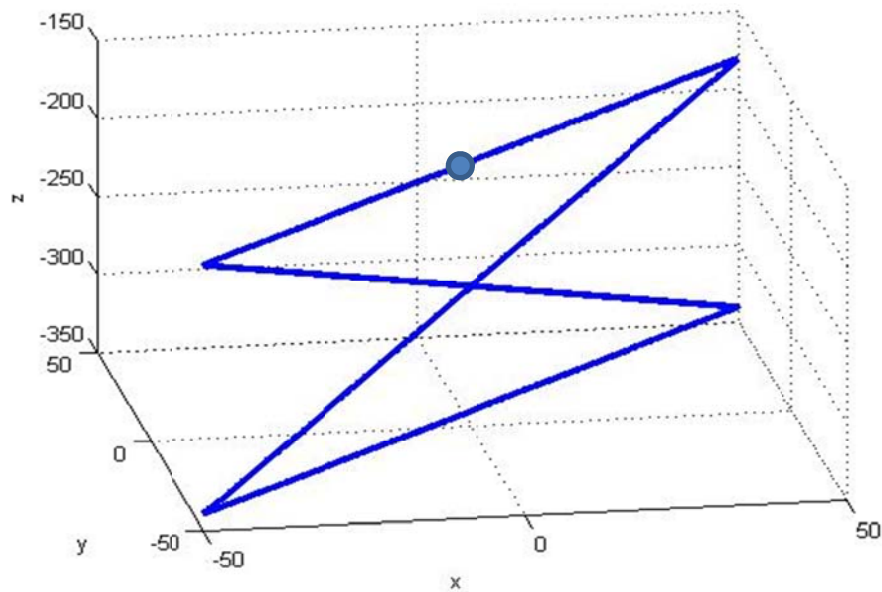


(g) Pares
Fuente: Autores

Movimiento 5 (multipunto):

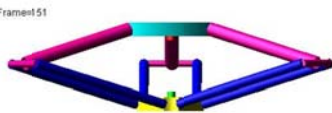
- Punto inicial (0,0,180)
- Puntos Intermedios (50,50,180), (-50,-50,340), (50,50,340)
- Punto final (0,0,180)
- Velocidad del efector final (400 mm/s)

Figura 39. Movimiento del Efector final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (0,0,180)

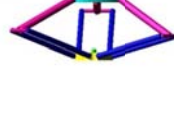


(a) Trayectoria Cartesiana

Run: Time= 2.7700 Frame=151



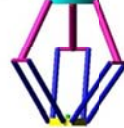
Run: Time= 2.2500 Frame=121



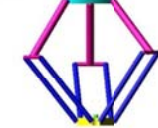
Run: Time= 3.5500 Frame=221



Run: Time= 1.0000 Frame=01

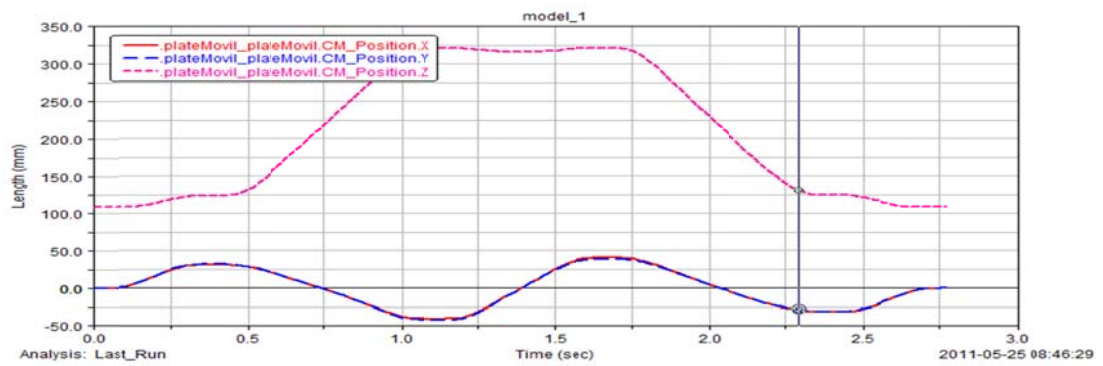


Run: Time= 1.8000 Frame=091

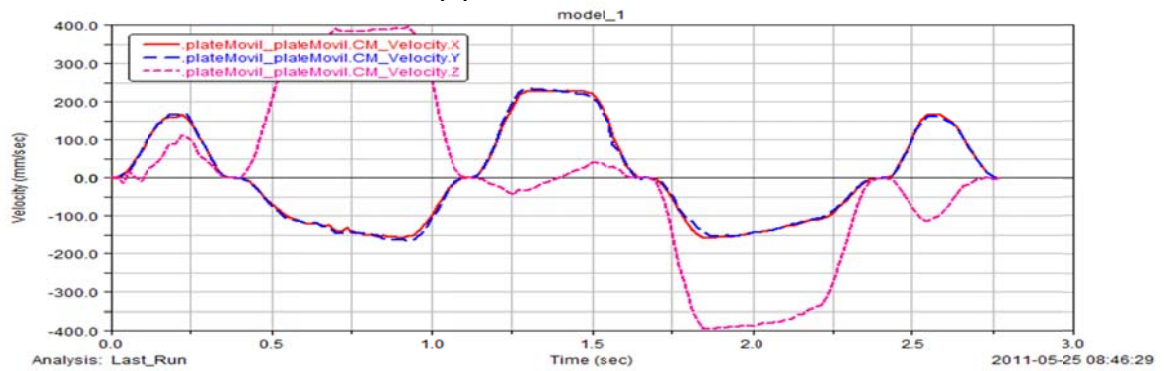


(b) Posición Inicial Modelo ADAMS

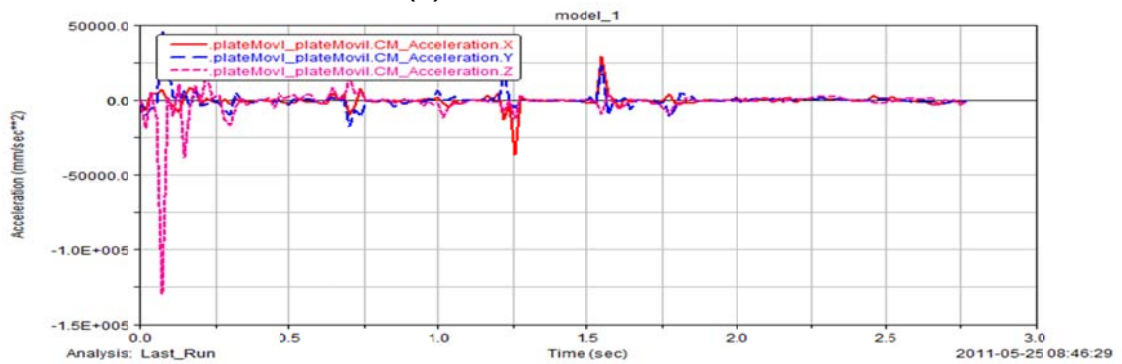
(c) Posiciones intermedias y Final



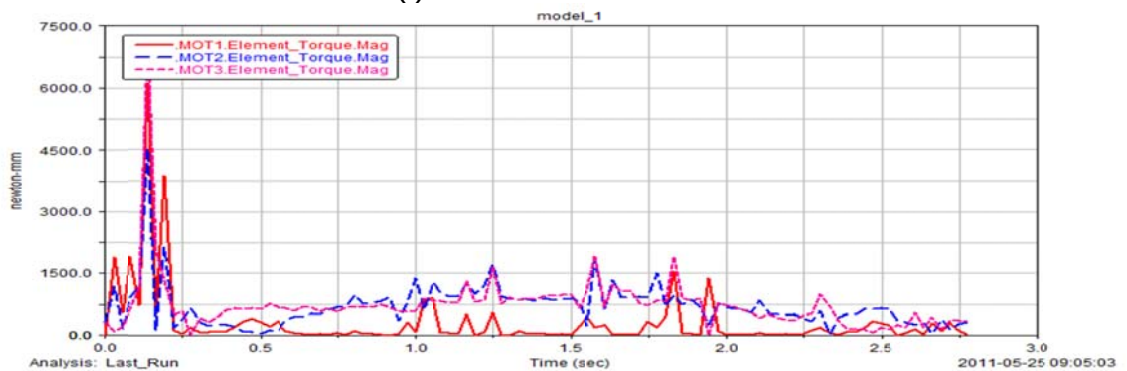
(d) Perfil de Posición



(e) Perfil de Velocidad



(f) Perfil de Aceleración

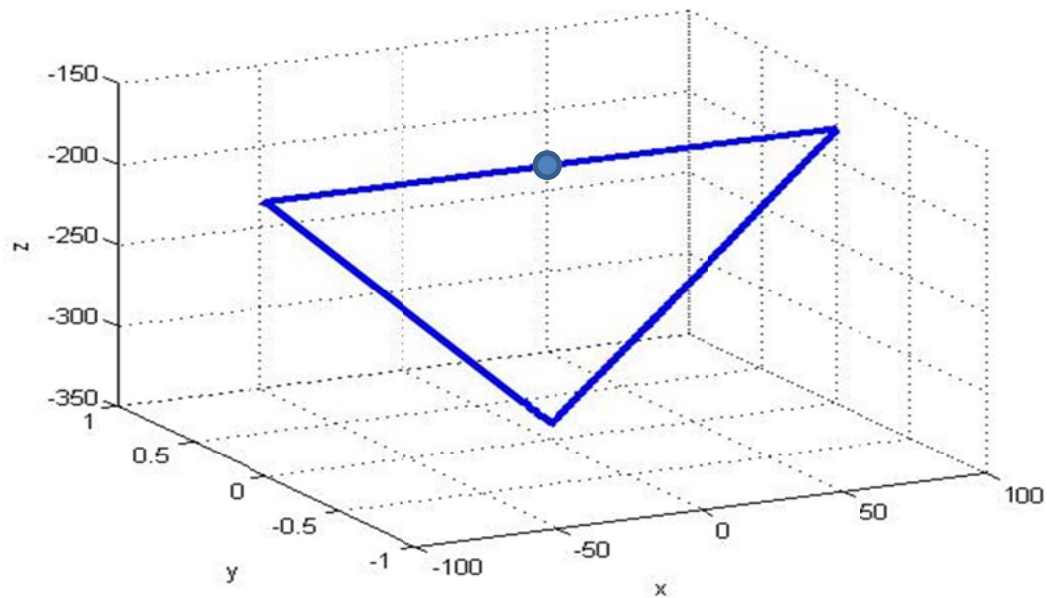


(g) Pares
Fuente: Autores

Movimiento 6 (multipunto):

- Punto inicial (0,0,180)
- Puntos Intermedios (100,0,180), (0,0,340), (-100,0,180)
- Punto final (0,0,180)
- Velocidad del efector final (400 mm/s)

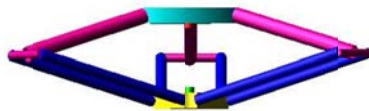
Figura 40. Movimiento del Efector final del Punto inicial (0,0,180) al Punto final (0,0,180)



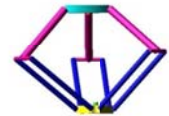
(a) Trayectoria Cartesiana

.in Time= 0.0000 Frame=001

Plot Time= 0.0000 Frame=001



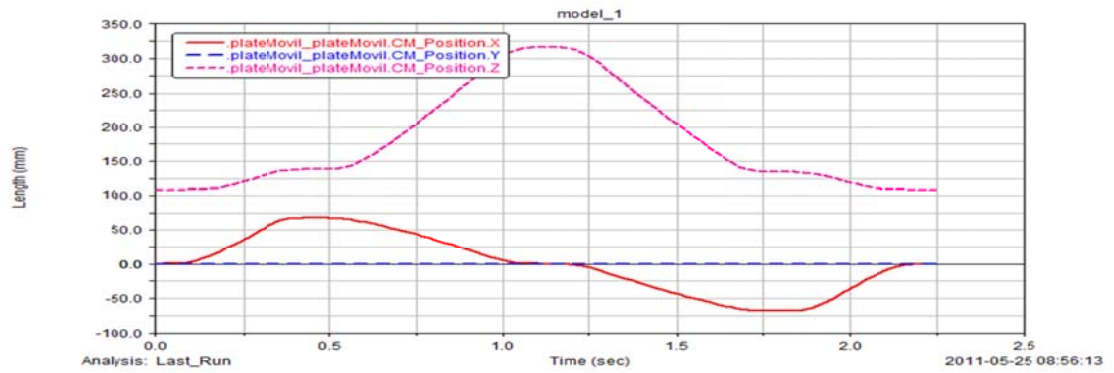
(b) Posición Inicial Modelo ADAMS



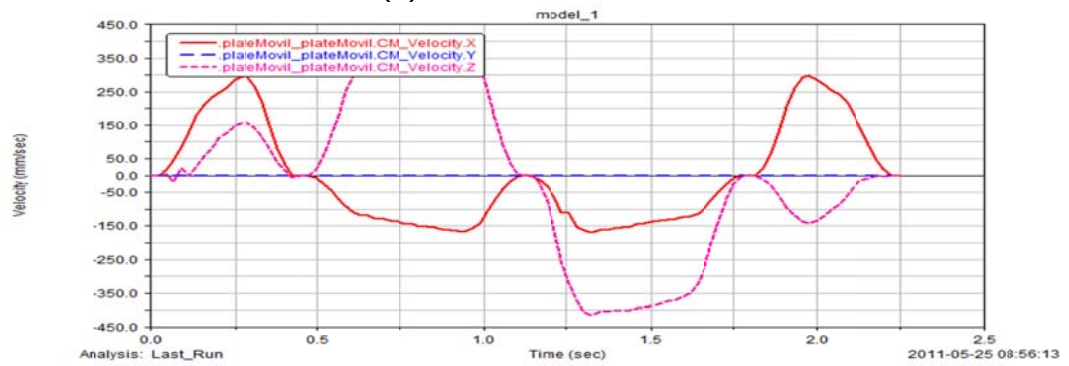
Plot Time= 0.0000 Frame=001



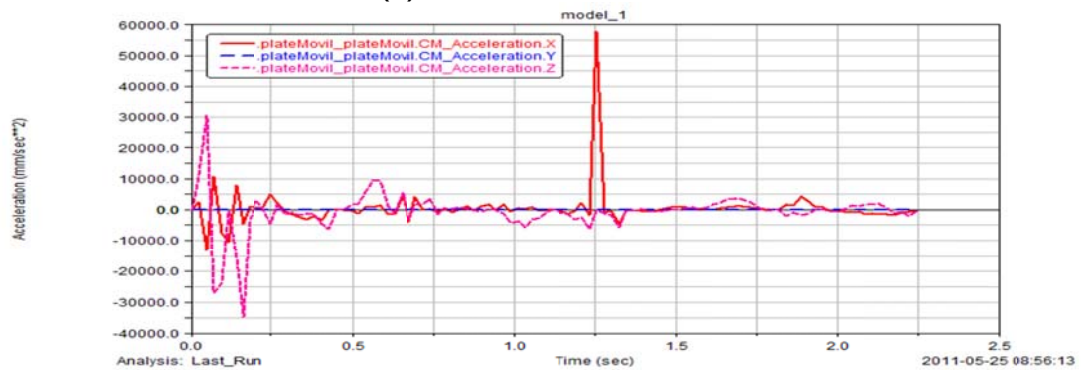
(c) Posiciones intermedias y Final



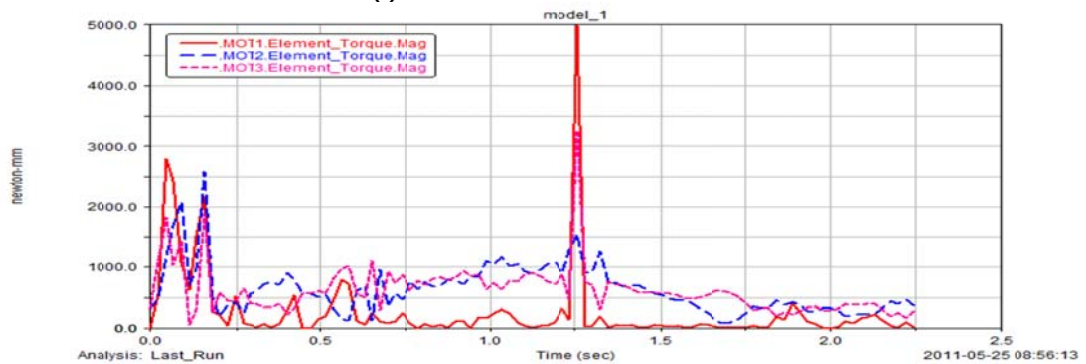
(d) Perfil de Posición



(e) Perfil de Velocidad



(f) Perfil de Aceleración



(g) Pares
Fuente: Autores

Se desarrollaron en total seis simulaciones, tres puntuales y tres multipunto, con las cuales se logró establecer el par máximo y par promedio que deben suministrar los motores. La Tabla 2 resume los pares máximos y promedios obtenidos en las simulaciones

Tabla 2. Trayectorias Simuladas

MOVIMIENTO	MOTOR 1		MOTOR 2		MOTOR 3		TOTAL
	Par N·mm RMS	Par (N·mm) Max	Par (N·mm) RMS	Par (N·mm) Max	Par (N·mm) RMS	Par (N·mm) Max	Par (N·mm) Max
1	280.67	1089.03	755.46	1505.4	678.24	1352.9	1505.4
2	1358.1	6157.0	1358.2	6157.0	1358.6	6157.0	6157.0
3	1097.5	4160.0	1457.8	5864.8	1430.1	5129.1	5864.8
4	713.79	2870.2	1209.1	2496.4	1130.3	3410.6	3410.6
5	879.6	6735.0	1221.0	7870.3	907.26	4919.6	7870.3
6	709.11	4986.9	748.94	2581.6	740.37	3267.3	4986.9

Fuente: Autores

Se puede observar que el par máximo es 7870.3 N.mm que corresponde al movimiento 5, este par máximo se da porque el robot va a una posición espacial que está muy cerca de los límites del espacio de trabajo.

3.4. SELECCIÓN COMERCIAL DE LOS MOTORES

De acuerdo a la simulación dinámica realizada en ADAMS, el par máximo que deben suministrar los motores es de 7.87 N·m. Se optó por buscar motores

comerciales de empresas reconocidas y con amplia trayectoria en el mercado como Siemens (Siemens Industry, Inc.), Maxon (Maxon Motor) y Autonics (Autonics Corporation). Dado el limitado presupuesto, se seleccionaron versiones más económicas de venta en el mercado local, encontrando motorreductores de corriente continua que están acoplados a una caja reductora de velocidad con relación de piñones de (131:1) (Figura 41). Las características se pueden observar en la Tabla 3.

Figura 41. Motorreductor de metal con relación 131:1



Fuente: (Pololu Corporation)

Tabla 3. Características de los Motores Seleccionados

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño:	37D x 69L mm
Peso:	8.1 oz
Diámetro del eje:	6 mm
Relación de transmisión:	131:1
Velocidad marcha libre @ 12 V:	80 rpm
Corriente marcha-libre @ 12 V:	300 mA
Corriente motor bloqueado @ 12V:	5000 mA
Par motor bloqueado @ 12 V:	250 oz·in
Velocidad marcha libre @ 6 V:	40 rpm
Corriente marcha-libre @ 6 V:	250 mA
Corriente motor bloqueado @ 6 V:	2500 mA
Par motor bloqueado @ 6 V:	125 oz·in

Fuente: (Pololu Corporation)

Se realizó la caracterización de los motores para hallar la constante de tiempo eléctrica τ_a , para lo cual se obtuvo experimentalmente los valores de resistencia de armadura R_a e inductancia de armadura L_a consignados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resistencia de Armadura e Inductancia de Armadura

	R_a (Ω)	L_a (mH)
	5.9	1.947
	5.83	1.946
	5.72	1.948
	5.73	1.950
	5.83	1.949
	6.23	1.948
	4.98	1.951
	4.96	1.952
	6.43	1.952
	6.39	1.953
PROMEDIO	5.8	1.9496

Fuente: Autores

Para calcular el valor de τ_a se usó la ecuación 10 y se obtuvo que $\tau_a = 0.336 \text{ m}$.

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (10)$$

Para garantizar un nivel de corriente que garantice que se mantenga el par de los motores, es necesario utilizar una frecuencia PWM con un periodo similar al de la constante de tiempo eléctrica, para estos motores se determinó que debe ser de 2974 Hz (Semiconductors, 1994).

