

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

MODELACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DELTA

JORGE ANDRÉS ARRIETA TORRES
ANDRÉS FELIPE PEÑA NAVARRO

CARTAGENA DE INDIAS D. T. & C.
MAYO 2012

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA**

MODELACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DELTA

**JORGE ANDRÉS ARRIETA TORRES
ANDRÉS FELIPE PEÑA NAVARRO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero
mecatrónico**

DIRECTOR

PH.D EUGENIO YIME RODRIGUEZ

CARTAGENA DE INDIAS D. T. & C.

MAYO 2012

Cartagena de Indias, D. T. y C., 15 de Mayo de 2012

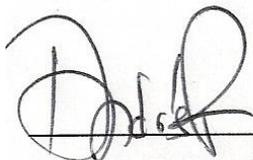
Señores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
Facultad de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Comité Evaluador de Trabajos de Grado

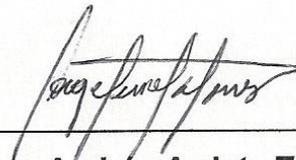
Cordial saludo.

Por medio de la presente, nos permitimos someter a su consideración el trabajo de grado titulado **“MODELACION, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ROBOT DELTA”**, de los estudiantes **JORGE ANDRÉS ARRIETA TORRES** y **ANDRÉS FELIPE PEÑA NAVARRO** para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico.

Cordialmente,



Andrés Felipe Peña Navarro



Jorge Andrés Arrieta Torres

Cartagena de Indias, D. T. y C., 15 de Mayo de 2012

Señores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

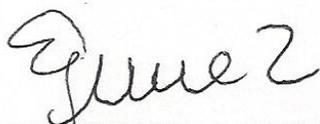
Facultad de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Comité Evaluador de Trabajos de Grado

Cordial saludo.

Por medio de la presente, nos permitimos someter a su consideración el trabajo de grado titulado "**MODELACION, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ROBOT DELTA**", elaborado por los estudiantes **JORGE ANDRÉS ARRIETA TORRES** y **ANDRÉS FELIPE PEÑA NAVARRO**, en el que me desempeño como Director.

Cordialmente.



PhD. Eugenio Yime Rodriguez

Director de trabajo de grado

ARTICULO 105

La universidad Tecnológica de Bolívar se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados y no pueden ser explotados comercialmente sin aprobación.

Los autores expresan sus **agradecimientos** a:

Agradecimiento a Dios todopoderoso porque de Él nace la sabiduría, por brindarme su ayuda a cada instante en este arduo camino, y por darme la vida y poder gozar en ella de la grata compañía de mis padres Jorge Arrieta Dávila y Lilibiana Torres Meza.

A mi hermana Lilibiana Arrieta Torres quien con su carisma y compañía ha sido mi motivación de salir adelante, durante mucho tiempo.

Al profesor Eugenio Yime, quien con sus respuestas acertadas y su disposición, consolido no solo un ideal, sino el esfuerzo de muchos años de estudio.

A todos mis amigos que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de este trabajo de grado, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

JORGE ANDRÉS ARRIETA TORRES

A usted, estimado tutor, ejemplo a seguir, profe Yime, por su inestimable aporte a mi carrera profesional. Gracias por todos los conocimientos transmitidos.

A Jorge, mi amigo. ¡Este nos quedó mejor que el submarino, 1er semestre!©

A mi madre Candelaria que acompaña cada paso y motiva cada meta de mi vida.

A mi tía Yovi, mi primera maestra.

A Kathe, mi mayor razón para sonreír.

Y sobre todo a Dios, cuando el final nunca llegaba mostraste la luz. Me diste disciplina para terminar este trabajo.

ANDRÉS FELIPE PEÑA NAVARRO

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.3. RESUMEN.....	5
1.4. ANTECEDENTES.....	7
1.5. ESTADO DEL ARTE.....	10
2. MARCO TEORICO.....	16
2.1. Hardware.....	16
2.2. Software.....	16
2.3. PWM y Control por PWM.....	16
2.4. Encoders.....	18
2.5. Actuadores.....	19
2.6. Motor eléctrico.....	19
2.7. Adquisición de datos.....	20
2.8. PC104.....	20
2.9. Control cinemático.....	21
2.10. Funcionamiento del control cinemático.....	21
2.11. Programación.....	22
2.12. Señales análogas.....	22
2.13. Señales digitales.....	22
2.14. Conversión ADC y DAC.....	23
2.15. Sistema automático de control.....	24
2.16. Controlador PID.....	24
2.17. Sintonización de PID.....	26

3.	DISEÑO DEL ROBOT.....	27
3.1.	Descripción Del Proceso De Diseño.....	27
3.2.	Descripción de la arquitectura del Robot Delta.....	29
3.3.	Diseño mecánico del Robot Delta.....	30
	3.3.1. Cinemática directa e inversa	30
	3.3.2. Análisis Cinemático del Robot Delta.....	30
	3.3.3. Análisis del espacio de trabajo.....	33
	3.3.4. Diseño CAD.....	39
	3.3.5. Selección de motores y criterios de selección.....	41
	3.3.5.1. Cálculo de pares RMS.....	45
	3.3.5.2. Cálculo de velocidades angulares.....	47
	3.3.5.3. Necesidades para la selección.....	48
	3.3.5.4. Verificación de la selección.....	53
	3.3.6. Construcción del modelo.....	53
3.4.	Diseño electrónico.....	59
	3.4.1. Tarjeta PC104.....	60
	3.4.2. Circuito de control del motor.....	60
	3.4.3. Diseño de módulos de encoders.....	65
	3.4.4. Características generales de los circuitos integrados.....	66
	3.4.5. Diseño de las PCB.....	70
	3.4.6. Diseño final del hardware de control.....	73
3.5.	Prueba del Hardware de control.....	75
3.6.	Control del Robot.....	78
	3.6.1. Sistema de control.....	78
	3.6.2. Control básico de posición.....	78
	3.6.3. Planificador de trayectorias.....	82
	3.6.3.1. Planificador.....	83
	3.6.3.2. Path_planning.....	85
	3.6.3.3. Joint_motion.....	85
	3.6.3.4. Joint_data.....	85

3.6.3.5. invkin_delta.....	85
3.6.3.6. Expordata.....	86
3.6.3.7. Delta_graphics.....	86
3.6.4. Control de posición con planificadores de trayectoria.....	88
4. RESULTADOS.....	95
4.1. Descripción del robot construido.....	95
4.2. Descripción de los resultados del hardware y el sistema de control.....	100
4.3. Optimización del Robot Delta.....	104
4.3.1. Optimización del espacio de trabajo y de las dimensiones del robot.....	104
4.3.2. Optimización mecánica de las partes del robot.....	104
4.3.3. Optimización del hardware electrónico y el control de los actuadores.....	104
4.4. Conclusiones.....	106
4.5. Trabajos futuros.....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS.....	111

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Diseño Virtual vs Diseño real definitivo.....	6
Figura 1.2. Plataforma móvil patentada J.E. Gwinnett.....	7
Figura 1.3. Robot paralelo patentado por W.L.V. Pollard.....	7
Figura 1.4. Plataforma Gough.....	8
Figura 1.5. Multi-Axis Simulation Table (MAST) referenciada por V.E. Gough.	8
Figura 1.6. Plataforma de Stewart.....	9
Figura 1.7. Variantes de la estructura tipo Delta.....	10
Figura 1.8. Demarex's Line-Placer installation for the packaging of pretzels in an industrial bakery (courtesy of Demarex).....	11
Figura 1.9. SurgiScope in action at the Surgical Robotics Lab, Humboldt-University at Berlin (courtesy of Prof. Dr. Tim C. Lueth).....	12
Figura 1.10. Hitachi Seiki's Delta robots for pick-and-place and drilling (courtesy of Hitachi Seiki).....	13
Figura 1.11. ABB Flexible Automation's IRB 340 FlexPicker (courtesy of ABB Flexible Automation).....	14
Figura 1.12. Two of the three Delta robot models offered by SIG Pack Systems, C33 and CE33 (courtesy of SIG Pack Systems).....	15
Figura 2.1. Control del motor por PWM.....	17
Figura 2.2. Señales PWM variando el ciclo útil de trabajo.....	18
Figura 2.3. Señal analógica digitalizada ADC y reconstruida DCA.....	24
Figura 2.4. Estructura de un controlador PID.	25
Figura 3.1 Estructura del Robot Delta en sistema de coordenadas de referencia.....	29
Figura 3.2. Análisis cinemático inverso del Robot Delta.....	31
Figura 3.3. Vista general del espacio de trabajo del Robot Delta.....	34

Figura 3.4. Resultado de simulación espacio de trabajo.	35
Figura 3.5. Espacio de trabajo batería de simulaciones No 1.....	36
Figura 3.6. Espacio de trabajo batería de simulaciones No 2.....	37
Figura 3.7. Espacio de trabajo batería de simulaciones No 3.....	38
Figura 3.8. Modelo virtual Delta I.....	39
Figura 3.9. Modelo virtual Delta II.....	40
Figura 3.10. Modelo virtual Delta III.....	40
Figura 3.11. Modelo virtual Delta IV.....	41
Figura 3.12. Simulación de desplazamientos del Robot Delta en condiciones extremas del espacio de trabajo.	42
Figura 3.13. Par desarrollado en el motor 1 durante simulación de puntos extremos.....	44
Figura 3.14. Par desarrollado en el motor 2 durante simulación de puntos extremos.....	44
Figura 3.15. Par desarrollado en el motor 3 durante simulación de puntos extremos.....	44
Figura 3.16. Velocidades del motor 1 durante la simulación de espacio de trabajo.....	47
Figura 3.17. Velocidades del motor 2 durante la simulación de espacio de trabajo.....	48
Figura 3.18. Velocidades del motor 3 durante la simulación de espacio de trabajo.....	48
Figura 3.19. Reductor seleccionado: Planetary Gearhead GP 22C Ø22 mm, 0.5 - 2.0 Nm, Ceramic Versión.....	50
Figura 3.20. Motor seleccionado: 2342 L012 CR 22 Ø23 mm, DC – Micromotor, conmutación de grafito.....	51
Figura 3.21. Encoder.....	52
Figura 3.22. Especificación de diseño de los ejes.....	54
Figura 3.23. Fabricación de los ejes de las articulaciones.	54
Figura 3.24. Fabricación de los ejes de las articulaciones.	55

Figura 3.25. Especificaciones de diseño de los acoples.	55
Figura 3.26. Maquina CNC en el proceso de construcción de los acoples.....	56
Figura 3.27. Devastado en la construcción de los acoples.	56
Figura 3.28. Acoples de los motores.	56
Figura 3.29. Ejes de las articulaciones.	57
Figura 3.30. Fabricación de los cojinetes de los brazos superiores.....	57
Figura 3.31. Robot Delta construido.....	58
Figura 3.32. Esquema del Hardware de control.....	59
Figura 3.33. Tarjeta de control PC104.....	60
Figura 3.34. Amplificador instrumental.....	61
Figura 3.35. Módulo de dirección.....	62
Figura 3.36. Módulo de Magnitud.....	62
Figura 3.37. Modulo de control on/off de corriente.....	63
Figura 3.38. Conexión en paralelo del L298.	64
Figura 3.39. Circuito integrado L298 conectado en paralelo para control del motor, y sección de amplificación.....	65
Figura 3.40. Conexión de encoders.....	66
Figura 3.41. Diagrama de Pines del L298.....	67
Figura 3.42. Diagrama del circuito del L298.....	67
Figura 3.43. Temporizador NE555.....	68
Figura 3.44. Amplificador operacional LM324.....	69
Figura 3.45. Amplificador operacional LM358.....	69
Figura 3.46. OR exclusivas 74LS386.....	70
Figura 3.47. PCB de control de motor.....	71
Figura 3.48. Modelo de pistas para quemar en la baquelita.....	71
Figura 3.49. Baquelita con el routing elaborado, y agujeros hechos.....	71
Figura 3.50. Posicionamiento de algunos componentes.....	72
Figura 3.51. Posicionamiento de bases de integrados.....	72
Figura 3.52. Tarjetas de control de motores terminadas.....	72

Figura 3.53. Modelo de tratamiento de señales de la PC104. (Izquierda) layout y (derecha) modelo final.....	73
Figura 3.54. Módulo de control de motores integrado.....	74
Figura 3.55. Tarjetas en el interior de la caja contenedora.....	74
Figura 3.56. Sistema de control para la prueba de las PCBs en Simulink.....	75
Figura 3.57. Resultados de las pruebas al hardware de control.....	76
Figura 3.58. Resultados de la prueba del hardware de control. Señales del control.....	77
Figura 3.59. Diagrama de control del Robot Delta.....	79
Figura 3.60. Diagrama de bloques del sistema de control del Robot Delta en Simulink.....	80
Figura 3.61. Simulación de prueba del Robot Delta.....	80
Figura 3.62. Posiciones de los encoders en la simulación.....	81
Figura 3.63. Lectura de los encoders durante la simulación.....	81
Figura 3.64. Lectura de error de posición (izquierda) y salida del PID (Derecha).....	82
Figura 3.65. Argumentos de entrada “Delta geometry” del planificador.....	83
Figura 3.66. Parámetros de los recorridos lineales y circulares para la trayectoria del efector final.....	84
Figura 3.67. Operaciones de exportación de datos y generación de graficas del planificador de trayectorias.....	84
Figura 3.68. Datos de entrada de la función invkin_delta.....	85
Figura 3.69. Cinemática inversa para cada brazo del Robot Delta.....	86
Figura 3.70. Diagrama de flujo del planificador para generar trayectorias.....	87
Figura 3.71. Esquema del sistema de control con planificadores.....	88
Figura 3.72. Sistema de control con planificadores de trayectoria.....	89
Figura 3.73. Bloques de control para las posiciones de cada motor.....	90
Figura 3.74. Desplazamientos de la trayectoria planificada.....	91
Figura 3.75. Desplazamientos sensados del encoder 1.....	92
Figura 3.76. Desplazamientos sensados del encoder 2.....	92