3.5. DRIVER DEL MOTOR DC

El driver del motor DC está conformado por el Puente H MC33932 (Figura 42) de la empresa Freescale, el cual contiene dos Puente H independientes en el mismo encapsulado, está diseñado principalmente para el control electrónico de motores DC o servos de baja tensión.

Figura 42. Puente H MC33932 de Freescale



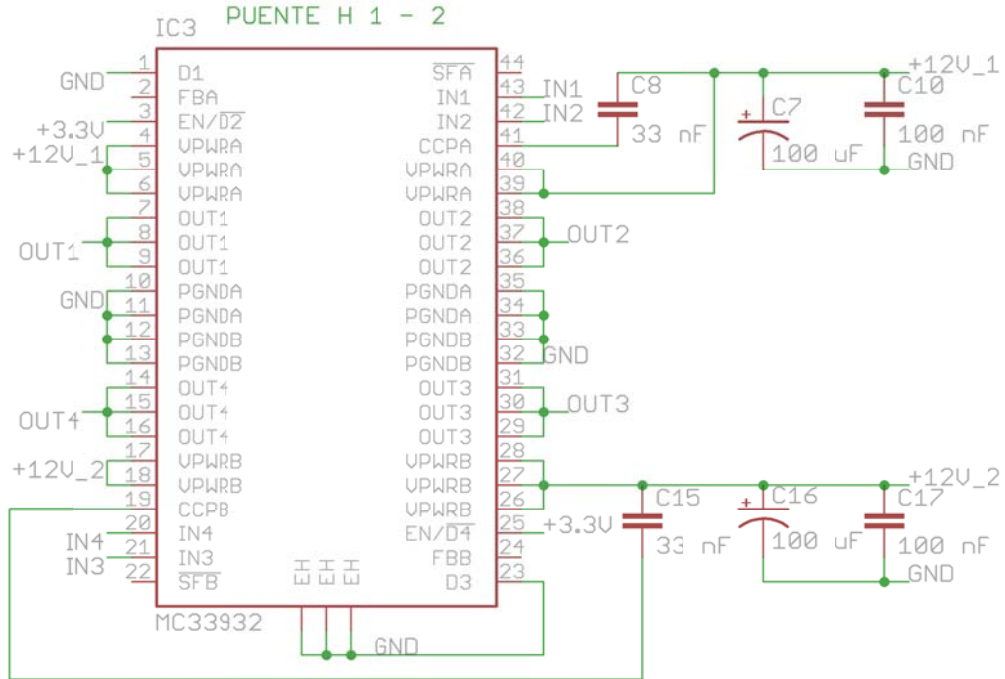
Fuente: (Freescale Semiconductor, Inc.)

Cada Puente H en el MC33932 es capaz de controlar cargas inductivas con corrientes de hasta 5.0 A pico, aunque la capacidad de corriente RMS está sujeta a la capacidad de disipación del encapsulado. En su interior posee un limitador de corrientes pico que se activa cuando la corriente de carga es superior a 6.5 A. La salida puede ser modulada por ancho de pulso (PWM) a frecuencias de hasta 11 kHz. Cuenta con unas características interesantes de monitoreo de corriente, fallas de voltaje, sobre corriente, y el exceso de temperatura.

Las conexiones requeridas para su correcto funcionamiento son mínimas, necesitando solo condensadores, según lo indicado en la hoja de datos (ANEXO1). En la Figura 43 se observa el esquema de conexiones de uno de los MC33932.

El MC33932 posee dos entradas de control por cada puente H, IN1 e IN2, en las cuales entra el tren de pulsos (PWM). Cuenta a su vez con dos salidas por puente H, OUT1 y OUT2, para cada uno de los conectores del motor distribuidas por seis pines.

Figura 43. Esquemático de Conexiones MC33932



Fuente: Autores

3.6. SENSORES

A continuación se presenta los sensores que posee el prototipo de robot Delta, los cuales son utilizados para la detección de las posiciones angulares del eje del motor, así como los de operación segura (Finales de carrera).

3.6.1. Codificador Rotatorio con sensor de Efecto Hall

Se utiliza un codificador rotatorio incremental o también conocido como codificador en cuadratura. El codificador de efecto Hall de dos canales se usa para detectar la rotación de un disco magnético ubicado en el eje del motor. El codificador de cuadratura ofrece una resolución de 64 pulsos por revolución (CPR) del eje del motor (contando en cada flanco de subida y bajada), con la relación transmisión se tiene que cada vuelta del eje de la caja reductora equivale a 8384 pulsos del codificador.

Figura 44. Codificador en cuadratura de 64 CPR



Fuente: (Pololu Corporation)

Tabla 5. Conexiones del Codificador Rotatorio

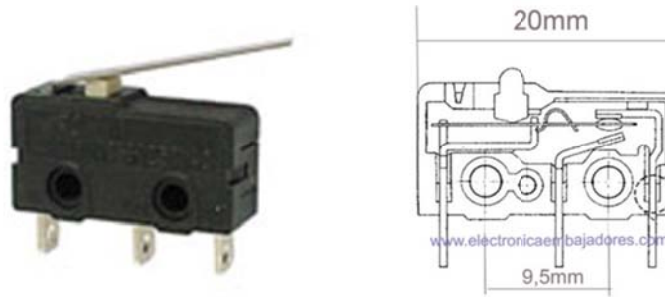
CABLE	FUNCIÓN
Negro:	Alimentación motor
Rojo:	Alimentación motor
Azul:	Sensor Hall Vcc (3.5 – 20 V)
Verde:	Sensor Hall GND
Amarillo:	Sensor Hall Salida A
Blanco:	Sensor Hall Salida B

Fuente: Autores

3.6.2. Final de Carrera

Este tipo de sensores son muy usados en la industria para dar seguridad al proceso, marcan el punto de inicio y sirven de protección en caso de un desbordamiento en la rutina. Se utilizan para determinar la posición inicial donde empieza el espacio de trabajo del robot. (Figura 45)

Figura 45. Final de Carrera



Fuente: (Electrónica Embajadores)

3.7. HARDWARE DE CONTROL

El hardware de control emplea un microcontrolador de alto rendimiento, el dsPIC33FJ128MC802 de Microchip perteneciente a la familia de control de motores, cuenta con una arquitectura Harvard de 16 bits y es capaz de operar en un rango de hasta 40 millones de instrucciones por segundo, siendo esta una de las razones por las cuales se optó por usarlo. Otra razón de peso es el conocimiento previo del funcionamiento y configuración de la mayoría de sus periféricos (Tabla 6) y su flexibilidad en cuanto a la reasignación de los pines a usar mediante la característica de mapeo y como se observa en la Figura 46, posee 16 pines que soportan esta característica.

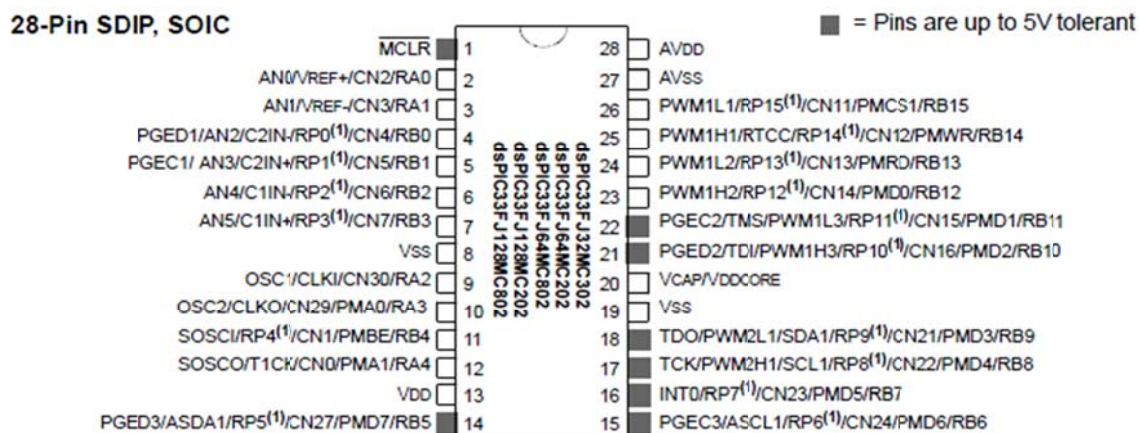
Tabla 6. Características dsPIC33FJ128MC802

CARACTERÍSTICA	VALOR
Arquitectura	16-bit
Velocidad CPU (MIPS)	40
Tipo de Memoria	Flash
Memoria de Programa (KB)	64
Bytes de RAM	16,384
Rango de Temperatura C	-40 a 150
Rango de Voltaje de Operación (V)	3 a 3.6
Pines I/O	21
Numero de Pines	28
Característica de Gestión del Sistema	PBOR
Oscilador Interno	7.37 MHz, 512 kHz
Características nanoWatt	Fast Wake/Fast Control

Periféricos de Comunicación Digital	2-UART, 2-SPI, 1-I2C
Periféricos Análogos	1-A/D 6x10-bit @ 1100(ksps)
Comparadores	2
CAN (#, Tipo)	1 ECAN
Captura/Comparación/Periféricos PWM	4/4
PWM de 16-bit de resolución	16
Canales PWM de Control de Motores	8
Interface de Codificador en Cuadratura (QEI)	2
Contadores	5 x 16-bit, 2 x 32-bit
Puerto Paralelo	PMP
Hardware RTCC	Si
DMA	8

Fuente: (Microchip Technology Inc.)

Figura 46. Diagrama de Pines dsPIC33FJ128



Fuente: (Microchip Technology Inc.)

3.8. DISEÑO CAD DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA

Las piezas fueron modeladas en el software de diseño SolidWorks, siguiendo la premisa de ser livianas y rígidas. El prototipo cuenta con 3 cadenas cinemáticas idénticas conformadas por un brazo y un antebrazo que van unidas a dos plataformas, una fija y otra móvil. Cada pieza fue diseñada para que el rango de movimiento estuviera dentro del espacio de trabajo establecido y el prototipo no fuese muy pesado.

A continuación se mostraran las piezas que fueron diseñadas a través de SolidWorks utilizando las longitudes de los eslabones y los radios de las plataformas previamente establecidos para la simulación dinámica en ADAMS.

En la Figura 47 se puede observar las piezas utilizadas en la construcción de la estructura mecánica del robot Delta, en las cuales se destacan: los bujes fabricados en broce, los tornillos, las tuercas, las articulaciones, el plato móvil, entre otras.

Figura 47. Piezas diseñadas en SolidWorks



Fuente: Autores

El brazo está compuesto por dos barras en acero inoxidable para garantizar la rigidez y uniones fabricadas en aluminio en cada extremo que las sujetan a las articulaciones (Figura 48).

Figura 48. Brazo con articulaciones



Fuente: Autores

El antebrazo cuenta con tres partes principales realizadas en aluminio unidas firmemente por cuatro tornillos y se une al eje del motor mediante un acople en acero (Figura 49).

Figura 49. Antebrazo



Fuente: Autores

Finalmente en la Figura 50 muestra la estructura mecánica que se proyectó para ser elaborada físicamente.

Figura 50. Ensamble final en SolidWorks



Fuente: Autores

3.9. PROTOTIPO CONSTRUIDO

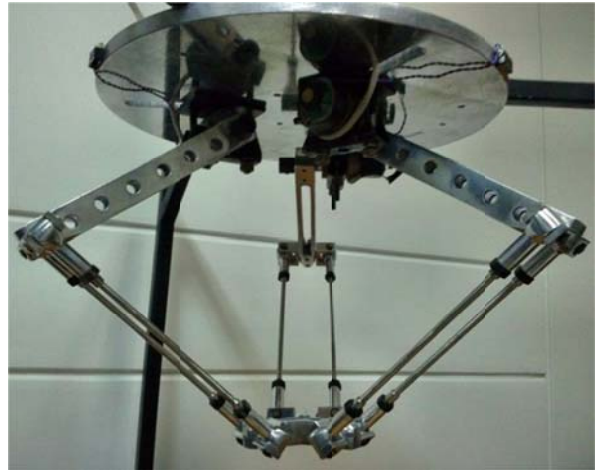
El prototipo construido se puede observar en la Figura 51 donde se destacan la estructura mecánica, los motores y la estructura de soporte

Los antebrazos como el mostrado en la (Figura 52) y la plataforma móvil (Figura 54), son fabricados en aluminio. Los brazos están formados por dos barras paralelas (Figura 53) fabricadas en acero, que convierten el movimiento articular del motor en desplazamiento espacial de la plataforma móvil, a la cual van unidas las 3 cadenas cinemáticas, donde cada una se encuentra separada por un ángulo de 120° . Como plataforma fija se usó un plato en aluminio de 20 cm de radio, donde se fijan los motores mediante unas abrazaderas que los mantienen firmes en su sitio (Figura 56). Como estructura de soporte se utilizaron tres tubos cuadrados en forma de L de 1" de diámetro atornillados a la plataforma fija y separados 120 grados.

Figura 51. Prototipo Construido



(a) Estructura completa



(b) Acercamiento

Fuente: Autores

Figura 52. Antebrazo



Fuente: Autores

Figura 53. Barras que conforman el Brazo



Fuente: Autores

Figura 54. Plataforma Móvil



Fuente: Autores

Las articulaciones se hicieron en aluminio y se sujetaron con chavetas y pasadores elaborados en bronce. En la Figura 55 se aprecia en detalle la libertad de movimiento que brinda cada articulación.

Figura 55. Detalle de las Articulaciones



(a) Posición normal



(b) Limite de movimiento

Fuente: Autores

Figura 56. Detalle de los motores



(a) Plataforma fija

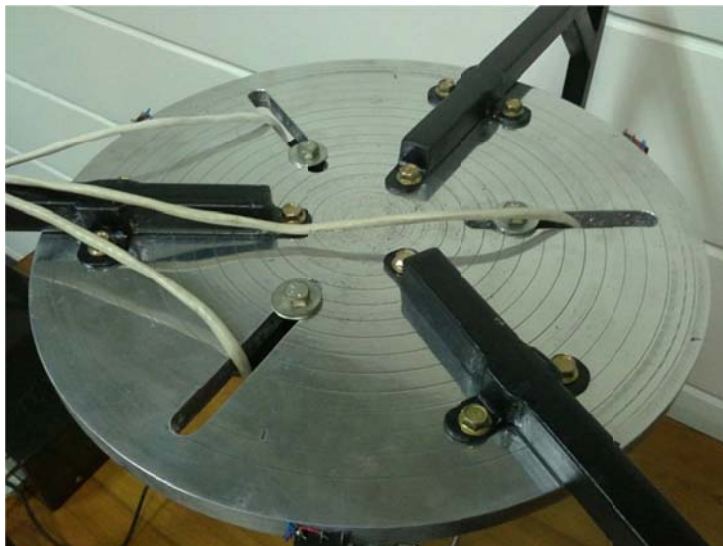


(b) Abrazadera del motor

Fuente: Autores

Mediante cable de par trenzado se realizaron las conexiones entre el módulo de control y los componentes del robot Delta. En la Figura 57 se observa en detalle el cableado y la ubicación de los finales de carrera.

Figura 57. Cableado y Final de Carrera



(a) Cableado



(b) Final de Carrera

Fuente: Autores

Las piezas finales pasaron por un proceso de reducción de peso de aproximadamente el 30%, quedando con los pesos mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Pesos de la Estructura

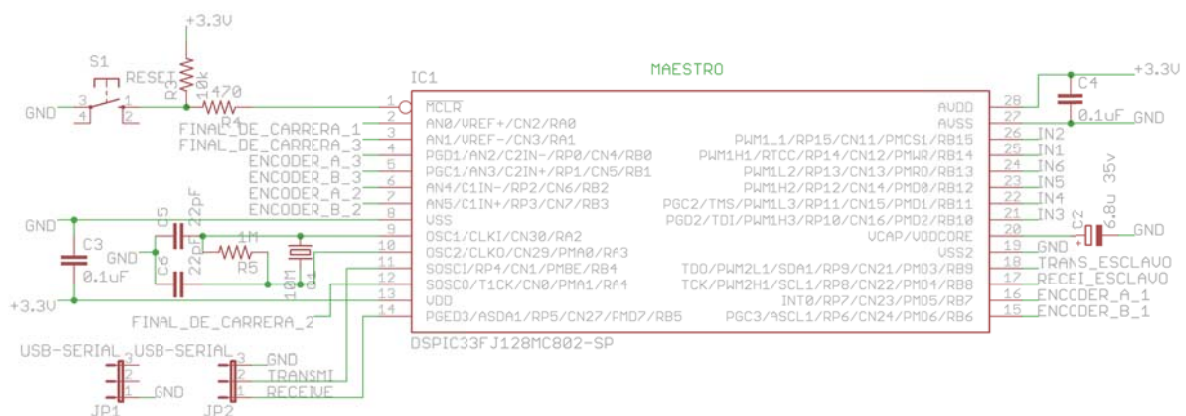
ESLABÓN	PESO (g)
Brazo	295.3
Antebrazo	118.1
Móvil	120.5
Fija	3000

Fuente: Autores

3.10. TARJETA DE CONTROL

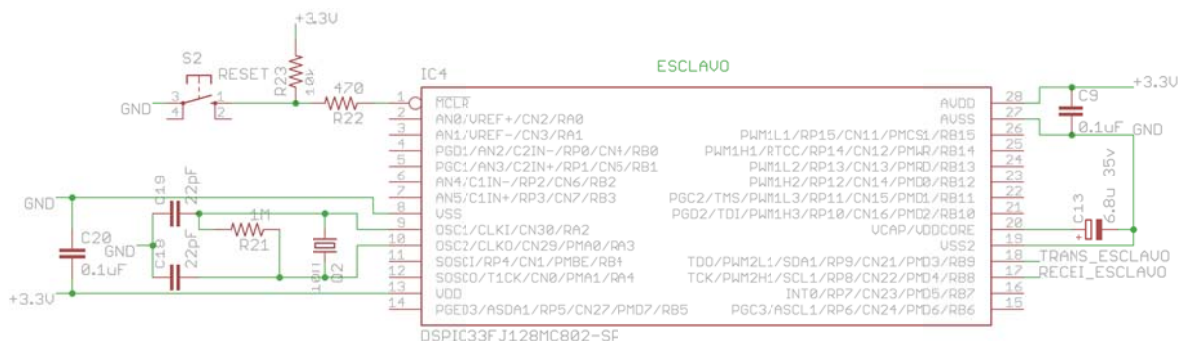
Una vez definido el tipo de microcontrolador y de driver a usar, se procedió a diseñar la tarjeta de control en Eagle, un software de diseño CAD, teniendo previsto usar cable de par trenzado para realizar las conexiones entre la tarjeta y los motores, los codificadores incrementales y los finales de carrera. De la Figura 58 a la Figura 63 se muestran el esquemático de conexiones de la tarjeta pudiendo distinguir dos microcontroladores y dos MC33932 como componentes principales. En la Figura 58 y la Figura 59 se muestra el esquemático de conexión del microcontrolador Maestro y Esclavo, el cual detalla las conexiones requeridas para su funcionamiento y los elementos conectados en cada pin. Se emplea un oscilador de 10 MHz para operar a su máxima velocidad y condensadores para eliminar picos de voltaje y garantizar un funcionamiento estable.

Figura 58. Esquemático de Conexiones Microcontrolador Maestro



Fuente: Autores

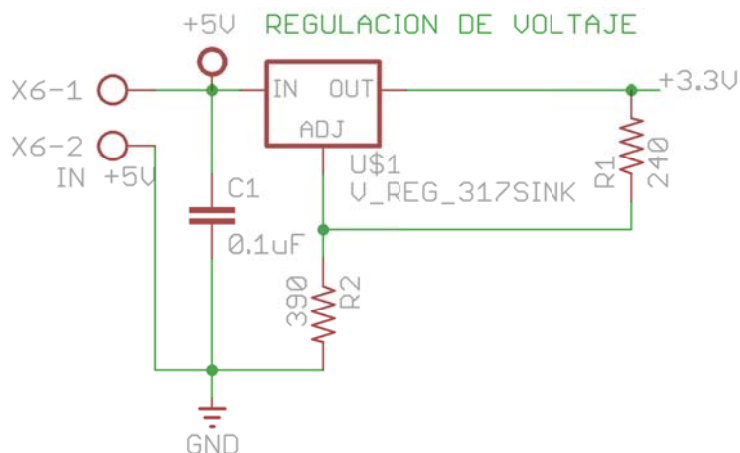
Figura 59. Esquemático de Conexiones Microcontrolador Esclavo



Fuente: Autores

En la Figura 60 se observa la etapa de regulación de voltaje, en el cual la entrada a regular son 5 V entregados por la fuente de poder, y la salida de regulada es de 3.3 V, siendo esta la alimentación de los microcontroladores, los puente H y los sensores de efecto Hall.

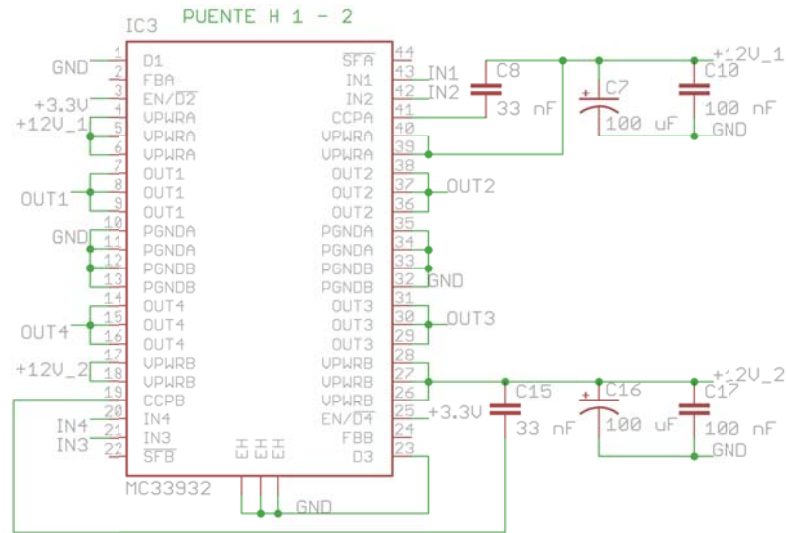
Figura 60. Esquemático de Conexiones Regulación de Voltaje



Fuente: Autores

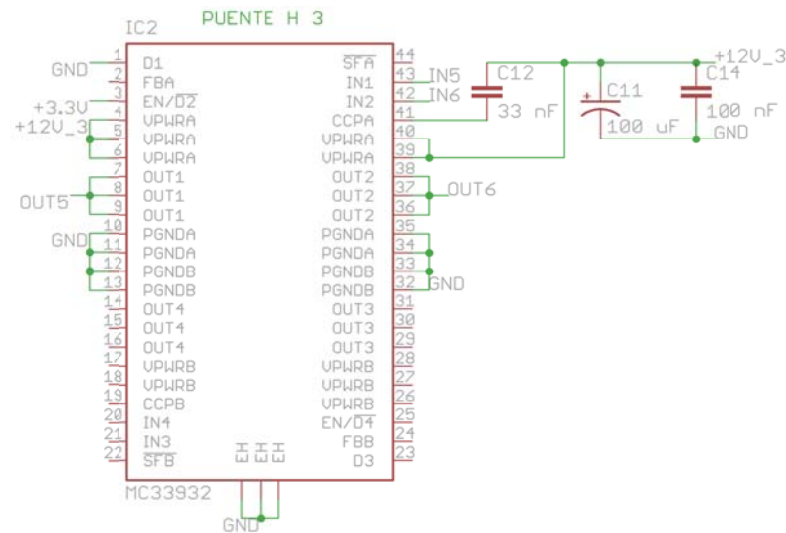
En la Figura 61 y Figura 62 se muestra la conexión básica de los drivers que controlan los motores. Cada driver puede controlar hasta dos motores a la vez. Estos drivers son alimentados a 3.3 V. La entrada de voltaje de 12 V suministra la alimentación del motor.

Figura 61. Esquemático de Conexiones Controlador de los Motores 1 y 2



Fuente: Autores

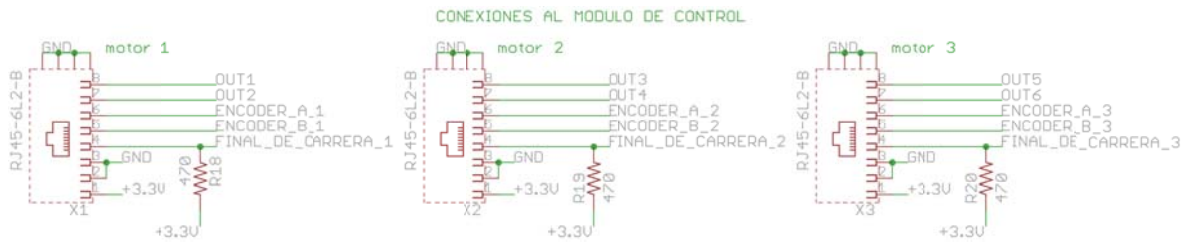
Figura 62. Esquemático de Conexiones Controlador del Motor 3



Fuente: Autores

Por último la conexión entre el sensor de efecto Hall, el microcontrolador Maestro, los drivers, los motores y los finales de carrera se realiza mediante cable de par trenzado usando un conector RJ45 (Figura 63).

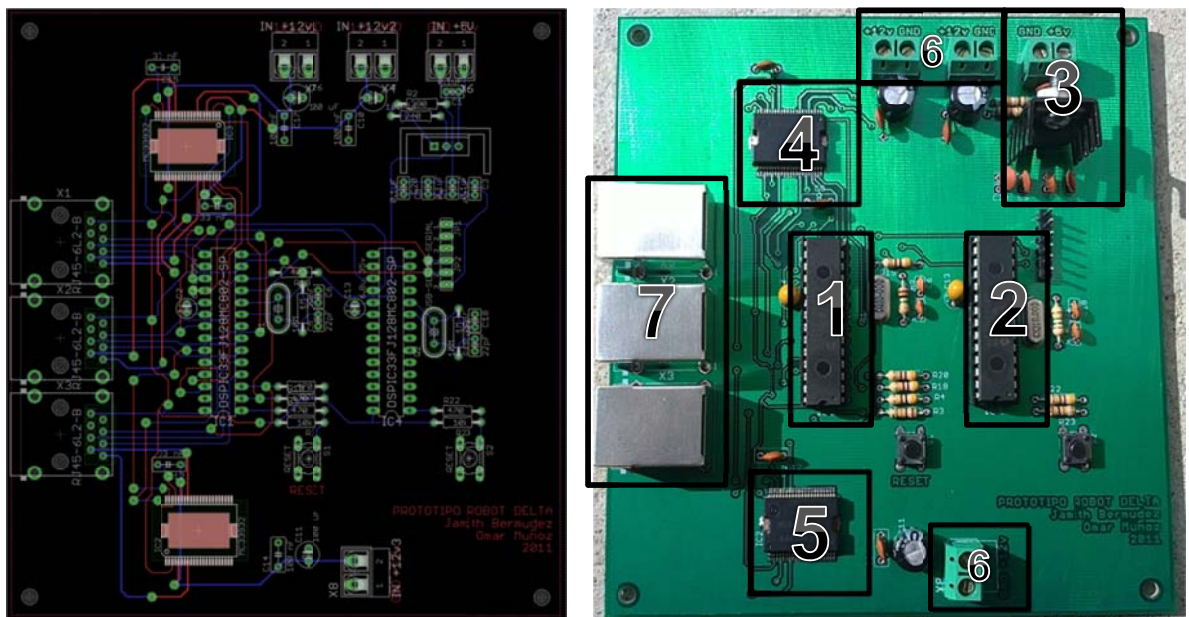
Figura 63. Conexiones Mediante Conector RJ45



Fuente: Autores

Para el diseño de la tarjeta de control se utilizó una baquelita doble capa por ser los MC33932 componentes de montaje superficial. En la Figura 64 se observa a la izquierda la tarjeta en Eagle y a la derecha la tarjeta física desarrollada con cada uno de sus componentes. En la parte inferior, se detalla la posición física de cada componente descrito anteriormente.

Figura 64. Baquelita del Modulo de Control



1. Microcontrolador Maestro
2. Microcontrolador Esclavo
3. Regulacion de Voltaje
4. Driver de los Motores 1 y 2 (Potencia)
5. Driver del Motor 3(Potencia)
6. Entradas de Alimentacion de los Motores (Potencia)
7. Conectores RJ45

Fuente: Autores

4. CONTROL DE POSICIÓN DEL ROBOT DELTA

En este capítulo se presenta el control de posición realizado sobre el robot Delta incluyendo el tipo de algoritmo usado y la forma de realizar la realimentación del sistema.

4.1. ARQUITECTURA DE CONTROL

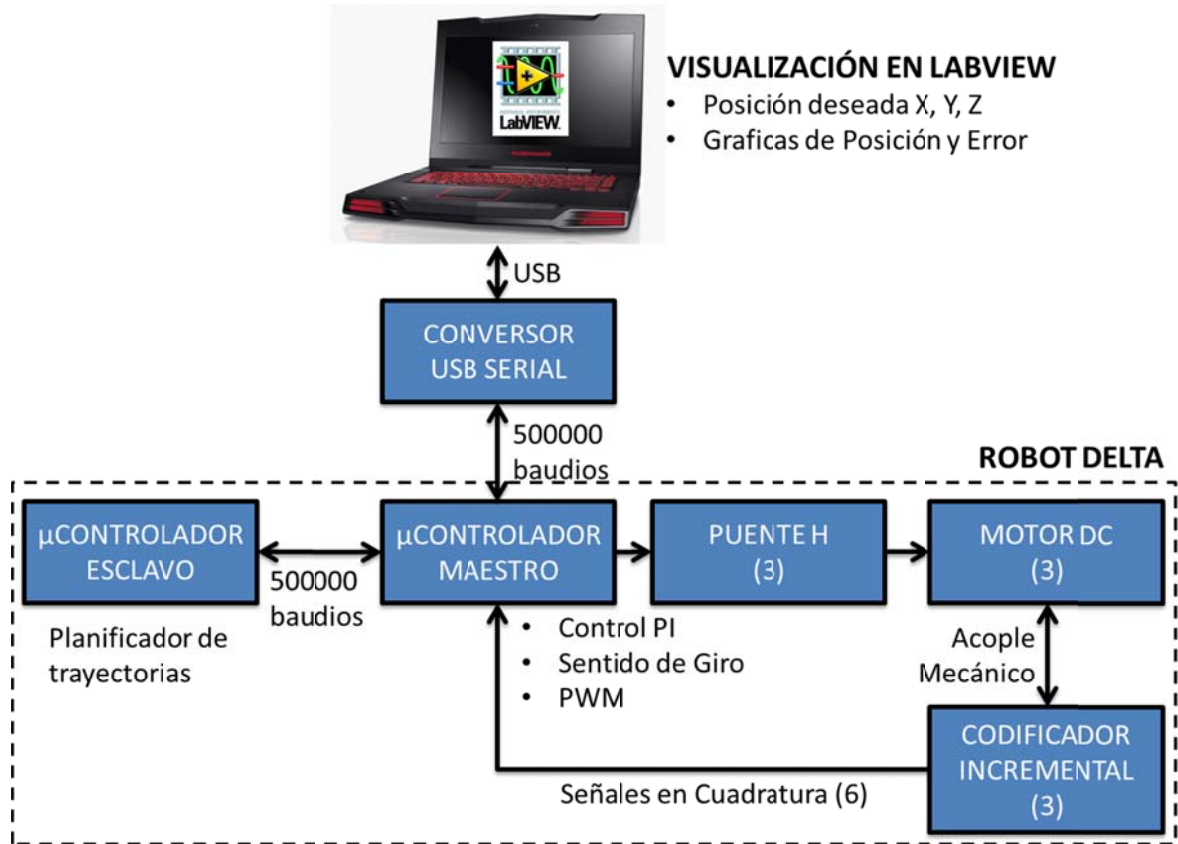
La arquitectura de control está basada en un modelo de protocolo de comunicación Maestro-Esclavo, donde el dispositivo Maestro tiene control bidireccional sobre el dispositivo Esclavo, que se somete a las órdenes del Maestro entregando los resultados que este exija. Cuando la comunicación es establecida, el control es siempre del Maestro al Esclavo. El Maestro está en la obligación de prever los resultados finales a partir de los resultados de los Esclavos. Por lo tanto:

- El trabajo se divide en sub-tareas que son procesadas de forma independiente por el esclavo.
- El resultado del trabajo total se calcula usando los resultados de cada sub-tarea realizada.
- Este tipo de estructura es muy usada en áreas de computación paralela y en sistemas distribuidos.

La arquitectura de control diseñada para el manejo del robot Delta se evidencia en el diagrama de bloques de la Figura 65, donde se aprecia dos microcontroladores, el Maestro y el Esclavo.

El microcontrolador Maestro realiza el control global de los motores y el envío de las variables controladas al entorno grafico en LabVIEW para su visualización. El control de posición se realiza mediante la realimentación de las señales en cuadratura provenientes de los codificadores incrementales, interpretando la posición de cada motor según el diagrama de transición de estados de la Figura 66, realizando el control independiente de cada articulación y enviando las posiciones, los errores y las acciones de control que se están realizando en el momento al computador para ser visualizadas empleando LabVIEW.

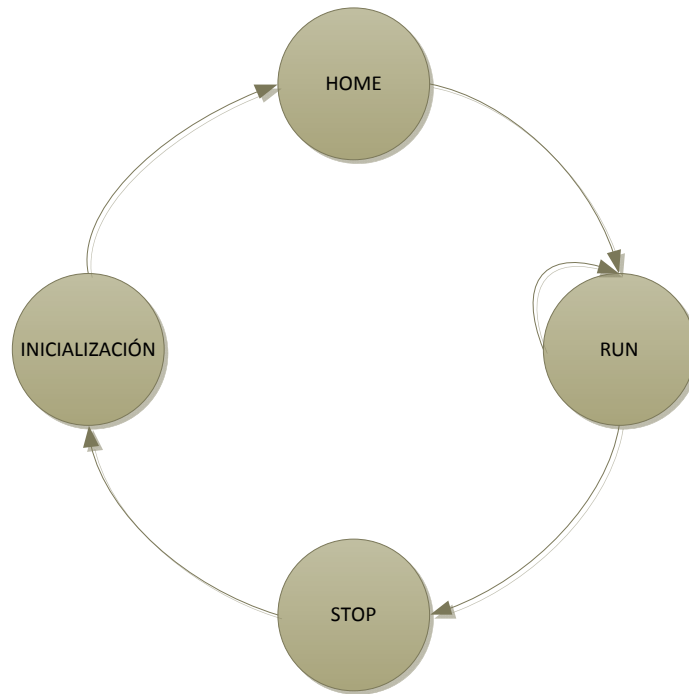
Figura 65. Arquitectura de Control



Fuente: Autores

Analizando con mayor detalle el diagrama de estados de la Figura 66 se tiene que en el primer estado (INICIALIZACIÓN) se realiza la rutina de configuración del controlador, y se envía al segundo estado (HOME) donde los motores se empiezan a mover a una velocidad determinada lo que lleva al desplazamiento de las cadenas cinemáticas desde su posición de reposo (abajo) hasta su máxima posición que se da cuando se activan los tres finales de carrera, en ese momento se clarean todas las variables y se establece que esa es la posición inicial del robot y se pasa al tercer estado (RUN) donde el robot Delta espera a que desde Labview se le envíen posiciones cartesianas para iniciar el movimiento. Una vez el microcontrolador Maestro recibe la posición deseada, empieza a realizar el conteo de los pulsos provenientes del codificador incremental de cada motor, que permiten determinar la posición de cada eje dado que se conoce cuantos pulsos hay por vuelta del eje, y ejecuta el algoritmo de control digital PI. El robot entra a un cuarto estado (STOP) si se activa uno de los finales de carrera, inmediatamente se reinicia el sistema y pasa de nuevo al primer estado.

Figura 66. Diagrama de Transición de Estados



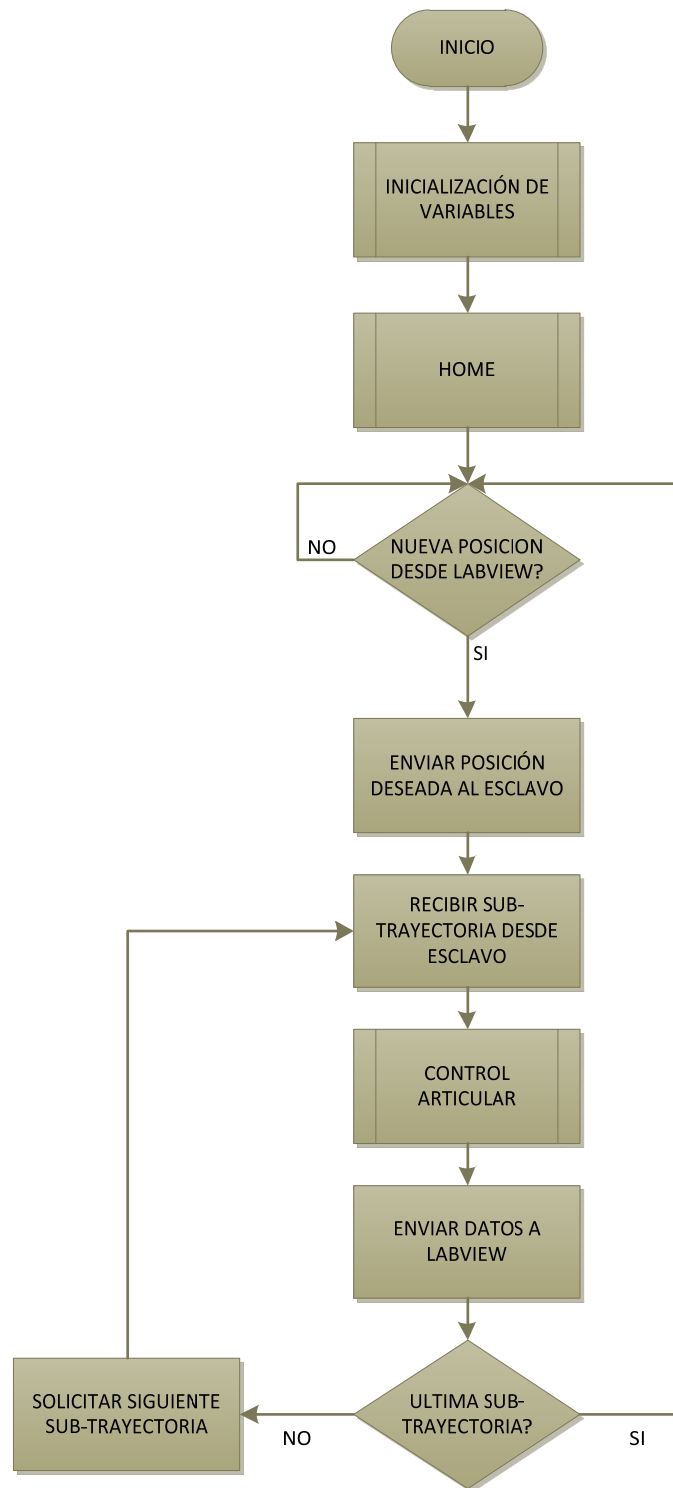
Fuente: Autores

El Esclavo se encarga de realizar la planificación de las trayectorias y es llevada a cabo en un microcontrolador independiente debido a la necesidad de procesamiento de la misma y para garantizar que todas las trayectorias sean correctamente planeadas sin afectar el proceso de control de cada motor.

La comunicación entre los dos microcontroladores se realiza mediante los módulos UART de cada dsPIC, utilizando comunicación serial asíncrona a una tasa de 500000 baudios.

En la Figura 67 se observa la rutina implementada en el microcontrolador Maestro, el cual hace el control global de robot. Inicialmente se llevan los motores a una posición inicial conocida como HOME, donde los mantiene hasta que recibe una posición cartesiana desde LabVIEW. Seguidamente el Maestro envía esta posición al Esclavo para que planifique la trayectoria, luego recibe cada punto de esa trayectoria y va realizando el control de cada articulación hasta llegar al punto cartesiano deseado y se queda esperando recibir otra posición.

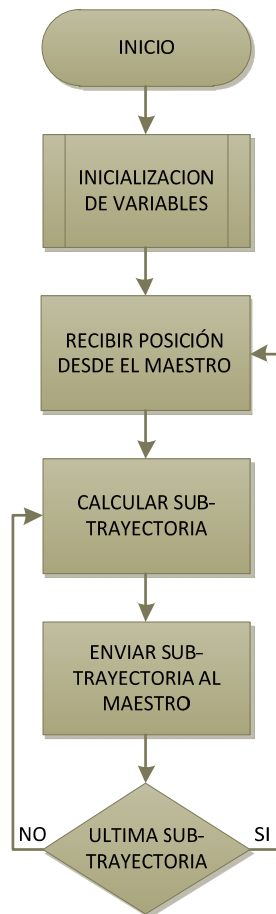
Figura 67. Rutina Ejecutada por el Maestro



Fuente: Autores

El Esclavo realiza la planificación de trayectorias dividiéndola en una serie de puntos (sub-trayectorias) y calculando las coordenadas articulares del eje para cada motor.