Figura 3.77. Desplazamientos sensados del encoder 3.....	93
Figura 3.78. Errores de posición para cada motor en grados.....	93
Figura 3.79. Señales de control del controlador PI.....	94
Figura 4.1. Base superior.....	95
Figura 4.2. Soporte para eje superior.....	96
Figura 4.3. Efecto Final.....	97
Figura 4.4. Brazo superior, Diseño CAD y prototipo construido.....	97
Figura 4.5. Terminales del brazo superior.....	98
Figura 4.6. Modelo CAD y prototipo del brazo inferior.....	98
Figura 4.7. Eje de las articulaciones.....	99
Figura 4.8. Modelo construido del Robot Delta.....	99
Figura 4.9. Simulación del módulo de control de dirección.....	100
Figura 4.10. Simulación del módulo de magnitud.....	101

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1. Dimensiones del Robot Delta para un alcance de 60 cm, simulaciones No. 1	36
Tabla 3.2. Dimensiones del Robot Delta para un alcance de 60 cm, simulaciones No. 2	37
Tabla 3.3. Dimensiones del Robot Delta para un alcance de 60 cm, simulaciones No. 3	38
Tabla 3.4. Par Pico en motores para piezas en acero.....	43
Tabla 3.5. Par Pico en motores para piezas en aluminio.....	43
Tabla 3.6. Par RMS en motores para piezas en acero.....	46
Tabla 3.7. Par RMS en motores para piezas en aluminio.....	46
Tabla 3.8. Velocidad angular pico en motores.....	47
Tabla 3.9. Especificaciones del reductor.....	50
Tabla 3.10. Especificaciones del motor.....	51
Tabla 3.11. Especificaciones del encoder.....	52

1. INTRODUCCIÓN.

Un robot paralelo es todo aquel robot cuyo efector final, con n grados de libertad, se encuentra unido a la base por más de una cadena cinemática independiente [1]. En 1985, el profesor Reymond Clavel de la EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) irrumpe la normalidad con la idea brillante de usar paralelogramos para construir una estructura paralela robusta con tres grados de libertad de translación y un rotatorio [2]. Al contrario de las publicaciones científicas hasta el momento, su inspiración era verdaderamente original. 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. Su diseño fue patentado por ABB y expiró en el año 2010 [3].

El Robot Paralelo Delta, se compone de tres brazos que se mueven empleando un actuador (motor DC) respectivo, conectados en un extremo a las juntas de articulación en la base en donde los tres motores están soportados, la base está por encima del área de trabajo. Los otros extremos de los brazos están conectados a una pequeña plataforma triangular EF (efector final) que se traslada por la acción conjunta de los brazos.

La característica principal del diseño de los robots paralelos es el uso de paralelogramos en los brazos que mantienen la orientación del efector final, lo que hace que su diseño cinemático sea especial pues permite realizar traslación sin cambiar su orientación. Estas condiciones hacen que los Robots Delta tengan una mayor rigidez (estabilidad estructural), tengan la capacidad de manipular cargas muy superiores a su propio peso (mayor relación carga/peso), posean una alta eficiencia energética (mayor relación carga/potencia), cuenten con más precisión y

puedan trabajar a mayor velocidad de operación que cualquier otro tipo de estructura robótica.

Sin embargo, los Robots Delta tienen una estructura más elaborada y por tanto requieren de un análisis cinemático, un diseño, y unos esquemas de control de mayor complejidad, esto sumado al limitado espacio de trabajo, genera un freno en el desarrollo temprano de estos sistemas paralelos.

La expiración de la patente, su importancia industrial e importancia académica plantea la necesidad de investigar a nivel nacional y enseñar en las universidades sobre este tipo de arquitecturas robóticas, en especial el estudio de problemas puntuales como maximizar el espacio de trabajo, optimizar las dimensiones del robot, análisis de singularidades y control. En Colombia se han hecho trabajos sobre análisis estructural y el control de robots paralelos [4], [5] y optimización del diseño [6].

En las siguientes secciones se describe los logros alcanzados en la Universidad Tecnológica de Bolívar durante el diseño mecatrónico y construcción de un Robot Delta, para el cual se ha realizado el estudio de cinemática directa e inversa, espacio de trabajo, interferencias y singularidades. También se presenta la metodología utilizada para la selección de los motores, el algoritmo de control, se describe el proceso de diseño mecánico y electrónico, la construcción del prototipo, para terminar con los resultados, alcances y conclusiones obtenidas en el presente trabajo de grado.

1.1. OBJETIVO GENERAL.

Modelar, diseñar y construir un robot tipo paralelo DELTA controlado por ordenador, con fines académicos para su utilización en un futuro laboratorio de mecatrónica en la Universidad Tecnológica de Bolívar.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Investigar sobre la literatura existente del estado del arte de los Robots Delta, antecedentes y patente.
- Diseñar un modelo teórico de los mecanismos del Robot Delta.
- Realizar un modelo virtual a partir del teórico en una herramienta CAD, para realizar simulaciones y obtener información de su comportamiento.
- Efectuar un análisis cinemático y dinámico del Robot Delta, para el desarrollo de un planificador de trayectorias, selección de motores, dimensionamiento ideal, y selección del espacio de trabajo del mismo.
- Realimentar los errores para perfeccionar el diseño virtual del Robot Delta hasta concluir en un diseño definitivo.
- Desarrollar el hardware de control.
- Programar el algoritmo de control y una interface amigable para el control del Robot Delta mediante un GUI (Graphical User Interface) en Matlab Simulink.
- Construir un modelo real del Robot Delta para su puesta en marcha y utilización en la Universidad Tecnológica de Bolívar
- Elaboración de un artículo científico.

1.3. RESUMEN.

Título:

MODELACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DELTA.

Objetivo:

Modelar, diseñar y construir un robot tipo paralelo Delta controlado por ordenador, con fines académicos para su utilización en un futuro laboratorio de mecatrónica en la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Descripción:

La ingeniería mecatrónica es la sinergia de la mecánica, electrónica, sistemas de control e informática. La clave de los sistemas mecatrónicos es la integración de estas áreas en un proceso de diseño, dando como resultado un producto mucho mejor que al realizarlo con la implementación de estas por separado, un ejemplo de un sistema mecatrónico es el Robot Delta.

El Robot Delta, es un tipo de robot manipulador paralelo, (hay más de una cadena cinemática desde la base hasta el efector final). Cuenta con tres grados de libertad (traslación, en dirección del eje X, Y o Z). Se compone de tres brazos que se mueven empleando un motor respectivo, conectados a las juntas de articulación en la base. Los tres motores están fijos a la base, que está por encima del área de trabajo, siendo capaz de moverse más rápido porque no tiene que llevar el peso de los motores.

Desde la base fija los tres brazos se extienden por actuación de los motores, los otros extremos de los brazos están conectados a una pequeña plataforma triangular (efector final) que se trasladara por la actuación conjunta de los brazos. La característica principal del diseño es el uso de paralelogramos en los brazos

que mantiene la orientación del efector final, lo que hace que su diseño cinemático sea especial pues permite realizar traslación sin cambiar su orientación.

Metodología:

Se inicia realizando una investigación del estado del arte de los robots delta para la selección de un modelo apropiado de diseño. Se analizan la cinemática y dinámica del robot para entender su funcionalidad basados en un modelo CAD del mismo. A continuación se obtienen a partir de la cinemática, dinámica y programas de simulación las variables necesarias para la selección de los componentes que requiera el Delta en lo que a funcionalidad se refiere, para después desarrollar el hardware de control, programación del algoritmo de control y ley de control del robot en una interfaz de ordenador en MatLab. Se finaliza con un montaje de un prototipo de pruebas de componentes mecánicos y electrónicos para lograr una optimización de ambos y desarrollar los sistemas de control necesario para el dispositivo, depuración y realimentación de errores para concluir en un diseño definitivo.

Diseño virtual y real construido:



a) Vista CAD del Robot Delta

b) Vista real del Robot Delta

Figura 1.1. Diseño Virtual vs Diseño real definitivo

1.4. ANTECEDENTES.

La aparición de los robots paralelos se remonta a 1931 con la presentación de patentes para aplicaciones generales.

1931: el modelo patentado por J.E. Gwinnett [7] el cual consistía en una plataforma móvil en la que se instalaría los asientos de un teatro y se recrearían los movimiento de acuerdo a la película. Este modelo no se llegó a construir.

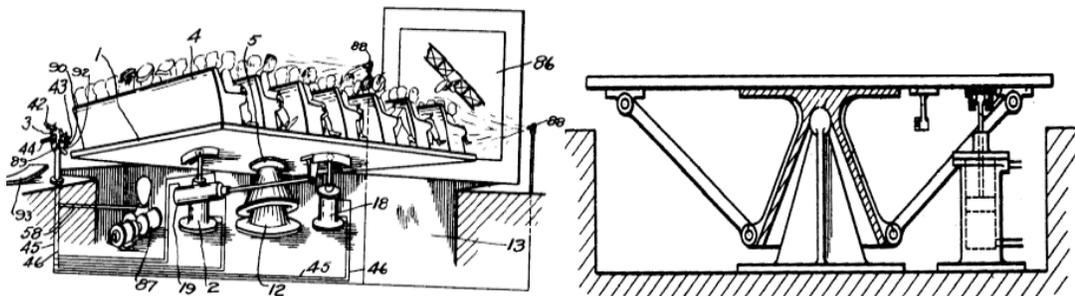


Figura 1.2. Plataforma móvil patentada J.E. Gwinnett.

Fuente: Imagen Original US Patent No. 1,789,680

1942: W.L.V. Pollard [8] patentó un robot paralelo (Position-Controlling Apparatus) para pintar automóviles. Este robot no llegó a construirse.

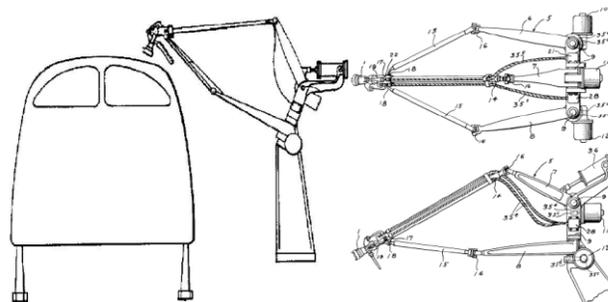
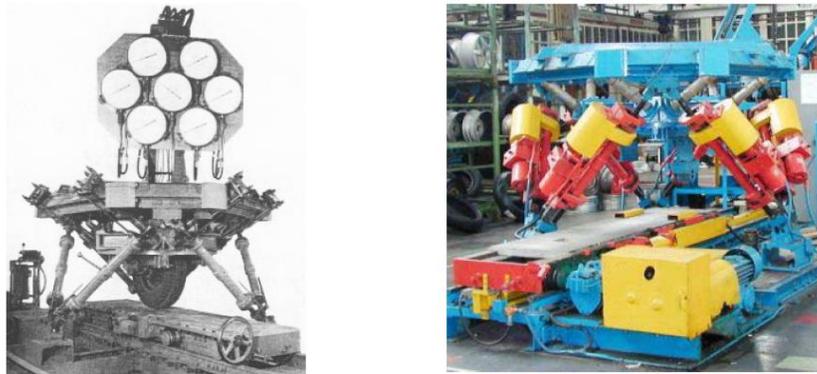


Figura 1.3. Robot paralelo patentado por W.L.V. Pollard.

Fuente: Imagen US Patent No. 2,286,571

1947: V.E. Gough [9] ideó un robot paralelo con seis actuadores lineales formando una estructura de octaedro. Posteriormente fue utilizada para el ensayo de neumáticos de aviación. Esta plataforma es normalmente conocida como plataforma de Stewart cuando se le debería conocer como plataforma de Gough.



a) Robot ideado por V. E. Gough. b) Modelo actual (Mike Beeson Dunlop Tyres 2000).

Figura 1.4. Plataforma Gough.

Fuente: Gough and Whitehall, 1962 “Universal tire test machine”.

Durante la presentación del modelo tipo octaedro, V. E. Gough citaba modelos de mesas accionadas por seis actuadores lineales, tres verticales y tres horizontales. Estos diseños son conocidos como MAST (Multi-Axis Simulation Table).



Figura 1.5. Multi-Axis Simulation Table (MAST) referenciada por V.E. Gough.

Fuente: RTS, University of Kassel

1965: motivado por el crecimiento de la industria aeronáutica en D. Stewart [10] se propuso un nuevo mecanismo para ser usado como simulador de vuelo. Un sistema basado en la maquina patentada por Gough en 1947. Poseía una parte móvil con seis grados de libertad, los cuales eran movidos por los deslizamientos de seis actuadores lineales. Esta máquina que se llamó plataforma de Stewart no se construyó y su aparición se dio mucho después de la plataforma de Gough.

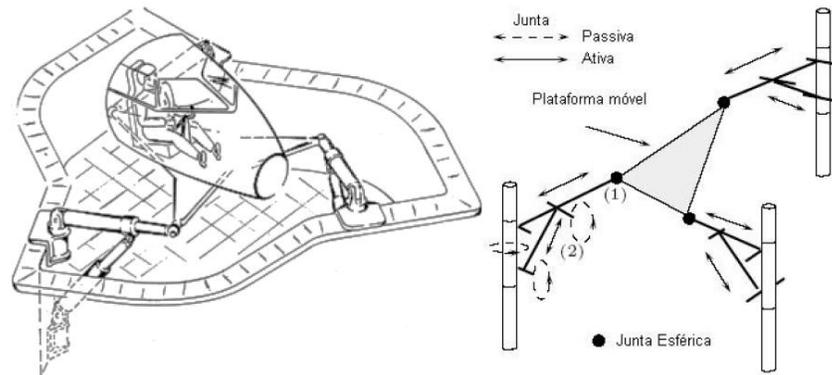


Figura 1.6. Plataforma de Stewart.

Fuente: "Stewart platform" (Proc. IMechE, 1965-66).

1.5. ESTADO DEL ARTE.

El diseño del Robot Delta está cubierto por una familia de 36 patentes de las cuales las más importantes son la patente WIPO la cual fue emitida el 18 de junio, 1987 (WO 87/03528), la patente norteamericana emitida el 11 de diciembre, 1990 (US 4,976,582), y la patente Europea emitida el 17 de julio, 1991 (EP 0 250 470). En total, estas patentes protegen las invenciones en Estados Unidos, Canadá, Japón y la mayoría de los países del occidente de Europa. Las patentes no especifican la forma por la cual la estructura del Delta actúa a fin de incorporar los diseños básicos así como sus variantes.

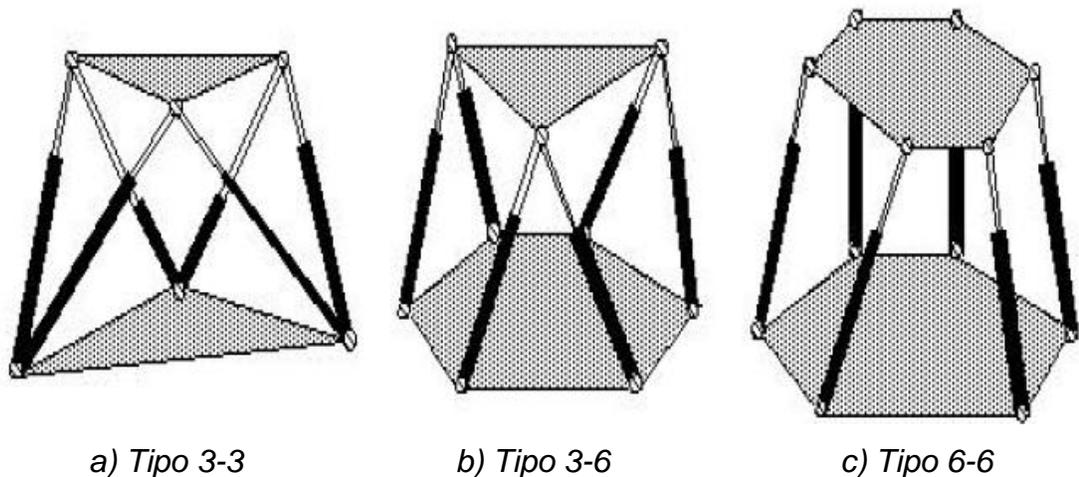


Figura 1.7. Variantes de la estructura tipo Delta

La historia del Robot Delta es larga, complicada e intrigante. Todo comenzó en 1983 cuando los dos hermanos suecos Marc-Oliver y Pascal Demareux crearon la compañía Demareux establecida en Romanel sur de Luisiana, Suiza. Después de comprar la licencia del Robot Delta en 1987, su principal objetivo se convirtió en comercializar el robot paralelo para industrias de empaquetamiento.

Después de muchos años, Demarex exitosamente ocupa un lugar importante en este difícil mercado. El producto de la compañía pasa a través de una serie de modificaciones. Cuatro versiones de aplicación fueron comercializadas bajo el nombre de Pack-Placer, Line-Placer, Top-Placer y Presto. Demarex expresa ahora tener 500 Robots Delta en todo el mundo.



Figura 1.8. Demarex's Line-Placer installation for the packaging of pretzels in an industrial bakery (courtesy of Demarex)

Fuente: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>

La patente del Robot Delta fue comprada por los hermanos Demarex a EPFL en 1996. Sin embargo, antes de que la transacción se realizara, EPFL había vendido solamente dos licencias. La primera relacionada con el robot de pequeñas dimensiones (brazos + paralelogramos < 800 mm) fue atribuida a Demarex en 1987. La segunda, relacionada con robots de grandes dimensiones, fue vendida a AID y después revendida a DeeMed. Esta compañía, comprada después por los suecos Elekta, especializados en un ámbito quirúrgico y manufactura un Robot Delta usado para llevar un pesado microscopio (20 Kg) (SurgiScope). La

tecnología del Robot Delta fue consecuentemente vendido a Medtronic a finales de 1999. [11]



Figura 1.9. *SurgiScope in action at the Surgical Robotics Lab, Humboldt-University at Berlin (courtesy of Prof. Dr. Tim C. Lueth).*

Fuente: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>

Antes de la transacción del SurgiScope, Elekta IGS entro en negociaciones sobre su licencia del Delta con el Zúrich basado en el grupo de tecnológico global ABB. Como resultado ABB adquirió la licencia para manufacturar Robot Deltas de grandes dimensiones. Mientras tanto, Demarex anunciaba la decisión de producir robots de mayores dimensiones (alrededor de 1200 mm). Sin embargo, Demarex no podía producir robots de dimensiones mayores a esa, desde que la compañía se comprometió a producir robots mayores a los 1200 mm, cuando compro la licencia exclusiva de menos de los 800 mm.

Al ver la probabilidad que Demarex negociaba con los alemanes GROB-Werke acerca de la licencia para producir TRIAGLIDE 5g, así mismo con Mikron Technology Group para su Triaglide, ambos Robots Delta con motores lineales. Es interesante, sin embargo, que el grupo Krause & Mauser tenga una patente para su máquinas de fresado Quickstep de tres ejes (US 6,161,992) la cual es otra vez un Robot Delta con accionamiento lineal. Además, Renault Automation Comau introdujo al EMO´99 en París su máquina de fresado Urane Sx la cual es remarcablemente similar al diseño del Quickstep. [11].

Demarex también licencia la compañía japonesa Hitachi Seiki para manufacturar Robots Deltas de pequeñas dimensiones para empaquetamiento (DELTA) y para perforación (PA35). De hecho Hitachi Seiki representa Demarex en Japón.



Figura 1.10. Hitachi Seiki's Delta robots for pick-and-place and drilling (courtesy of Hitachi Seiki).

Fuente: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>

La automatización flexible de ABB lanzó el Robot Delta en 1999 bajo el nombre de IRB 340 FlexPicker. Tres industrias del sector eran el objetivo, la industria de la comida, la farmacéutica, y la electrónica. El FlexPicker está equipado con un sistema de vacío integrado que es capaz de recoger y soltar objetos que pesan más de 1 kg velozmente. El robot es guiado por un sistema de visión artificial por Cognex y un controlador ABB S4C. Opcionalmente, el robot podría ser equipado con un controlador de movimiento y un sistema de visión por Adept Technology. Las velocidades alcanzables son de 10 m/s y 3.6 rad/s (alrededor de 150 tomas por minuto), y las aceleraciones son mayores a 100 m/s² y 1.2 rad/s². El robot vienen en dos versiones, una de la cuales es vendida, versión resistente al lavado, diseñado especialmente para ambientes de limpieza intensiva.



Figura 1.11. ABB Flexible Automation's IRB 340 FlexPicker (courtesy of ABB Flexible Automation).

Fuente: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>

Después de más de quince años como el único jugador en el mercado, Demarex súbitamente se enfrentara a la decisión del gigante sueco ABB para entrar en este lucrativo mercado. En un intento por asegurar su estabilidad a largo plazo,

Demaurex cambió su línea de producción de desnudos Robot Delta para completar las células del robot. Sin embargo, con el fin de obtener un mercado mundial, el pequeño Demaurex comenzó a buscar un socio y es así que Demaurex fue adquirida por el grupo suizo SIG a finales de 1999. [11].

El grupo SIG se conforma por tres ramas, de las cuales la rama SIG Pack, solamente, emplea algunos 2000 trabajadores – una compañía lo suficientemente grande para ofrecer a Demaurex el necesitado acceso al mercado mundial. Demaurex mantendrá su renombre y al mismo tiempo a sus dos fundadores y consejeros delegados. Actualmente, tres modelos diferentes de Robot Delta son ofrecidos por SIG Pack Systems, mientras que el C23 y el C33 son fabricados por Demaurex, el CE33 es fabricado por SIG Pack Systems.

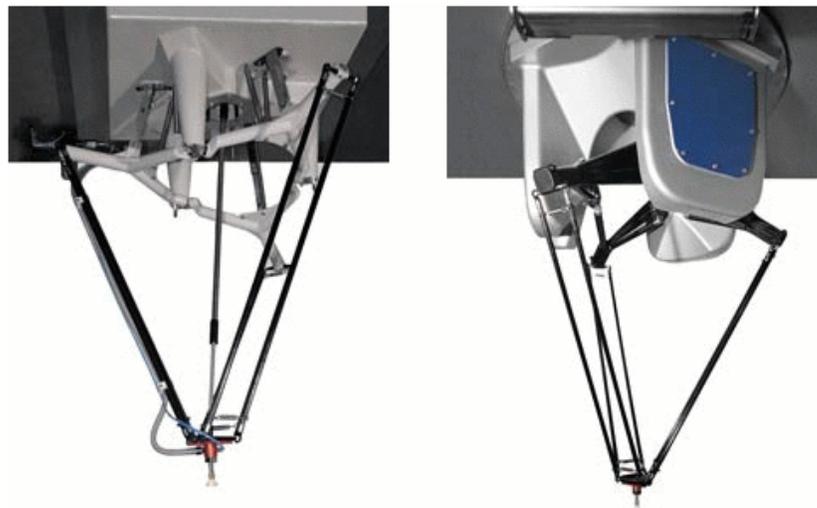


Figura 1.12. Two of the three Delta robot models offered by SIG Pack Systems, C33 and CE33 (courtesy of SIG Pack Systems).

Fuente: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Hardware.

Son todas las partes tangibles de un sistema informático, componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos. El término es propio del idioma inglés (literalmente traducido significa: partes duras). Hardware no solamente se aplica a una computadora tal como se la conoce, ya que por ejemplo un robot, un teléfono móvil, una cámara fotográfica o un reproductor multimedia también poseen hardware (y software), por lo que es más correcto el uso de sistema informático.

2.2. Software.

Se conoce como software al equipamiento lógico o soporte lógico de un sistema informático. Comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas, en contraposición a los componentes físicos, que son llamados hardware. Los componentes lógicos incluyen entre muchos otros las aplicaciones informáticas tales como el procesador de texto, que permite al usuario realizar todas las tareas concernientes a la edición de textos; el software de sistema, tal como el sistema operativo, que básicamente permite al resto de los programas funcionar adecuadamente facilitando también la interacción entre los componentes físicos y el resto de las aplicaciones y proporcionando una interfaz con el usuario.

2.3. PWM y Control por PWM.

PWM (en inglés, *Pulse Width Modulation*) significa modulación por ancho de pulsos, ya sea de una señal o fuente de energía. Es una técnica en la que se

modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada) ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Por mencionar, una aplicación muy común del PWM es la de regular la velocidad de giro de los motores eléctricos de inducción o asíncronos. Mantiene el par motor constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica. Se utiliza tanto en corriente continua como en alterna, como su nombre lo indica, al controlar un momento alto T_{on} (tiempo encendido o alimentado) y un momento bajo T_{off} (apagado o desconectado), controlado normalmente por relevadores o relés (para aplicaciones de baja frecuencia) o MOSFET o tiristores (para aplicaciones de alta frecuencia) como se ve en la figura 2.1.