Figura 68. Rutina Ejecutada por el Esclavo

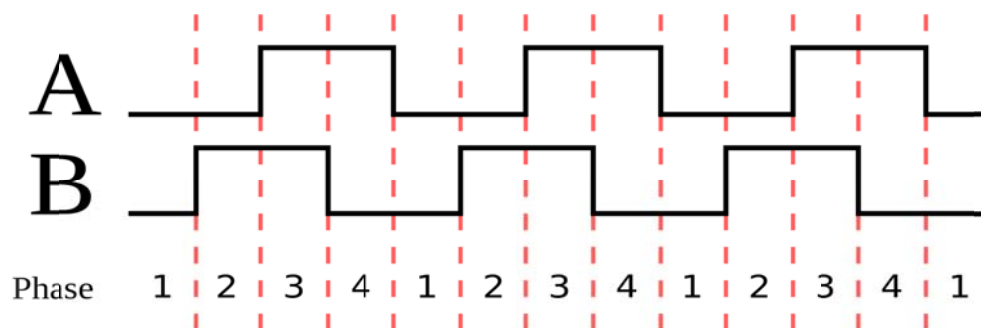


Fuente: Autores

4.2. SEÑAL DE REALIMENTACIÓN

Para controlar la posición de los motores se requiere conocer la posición exacta del eje del motor, utilizando la información proveniente del codificador incremental en cuadratura, el cual genera dos señales de tipo tren de pulsos por cada uno de sus dos canales desfasadas 90° entre sí (Figura 69). Estas señales se llevan al microcontrolador Maestro, quien las decodifica para producir un conteo de pulsos ascendente o descendente.

Figura 69. Señales en cuadratura (rotación en sentido horario)



Fuente: Autores

El codificador utiliza un sensor de efecto Hall que genera una señal cuadrada que se puede capturar con el microcontrolador sin necesidad de un acondicionamiento de señal previo. Esto se logra utilizando la característica de interrupción externa con la que cuenta el microcontrolador que permite detectar un cambio en la entrada de un pin específico y realizar una interrupción en el programa. Después de leer las señales con el microcontrolador Maestro, se utilizan la Tabla 8 y la Tabla 9 para determinar el sentido de giro y el incremento o decremento de un acumulador que lleva el registro de la posición del eje del motor.

Tabla 8. Diagrama de estados para rotación horaria

Fase	A	B
1	0	0
2	0	1
3	1	1
4	1	0

Fuente: Autores

Tabla 9. Diagrama de estados para rotación anti-horaria

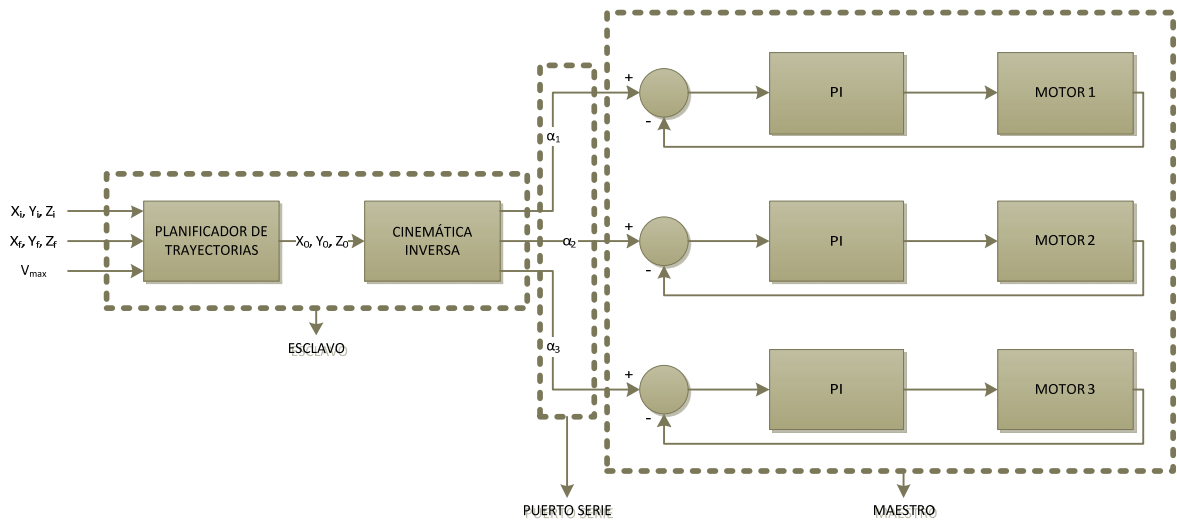
Fase	A	B
1	1	0
2	1	1
3	0	1
4	0	0

Fuente: Autores

4.3. CONTROL MONOARTICULAR

El control de posición implementando en el prototipo es mostrado en la Figura 70, donde a partir de una posición espacial inicial, una posición espacial final y una velocidad máxima de la plataforma móvil, se controla la posición de cada brazo en forma individual a partir de la cinemática inversa del robot, quien obtiene la posición articular de referencia para cada lazo individual de control a partir de las coordenadas espaciales.

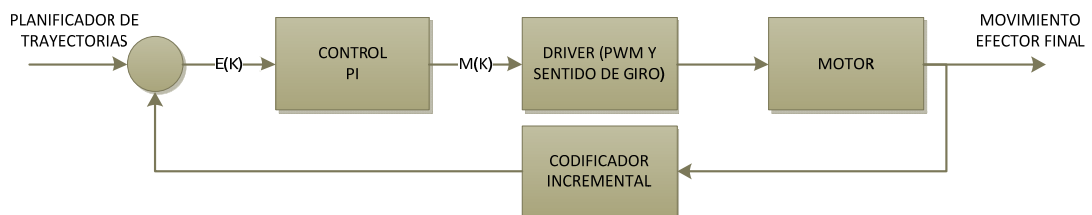
Figura 70. Control de Posición



Fuente: Autores

Las características mecánicas de un robot (dimensiones, peso, tipo de actuadores, etc.) influyen notablemente en el tipo de control a utilizar. Algunos factores como la presencia de reductores hace que se desprecie la interacción entre los grados de libertad del robot pudiéndose implementar de esta forma un control monoarticular con técnicas PID como el mostrado en la Figura 71.

Figura 71. Esquema de Control Para un Motor



Fuente: Autores

Dada la necesidad de obtener una respuesta rápida y con un error casi nulo en posición, se optó por el uso de un controlador PI, ya que su parte PROPORCIONAL suministra una rápida respuesta, y su parte INTEGRAL elimina el error estacionario, haciéndolo al prototipo más exacto y estable. Como se mencionó anteriormente, la medición de la posición angular del eje de cada motor se realizó utilizando un codificador incremental con sensor de efecto Hall, que permite determinar el sentido de giro del motor.

Asumiendo que el controlador PI tiene la forma:

$$M(s) = K_p \cdot E(s) + \frac{K_i}{s} \cdot E(s) \quad (11)$$

Para obtener el controlador PI digital se aplica el método de transformación bilineal:

$$s \rightarrow \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} \quad (12)$$

Lo cual da como resultado la ecuación de diferencias para el PI digital:

$$m(k) = m(k-1) + K_1 \cdot e(k) + K_2 \cdot e(k-1) \quad (13)$$

Donde

$m(k)$ = Acción de control

$m(k-1)$ = Acción de control anterior

$e(k)$ = Error

$e(k-1)$ = Error Anterior

K_1 y K_2 = Constantes en función de K_p y K_i

El código implementado sobre el dsPIC fue programado en lenguaje C y compilado en MPLAB C30, un compilador completamente compatible con el estándar ANSI-C y diseñado para operar con dispositivos de 16 bits de Microchip que se integra al entorno de desarrollo MPLAB (Microchip Technology Inc.). El algoritmo para el controlador PI digital desarrollado a partir de la ecuación 13 se muestra a continuación:

```
error_anterior = setpoint - posicion_actual
controlador_ant = 0
```

```

k1 = kp + (ki / 2);
k2 = (ki / 2) - kp;
control_pi:
    error = setpoint - posicion_actual
    controlador = controlador_ant + k1 x error + k2 x error_anterior
    //anti-windup
    si controlador > controlador_maximo entonces
        controlador = controlador_maximo
    sino
        si controlador < controlador_minimo entonces
            controlador = controlador_minimo
        fin si
    fin si
    //dato anterior
    error_anterior = error;
    controlador_anterior = controlador;
    ir a control_pi

```

En la estructura de control se incluye la acción integral para no tener error en el régimen permanente pero como lo expone Mazzone (2002), uno de los principales efectos indeseables de la saturación en la actuación es que cualquier integrador del controlador continuará integrando aún mientras la entrada se encuentra saturada. Así, el estado del integrador en cuestión puede alcanzar valores excesivos, que deteriorarán la respuesta transitoria del sistema, generalmente produciendo grandes sobrevalores.

Una idea general de la estructura anti-windup es que reescribe el controlador de forma tal que el integrador no integre al error cuando la entrada alcanza algún límite. Hay muchas alternativas para evitar el windup de los integradores. Todas ellas se basan en tratar que los estados del controlador estén conducidos por la verdadera entrada (es decir, la limitada) del sistema y tengan una respuesta acotada cuando la entrada de la planta satura en los límites de actuación.

Por lo tanto, se implementa un esquema de limitación en amplitud, o saturación del controlador que corresponde a limitar el mismo entre los valores reales del actuador y desactivar la parte integradora cuando se alcancen los límites de saturación del motor. (Mazzone, 2002).

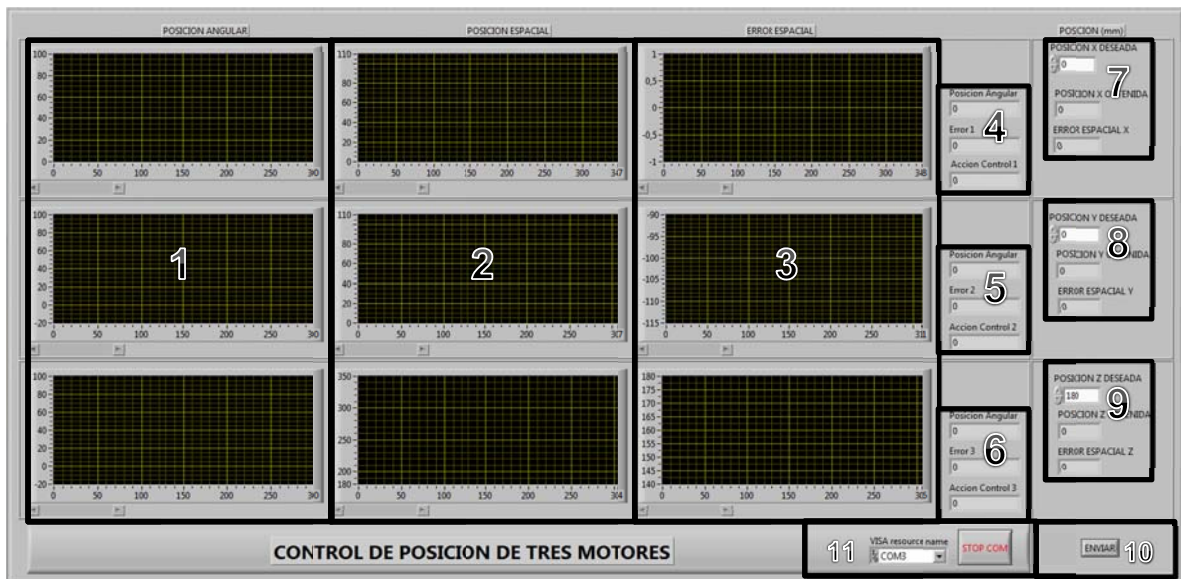
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de evaluar el esquema de control propuesto para el robot Delta, a continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos para el posicionamiento y el seguimiento de trayectorias dentro del espacio de trabajo del robot, a diferentes velocidades de operación y empleando el error de posición de la plataforma móvil como índice de evaluación. Para visualizar estas variables y enviar la información requerida se creó una interfaz gráfica en LabVIEW.

5.1. INTERFAZ GRAFICA EN LABVIEW

Para la visualización se implementó un entorno grafico en LabVIEW, en el cual se visualizan las 3 variables a supervisar: posición angular, posición espacial y error espacial (Figura 72). La comunicación entre la interfaz gráfica y el sistema de control se realiza a través del controlador Maestro utilizando transmisión serial mediante el estándar de comunicaciones RS232.

Figura 72. Entorno de LabVIEW



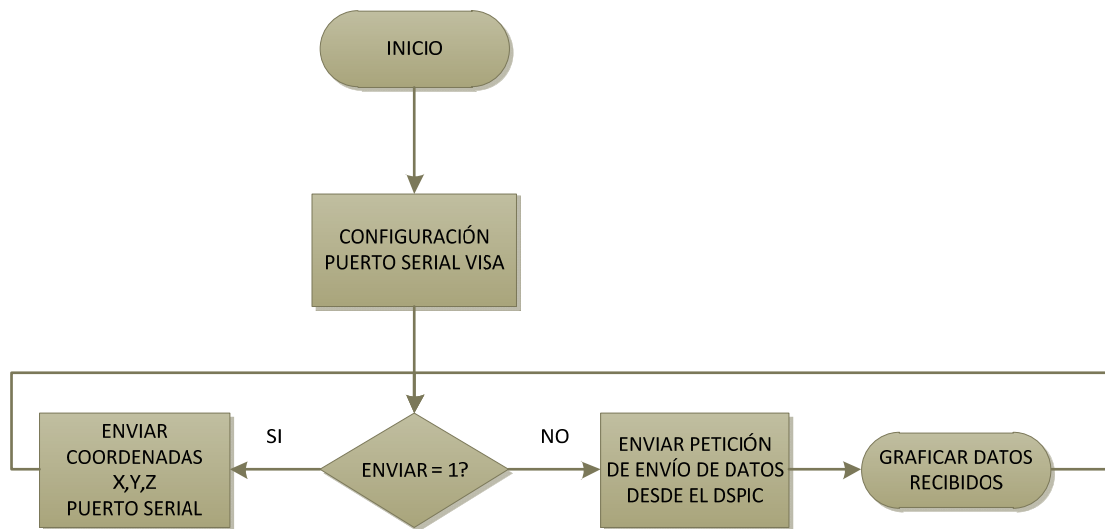
Fuente: Autores

En la interfaz gráfica, la primera columna permite visualizar la posición angular de cada motor, la segunda la posición espacial de la plataforma móvil y la tercera el error espacial estimado de la plataforma móvil. Las áreas 4, 5 y 6 permiten

observar la posición angular, el error estimado en grados y la acción de control en forma numérica de cada uno de los motores. En las áreas 7, 8 y 9 se permite introducir la posición espacial deseada de la plataforma móvil limitada dentro del espacio de trabajo del robot, también se puede observar la posición espacial obtenida y el error de posición estimado de la plataforma móvil. El área 10 permite enviar la coordenada deseada al sistema de control y el área 11 sirve para iniciar o detener la comunicación y escoger el puerto de comunicaciones por el cual se va llevar a cabo.

Un diagrama de bloques del programa implementado en LabVIEW se puede observar en la Figura 73. El programa permanece recibiendo datos desde el microcontrolador Maestro y en el momento en que se desee enviar una posición se presiona un botón que pone la variable ENVIAR en 1 durante un instante de tiempo (mientras envía los datos al microcontrolador Maestro), luego vuelve a ponerla en 0 y continua recibiendo datos.

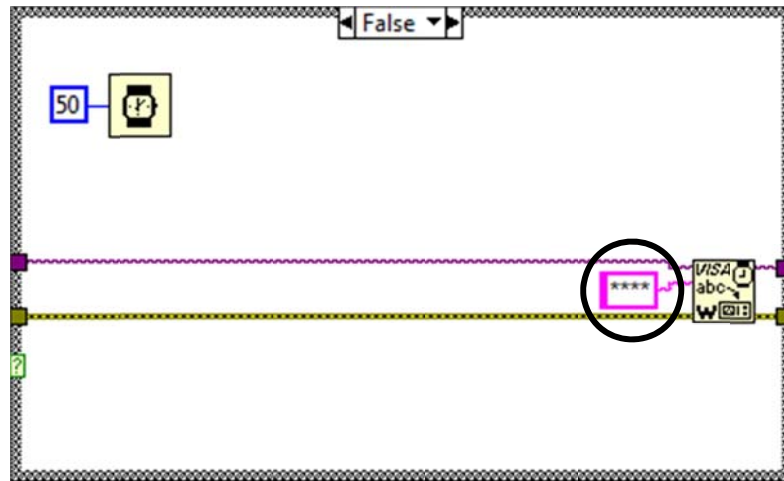
Figura 73. Diagrama de Bloques de la Interfaz en LabVIEW



Fuente: Autores

Para realizar el muestreo de datos, se envía desde LabVIEW un carácter especial al dsPIC para que este envíe el valor de los datos almacenados en ese momento y poder graficarlos. En la Figura 74 se puede observar que el carácter escogido fue el asterisco, el cual está siendo enviado cada 50 ms.

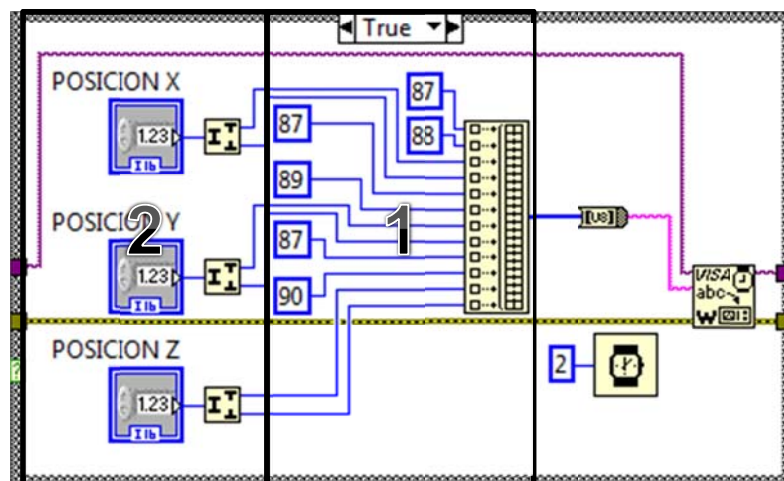
Figura 74. Bandera de Petición de Datos



Fuente: Autores

Cuando se quiere enviar una coordenada al sistema de control, se envían caracteres especiales previos al dato para que el dsPIC identifique correctamente el valor de cada una. En la Figura 75, en el área 1, se observa que antes de cada coordenada van dos números decimales, que corresponden a un carácter ASCII determinado, 87 es W, 88 es X, 89 es Y y 90 es Z, los cuales permiten que el sistema de control identifique correctamente cada posición deseada. El puerto serial permite envíos de tramas de datos de 8 bits, pero dado que las variables que se manejan comprenden 16 bits, se hizo necesario dividirlas en 2 tramas, esto se evidencia en el área 2.

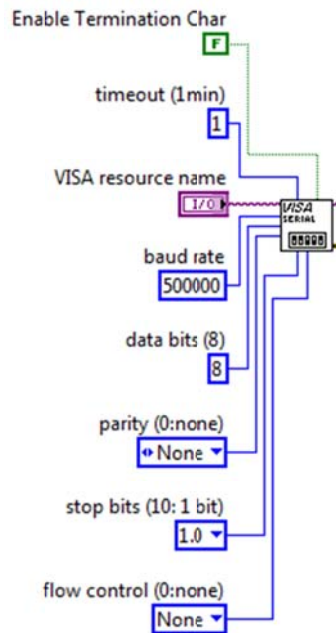
Figura 75. Envío de coordenadas al dsPIC



Fuente: Autores

La comunicación serial se realizó de forma asincrónica con una velocidad de transmisión de 500000 baudios por segundo, tramas de 8 bits de datos, ningún bit de paridad y 1 bit de parada, suele abreviarse como 500000/8N1 (Figura 76).