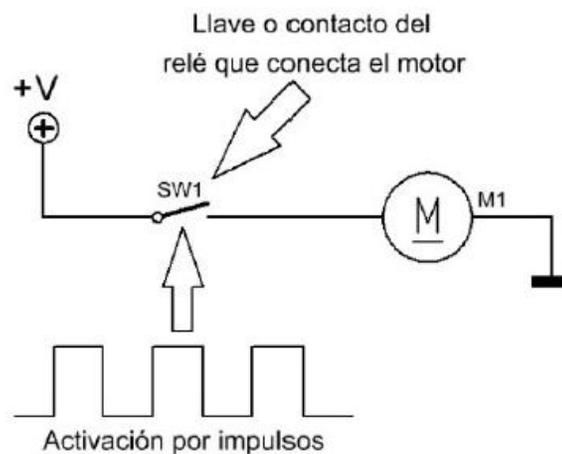


Figura 2.1. Control del motor por PWM

En la figura 2.2. se aprecian varias señales de PWM variando su ciclo útil de trabajo en el tiempo. Entonces la energía entregada obedece la siguiente expresión:

$$T = T_{on} + T_{off}$$

$$V_{Promedio} = V_{RMS} = \frac{T_{on}}{T} * V$$

Dónde:

$T = \text{Periodo de la señal}$

$V = \text{Voltaje maximo}$

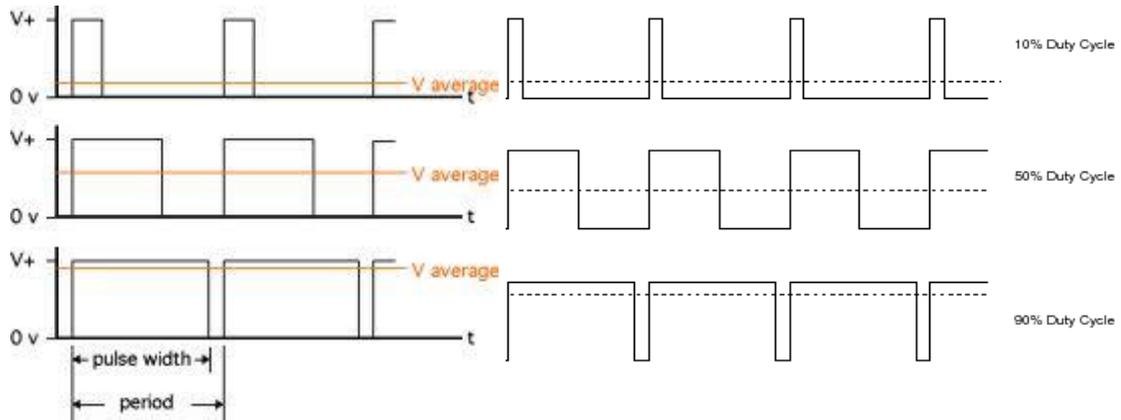


Figura 2.2. Señales PWM variando el ciclo útil de trabajo.

Fuente: <http://www.best-microcontroller-projects.com/>

En la aplicación del control un motor, al variar el ciclo útil de trabajo, este se reflejaría en la velocidad de giro (variable controlada). Si fuese el caso en que se controla una bombilla, la variable controlada sería la instancia de luz.

2.4. Encoders.

Es un codificador rotatorio, también llamado codificador del eje o generador de pulsos, suele ser un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor. Estos dispositivos se utilizan en robótica, en lentes fotográficas de última generación, en dispositivos de entrada de ordenador (tales como el ratón y el trackball), y en plataformas de radar rotatorias. Hay dos tipos principales: absoluto e incremental (relativo).

2.5. Actuadores.

Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden de un regulador o controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control como, por ejemplo, una válvula. Existen varios tipos de actuadores como son Electrónicos, Hidráulicos, Neumáticos y Eléctricos.

Los actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos son usados para manejar aparatos mecatrónicos. Por lo general, los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, y los neumáticos son simples posicionamientos. Sin embargo, los hidráulicos requieren mucho equipo para suministro de energía, así como de mantenimiento periódico. Por otro lado, las aplicaciones de los modelos neumáticos también son limitadas desde el punto de vista de precisión y mantenimiento.

2.6. Motor eléctrico.

Un motor eléctrico es un ejemplo de actuador. El motor es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. Algunos de los motores eléctricos son reversibles pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores. Son ampliamente utilizados en instalaciones industriales, comerciales y particulares. Pueden funcionar conectados a una red de suministro eléctrico o a baterías. En diversas circunstancias presenta muchas ventajas respecto a los motores de combustión; a igual potencia, su tamaño y peso son más reducidos; se pueden construir de cualquier tamaño; tiene un par de giro elevado y, según el tipo de motor, prácticamente constante; su rendimiento es muy

elevado (típicamente en torno al 75%, aumentando el mismo a medida que se incrementa la potencia de la máquina); y este tipo de motores no emite contaminantes.

2.7. Adquisición de datos.

La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas por medio de sensores o transductores, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora o controlador de automatización programable (PAC). Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

2.8. PC104.

Es un estándar de ordenador embebido que define el formato de la placa base (form factor) y el bus del sistema. A diferencia de la clásica arquitectura ATX y bus PCI que son usados en la mayoría de los ordenadores personales, el PC/104 está diseñado para aplicaciones específicas, como adquisición de datos o sistemas de control industrial. La arquitectura de la placa base no es la típica placa de circuitos integrados (backplane) en el que van insertados los componentes, en lugar de eso, los componentes se encuentran en módulos que son apilados unos encima de otros. El tamaño estándar es de 90.17 mm x 95.89 mm. La altura depende del

número de módulos conectados. Una instalación típica incluye una placa base, conversores analógico-digital y módulos I/O digitales. [12].

2.9. Control cinemático.

El objetivo fundamental de los modelos cinemáticos y dinámicos de un robot, es establecer las adecuadas estrategias de control del robot que traen como consecuencia una mayor calidad de sus movimientos. A diferencia del control dinámico (que se basa en los torques), el control cinemático establece las trayectorias que debe seguir cada articulación del robot para cumplir con los requerimientos del usuario. Dichas trayectorias se seleccionaran dependiendo de las restricciones físicas propias de los accionamientos y a criterios de calidad como suavidad o precisión de la misma.

2.10. Funcionamiento del control cinemático.

El robot recibe como entradas los datos procedentes del programa del robot escrito por el usuario, (punto de destino, precisión, tipo de trayectoria, deseada, velocidad, etc.), luego establece la trayectoria para cada articulación como funciones del tiempo. El control cinemático selecciona cuatro puntos de la trayectoria, a continuación trata de unir estos cuatro puntos con algún tipo de función que pasando por todos ellos garantice la suavidad y no supere las velocidades y aceleraciones máximas permisibles para cada accionador. El resultado final del movimiento del extremo del robot es una trayectoria que se aproxima en mayor o menor medida a la línea recta deseada, el principal inconveniente del procedimiento descrito radica en la necesidad de resolver repetidamente la transformación homogénea inversa, lo que conlleva un elevado costo computacional. Otra alternativa, puede ser utilizar un procedimiento basado

en la utilización de la matriz Jacobiana. La matriz Jacobiana establece las relaciones diferenciales entre variables articulares y cartesianas, relación que nos entrega la localización, la cual a su vez a través de su derivada, permite establecer las velocidades a partir de las correspondientes articulaciones. Luego los puntos finitos obtenidos de la derivada deben ser interpolados. [13].

2.11. Programación.

La programación es el proceso de diseñar, escribir, depurar y mantener el código fuente de programas computacionales. El código fuente es escrito en un lenguaje de programación. El propósito de la programación es crear programas que exhiban un comportamiento deseado. El proceso de escribir código requiere frecuentemente conocimientos en varias áreas distintas, además del dominio del lenguaje a utilizar, algoritmos especializados y lógica formal.

2.12. Señales análogas.

La señal eléctrica analógica es aquella en la que los valores de la tensión o voltaje varían constantemente en forma de corriente alterna, incrementando su valor con signo eléctrico positivo (+) durante medio ciclo y disminuyéndolo a continuación con signo eléctrico negativo (-) en el medio ciclo siguiente. El cambio constante de polaridad de positivo a negativo provoca que se cree un trazado en forma de onda senoidal.

2.13. Señales digitales.

La señal digital es un tipo de señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético en que cada signo que codifica el contenido de la misma puede

ser analizado en término de algunas magnitudes que representan valores discretos, en lugar de valores dentro de un cierto rango. Por ejemplo, el interruptor de la luz sólo puede tomar dos valores o estados: abierto o cerrado, o la misma lámpara: encendida o apagada. Esto no significa que la señal físicamente sea discreta ya que los campos electromagnéticos suelen ser continuos, sino que en general existe una forma de discretizarla unívocamente.

2.14. Conversión ADC y DAC.

La digitalización o conversión analógica-digital (A/D) consiste básicamente en realizar de forma periódica medidas de la amplitud (tensión) de una señal análoga, por ejemplo, la que proviene de un micrófono, si se trata de registrar sonidos o de un sismógrafo si se trata de registrar vibraciones. La tensión registrada en el muestreo se redondea sus valores a un conjunto finito de niveles preestablecidos de tensión (conocidos como niveles de cuantificación) y registrarlos como números enteros en cualquier tipo de memoria o soporte. La conversión A/D también es conocida por el acrónimo inglés ADC (analogue to digital converter).

Por su parte, un conversor digital-analógico o DAC (digital to analogue converter) es el paso inverso al ADC. En este se convierten datos digitales en señales de corriente o de tensión analógica. Se utilizan por ejemplo en los reproductores de discos compactos. La mayoría de los DAC utilizan alguna forma de red reostática. Los datos digitales se aplican a los reóstatos en grupos de bits. Las resistencias varían en proporciones definidas y el flujo de corriente de cada uno está directamente relacionado con el valor binario del bit recibido.

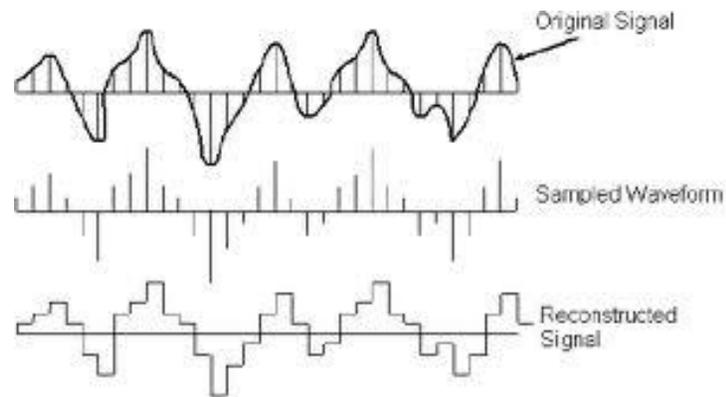


Figura 2.3. Señal analógica digitalizada ADC y reconstruida DCA.

Fuente: <http://www.azimadli.com/>

2.15. Sistema automático de control.

Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados entre sí, de tal forma que regulan por si mismos la actuación de mecanismos sin intervención externa, corrigiendo los posibles errores que se presenten en su funcionamiento. El mismo sistema debe ser capaz de regular la capacidad de acción que debe aplicar, para ejecutar la acción que le es indicada. Actualmente, cualquier mecanismo, sistema o planta industrial presenta una parte actuadora, que corresponde al sistema físico que realiza la acción, y otra parte de mando o control, que genera las órdenes necesarias para que esa acción se lleve o no a cabo.

2.16. Controlador PID.

Un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener (Set Point), para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros

distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor proporcional determina la reacción del error actual. El integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control (actuador) como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador. Ajustando estas tres variables en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar.

La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de respuesta del control ante un error, el grado el cual el controlador llega al "set point", y el grado de oscilación del sistema. Nótese que el uso del PID para control no garantiza control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo. Algunas aplicaciones pueden solo requerir de uno o dos modos de los que provee este sistema de control. Un controlador PID puede ser llamado también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control.

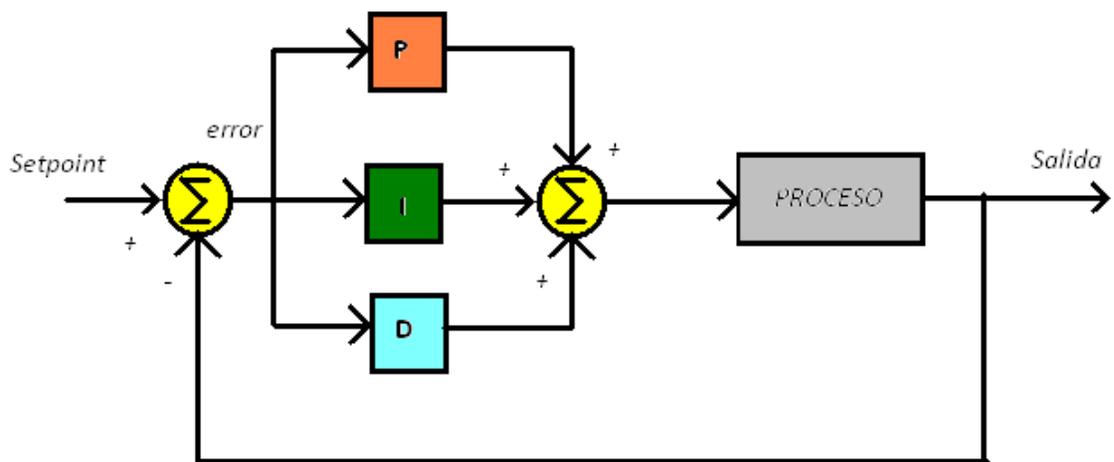


Figura 2.4. Estructura de un controlador PID.

2.17. Sintonización de PID.

Ajustar un lazo de control significa ajustar los parámetros del sistema de control a los valores óptimos para la respuesta del sistema de control deseada. El comportamiento óptimo ante un cambio del proceso o cambio del "setpoint" varía dependiendo de la aplicación. Generalmente, se requiere estabilidad ante la respuesta dada por el controlador, y este no debe oscilar ante ninguna combinación de las condiciones del proceso y cambio de "setpoints". Algunos procesos tienen un grado de no-linealidad y algunos parámetros que funcionan bien en condiciones de carga máxima no funcionan cuando el proceso está en estado de "sin carga". Hay varios métodos para ajustar un lazo de PID. El método más efectivo generalmente requiere del desarrollo de alguna forma del modelo del proceso, luego elegir P, I y D basándose en los parámetros del modelo dinámico.