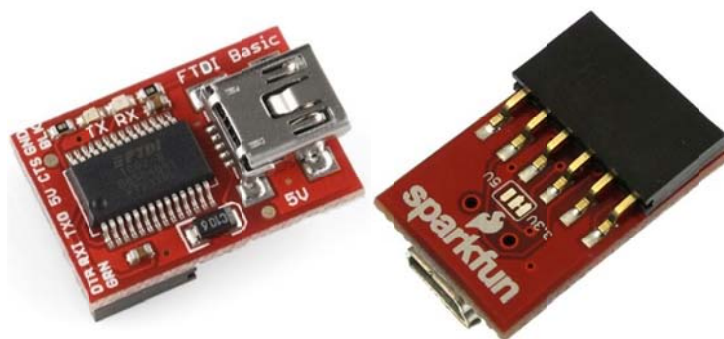
Figura 76. Configuración Puerto Serie



Fuente: Autores

Para garantizar una mayor compatibilidad con los computadores actuales se optó por utilizar un conversor USB (Universal Serial Bus) a RS232 (Figura 77) que permite convertir el puerto USB en un puerto serial virtual permitiendo alcanzar velocidades de comunicación altas y estables.

Figura 77. Conversor USB a RS232



Fuente: (SparkFun, 2003)

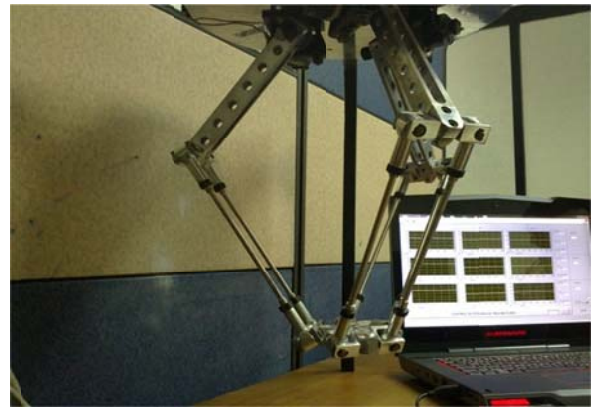
Prueba Experimental 1

- Posición Inicial: (0, 0, 180)
- Posición Final: (0, 0, 340)
- Velocidad: 400 mm/s

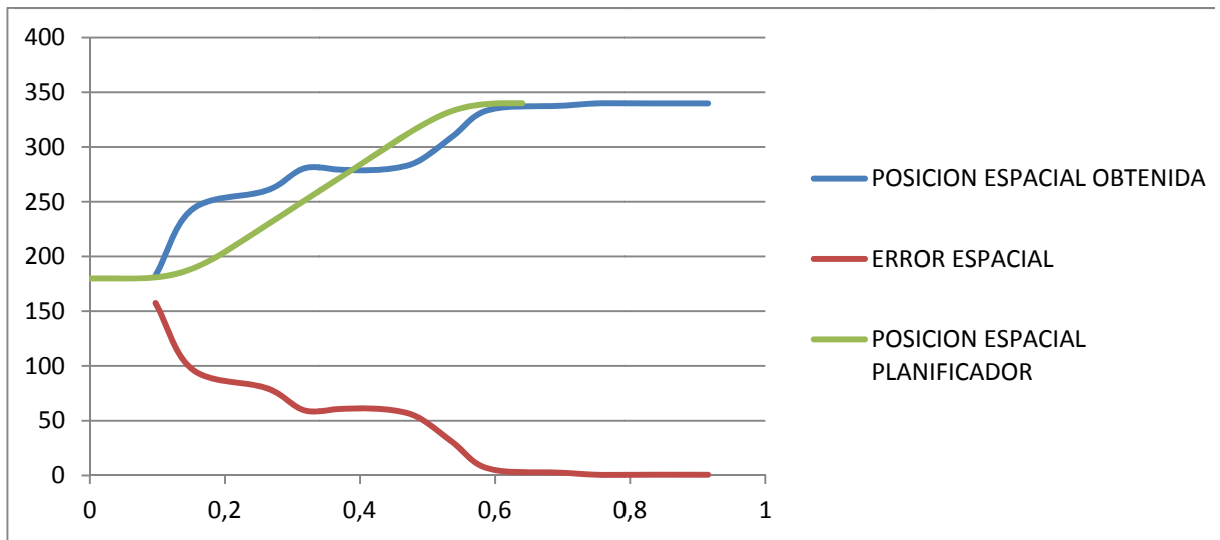
Figura 79. Prueba Experimental 1



Posición Inicial



Posición deseada



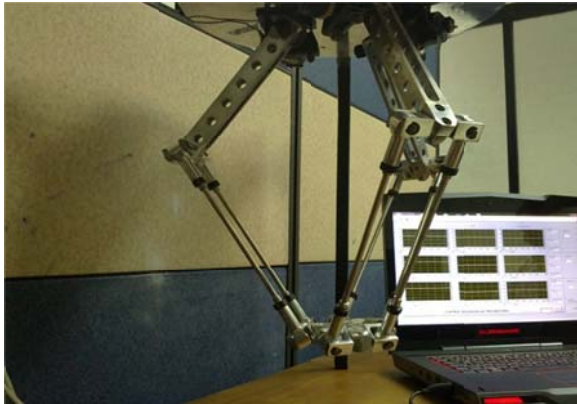
Trayectoria Seguida y Error Espacial

Fuente: Autores

Prueba Experimental 2

- Posición Inicial: (0, 0, 340)
- Posición Final: (100, 0, 340)
- Velocidad: 400 mm/s

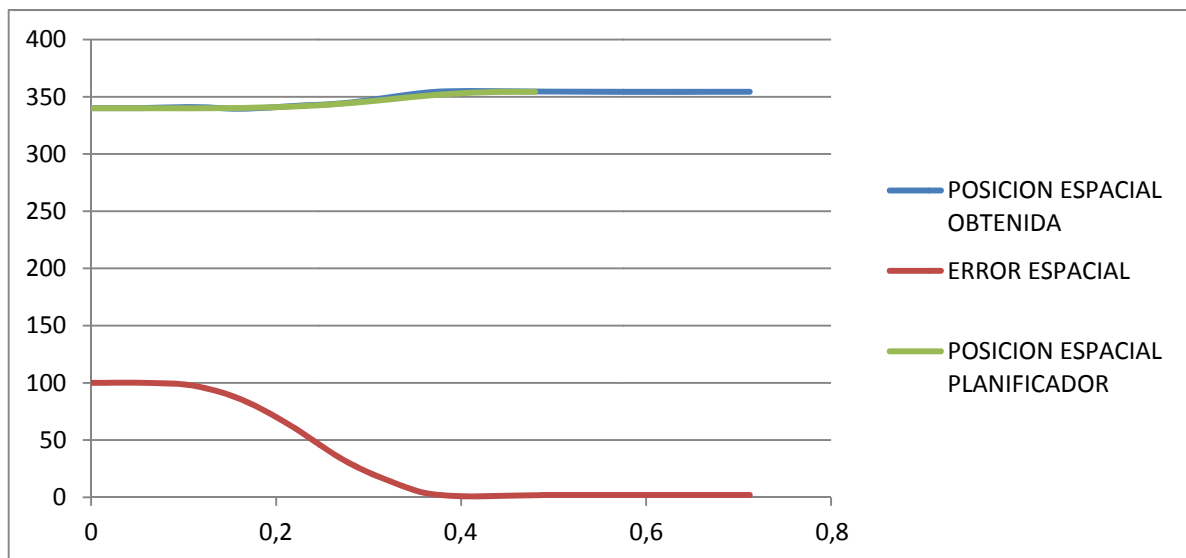
Figura 80. Prueba Experimental 1



Posición Inicial



Posición Deseada



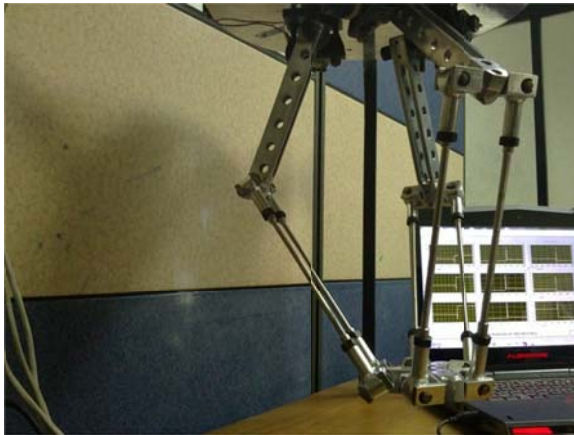
Trayectoria Seguida y Error Espacial

Fuente: Autores

Prueba Experimental 3

- Posición Inicial: (100, 0 ,340)
- Posición Final: (100, 0, 180)
- Velocidad: 400 mm/s

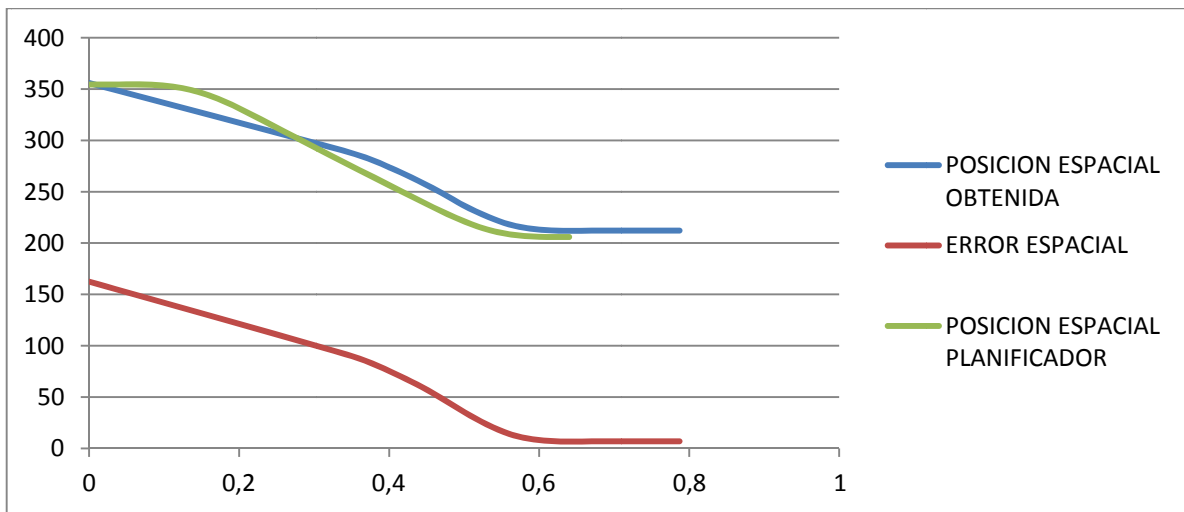
Figura 81. Prueba Experimental 3



Posición Inicial



Posición Deseada



Trayectoria Seguida y Error Espacial

Fuente: Autores

Prueba Experimental 4

- Posición Inicial: (100, 0, 340)
- Posición Final: (-100, 0, 340)
- Velocidad: 400 mm/s

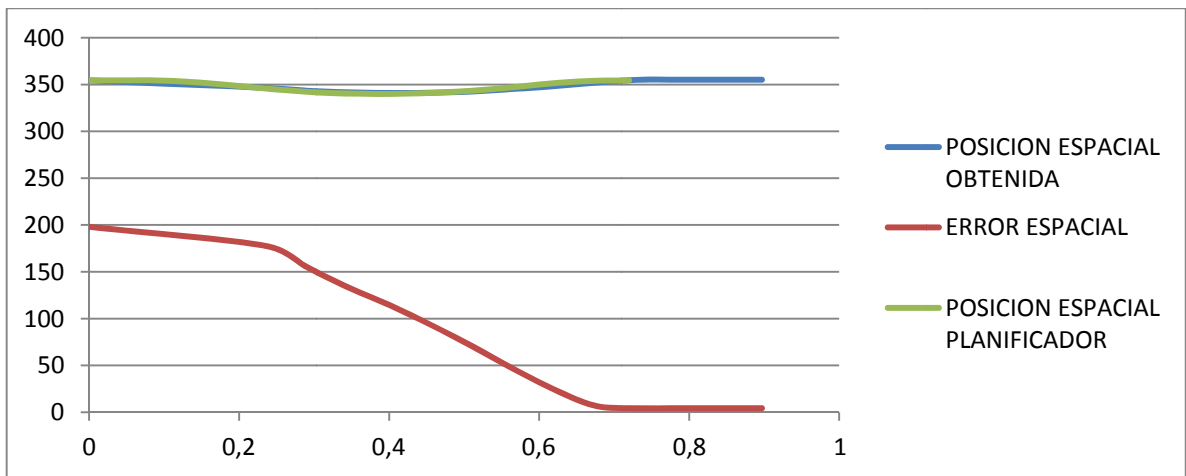
Figura 82. Prueba Experimental 4



Posición Inicial



Posición Deseada

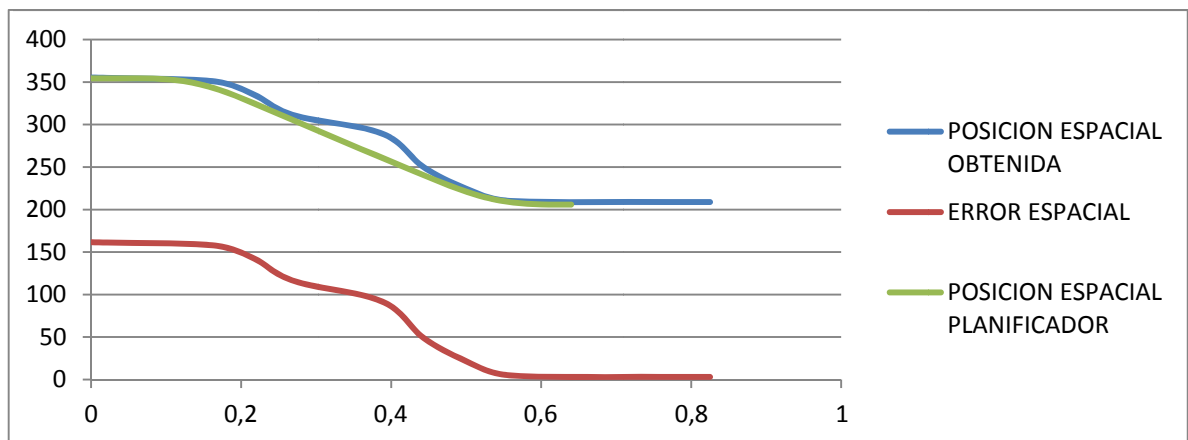
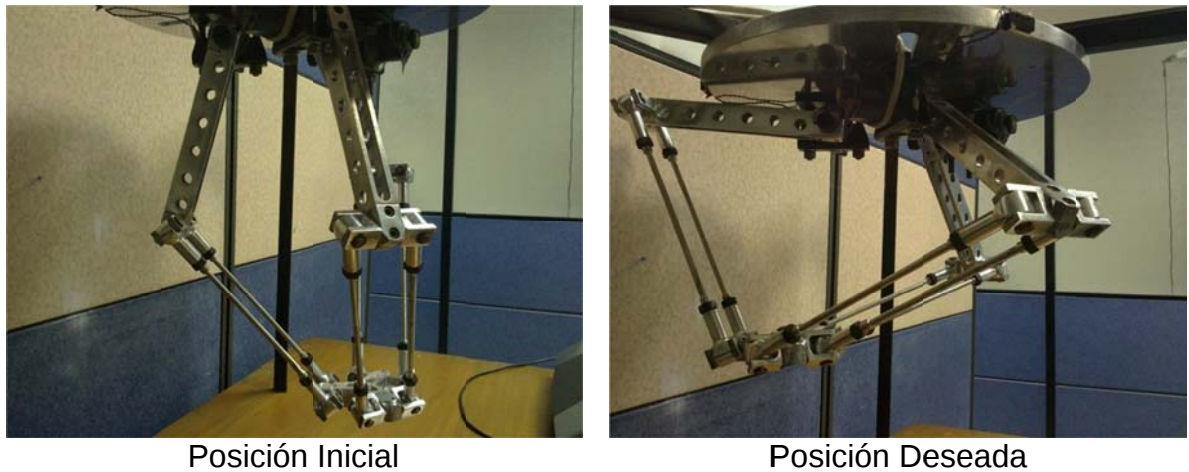


Trayectoria Seguida y Error Espacial
Fuente: Autores

Prueba Experimental 5

- Posición Inicial: (-100, 0, 340)
- Posición Final: (-100, 0, 180)
- Velocidad: 400 mm/s

Figura 83. Prueba Experimental 5



Trayectoria Seguida y Error Espacial
Fuente: Autores

En la Tabla 10 se resumen los resultados obtenidos en las ejecución de las trayectorias pudiendo observar que el error articular en régimen permanente es inferior a un grado, lo que comprueba que el esquema de control utilizado fue el adecuado.

En las gráficas de posición contra tiempo se pudo observar que la velocidad de operación fue acorde con la establecida en el momento de realizar la prueba, comprobando que el perfil de velocidad calculado por el planificador de trayectorias se cumple.

Tabla 10. Errores Articulares Experimentales

MOVIMIENTO	ERROR DE POSICIÓN ARTICULAR			ERROR MAX
	ARTICULACIÓN 1	ARTICULACIÓN 2	ARTICULACIÓN 3	
1	0.34	0.51	0.34	0.51
2	0.34	0.17	0.17	0.34
3	0.15	0.17	0.17	0.17
4	0.51	0.17	0.34	0.51
5	0.17	0.68	0	0.68
6	0.34	0.17	0.51	0.51
7	0.34	0	0.51	0.51
8	0.17	0.17	0	0.17
9	0.68	0.17	0.17	0.68
10	0.17	0.34	0.34	0.34

Fuente: Autores

Tabla 11. Errores de Posición Espacial

MOVIMIENTO	ERROR DE POSICION ESPACIAL	
	ERROR ESTIMADO (mm)	
1	0,58	
2	2,04	
3	4,30	
4	4,05	
5	5,12	
6	3,05	
7	4,22	
8	6,90	
9	3,48	
10	3,75	

Fuente: Autores

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto de grado ha presentado el diseño y construcción de un robot paralelo y su hardware de control. Este sistema fue construido con el propósito de desarrollar una herramienta de investigación en el campo del control de robots paralelos.

Se estudia el problema cinemático del robot diseñado. Se presentan los modelos cinemáticos directo e inverso.

Usando un modelo de simulación en ADAMS, se obtiene el par máximo de los motores para un conjunto de trayectorias del efector final y se valida el modelo dinámico. Los resultados de estas simulaciones permiten seleccionar comercialmente los motores a usar.

Se desarrollan un planificador de trayectorias que permite solucionar el problema cinemático inverso y directo del robot paralelo y generación de trayectorias suaves.

Se diseña el prototipo del robot Delta en aluminio y se consigue una excelente rigidez estructural con un peso relativamente bajo que permite trabajar con motores de menor fuerza.

Se implementa el control articular. Se describe la arquitectura de control del sistema y los procedimientos de implantación de control de posición y de movimiento del robot paralelo. Diferentes trayectorias han sido programadas y ejecutadas sobre el prototipo. Los resultados experimentales muestran que el robot es capaz de alcanzar velocidades superiores a 500 mm/s.

El prototipo contribuye al sector industrial de la región siendo un proyecto viable para la automatización de las empresas.

Dentro de los trabajos futuros y que están fuera de los objetivos planteados inicialmente para el desarrollo de este trabajo de grado, se proponen:

- Cambiar los motores por motores de tipo industrial que permitan alcanzar mayores velocidades con mejor precisión.
- Reemplazar el hardware de control por uno más robusto que permita la implementación de estrategias de control más complejas y en tiempo real.
- Desarrollar nuevos algoritmos de control que permitan la realización de tareas más complejas como control visual.

BIBLIOGRAFÍA

- Adept Technology, Inc. (s.f.). *adept*. Recuperado el 5 de Abril de 2011, de <http://www.adept.com/products/robots/parallel/quattro-s650h/general>
- Agrawal, S. K. (1991). *A Study of In-Parallel Manipulator Systems*. Stanford: Stanford University.
- Ángel Silva, L. (2005). *Control Visual de Robots Paralelos: Análisis, Desarrollo y Aplicación a la Plataforma Robotenis*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- Angulo Usategui, J. M. (2006). *Microcontroladores Avanzados dsPIC*. Madrid: Thomson.
- Asada, H., & Cro Granito, J. A. (1985). Kinematic and Static Characterization of Wrist Joints and Their Optimal Design. *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics*, 244-250.
- Autonics Corporation. (s.f.). *Autonics*. Recuperado el 14 de Mayo de 2011, de <http://www.autonics.com/index.php>
- Barrientos, A., Peñín, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). *Fundamentos de Robótica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Bruzzzone, L., Molfino, R. M., Zoppi, M., & Zurlo, G. (2003). The PRIDE Prototype: control layout of a parallel robot for assembly tasks. *Proceedings of the 22nd IASTED Intl. Conf. Modelling, Identification and Control MIC2003*, 606-611.
- Capek, K. (2004). *RUR: Robots Universales Rossum : obra en tres actos y un epílogo*. Barcelona: Círculo de Lectores.
- Carretero, J. A., Podhorodeski, R. P., & Gosselin, C. M. (2000). Kinematic analysis and optimization of a new three degree of freedom spatial parallel manipulator. *Trans. ASME, J.Mech. Des.*, 17-24.
- Cauchy, A. L. (1813). Deuxieme memoire sur les polygones et les polyedres. *Journal de l'École Polytechnique*, 87-98.
- Clavel, R. (1988). Delta, a fast robot with parallel geometry. *18th Int. Symposium on Industrial Robots*, 91-100.