3. DISEÑO DEL ROBOT DELTA.

3.1. Descripción del Proceso de Diseño.

El proceso de diseño del Robot Delta fue un proceso iterativo, empezó con una concepción de algo deseado y a medida que se realizan los cálculos y análisis de ingeniería fue tomando forma. El Robot Delta como cualquier otro diseño mecatrónico es multidisciplinario, contempla tres áreas distintas, y se abordó con una **metodología concurrente**, se consideró el robot como un conjunto, por lo que los tres enfoques de diseño están aplicados de forma conjunta y simultánea, interactuando entre ellos. Cada error o problema presente en un área que afectara otra realimentaba al proceso hasta alcanzar un punto funcional e ideal entre los tres componentes mecatrónicos.

El componente **mecánico**, es la parte central o razón de ser del robot, contempla análisis de mecanismos, dimensionamiento, materiales, forma, peso, procesos de fabricación, resistencia, velocidades, aceleraciones, entre otros. Cabe resaltar, los actuadores en este caso son motores DC y la selección adecuada de los mismos a lo que funcionalidad se refiere, es un punto muy importante en diseño del robot.

El componente **electrónico**, representado en los sensores, integrados y controlador que se requiera, como son encoders, amplificadores operaciones, puentes H, PC104 (como controlador), etc.

Por último, el componente de **control**, requerido para hacer que el robot interactúe de forma “inteligente” con el medio y el usuario, aplicado en Matlab Simulink donde se programaron todos los algoritmos control y se desarrolló la interfaz con el usuario.

Se aclara que, el objetivo central de este trabajo de grado limita el alcance del robot para fines académicos en la Universidad Tecnológica de Bolívar, pero la naturaleza de cualquier diseño y el deber ser es, diseñar cumpliendo especificaciones y criterios. Al inicio del proceso se plantearon como criterios y especificaciones del robot:

- Un espacio de trabajo mínimo de un volumen de 30cm x 30cm x 30cm.
- Velocidad mínima de 10cm/s
- Dos tipos de movimientos básicos, lineal y circular.
- Tiempo de aceleración 500mS
- Construirlo con materiales asequibles y componentes de bajo costo para su fácil replica y mejoras de los estudiantes de la universidad.

Se inicia el proceso de diseño del Robot Delta proyectando y analizando el comportamiento de los mecanismos presentes, de este análisis se imagina un diseño conceptual y especificaciones funcionales. En esta etapa se elaboran posibles soluciones a los problema detectados y se establecen los requisitos mínimos de funcionalidad del robot a desarrollar, es decir las necesidades y criterios de diseño del robot.

Teniendo claro el comportamiento de los mecanismos del robot, se avanza simultáneamente en las busca de restricciones del robot, dimensionamiento y longitudes de las articulaciones más convenientes para alcanzar el espacio de trabajo estimado, un análisis de la cinemática del robot, diseño CAD del robot, análisis dinámico para la selección de motores, se define la ley de control, confirmación del espacio de trabajo, para terminar en pruebas experimentales, sintonización y puesta en marcha de robot. Todos los aspectos mencionados no se abordaron aislados y el orden en que se aluden es irrelevante, pues la metodología empleada es la concurrente, con lo que se logra un conjunto final mejor optimizado que en el caso secuencial, donde se trabajan por separado.

3.2. Descripción de la arquitectura del Robot Delta.

La figura 3.1. muestra la estructura del Robot Delta en un sistema de coordenadas de referencia (X, Y, Z) fijo en punto O. El Delta consta de dos plataformas, la plataforma fija o base, en la cual se ubican los actuadores que para este tipo de robot consisten en motores rotativos (motor 1, 2 y 3), colocados a la misma distancia del punto O, con su eje perpendicular en los puntos 1, 2 y 3 respectivamente y la plataforma móvil que porta el EF (efector final) del robot, ubicado adecuadamente en el punto P. Las dos plataformas están unidas entre sí por tres cadenas cinemáticas híbridas, un brazo compuesto por una barra unida a los motores en el punto A seguido por el antebrazo, que es un mecanismo cerrado de cuatro barras, unido a la plataforma móvil en el punto C por medio de juntas esféricas.

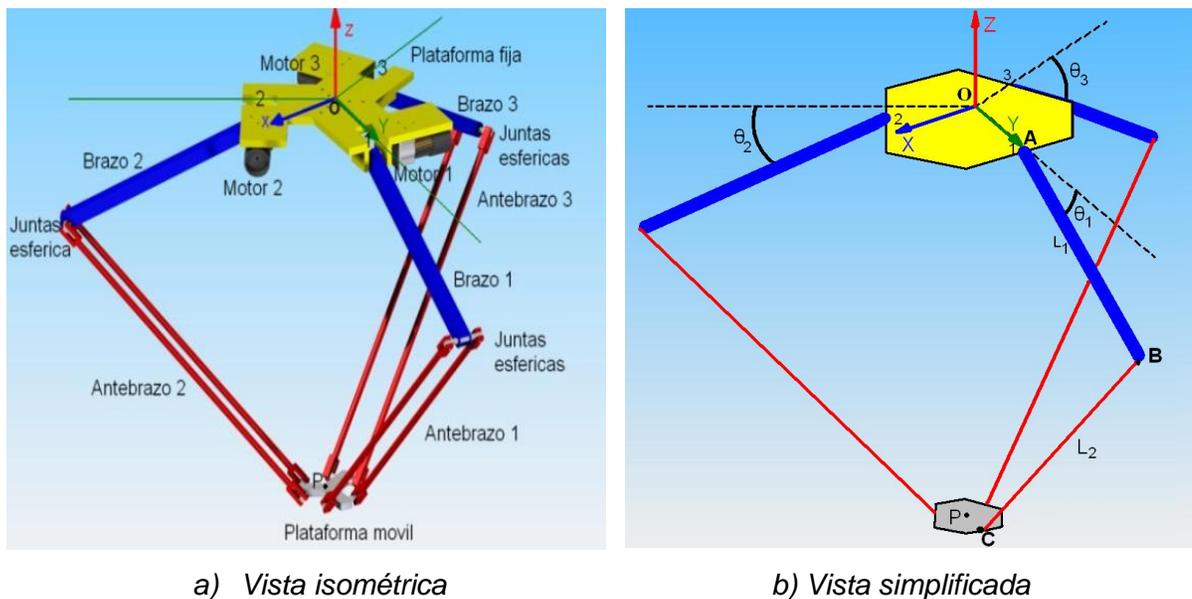


Figura 3.1. Estructura del Robot Delta en un sistema de coordenadas de referencia.

3.3. Diseño mecánico del Robot Delta.

3.3.1. Cinemática Directa e inversa.

La cinemática estudia el movimiento de un mecanismo sin tomar en cuenta las fuerzas que lo generan. Aparentemente, es posible imaginar en forma sencilla los movimientos que puede generar un mecanismo, a diferencia de las fuerzas estáticas y dinámicas que muchas veces no es posible determinar por inspección, la forma en que se desarrollan en el mecanismo. Típicamente, la cinemática de un mecanismo se divide en dos, **Cinemática Directa** y **Cinemática Inversa**.

3.3.2. Análisis cinemático del Robot Delta.

Cinemática directa: determina la posición de la plataforma móvil o efector final a partir de coordenadas articulares conocidas.

Un estudio sobre diferentes métodos para el cálculo de la cinemática directa fue realizado por Merlet (1993). En esta investigación se comparan las ventajas de los métodos iterativos y polinomiales, que son métodos numéricos que requieren cierto tiempo de cálculo para ser realizados. En otras investigaciones se proponen métodos más sofisticados como en la programación de redes neuronales por Patrick & Sarah (2005) para calcular la cinemática directa de un mecanismo.

Cinemática inversa que determina las coordenadas articulares de cada actuador para una posición de la plataforma móvil conocida.

Existen varios métodos para el cálculo de la cinemática inversa. García de Jalón & Bayo (1994), [15] el autor resuelve la cinemática a partir de las ecuaciones de

restricción del mecanismo. Por otro lado, Merlet (2006) propone dos métodos para el cálculo de la cinemática inversa: un método analítico y método geométrico. Tsai (1999) hace una breve comparación entre el método de Denavit-Hamtenberg y el método geométrico, [1]. Ambos autores coinciden en que el método geométrico facilita el análisis de la cinemática inversa cuando se componen de más de un lazo cerrado, como se muestra a continuación.

En el caso del Robot Delta, el análisis cinemático inverso busca la relación entre la posición del efector final, específicamente el punto P, con los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 de los de los brazos, dependientes de la acción de los motores, como se muestra en la figura 3.1. Idealmente, la junta en el punto A le permite al brazo describir una circunferencia de radio L_1 , por otra parte las juntas en el punto B, le permiten al antebrazo describir una esfera de radio L_2 . La circunferencia y la esfera se interceptan en los puntos P1 y P2, como se aprecia en la figura 3.2.

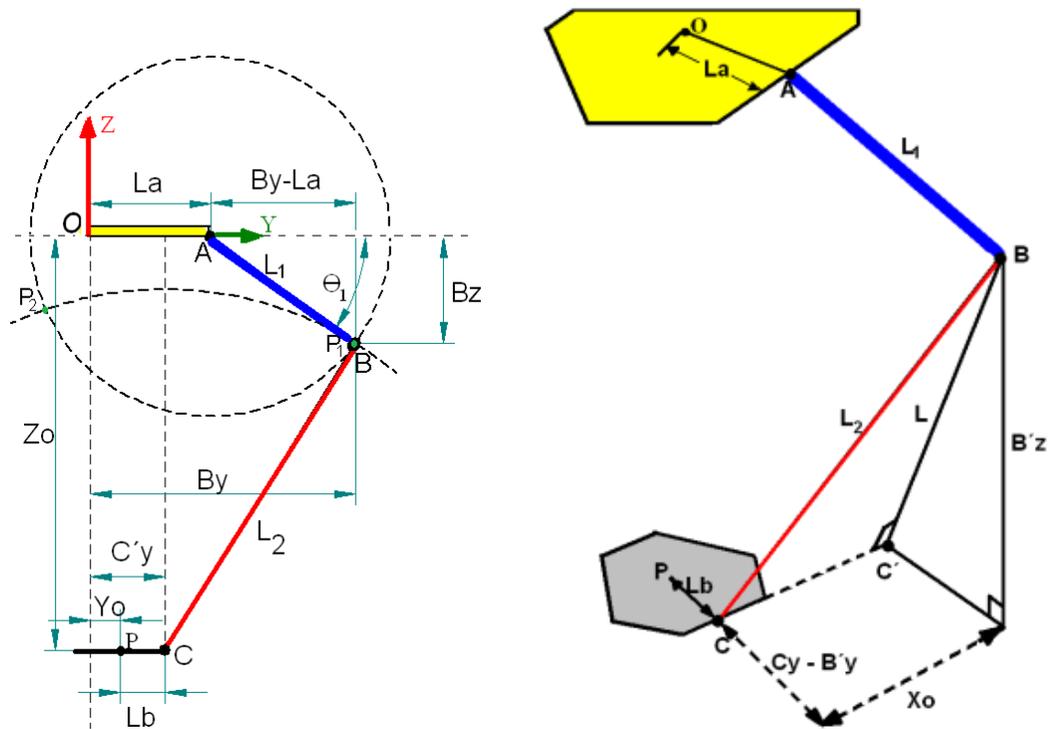


Figura 3.2. Análisis cinemático inverso del Robot Delta

Se converge que el brazo 1 está ubicado paralelamente sobre el eje Y, mientras el brazo 2 y 3 se ubican a 120° y 240° del brazo 1 respectivamente en el mismo plano. Es en el brazo 1 donde se inicia el análisis cinemático; idealmente P1 y P2 son soluciones validadas, pero físicamente, si el brazo 1 alcanzara al punto P2 se incurriría en una singularidad ($\theta_1 > 90^\circ$), por eso se toma como solución P1. Los puntos P1 y B están sobrepuestos, entonces al determinar la posición del punto B, se puede obtener el ángulo θ_1 del actuador. Para encontrar la posición de B, se plantea un sistema de ecuaciones cuadráticas con las coordenadas de los puntos P, C, A y C'. Las coordenadas de estos puntos son:

$$P \ x_o; y_o; z_o \quad - \quad C \ x_o; y_o - L_b; z_o \quad - \quad A \ 0; L_a; 0 \quad - \quad C' \ 0; y_o - L_b; z_o$$

Sistema de ecuaciones cuadráticas:

$$B_y - r^2 + B_z - A_z^2 = L_1^2 \quad (1)$$

$$L^2 + x_o^2 = L_1^2 \quad (2)$$

$$L^2 = B_y - C'_y{}^2 + B_z - C'_z{}^2 \quad (3)$$

La solución del sistema de ecuaciones (1), (2) y (3) es otra ecuación cuadrática (4).

$$a \cdot B_y^2 + b \cdot B_y + c = 0 \quad (4)$$

Donde los valores de a , b y c son:

$$a = 1 + \frac{L_a + L_b - y_o^2}{z_o^2} \quad 5$$

$$b = \frac{1}{z_o^2} \cdot 2 \cdot L_b \cdot y_o - 2 \cdot L_a - \frac{L_a + L_b - y_o}{z_o} \cdot L_1^2 - L_2^2 + L_b^2 - L_a^2 + x_o^2 - y_o^2 - z_o^2 \quad (6)$$

$$c = L_a^2 - L_1^2 + \frac{L_1^2 - L_2^2 + L_b^2 - L_a^2 + x_o^2 - y_o^2 - z_o^2}{2 \cdot z_o} - \frac{L_b \cdot y_o^2}{z_o} \quad 7$$

La solución general de la ecuación (4) está dada por ecuación (8), esta solución tiene sentido solo cuando el resultado dentro de la raíz cuadrada es positivo.

$$B_{y1-2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad 8$$

El valor del ángulo del brazo 1 se calcula con la ecuación (9).

$$\theta_1 = \arctan \frac{B_{z1}}{L_a - B_{y1}} \quad 9$$

$$B_{z1} = \sqrt{L_1^2 - (B_{y1} - L_a)^2} \quad 10$$

Si se gira el sistema de coordenadas, 120° para el brazo 2 y 240° para el 3 esta solución también es válida para los otros brazos.