- Clavel, R. (11 de Diciembre de 1990). *Patente nº 4.976.582*. Estados Unidos.
- Clavel, R. (1991). *Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté*. Lausanne, Switzerland: EPFL.
- Cox, D. J., & Tesar, D. (1989). The Dynamic Model of a Three-Degree-of-Freedom Parallel Robotic Shoulder Module. *Fourth International Conference on Advanced Robotics*.
- Di Gregorio, R., & Parenti-Castelli, V. (2001). Position analysis in analytical form of the 3-PSP mechanism. *ASME Journal of Mechanical Design* 123, 51-57.
- DirectIndustry. (s.f.). *DirectIndustry*. Recuperado el 13 de Abril de 2011, de <http://www.directindustry.es/prod/bosch-packaging-technology/robots-de-empaquetado-pick-and-place-61849-398135.html>
- École Polytechnique Fédérale de Lausanne. (19 de Octubre de 2006). *Reymond Clavel*. Recuperado el 23 de Mayo de 2011, de <http://people.epfl.ch/reymond.clavel>
- École Polytechnique Fédérale de Lausanne. (s.f.). *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*. Recuperado el 22 de Mayo de 2011, de <http://www.epfl.ch/>
- Electrónica Embajadores. (s.f.). *Electrónica Embajadores*. Recuperado el 15 de Mayo de 2011, de <http://www.electronicaembajadores.com/Productos/Detalle/16/IT41P05/final-de-carrera-peque-o-con-palanca>
- Fang, Y. F., & Huang, Z. (1997). Kinematics of a 3-DOF in-parallel actuated manipulator. *Beijing: Mechanical Press*.
- Freescale Semiconductor, Inc. (s.f.). *Freescale Semiconductor*. Recuperado el 1 de Mayo de 2011, de http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MC33932
- Gosselin, C. M., & Lavoie, E. (1993). On the kinematic design of spherical three-degree-of-freedom parallel manipulators. *The Int. J. of Robotics Research* vol. 12 No. 4, 394-402.
- Gosselin, C. M., Sefrioui, J., & Richard, M. J. (1992). Solutions polynomiales au problème de la cinématique directe des manipulateurs parallèles plans à trois degrés de liberté. *Mechanism and Machine Theory* Vol. 27, 107-119.

- Gough, E. V., & Whitehall, S. G. (1962). Universal tyre test machine. *Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress*, 117-137.
- Hesselbach, J., Plitea, N., Frindt, M., & Kusiek, A. (1998). A New Parallel Mechanism to Use for Cutting Convex Glass Panels. *In Advances in Robot Kinematics*, J. Lenarcic and M. L. Husty eds., 165–174.
- Huang, Z., & Li, Q. C. (2002). Some Novel Lower-Mobility Parallel Mechanisms. *ASME DETC/CIE*.
- Hunt, K. H. (1978). *Kinematic Geometry of Mechanisms*. New York: Oxford University Press.
- Hunt, K. H. (1983). Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design* 105, 705-712.
- Hydra-Power Systems, Inc. (s.f.). *Hydra-Power Systems*. Recuperado el 13 de Mayo de 2011, de <http://www.hydrapowersystems.com/custmachn.htm>
- Lee, K. M., & Arjuman, S. (1991). A 3-DOF micromotion inparallel actuated manipulator. *IEEE T rans. Robotic Automon*, 634–640.
- Lee, K. M., & Park, K. W. (1999). Kinematics and Dynamics Analysis of a Double Parallel Manipulator for Enlarging Workspace and Avoiding Singularities. *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 15, 1024–1034.
- Lee, K. M., & Shah, D. K. (1987). Kinematic analysis of a three degrees of freedom in-parallel actuated manipulator. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 345-350.
- Lee, K. M., & Shah, D. K. (1988). Dynamic analysis of a three degrees of freedom in-parallel actuated manipulator. *IEEE Tran. Rob. Autom.* 4, 361-367.
- Maxon Motor. (s.f.). *Maxon Motor*. Recuperado el 14 de Mayo de 2011, de <http://www.maxonmotor.es/>
- Mazzone, V. (Marzo de 2002). *The University of Newcastle, Australia*. Recuperado el 05 de 22 de 2011, de http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/Estr_Prac.pdf

- Mazzone, Virginia. (2002). Estructuras Prácticas de Control SISO. *Universidad Nacional de Quilmes*.
- McCallion, H., & Pham, D. T. (1979). The analysis of a six degrees of freedom workstation for mechanized assembly. *Proceedings of the 5th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, 611-616.
- Merlet, J. P., Perng, M. W., & Daney, D. (2000). Optimal Trajectory Planning of A 5-Axis Machine Tool Based on a 6-Axis Parallel Manipulator. *In Advances in Robot Kinematics, J. Lenarcic and M. M. Stanisic, eds.,*, 315–322.
- Microchip Technology Inc. (s.f.). *Microchip*. Recuperado el 28 de Abril de 2011, de http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en010065
- Microchip Technology Inc. (s.f.). *Microchip 33FJ128MC802*. Recuperado el 27 de Abril de 2011, de <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en532314>
- Microchip Technology Inc. (s.f.). *Microchip Data Sheet*. Recuperado el 26 de Abril de 2011, de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70291E.pdf>
- Midmarket CIO Definitions. (n.d.). *SearchCIO-Midmarket*. Retrieved Abril 5, 2011, from <http://searchcio-midmarket.techtarget.com/definition/robot>
- Miller, K. (1995). Experimental Verification of Modeling of Delta Robot dynamics by Direct Application of Hamilton's Principle. *IEEE International Conference of Robotics and Automation*, 532-537.
- Parallel Mechanisms Information Center. (s.f.). *ParalleMIC*. Recuperado el 5 de Abril de 2011, de <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>
- Pfreundschuh, G. H., Kumar, V., & Sugar, T. G. (1991). Design and Control of a Three-Degree-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator. *Proceedings of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1659-1664.
- Pololu Corporation. (s.f.). *Pololu Robotics & Electronics*. Recuperado el 1 de Mayo de 2011, de <http://www.pololu.com/catalog/product/1447>
- Robert Bosch GmbH. (s.f.). *BOSCH*. Recuperado el 01 de Mayo de 2011, de <http://www.boschpackaging.com/demaurex/eng/69604.asp>

- Rooney, J., & Ear, C. F. (1983). Manipulator postures and kinematic assembly configurations. *Proceedings of the Sixth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, 1014-1020.
- Rueda Florez, J. D. (2008). *Metodologia para el diseño de un robot paralelo industrial tipo delta*. Bucaramanga: Tesis de Grado.
- Semiconductors, P. (1994). *Power Semiconductor Applications*.
- Siemens Corporation, Inc. (s.f.). *Siemens Servo Motors*. Recuperado el 14 de Mayo de 2011, de <http://www.sea.siemens.com/us/Products/MotionControl/Products/Motors/ServoMotors/Pages/Default.aspx>
- Siemens Industry, Inc. (s.f.). *Siemens*. Recuperado el 14 de Mayo de 2011, de <http://www.sea.siemens.com>
- Song, S. -M., & Zhang, M. -D. (1995). A Study of Reactional Force Compensation Based on Three-Degree-of Freedom Parallel Platforms. *J. Robot Syst.* 12, 783-794.
- SparkFun. (2003). *SparkFun Electronics*. Recuperado el 28 de Abril de 2011, de <http://www.sparkfun.com/products/9716>
- Stamper, R. E., & Tsai, L. W. (1988). Two Dynamic Models of a Parallel Manipulator with Three Translational Degrees of Freedom. *Proceedings of the 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*.
- Stewart, D. (1965-1966). A Platform with Six Degrees of Freedom. *Proceedings Institution of Mechanical Engineers (UK) Vol 180 (Pt 1, No 15)*, 371-385.
- Technion - Israel Institute of Technology . (s.f.). *Robotics Laboratory*. Recuperado el 5 de Abril de 2011, de http://robotics.technion.ac.il/projects/ronen_project.html
- The ABB Group. (s.f.). *ABB FlexPicker*. Recuperado el 5 de Abril de 2011, de <http://www.abb.com/product/seitp327/cf1b0a0847a71711c12573f40037d5cf.aspx>
- The ABB Group. (s.f.). *ABB IRB 6400RF*. Recuperado el 5 de Abril de 2011, de <http://www.abb.com/product/seitp327/dcf857783322f1b9c125717900227526.aspx>

- University of Western Australia. (s.f.). *NUWAR History*. Recuperado el 26 de Abril de 2011, de http://school.mech.uwa.edu.au/~kmiller/NuwarWebPages-Zeike99/Web_Pages/History1.html
- Vischer, P., & Clavel, R. (2000). Kinematic calibration of the parallel Argos mechanism. *Int. J. Robotics Research Vol. 19 No. 1*, 5-11.
- Waldron, K. J., Raghavan, M., & Roth, B. (1989). Kinematics of a hybrid series–parallel manipulation system. *Trans. ASME, J. Mechanisms, Trans. and Automn in Des.*, 211-221.
- Wang, J., & Gosselin, C. M. (1996). Kinematic Analysis and Singularity Loci of Spatial Four-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator. *24th Biennial Mechanisms Conference*.
- Wang, J., & Gosselin, C. M. (1997). Kinematic Analysis and Singularity Representation of Spatial Five-Degree-of-Freedom Parallel Mechanisms. *Journal of Robotic Systems 14*, 851–869.
- Zunt, D. (2005). *Karel Capek website*. Recuperado el 11 de abril de 2011, de <http://capek.misto.cz/english/robot.html>

ANEXO 1

HOJA DE DATOS MC33932

Freescale Semiconductor
Advance Information

Document Number: MC33932
Rev. 3.0, 1/2009



5.0 A Throttle Control H-Bridge

The 33932 is a monolithic H-Bridge Power IC in a robust thermally enhanced package. The 33932 has two independent monolithic H-Bridge Power ICs in the same package. They are designed primarily for automotive electronic throttle control, but are applicable to any low-voltage DC servo motor control application within the current and voltage limits stated in this specification.

Each H-bridge in the 33932 is able to control inductive loads with currents up to 5.0 A peak. RMS current capability is subject to the degree of heatsinking provided to the device package. Internal peak-current limiting (regulation) is activated at load currents above 6.5 A ± 1.5 A. Output loads can be pulse width modulated (PWM-ed) at frequencies up to 11 kHz. A load current feedback feature provides a proportional (0.24% of the load current) current output suitable for monitoring by a microcontroller's A/D input. A Status Flag output reports under-voltage, over-current, and over-temperature fault conditions.

Two independent inputs provide polarity control of two half-bridge totem-pole outputs. Two independent disable inputs are provided to force the H-bridge outputs to tri-state (high-impedance off-state).

Features

- 8.0 to 28 V continuous operation (transient operation from 5.0 to 40 V)
- 235 m Ω maximum $R_{DS(ON)}$ @ 150°C (each H-Bridge MOSFET)
- 3.0 V and 5.0 V TTL / CMOS logic compatible inputs
- Over-current limiting (regulation) via internal constant-off-time PWM
- Output short-circuit protection (short to VPWR or GND)
- Temperature-dependant current-limit threshold reduction
- All inputs have an internal source/sink to define the default (floating input) states
- Sleep Mode with current draw < 50 μ A (each half with inputs floating or set to match default logic states)

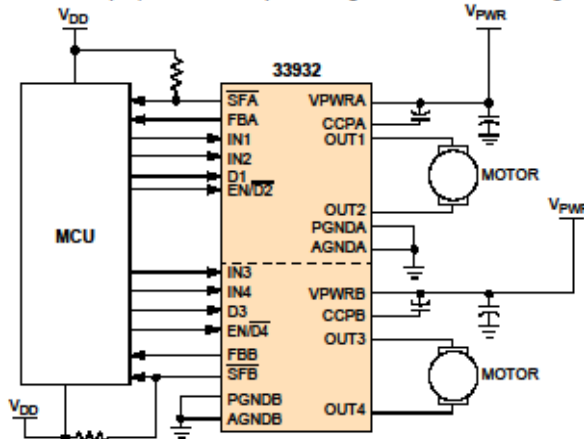


Figure 1. MC33932 Simplified Application Diagram

* This document contains certain information on a new product.
Specifications and information herein are subject to change without notice.
© Freescale Semiconductor, Inc., 2009. All rights reserved.



INTERNAL BLOCK DIAGRAM

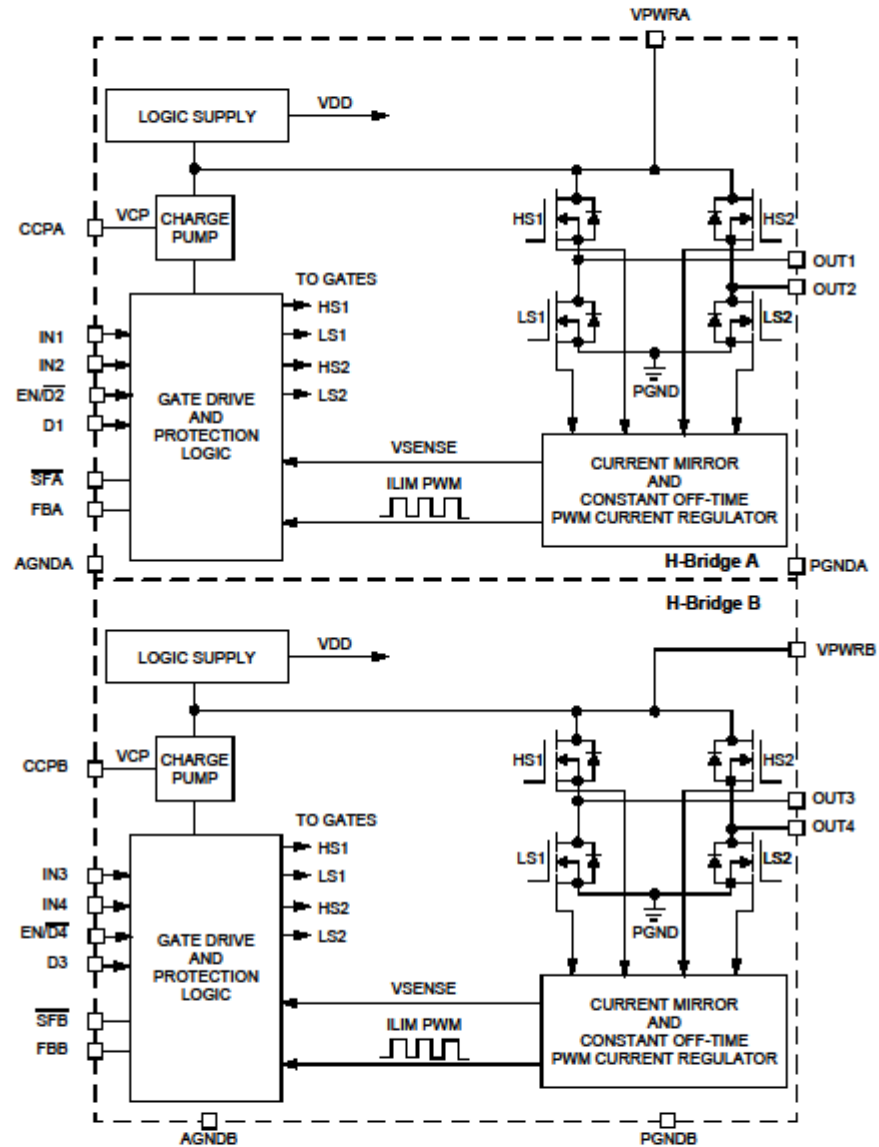


Figure 2. 33932 Simplified Internal Block Diagram

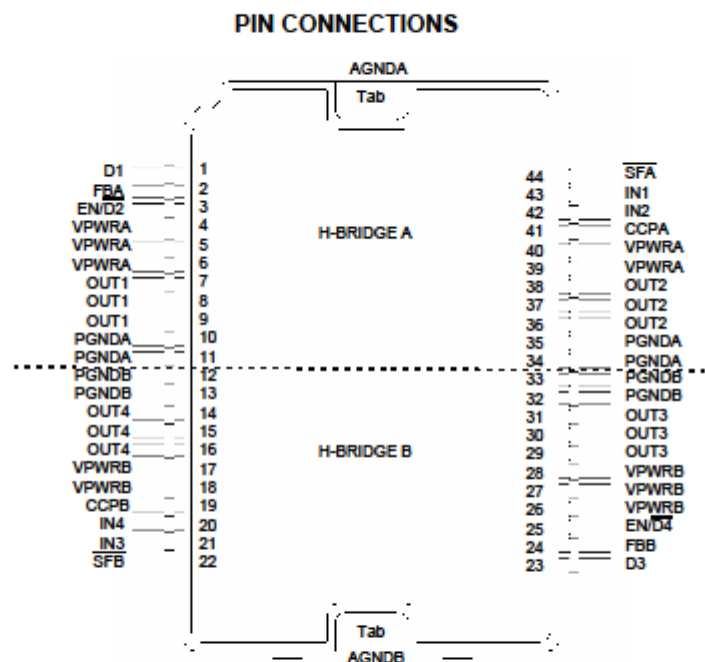


Figure 3. 33932 Pin Connections

Table 1. 33932 Pin Definitions

A functional description of each pin can be found in the Functional Description section beginning on page 11 .				
Pin	Pin Name	Pin Function	Formal Name	Definition
1	D1	Logic Input	Disable Input 1 (Active High)	When D1 is logic HIGH, both OUT1 and OUT2 are tri-stated. Schmitt trigger input with ~80 μ A source so default condition = disabled.
2	FBA	Analog Output	Feedback	H-Bridge A load current feedback output provides ground referenced 0.24% of the high side output current. (Tie to GND through a resistor if not used.)
3	EN/D2	Logic Input	Enable Input	When EN/D2 is logic HIGH, H-Bridge A is operational. When EN/D2 is logic LOW, the H-Bridge A outputs are tri-stated and H-bridge A is placed in Sleep Mode. (logic input with ~80 μ A sink so default condition = Sleep Mode.)
4-6,39,40	VPWRA VPWRB	Power Input	Positive Power Supply	These pins must be connected together physically as close as possible and directly soldered down to a wide, thick, low resistance supply plane on the PCB.
7-9	OUT1	Power Output	H-Bridge Output 1	H-bridge A source of high side MOSFET1 and drain of low side MOSFET1.
10,11,34,35	PGNDA	Power Ground	Power Ground	High-current power ground pins must be connected together physically as close as possible and directly soldered down to a wide, thick, low resistance ground plane on the PCB.
12,13,32,33	PGNDB	Power Ground	Power Ground	High-current power ground pins must be connected together physically as close as possible and directly soldered down to a wide, thick, low resistance ground plane on the PCB.