3.3.3. Análisis del Espacio de Trabajo.

Es posible determinar el espacio de trabajo, principalmente, de dos formas: la primera mediante algoritmos geométricos, o la segunda mediante el método de Monte Carlo de simulación probabilística (Rastegar, 1990) [16]. La forma más simple es estableciendo algoritmos a partir de la geometría del mecanismo (Merlet, 1998), sin embargo, cuando el modelo geométrico del mecanismo es complejo, este procedimiento resulta poco factible, en estos casos se recurre a métodos como la simulación probabilística.

El espacio de trabajo de un Robot Delta se puede definir matemáticamente como la intersección de 3 toroides figura 3.3. La ecuación general del toroide se muestra

a continuación, ecuación (11). Para cada uno de los ejes se debe multiplicar la coordenada del punto P por la matriz de rotación, de forma que se obtienen tres ecuaciones, con los que se define el espacio de trabajo.

$$Y_p^2 - L_1^2 + X_p^2 + Z_p^2 + L_1^2 + L_2^2 = -aL_1^2 Y_p^2 + Z_p^2 \quad (11)$$

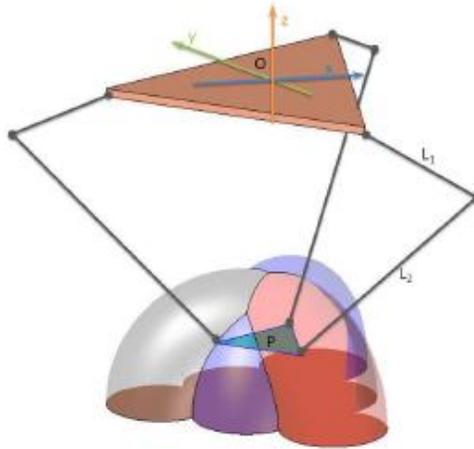
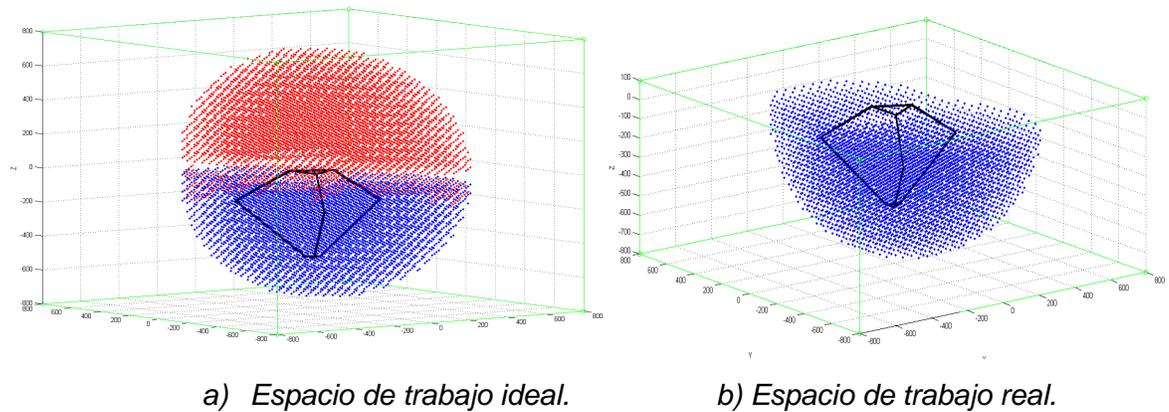


Figura 3.3. Vista general del espacio de trabajo del Robot Delta.

Fuente: Tesis de maestría - Diseño de un Robot paralelo para operaciones de “tomar y colocar”. Edison Martínez, Universidad de Pamplona. 2011.

Usando las ecuaciones de la cinemática inversa, se implementa un algoritmo en Matlab para encontrar el espacio de trabajo eficazmente mediante un proceso de discretización. Este algoritmo además del análisis cinemático del robot, tiene en cuenta las restricciones (interferencias) de los brazos. Entonces, para calcular el espacio de trabajo se define un volumen determinado $[-x, x]$, $[-y, y]$, y $[-z, z]$ dentro del cual el algoritmo evalúa la cinemática inversa en puntos equidistantes, comprueba si el efector del robot puede o no alcanzar tal posición y verifica si hay o no restricciones en los brazos. El algoritmo prueba cada uno de los puntos a los que puede llegar el centro de la plataforma, sin que el término de la raíz cuadrada en la ecuación (8) se haga negativo.

Realizando una batería de simulaciones variando las configuraciones de dimensiones, alcance del EF y longitudes de los brazos superiores e inferiores 1 y 2 respectivamente. Los resultados para un alcance máximo en $Z = 0.6$ m son los siguientes.



a) *Espacio de trabajo ideal.* b) *Espacio de trabajo real.*

Figura 3.4. Resultado de simulación espacio de trabajo.

En la figura 3.4., se aprecia el espacio de trabajo del robot obtenido. Los puntos de color rojo representan las posiciones que cumple con las restricciones impuestas por la cinemática inversa pero incurren en interferencias los brazos. Los puntos en color azul, representan las posiciones que el efector puede alcanzar sin ningún problema, este es el espacio de trabajo real del Robot Delta. Es importante determinar en qué lugares el robot incurre en restricciones, estas posiciones deben ser excluidas del espacio de trabajo, pues nunca serian alcanzados por el efector final porque físicamente es imposible.

Manteniendo el mismo alcance $Z = 0.6$ m, y variando las dimensiones del robot, es decir radio de la base superior, radio del efector final, las longitudes del brazo y el antebrazo, se obtuvieron diversos alcances para los espacios de trabajo. Estos son presentados a continuación.

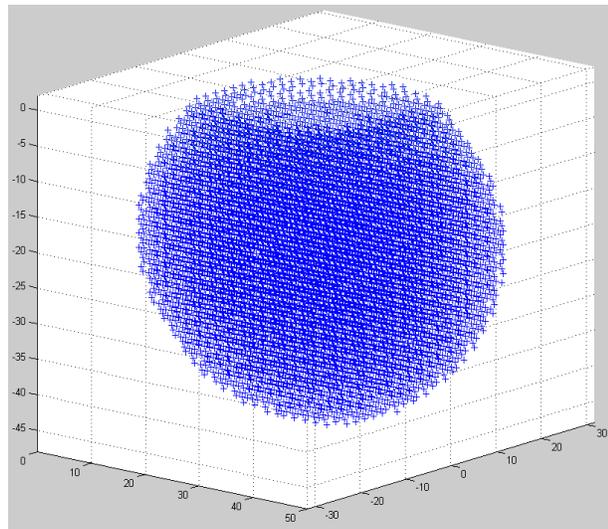


Figura 3.5. Espacio de trabajo batería de simulaciones No. 1

El espacio de trabajo obtenido en la figura 3.5, se obtuvo con las siguientes dimensiones:

Tabla 3.1. Dimensiones del Robot Delta para un alcance de 60 cm, simulaciones No. 1

Elemento	Longitud
Base superior (radio)	20 cm
Efecto final (radio)	10 cm
Brazo superior (longitud)	30 cm
Brazo inferior (longitud)	30 cm

De los resultados obtenidos en esta simulación, los alcances para el efecto final no cumplen con el planteamiento inicial de alcanzar un espacio de trabajo de 30 X 30 X 30 cm, debido a la irregularidad del espacio, que teóricamente debería ser una esfera proporcionada.

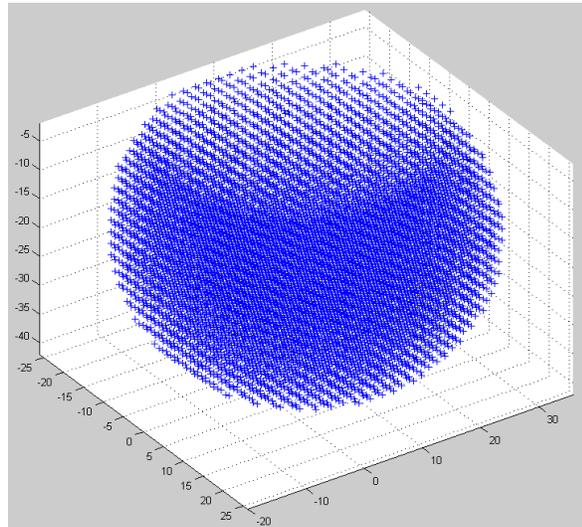


Figura 3.6. Espacio de trabajo batería de simulaciones No. 2

Las dimensiones para el espacio de trabajo de la figura 3.6 son las siguientes:

Tabla 3.2. Dimensiones del Robot Delta para un alcance de 60 cm, simulaciones No.2

Elemento	Longitud
Base superior (radio)	15 cm
Efecto final (radio)	10 cm
Brazo superior (longitud)	20 cm
Brazo inferior (longitud)	40 cm

De la figura 3.6 es posible notar como el espacio de trabajo es más uniforme, los contornos son más suaves, y no hay cambios bruscos en la continuidad de la forma, como si se presentó en la figura 3.5. Es de mencionar que emplear una longitud del antebrazo menor que la longitud del brazo, influye en la obtención de esta característica en el espacio de trabajo.

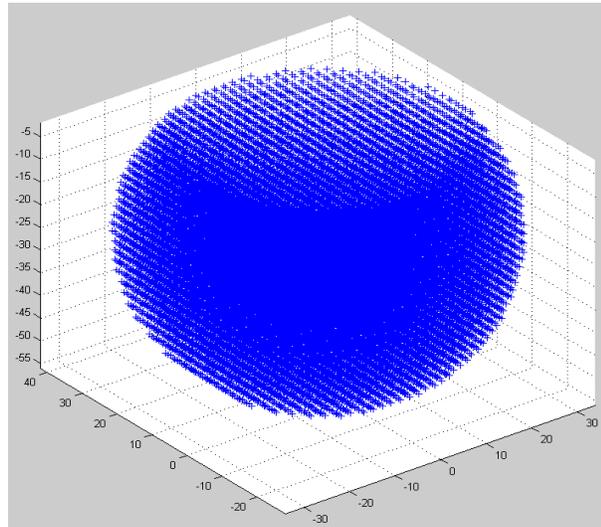


Figura 3.7. Espacio de trabajo batería de simulaciones No. 3.

Así, a partir de los resultados de la figura 3.7 las longitudes definitivas de los componentes del Robot Delta construido son las siguientes:

Tabla 3.3. Dimensiones del Robot Delta para un alcance de 60 cm, simulaciones No. 3

Elemento	Longitud
Base superior (radio)	11.5 cm
Efecto final (radio)	6.5 cm
Brazo superior (longitud)	25 cm
Brazo inferior (longitud)	35 cm

3.3.4. Diseño CAD.

El proceso de diseño CAD comienza simultáneamente con el análisis cinemático. Con las dimensiones calculadas se genera un primer modelo virtual para el espacio de trabajo de la figura 3.7 determinado del análisis cinemático. A continuación a lo largo del proceso se realimentaban los errores y se generaban nuevos modelos. Este proceso atendió básicamente a los procesos de fabricación de cada componente, siendo consecuentes con los costos y la apariencia del diseño.

Propuesta No. 1. – Abril de 2011.

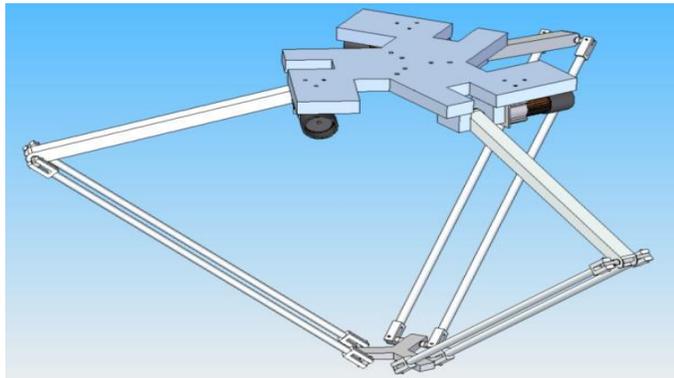


Figura 3.8. Modelo virtual Delta I.

Delta I fue descartado principalmente por error de diseño, la longitud del eje de las articulaciones de los brazos y el efector final no era la apropiada, pues la junta universal del antebrazo chocaba con el eje, restringiendo en gran medida los alcances en las coordenadas X y Y, Las dimensiones del Delta I son las presentadas en la tabla 3.3.

Propuesta No. 2. – Junio de 2011.

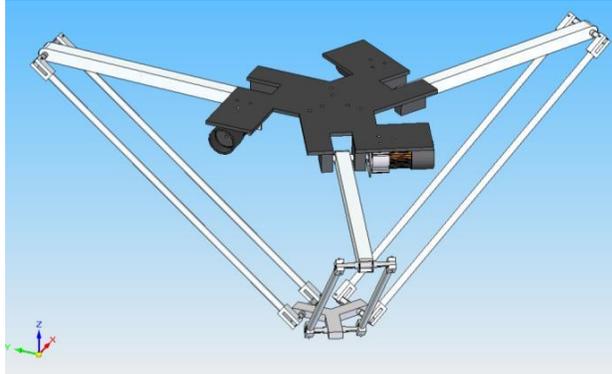


Figura 3.9 Modelo virtual Delta II

A parte de la corrección del error de la longitud del eje de las articulaciones, se atienden detalles como la reducción del espesor de la base superior, de un espesor de 3 cm, se reduce a 5 mm, el grueso de una lámina metálica capaz de soportar el peso de los brazos, creando la segunda versión. Delta II.