33932

Table 1. 33932 Pin Definitions (continued)

A functional description of each pin can be found in the Functional Description section beginning on page 11 .				
Pin	Pin Name	Pin Function	Formal Name	Definition
14-16	OUT4	Power Output	H-Bridge Output 4	H-bridge B Source of high side MOSFET2 and drain of low side MOSFET2.
17,18,26-28	VPWRB	Power Input	Positive Power Supply	These pins must be connected together physically as close as possible and directly soldered down to a wide, thick, low resistance supply plane on the PCB.
19	CCPB	Analog Output	Charge Pump Capacitor	External reservoir capacitor connection for H-bridge B internal charge pump; connected to VPWRB. Allowable values are 30 to 100 nF. Note: This capacitor is required for the proper performance of the device.
20	IN4	Logic Input	Input 4	Logic input control of OUT4.
21	IN3	Logic Input	Input 3	Logic input control of OUT3.
22	SFB	Logic Output - Open Drain	Status Flag B (Active Low)	H-bridge B open drain active LOW Status Flag output (requires an external pull-up resistor to V _{DD} . Maximum permissible load current < 0.5 mA. Maximum V _{CEsat} < 0.4 V @ 0.3 mA. Maximum permissible pull-up voltage < 7.0 V.)
23	D3	Logic Input	Disable Input 3 (Active High)	When D3 is logic HIGH, both OUT3 and OUT4 are tri-stated. Schmitt trigger input with ~80 μ A source so default condition = disabled.
24	FBB	Analog Output	Feedback B	H-bridge B load current feedback output provides ground referenced 0.24% of the high side output current. (Tie to GND through a resistor if not used.)
25	EN/D4	Logic Input	Enable Input	When EN/D4 is logic HIGH, H-bridge B is operational. When EN/D4 is logic LOW, the H-bridge B outputs are tri-stated and H-bridge B is placed in Sleep Mode. (logic input with ~80 μ A sink so default condition = Sleep Mode.)
29-31	OUT3	Power Output	H-Bridge Output 3	H-bridge B Source of high side MOSFET1 and drain of low side MOSFET1.
36-38	OUT2	Power Output	H-Bridge Output 2	H-Bridge A source of high side MOSFET2 and drain of low side MOSFET2.
41	CCPA	Analog Output	Charge Pump Capacitor	External reservoir capacitor connection for H-bridge A internal charge pump; connected to VPWRA. Allowable values are 30 to 100 nF. Note: This capacitor is required for the proper performance of the device.
42	IN2	Logic Input	Input 2	Logic input control of OUT2.
43	IN1	Logic Input	Input 1	Logic input control of OUT1; e.g., when IN1 is logic HIGH, OUT1 is set to VPWRA, and when IN1 is logic LOW, OUT1 is set to PGND. (Schmitt trigger input with ~80 μ A source so default condition = OUT1 HIGH.)
44	SFA	Logic Output - Open Drain	Status Flag (Active Low)	H-Bridge A open drain active LOW Status Flag output (requires an external pull-up resistor to V _{DD} . Maximum permissible load current < 0.5 mA. Maximum V _{CEsat} < 0.4 V @ 0.3 mA. Maximum permissible pull-up voltage < 7.0 V.)
TAB	AGNDA AGNDB	Analog Ground	Analog Signal Ground	The low-current analog signal ground must be connected to PGND via low-impedance path (<10 m Ω , 0 Hz to 20 kHz). Exposed TAB is also the main heatsinking path for the device.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

MAXIMUM RATINGS

Table 2. Maximum Ratings

All voltages are with respect to ground unless otherwise noted. Exceeding these ratings may cause a malfunction or permanent damage to the device. These parameters are not production tested.

Ratings	Symbol	Value	Unit
ELECTRICAL RATINGS			
Power Supply Voltage			V
Normal Operation (Steady-state)	$V_{PWR(SS)}$	-0.3 to 28	
Transient Overvoltage ⁽¹⁾	$V_{PWR(T)}$	-0.3 to 40	
Logic Input Voltage ⁽²⁾	V_{IN}	-0.3 to 7.0	V
SFA, SFB Output ⁽³⁾	V_{SF}	-0.3 to 7.0	V
Continuous Output Current ⁽⁴⁾	$I_{OUT(CONT)}$	5.0	A
ESD Voltage ⁽⁵⁾			V
Human Body Model	V_{ESD1}	±2000	
Machine Model	V_{ESD2}	±200	
Charge Device Model			
Corner Pins (1,9,17,25)		±750	
All Other Pins		±500	
THERMAL RATINGS			
Storage Temperature	T_{STG}	-65 to 150	°C
Operating Temperature ⁽⁶⁾			°C
Ambient	T_A	-40 to 125	
Junction	T_J	-40 to 150	
Peak Package Reflow Temperature During Reflow ^{(7), (8)}	T_{PPRT}	Note 8	°C
Approximate Junction-to-Case Thermal Resistance ⁽⁹⁾	R_{THJC}	<1.0	°C/W

Notes

- Device will survive repetitive transient over-voltage conditions for durations not to exceed 500ms @ duty cycle not to exceed 10%. External protection is required to prevent device damage in case of a reverse battery condition.
- Exceeding the maximum input voltage on IN1, IN2, IN3, IN4, EN/D2, EN/D4, D1, or D3 may cause a malfunction or permanent damage to the device.
- Exceeding the pull-up resistor voltage on the open drain SFA or SFB pin may cause permanent damage to the device.
- Continuous output current capability is dependent on sufficient package heatsinking to keep junction temperature $\leq 150^\circ\text{C}$.
- ESD testing is performed in accordance with the Human Body Model ($C_{ZAP} = 100\text{ pF}$, $R_{ZAP} = 1500\ \Omega$), Machine Model ($C_{ZAP} = 200\text{ pF}$, $R_{ZAP} = 0\ \Omega$), and the Charge Device Model (CDM), Robotic ($C_{ZAP} = 4.0\text{ pF}$).
- The limiting factor is junction temperature, taking into account the power dissipation, thermal resistance, and heat sinking provided. Brief non-repetitive excursions of junction temperature above 150°C can be tolerated, provided the duration does not exceed 30 seconds maximum. (Non-repetitive events are defined as not occurring more than once in 24 hours.)
- Pin soldering temperature limit is for 10 seconds maximum duration. Not designed for immersion soldering. Exceeding these limits may cause malfunction or permanent damage to the device.
- Freescall's Package Reflow capability meets Pb-free requirements for JEDEC standard J-STD-020C. For Peak Package Reflow Temperature and Moisture Sensitivity Levels (MSL), Go to www.freescale.com, search by part number [e.g. remove prefixes/suffixes and enter the core ID to view all orderable parts. (i.e. MC33xxx enter 33xxx)], and review parameters.
- Exposed heatsink pad plus the power and ground pins comprise the main heat conduction paths. The actual $R_{\theta JA}$ (junction-to-PC board) values will vary depending on solder thickness and composition and copper trace thickness and area. Maximum current at maximum die temperature represents ~16 W of conduction loss heating in the diagonal pair of output MOSFETs. Therefore, the $R_{\theta JA}$ must be $<5.0^\circ\text{C/W}$ for maximum current at 70°C ambient. Module thermal design must be planned accordingly.

33932

STATIC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Table 3. Static Electrical Characteristics

Characteristics noted under conditions $8.0\text{ V} \leq V_{PWR} \leq 28\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq 125^\circ\text{C}$, $GND = 0\text{ V}$, unless otherwise noted. Typical values noted reflect the approximate parameter means at $T_A = 25^\circ\text{C}$ under nominal conditions, unless otherwise noted. Specifications given for H-Bridge A apply symmetrically to H-Bridge B.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
POWER INPUTS (VPWR)					
Operating Voltage Range ⁽¹⁰⁾					V
Steady-state	$V_{PWR(SS)}$	8.0	—	28	
Transient ($t < 500\text{ ms}$) ⁽¹¹⁾	$V_{PWR(I)}$	—	—	40	
Quasi-Functional ($R_{DS(ON)}$ May Increase by 50%)	$V_{PWR(QF)}$	5.0	—	8.0	
Sleep State Supply Current ⁽¹²⁾	$I_{PWR(SLEEP)}$	—	—	50	μA
EN/D2 = Logic [0], IN1, IN2, D1 = Logic [1], and $I_{OUT} = 0\text{ A}$		—	—	—	
Standby Supply Current (Part Enabled)	$I_{PWR(STANDBY)}$	—	—	20	mA
$I_{OUT} = 0\text{ A}$, $V_{EN} = 5.0\text{ V}$		—	—	—	
Under-voltage Lockout Thresholds					
$V_{PWR(falling)}$	$V_{UVLO(ACTIVE)}$	4.15	—	—	V
$V_{PWR(rising)}$	$V_{UVLO(INACTIVE)}$	—	—	5.0	V
Hysteresis	$V_{UVLO(HYS)}$	150	200	350	mV
CHARGE PUMP					
Charge Pump Voltage (CP Capacitor = 33 nF), No PWM	$V_{CP} - V_{PWR}$				V
$V_{PWR} = 5.0\text{ V}$		3.5	—	—	
$V_{PWR} = 28\text{ V}$		—	—	12	
Charge Pump Voltage (CP Capacitor = 33 nF), PWM = 11 kHz	$V_{CP} - V_{PWR}$				V
$V_{PWR} = 5.0\text{ V}$		3.5	—	—	
$V_{PWR} = 28\text{ V}$		—	—	12	
CONTROL INPUTS					
Operating Input Voltage (IN1, IN2, D1, EN/D2, IN3, IN4, D3, EN/D4)	V_I	—	—	5.5	V
Input Voltage (IN1, IN2, D1, EN/D2, IN3, IN4, D3, EN/D4)					
Logic Threshold HIGH	V_{IH}	2.0	—	—	V
Logic Threshold LOW	V_{IL}	—	—	1.0	V
Hysteresis	V_{HYS}	250	400	—	mV
Logic Input Currents, $V_{PWR} = 8.0\text{ V}$	I_{IN}				μA
Input EN/D2, EN/D4 (Internal pull-downs), $V_{IH} = 5.0\text{ V}$		20	80	200	
Inputs IN1, IN2, D1, IN3, IN4, D3 (Internal pull-ups), $V_{IL} = 0\text{ V}$		-200	-80	-20	

Notes

- Device specifications are characterized over the range of $8.0\text{ V} \leq V_{PWR} \leq 28\text{ V}$. Continuous operation above 28 V may degrade device reliability. Device is operational down to 5.0V, but below 8.0 V the output resistance may increase by 50 percent.
- Device will survive the transient over-voltage indicated for a maximum duration of 500 ms. Transient not to be repeated more than once every 10 seconds.
- $I_{PWR(SLEEP)}$ is with Sleep Mode activated and EN/D2 = logic [0], and IN1, IN2, D1 = logic [1] or with these inputs left floating.

Table 3. Static Electrical Characteristics (continued)

Characteristics noted under conditions $8.0\text{ V} \leq V_{PWR} \leq 28\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq 125^\circ\text{C}$, $GND = 0\text{ V}$, unless otherwise noted. Typical values noted reflect the approximate parameter means at $T_A = 25^\circ\text{C}$ under nominal conditions, unless otherwise noted. Specifications given for H-Bridge A apply symmetrically to H-Bridge B.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
POWER OUTPUTS OUT1, OUT2					
Output-ON Resistance ⁽¹⁴⁾ , $I_{LOAD} = 3.0\text{ A}$ $V_{PWR} = 8.0\text{ V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $V_{PWR} = 8.0\text{ V}$, $T_J = 150^\circ\text{C}$ $V_{PWR} = 5.0\text{ V}$, $T_J = 150^\circ\text{C}$	$R_{DS(ON)}$	— — —	120 — —	— 235 325	mΩ
Output Current Regulation Threshold $T_J < T_{FB}$ $T_J \geq T_{FB}$ (Fold back Region - see Figure 9 and Figure 11) ⁽¹⁵⁾	I_{LIM}	5.2 —	6.5 4.2	8.0 —	A
High Side Short Circuit Detection Threshold (Short Circuit to Ground) ⁽¹³⁾	I_{SCH}	11	13	16	A
Low Side Short Circuit Detection Threshold (Short Circuit to V_{PWR}) ⁽¹³⁾	I_{SCL}	9.0	11	14	A
Output Leakage Current ⁽¹⁶⁾ , Outputs off, $V_{PWR} = 28\text{ V}$ $V_{OUT} = V_{PWR}$ $V_{OUT} = \text{Ground}$	$I_{OUTLEAK}$	— -60	— —	100 —	μA
Output MOSFET Body Diode Forward Voltage Drop, $I_{OUT} = 3.0\text{ A}$	V_F	—	—	2.0	V
Over-temperature Shutdown ⁽¹³⁾ Thermal Limit @ T_J Hysteresis @ T_J	T_{LIM} T_{HYS}	175 —	— 12	200 —	°C
Current Foldback at T_J ⁽¹³⁾	T_{FB}	165	—	185	°C
Current Foldback to Thermal Shutdown Separation ⁽¹³⁾	T_{SEP}	10	—	15	°C
HIGH SIDE CURRENT SENSE FEEDBACK					
Feedback Current (pin FB sourcing current) ⁽¹⁶⁾ $I_{OUT} = 0\text{ mA}$ $I_{OUT} = 300\text{ mA}$ $I_{OUT} = 500\text{ mA}$ $I_{OUT} = 1.5\text{ A}$ $I_{OUT} = 3.0\text{ A}$ $I_{OUT} = 6.0\text{ A}$	I_{FB}	0.0 0.0 0.35 2.86 5.71 11.43	— 270 0.775 3.57 7.14 14.29	50 750 1.56 4.28 8.57 17.15	μA μA mA mA mA mA
STATUS FLAG⁽¹⁷⁾					
Status Flag Leakage Current ⁽¹⁸⁾ $V_{SF} = 5.0\text{ V}$	I_{SFLEAK}	—	—	5.0	μA
Status Flag SET Voltage ⁽¹⁹⁾ $I_{SF} = 300\text{ μA}$	V_{SFLOW}	—	—	0.4	V

Notes

13. This parameter is Guaranteed By Design.
14. Output-ON resistance as measured from output to V_{PWR} and from output to GND.
15. Outputs switched OFF via D1 or EN/D2.
16. Accuracy is better than 20% from 0.5 A to 6.0 A. Recommended terminating resistor value: $R_{FB} = 270\text{ Ω}$.
17. Status Flag output is an open drain output requiring a pull-up resistor to logic V_{DD} .
18. Status Flag Leakage Current is measured with Status Flag HIGH and not SET.
19. Status Flag Set Voltage measured with Status Flag LOW and SET with $I_{SF} = 300\text{ μA}$. Maximum allowable sink current from this pin is $< 500\text{ μA}$. Maximum allowable pull-up voltage $< 7.0\text{ V}$.

DYNAMIC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Table 4. Dynamic Electrical Characteristics

Characteristics noted under conditions $8.0\text{ V} \leq V_{PWR} \leq 28\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq 125^\circ\text{C}$, $GND = 0\text{ V}$, unless otherwise noted. Typical values noted reflect the approximate parameter means at $T_A = 25^\circ\text{C}$ under nominal conditions, unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
TIMING CHARACTERISTICS					
PWM Frequency ⁽²⁰⁾	f_{PWM}	—	—	11	kHz
Maximum Switching Frequency During Current Limit Regulation ⁽²¹⁾	f_{MAX}	—	—	20	kHz
Output ON Delay ⁽²²⁾ $V_{PWR} = 14\text{ V}$	t_{DON}	—	—	18	μs
Output OFF Delay ⁽²²⁾ $V_{PWR} = 14\text{ V}$	t_{DOFF}	—	—	12	μs
I_{LIM} Output Constant-OFF Time ⁽²³⁾	t_A	15	20.5	32	μs
I_{LIM} Blanking Time ⁽²⁴⁾	t_B	12	16.5	27	μs
Disable Delay Time ⁽²⁵⁾	$t_{DDISABLE}$	—	—	8.0	μs
Output Rise and Fall Time ⁽²⁶⁾	t_F, t_R	1.5	3.0	8.0	μs
Short-circuit/Over-temperature Turn-OFF (Latch-OFF) Time ^{(27), (28)}	t_{FAULT}	—	—	8.0	μs
Power-ON Delay Time ⁽²⁸⁾	t_{POD}	—	1.0	5.0	ms
Output MOSFET Body Diode Reverse Recovery Time ⁽²⁸⁾	t_{RR}	75	100	150	ns
Charge Pump Operating Frequency ⁽²⁸⁾	f_{CP}	—	7.0	—	MHz

Notes

20. The maximum PWM frequency should be limited to frequencies $< 11\text{ kHz}$ in order to allow the internal high side driver circuitry time to fully enhance the high side MOSFETs.
21. The internal current limit circuitry produces a constant-OFF-time Pulse Width Modulation of the output current. The output load's inductance, capacitance, and resistance characteristics affect the total switching period (OFF-time + ON-time), and thus the PWM frequency during current limit.
22. * Output Delay is the time duration from 1.5V on the IN1 or IN2 input signal to the 20% or 80% point (dependent on the transition direction) of the OUT1 or OUT2 signal. If the output is transitioning HIGH-to-LOW, the delay is from 1.5 V on the input signal to the 80% point of the output response signal. If the output is transitioning LOW-to-HIGH, the delay is from 1.5 V on the input signal to the 20% point of the output response signal. See [Figure 4](#), page 9.
23. The time during which the internal constant-OFF time PWM current regulation circuit has tri-stated the output bridge.
24. The time during which the current regulation threshold is ignored so that the short-circuit detection threshold comparators may have time to act.
25. * Disable Delay Time measurement is defined in [Figure 5](#), page 9.
26. Rise Time is from the 10% to the 90% level and Fall Time is from the 90% to the 10% level of the output signal with $V_{PWR} = 14\text{ V}$, $R_{LOAD} = 3.0\text{ ohm}$. See [Figure 6](#), page 9.
27. Load currents ramping up to the current regulation threshold become limited at the I_{LIM} value (see [Figure 7](#)). The short-circuit currents possess a di/dt that ramps up to the I_{SCH} or I_{SCL} threshold during the I_{LIM} blanking time, registering as a short-circuit event detection and causing the shutdown circuitry to force the output into an immediate tri-state latch-OFF (see [Figure 8](#)). Operation in Current Limit mode may cause junction temperatures to rise. Junction temperatures above $\sim 160^\circ\text{C}$ will cause the output current limit threshold to "fold back", or decrease, until $\sim 175^\circ\text{C}$ is reached, after which the T_{LIM} thermal latch-OFF will occur. Permissible operation within this fold back region is limited to non-repetitive transient events of duration not to exceed 30 seconds (see [Figure 9](#)).
28. Parameter is Guaranteed By Design.

TIMING DIAGRAMS

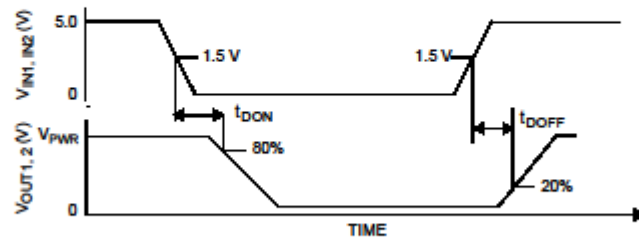


Figure 4. Output Delay Time

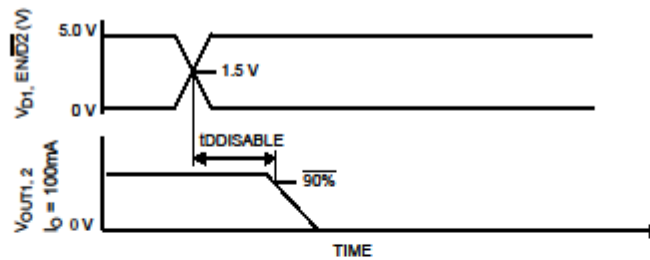


Figure 5. Disable Delay Time

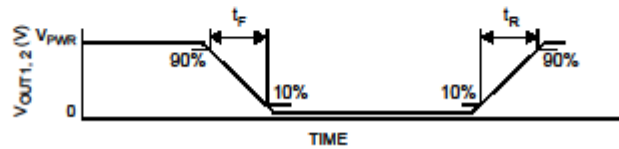


Figure 6. Output Switching Time

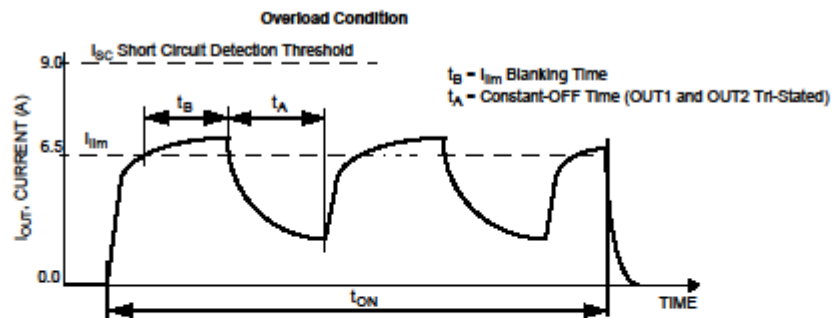


Figure 7. Current Limit Blanking Time and Constant-OFF Time

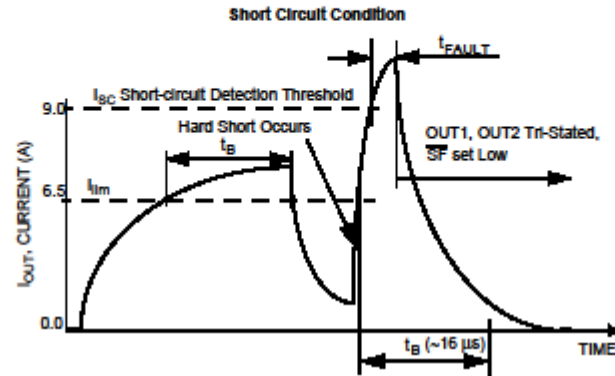


Figure 8. Short-circuit Detection Turn-Off Time t_{FAULT}

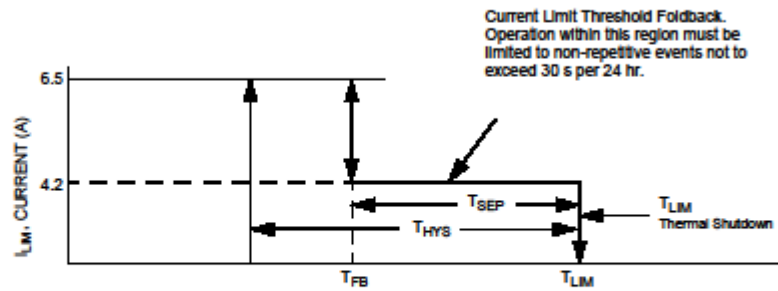


Figure 9. Output Current Limiting Foldback Region

FUNCTIONAL DESCRIPTION

INTRODUCTION

The 33932 has two identical H-Bridge drivers in the same package. The only connection that is shared internally is the Analog Ground (AGND). This description is given for the H-Bridge A half of the total device. However, the H-Bridge B half will exhibit identical behavior.