Propuesta No. 3. – Agosto de 2011.

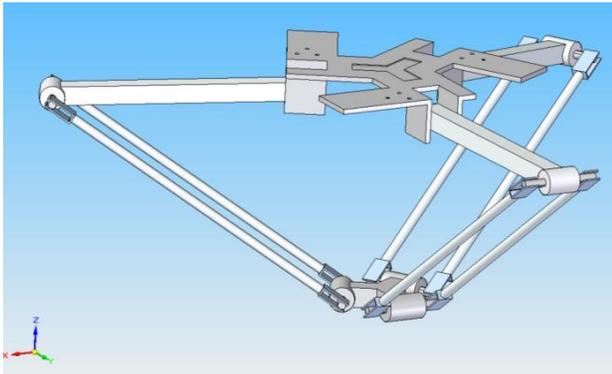


Figura 3.10. Modelo virtual Delta III.

Las mejoras realizadas al modelo III son los acoples de los ejes de las articulaciones, pues se decide utilizar rodamientos de bolas, para eliminar altos factores de fricción desarrollados en las juntas, y que incrementaban el consumo

de corriente en los motores. De este modo se añaden soportes para los rodamientos, en los extremos de cada brazo y en el efector final.

Propuesta No. 4. – Noviembre de 2011

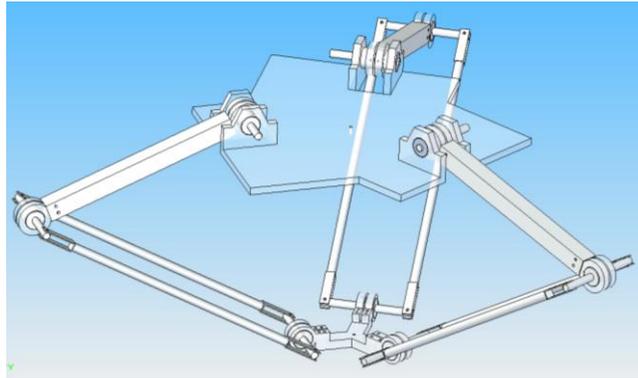


Figura 3.11. Modelo propuesta IV.

En la propuesta IV se optimizan las juntas universales y los terminales que portan los rodamientos, debido a que en el anterior diseño los torque producidos por la forma del terminal incrementan considerablemente el torque en los motores. se cambian los materiales del efector final y la base superior, decidiendo además ubicar los motores en la parte superior. En este modelo los materiales utilizados son aluminio para los brazos y los ejes de las articulaciones, acero inoxidable para las juntas terminales de los brazos inferiores, y acrílico para la base superior y el efector final.

3.3.5. Selección de motores y criterio de selección.

Con un modelo CAD desarrollado en Solid Edge y el complemento Dynamic Designer es posible realizar las simulaciones en el espacio de trabajo previamente definido en condiciones reales o aproximadas de funcionamiento. En estas simulaciones se busca llevar al límite los alcances del Robot Delta, generando y simulando trayectorias que requieran los torques más elevados.

Para obtener resultados veraces, las condiciones de simulación deben ser las más acercadas a la realidad, por eso se le indica a Dynamic Designer variables como fricción, materiales, peso, carga, entre otros. Continuamente se le indica a Solid Edge que arroje las gráficas de par en el tiempo de cada motor y de velocidad angular en el tiempo de los eslabones. A partir de estas graficas se deduce el valor del par pico y el valor del par constante que deben satisfacer los motores, al igual que el valor pico necesario de velocidad angular en RPM (revoluciones por minuto) para ser funcionales para la trayectoria simulada. Estos valores pueden deducirse empíricamente de la gráfica, pero para efecto de eliminar posibles errores en la medida, se recurre a MATLAB para que encuentre dichos valores en la gráfica, lo cual hace de forma más rápida y segura. Este procedimiento se repite iterativamente en una batería de simulaciones que a consideración sean las más exigentes y que abarquen todo tipo de movimientos del EF.

Cuando se tiene estos valores, solo basta buscar el par RMS (en inglés; *Root Mean Square*, Raíz Media Cuadrática), el cual es al fin y al cabo el criterio con el que se seleccionan los motores (en lo que a funcionalidad se refiere) de las ofertas comerciales que ofrecen las casas fabricantes.

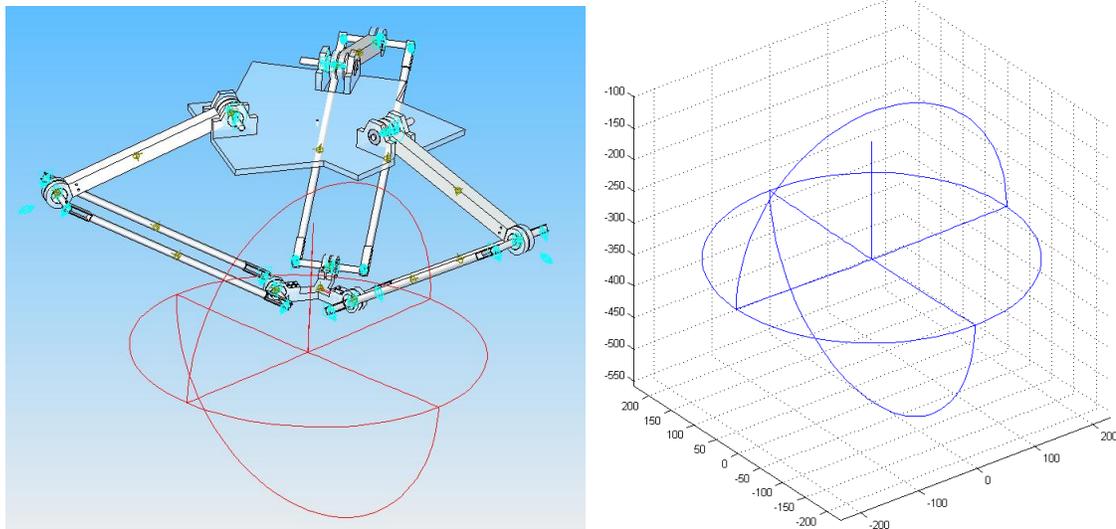


Figura 3.12. Simulación desplazamientos del Robot Delta en condiciones extremas del espacio de trabajo.

[VIDEO: Delta - Espacio de trabajo](#). La figura 3.12 fue obtenida tras la simulación presentada en este video. Si no abre el video con el hipervínculo, encontrar el video en la subcarpeta “Tesis RD2012/Videos y fotografías/Delta - Espacio de Trabajo”.

Cabe resaltar que en las simulaciones realizadas el material de cada pieza repercutía en los pares obtenidos para cada motor. En las simulaciones con los mismos recorridos y con diversas configuraciones de materiales para las partes se obtuvieron diferentes resultados, como es el caso de los siguientes pares en los actuadores obtenidos para dos tipos de materiales, acero y aluminio, siendo más apropiado el aluminio para los brazos y ejes debido a su baja densidad en comparación al hierro o acero.

Tabla 3.4. Par Pico en motores para piezas en acero.

Motor	Par pico [n*mm]
1	2045
2	2036
3	2037

Tabla 3.5. Par Pico en motores para piezas en aluminio

Motor	Par pico [n*mm]
1	881
2	877
3	876

En este punto, entre otras cosas se ha seleccionado el material (aluminio) para las piezas, lo que acerca a la construcción del modelo real del robot. Entre los resultados obtenidos se buscan las condiciones más críticas, como se muestran continuación.

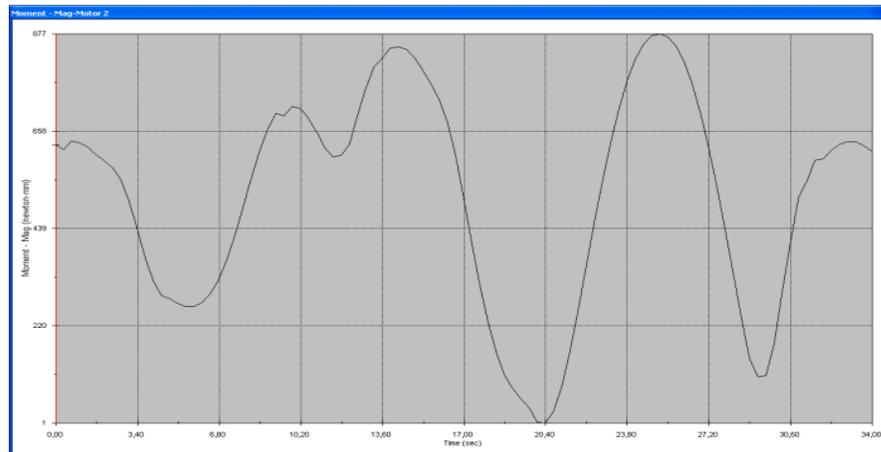


Figura 3.13. Par desarrollado en el motor 1 durante simulación de puntos extremos.

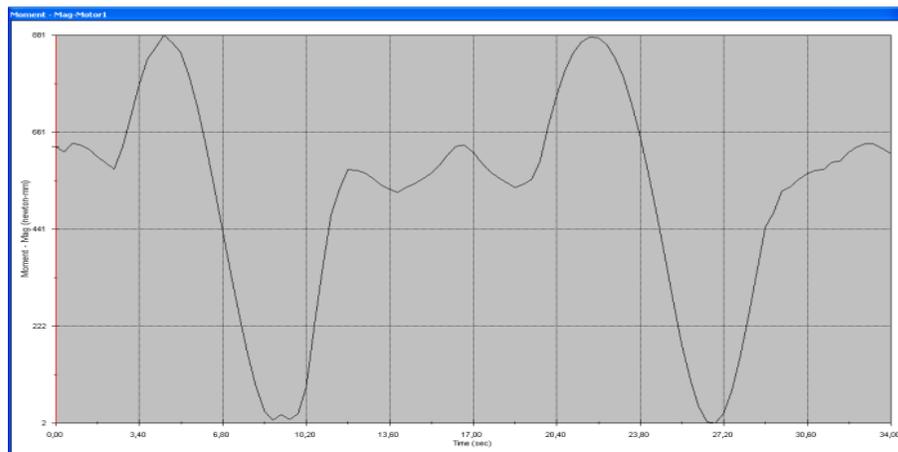


Figura 3.14. Par desarrollado en el motor 2 durante simulación de puntos extremos.

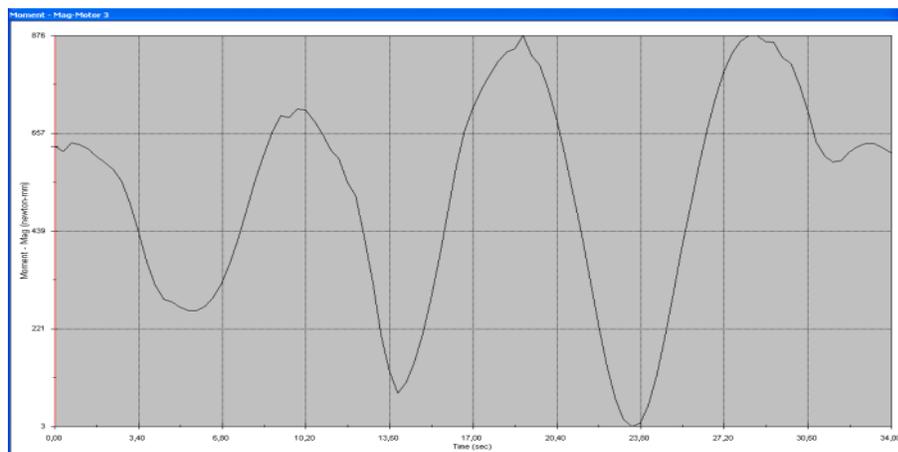


Figura 3.15. Par desarrollado en el motor 3 durante simulación de puntos extremos.

Las anteriores figuras corresponden a los resultados de la simulación para condiciones más exigentes del espacio de trabajo del modelo., y con las piezas fabricadas en aluminio.

3.3.5.1. Calculo de pares RMS: La selección de motores usando como criterio de funcionalidad el par RMS se usa cuando el motor debe trabajar entre ciclos de espera, es decir su trabajo es intermitente, como en el caso del DELTA, donde los motores no tienen un funcionamiento continuo; entonces tener el valor del par RMS de cada motor en el robot es importante al momento de seleccionarlo, puesto que este es el valor del par efectivo que debe suministrar dicho motor para su funcionalidad. Para el cálculo del par RMS se usan los archivos generados por el planificador en MATLAB.

El cálculo del par RMS obedece la ecuación (2), en la cual intervine los valores de los pares en el tiempo que se generan a lo largo de un desplazamiento. El par requerido para cualquier desplazamiento en el DELTA no es constante, por lo que al momento de calcularlo se tienen en cuenta ciertos valores de pares durante el movimiento, como se muestra en la ecuación (3), que queda en función de todos los pares posibles.

$$\tau_{RMS} = \frac{\tau_{en\ el\ movieminto} * \Delta t^2}{\Delta t_{Total}} \quad Ecuacion\ 11$$

$$\tau_{RMS} = \frac{\tau_1 t_1^2 + \tau_2 t_2^2 + \tau_3 t_3^2 + \tau_4 t_4^2}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \quad Ecuacion\ 12$$

Dónde:

τ_1 = par aceleración o pico: momento de torsión para acelerar la carga desde velocidad cero a velocidad máxima.