Numerous protection and operational features (speed, torque, direction, dynamic braking, PWM control, and closed-loop control) make the 33932 a very attractive, cost-effective solution for controlling a broad range of small DC motors. The 33932 outputs are capable of supporting peak DC load currents of up to 5.0 A from a 28 V V_{PWR} source. An internal charge pump and gate drive circuitry are provided that can support external PWM frequencies up to 11 kHz.

The 33932 has an analog feedback (current mirror) output pin (the FB pin) that provides a constant-current source ratioed to the active high side MOSFETs' current. This can be used to provide "real time" monitoring of output current to facilitate closed-loop operation for motor speed/torque control, or for the detection of open load conditions.

Two independent inputs, IN1 and IN2, provide control of the two totem-pole half-bridge outputs. Two independent disable inputs, D1 and EN/D2, provide the means to force the

H-bridge outputs to a high-impedance state (all H-bridge switches OFF). The EN/D2 pin also controls an enable function that allows the IC to be placed in a power-conserving Sleep Mode.

The 33932 has output current limiting (via constant OFF-time PWM current regulation), output short-circuit detection with latch-OFF, and over-temperature detection with latch-OFF. Once the device is latched-OFF due to a fault condition, either of the Disable inputs (D1 or EN/D2), or V_{PWR} must be "toggled" to clear the status flag.

Current limiting (Load Current Regulation) is accomplished by a constant-OFF time PWM method using current limit threshold triggering. The current limiting scheme is unique in that it incorporates a junction temperature-dependent current limit threshold. This means that the current limit threshold is "reduced to around 4.2 A" as the junction temperature increases above 160°C. When the temperature is above 175°C, over-temperature shutdown (latch-OFF) will occur. This combination of features allows the device to continue operating for short periods of time (<30 seconds) with unexpected loads, while still retaining adequate protection for both the device and the load.

FUNCTIONAL PIN DESCRIPTION

POWER GROUND AND ANALOG GROUND
(PGND AND AGND)

The power and analog ground pins should be connected together with a very low-impedance connection.

POSITIVE POWER SUPPLY (VPWR)

VPWR pins are the power supply inputs to the device. All VPWR pins must be connected together on the printed circuit board with as short as possible traces, offering as low an impedance as possible between pins.

STATUS FLAG (SF)

This pin is the device fault status output. This output is an active LOW open drain structure requiring a pull-up resistor to V_{DD} . The maximum V_{DD} is <7.0 V. Refer to [Table 5, Truth Table, page 15](#) for the SF Output status definition.

INPUT 1,2 AND DISABLE INPUT 1
(IN1, IN2, AND D1)

These pins are input control pins used to control the outputs. These pins are 3.0 V/5.0 V CMOS-compatible inputs with hysteresis. IN1 and IN2 independently control OUT1 and OUT2, respectively. D1 input is used to tri-state disable the H-bridge outputs.

When D1 is SET (D1 = logic HIGH) in the disable state, outputs OUT1 and OUT2 are both tri-state disabled; however, the rest of the device circuitry is fully operational and the supply $I_{PWR(standby)}$ current is reduced to a few mA. Refer to [Table 3, Static Electrical Characteristics, page 8](#).

H-BRIDGE OUTPUT (OUT1, OUT2)

These pins are the outputs of the H-bridge with integrated free-wheeling diodes. The bridge output is controlled using the IN1, IN2, D1, and EN/D2 inputs. The outputs have PWM current limiting above the I_{LIM} threshold. The outputs also have thermal shutdown (tri-state latch-OFF) with hysteresis as well as short circuit latch-OFF protection.

A disable timer (time t_{b}) is incorporated to distinguish between load currents that are higher than the I_{LIM} threshold and short circuit currents. This timer is activated at each output transition.

CHARGE PUMP CAPACITOR (CCP)

This pin is the charge pump output pin and connection for the external charge pump reservoir capacitor. The allowable value is from 30 to 100 nF. This capacitor must be connected from the CCP pin to the VPWR pin. The device cannot operate properly without the external reservoir capacitor.

ENABLE INPUT/DISABLE INPUT 2 (EN/D2)

The EN/D2 pin performs the same function as D1 pin, when it goes to a logic LOW the outputs are immediately tri-stated. It is also used to place the device in a Sleep Mode so as to consume very low currents. When the EN/D2 pin voltage is a logic LOW state, the device is in the Sleep Mode. The device is enabled and fully operational when the EN pin voltage is logic HIGH. An internal pull-down resistor maintains the device in Sleep Mode in the event EN is driven through a high-impedance I/O or an unpowered microcontroller, or the EN/D2 input becomes disconnected.

FEEDBACK (FB)

The 33932 has a feedback output (FB) for "real time" monitoring of H-bridge high-side output currents to facilitate closed-loop operation for motor speed and torque control.

The FB pin provides current sensing feedback of the H-bridge high side drivers. When running in the forward or reverse direction, a ground-referenced 0.24% of load current is output to this pin. Through the use of an external resistor to ground, the proportional feedback current can be converted to a proportional voltage equivalent and the controlling microcontroller can "read" the current proportional voltage with its analog-to-digital converter (ADC). This is intended to provide the user with only first-order motor current feedback for motor torque control. The resistance range for the linear operation of the FB pin is $100\ \Omega < R_{FB} < 300\ \Omega$.

If PWM-ing is implemented using the disable pin input (only D1), a small filter capacitor ($\sim 1.0\ \mu\text{F}$) may be required in parallel with the R_{FB} resistor to ground for spike suppression.

FUNCTIONAL INTERNAL BLOCK DESCRIPTION

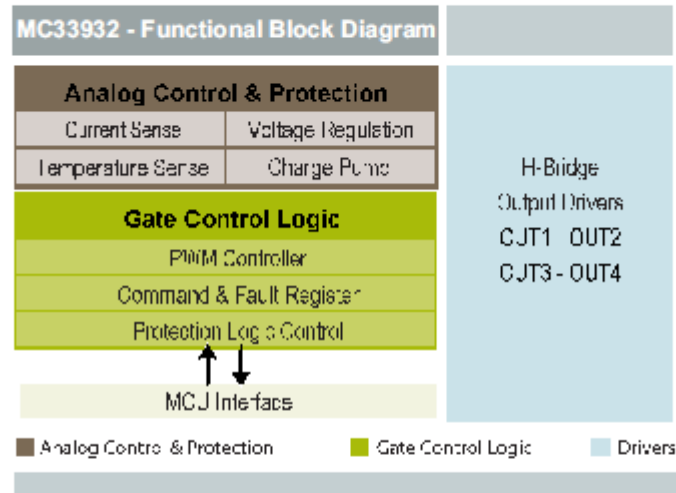


Figure 10. Functional Internal Block Diagram

ANALOG CONTROL AND PROTECTION CIRCUITRY:

An on-chip voltage regulator supplies the internal logic. The charge pump provides gate drive for the H-Bridge MOSFETs. The Current and Temperature sense circuitry provides detection and protection for the output drivers. Output undervoltage protection shuts down the MOSFETs.

GATE CONTROL LOGIC:

The 33932 is a monolithic H-Bridge Power IC designed primarily for any low-voltage DC servo motor control application within the current and voltage limits stated for the device. Two independent inputs provide polarity control of

two half-bridge totem-pole outputs. Two independent disable inputs are provided to force the H-Bridge outputs to tri-state (high impedance off-state).

H-BRIDGE OUTPUT DRIVERS: OUT1 AND OUT2

The H-Bridge is the power output stage. The current flow from OUT1 to OUT2 is reversible and under full control of the user by way of the Input Control Logic. The output stage is designed to produce full load control under all system conditions. All protective and control features are integrated into the Control and Protection blocks. The sensors for current and temperature are integrated directly into the output MOSFET for maximum accuracy and dependability.

FUNCTIONAL DEVICE OPERATION

OPERATIONAL MODES

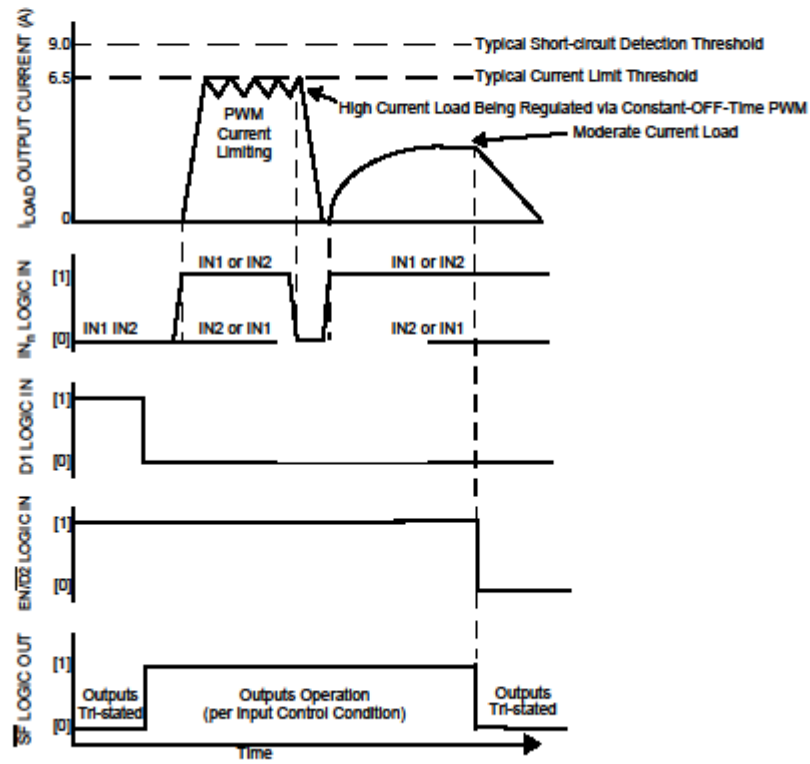


Figure 11. Operating States

LOGIC COMMANDS AND REGISTERS

Table 5. Truth Table

The tri-state conditions and the status flag are reset using D1 or $\overline{D2}$. The truth table uses the following notations: L = LOW, H = HIGH, X = HIGH or LOW, and Z = High-impedance. All output power transistors are switched off.

Device State	Input Conditions				Status	Outputs	
	EN/ $\overline{D2}$	D1	IN1	IN2	SF	OUT1	OUT2
Forward	H	L	H	L	H	H	L
Reverse	H	L	L	H	H	L	H
Free Wheeling Low	H	L	L	L	H	L	L
Free Wheeling High	H	L	H	H	H	H	H
Disable 1 (D1)	H	H	X	X	L	Z	Z
IN1 Disconnected	H	L	Z	X	H	H	X
IN2 Disconnected	H	L	X	Z	H	X	H
D1 Disconnected	H	Z	X	X	L	Z	Z
Under-voltage Lockout ⁽²⁹⁾	H	X	X	X	L	Z	Z
Over-temperature ⁽³⁰⁾	H	X	X	X	L	Z	Z
Short-circuit ⁽³⁰⁾	H	X	X	X	L	Z	Z
Sleep Mode EN/ $\overline{D2}$	L	X	X	X	H	Z	Z
EN/ $\overline{D2}$ Disconnected	Z	X	X	X	H	Z	Z

Notes

29. In the event of an under-voltage condition, the outputs tri-state and status flag is SET logic LOW. Upon under-voltage recovery, status flag is reset automatically or automatically cleared and the outputs are restored to their original operating condition.
30. When a short-circuit or over-temperature condition is detected, the power outputs are tri-state latched-OFF Independent of the input signals and the status flag is latched to logic LOW. To reset from this condition requires the toggling of either D1, EN/ $\overline{D2}$, or V_{PWR} .

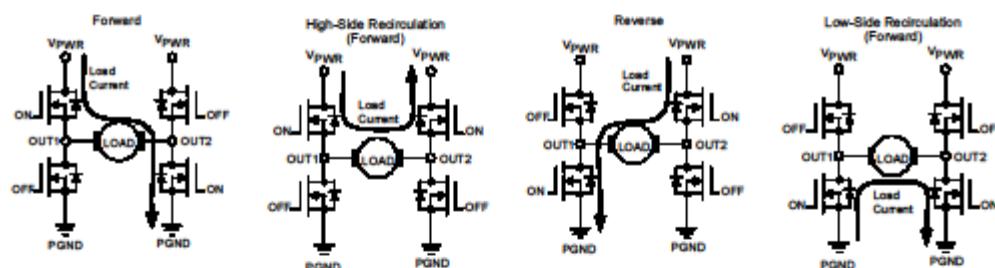


Figure 12. 33932 Power Stage Operation

PROTECTION AND DIAGNOSTIC FEATURES

SHORT-CIRCUIT PROTECTION

If an output short-circuit condition is detected, the power outputs tri-state (latch-OFF) independent of the input (IN1 and IN2) states, and the fault status output flag (SF) is SET to logic LOW. If the D1 input changes from logic HIGH to logic LOW, or if the EN/D2 input changes from logic LOW to logic HIGH, the output bridge will become operational again and the fault status flag will be reset (cleared) to a logic HIGH state.

The output stage will always switch into the mode defined by the input pins (IN1, IN2, D1, and EN/D2), provided the device junction temperature is within the specified operating temperature range.

INTERNAL PWM CURRENT LIMITING

The maximum current flow under normal operating conditions should be less than 5.0 A. The instantaneous load currents will be limited to I_{LIM} via the internal PWM current limiting circuitry. When the I_{LIM} threshold current value is reached, the output stages are tri-stated for a fixed time (T_A) of 20 μ s typical. Depending on the time constant associated with the load characteristics, the output current decreases during the tri-state duration until the next output ON cycle occurs.

The PWM current limit threshold value is dependent on the device junction temperature. When $-40^\circ\text{C} < T_J < 160^\circ\text{C}$, I_{LIM} is between the specified minimum/maximum values. When T_J exceeds 160°C , the I_{LIM} threshold decreases to 4.2A. Shortly above 175°C the device over-temperature circuit will detect T_{LIM} and an over-temperature shutdown will occur. This feature implements a graceful degradation of operation before thermal shutdown occurs, thus allowing for intermittent unexpected mechanical loads on the motor's gear-reduction train to be handled.

Important Die temperature excursions above 150°C are permitted only for non-repetitive durations <30 seconds. Provision must be made at the system level to prevent prolonged operation in the current-foldback region.

OVER-TEMPERATURE SHUTDOWN AND HYSTERESIS

If an over-temperature condition occurs, the power outputs are tri-stated (latched-OFF) and the fault status flag (SF) is SET to logic LOW.

To reset from this condition, D1 must change from logic HIGH to logic LOW, or EN/D2 must change from logic LOW to logic HIGH. When reset, the output stage switches ON again, provided that the junction temperature is now below the over-temperature threshold limit minus the hysteresis.

Important Resetting from the fault condition will clear the fault status flag. Powering down and powering up the device will also reset the 33932 from the fault condition.

OUTPUT AVALANCHE PROTECTION

If VPWR were to become an open circuit, the outputs would likely tri-state simultaneously due to the disable logic. This could result in an unclamped inductive discharge. The VPWR input to the 33932 should not exceed 40 V during this transient condition, to prevent electrical overstress of the output drivers. This can be accomplished with a zener clamp or MOV, and/or an appropriately valued input capacitor with sufficiently low ESR (see Figure 13).

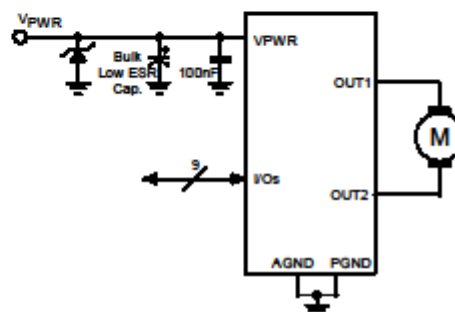


Figure 13. Avalanche Protection

TYPICAL APPLICATIONS

INTRODUCTION

A typical application schematic is shown in [Figure 14](#). For precision high-current applications in harsh, noisy

environments, the V_{PWR} by-pass capacitor may need to be substantially larger.

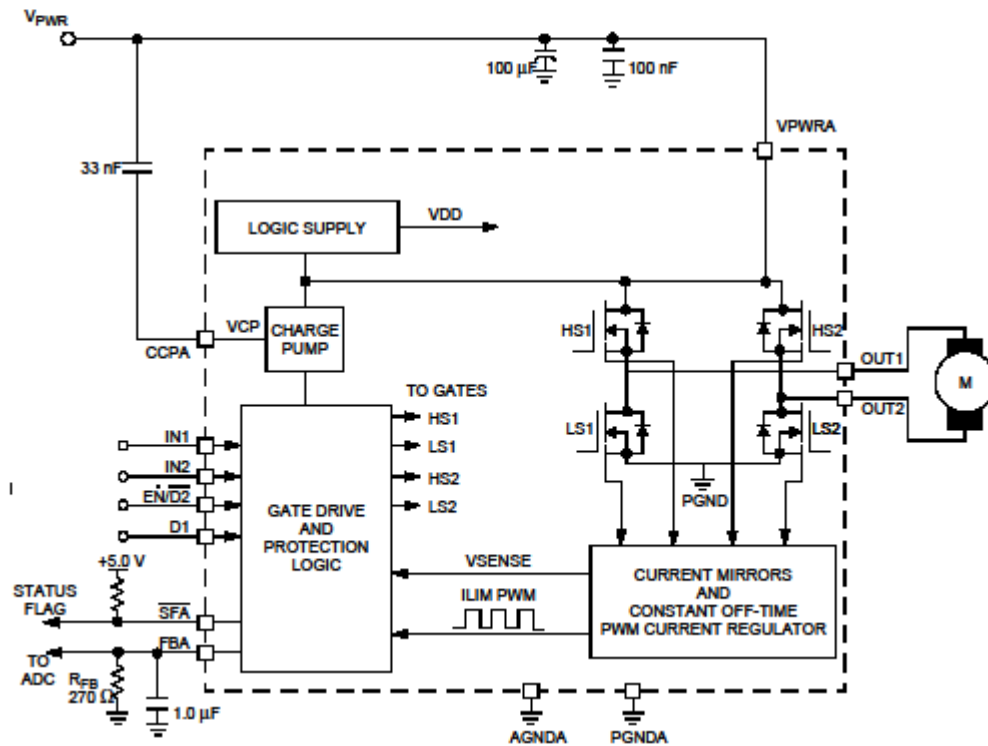
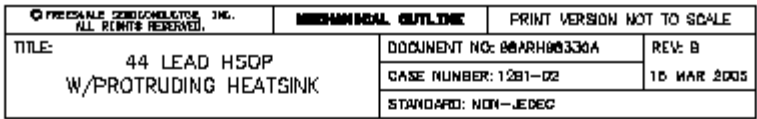


Figure 14. 33832 Typical Application Schematic 1/2 Device



Analog Integrated Circuit Device Data
Freescale Semiconductor