τ_2 = par continuo: momento de torsión necesario para mantener la carga a velocidad máxima.

τ_3 = par desaceleración: momento de torsión para desacelerar desde la velocidad máxima a cualquier otra velocidad.

τ_4 = par reposo: momento de torsión mientras la carga esta quieta.

t_1 = tiempo t para acelerar la carga.

t_2 = tiempo t para la velocidad máxima.

t_3 = tiempo t para desacelerar la carga.

t_4 = tiempo t en reposo.

El cálculo se realiza en MATLAB, se toman los archivos generados por el planificador y se exploran los datos (valores de pares en el tiempo) realizando la operación de la ecuación (3). Así para cada motor se le calcula el valor RMS requerido.

Tabla 3.6. Par RMS en motores para piezas en acero.

Motor	Par rms [n*mm]
1	784.3
2	778.3
3	789.7

Tabla 3.7. Par RMS en motores para piezas en aluminio

Motor	Par rms [n*mm]
1	332
2	329
3	334

En base a los torques pico y RMS obtenidos para el modelo CAD seleccionado, simulándolo con los dos tipos de materiales, resulta más factible desde un punto de vista energético emplear el modelo en aluminio, ya que al ser menores los

torques, menores serán las corrientes empleadas por los actuadores para poner en marcha el robot, así mismo más económico será el motor seleccionado.

3.3.5.2. Cálculo de velocidades angulares: Para el cálculo de las velocidades angulares se procede similarmente que en el cálculo de los pares RMS. De Solid Edge se obtiene las gráficas de velocidad en el tiempo para cada motor y se busca la velocidad angular pico en cada gráfica, una vez más apoyados en MATLAB. Los valores pico de velocidad angular obtenidos para cada motor son los siguientes:

Tabla 3.8. Velocidad Angular Pico En Motores

Motor	Vel. Ang [°/s]	Vel. Ang [rpm]
1	23	3.8
2	31	5.16
3	31	5.16

Velocidades desarrolladas por los motores, obtenidas en las simulaciones de las condiciones más exigentes de los espacios de trabajo.

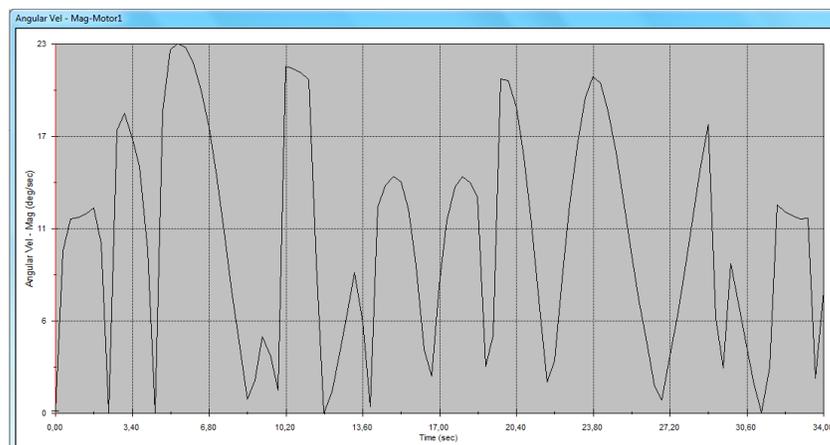


Figura 3.16. Velocidades del motor 1 durante la simulación de espacio de trabajo.

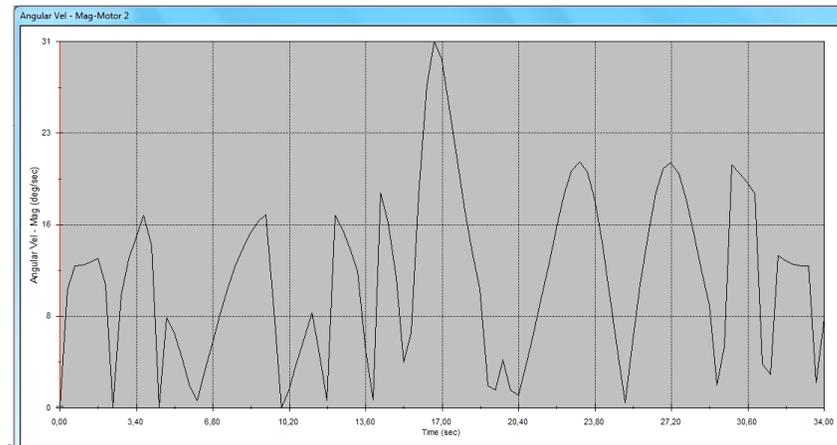


Figura 3.17. Velocidades del motor 2 durante la simulación de espacio de trabajo. .

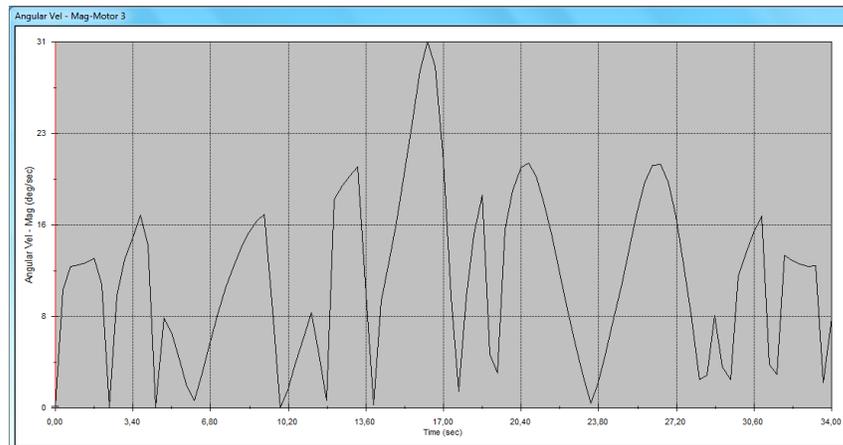


Figura 3.18. Velocidades del motor 2 durante la simulación de espacio de trabajo.

Las figuras anteriores corresponden a las velocidades de los motores 1, 2 y 3; Resultados de la simulación para condiciones más exigentes del espacio de trabajo del modelo.

3.3.5.3. Necesidades para la selección: Para la selección de los motores se tienen los valores del par pico, el par RPM y la velocidad angular máxima 5.16 RPM. Con el par pico de 0.881 N.m se selecciona un reductor con un valor mayor a este. Par = 1 N.m Reductor de 8000 RPM máximo. Se da un margen de

seguridad del $\pm 50\%$ para la velocidad pico. Con ello el rango de velocidad es igual a:

$$5.16 \text{ RPM} + 5.16 \text{ RPM} = 10.33 \text{ RPM.}$$

Reductor: Con las RPM máximas y este rango se calcula la razón r máxima del reductor:

$$8000 \text{ RPM} / 10.33 \text{ RPM} \text{ que equivale a una relación } 774:1$$

Es decir la razón del reductor a seleccionar debe ser menor que 774:1:
Selección 64:1.

La eficiencia del reductor n es del 49%. Esta se utiliza para determinar el torque medio que suministra el motor.

$$T_{motor} = \frac{T_{rms}}{r * n} = \frac{0.334}{64 * 0.49} = 10.65 \text{ mN.m}$$

Además se debe calcular las RPM que suministra el motor a partir de la razón del reductor y las RPM pico.

$$RPM \text{ motor} = 64 * 5.16 \text{ RPM} = 330 \text{ RPM}$$

Con estos dos parámetros se puede seleccionar un motor apto para la aplicación. Para la selección de motores y accesorios se tienen en cuenta el torque RMS de los tres motores, debido a que el movimiento debe ser desarrollado por cualquiera de ellos.

Reductor: Este torque se asigna a la salida del reductor, al igual que la velocidad pico obtenida en las gráficas. Con este torque pico en la página de Maxon Motor se selecciona el de mayor valor.

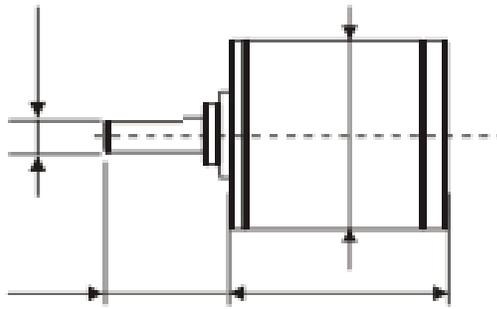


Figura 3.19. Reductor seleccionado: Planetary Gearhead GP 22C Ø22 mm, 0.5 - 2.0 Nm, Ceramic Version.

Fuente: Maxon Motor

Tabla 3.9. Especificaciones del reductor

Razón de reductor	64:1
Torque continuo máximo	1.8 N.m
Eficiencia	49%
Diámetro eje de salida	4 mm
Diámetro elemento	22 mm
Precio	USD \$140.64

Motor: Consultando la lista de productos de Faul Hauber se tomó el valor subsiguiente al obtenido de par y de velocidad en la sección de cálculos, para la selección del motor.

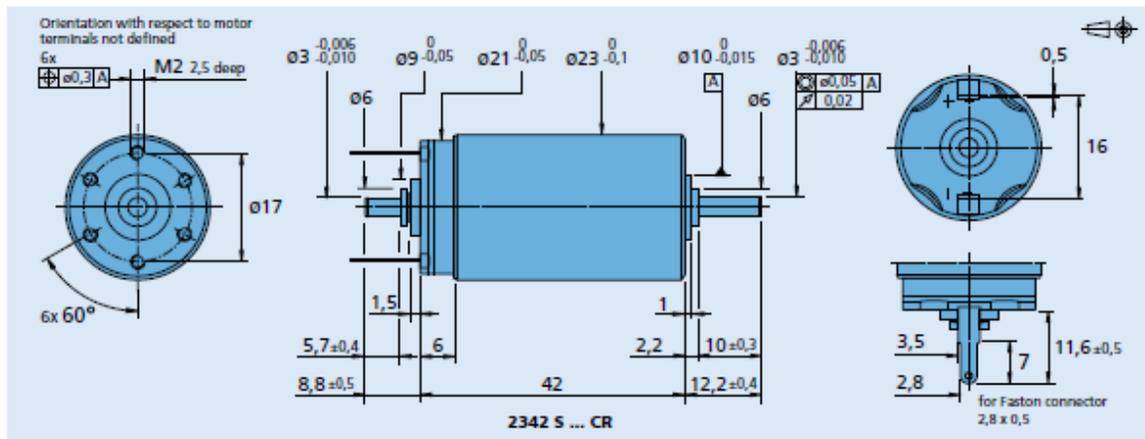


Figura 3.20. Motor seleccionado: 2342 L012 CR 22 Ø23 mm, DC – Micromotor, conmutación de grafito.

Fuente: Faulhaber

Tabla 3.10. Especificaciones del motor

Referencia 2342 L012 CR	Precio USD \$61.64
Potencia	17 W
Voltaje nominal	12 V
Velocidad sin carga	8100 RPM
Max. torque continuo	80 mN.m
Corriente sin carga	0.075 A
Corriente Máxima	1.4 A
Max. Eficiencia	80 %
Constante torque	13.4 mN.m/A
Constante de velocidad	713 RPM/V

Encoder: la selección del encoder está sujeta a las dimensiones del motor y a las salidas que se deseen manejar para sensar la posición del motor.



Figura 3.21. Encoder.

Fuente: Faulhaber

Tabla 3.11. Especificaciones del encoder

DATOS TECNICOS	IE3 – 1024 (L)	
Líneas por revolución	Max. 1024	
Voltaje nominal	5 +/- 10%	V
Canales	2	
Corriente constante	16(17)	mA
Rango de temperatura	-40 ...+100	°C
Ancho de pulso	90+/- 75	°e
Rango de frecuencia	15 ... 460	KHz
Para combinación con	Motores DC	

3.3.5.4. Verificación de la selección: Luego de seleccionar el motor se comprueba la corriente continua y el voltaje nominal a partir de los parámetros en la hoja de datos.

Verificación de la corriente:

$$T_m = K_m * I; \quad K_m = 13.4 \text{ mN.m/A}; \quad T_m = 10.65 \text{ mN.m}$$

$$I = \frac{10.65 \text{ mN.m}}{13.4 \text{ mN.m/A}} = 795 \text{ mA}$$

La I_{max} del motor es 1.4 A; el valor calculado esta debajo de este, por lo tanto funcionara correctamente.

$$\text{Verificación de la tensión: } w = K_b * V; \quad K_b = 713 \text{ RPM/V}; \quad w = 330 \text{ RPM}$$

$$V = \frac{330 \text{ RPM}}{713 \text{ RPM/V}} = 0.5 \text{ V}$$

La tensión nominal del motor es 12 V, por lo que funcionara correctamente.

3.3.6. Construcción del Modelo.

Ya cumplida la fase de simulaciones y diseño, se dio inicio al proceso de construcción del robot. La mayoría de las piezas fueron realizadas en máquinas CNC, como los ejes de las articulaciones y el acople con el motor en aluminio, los acoples de los rodamientos, las terminaciones de los ambos brazos y así mismo el efector final y la base superior en acrílico.

Fabricación de los ejes de las articulaciones

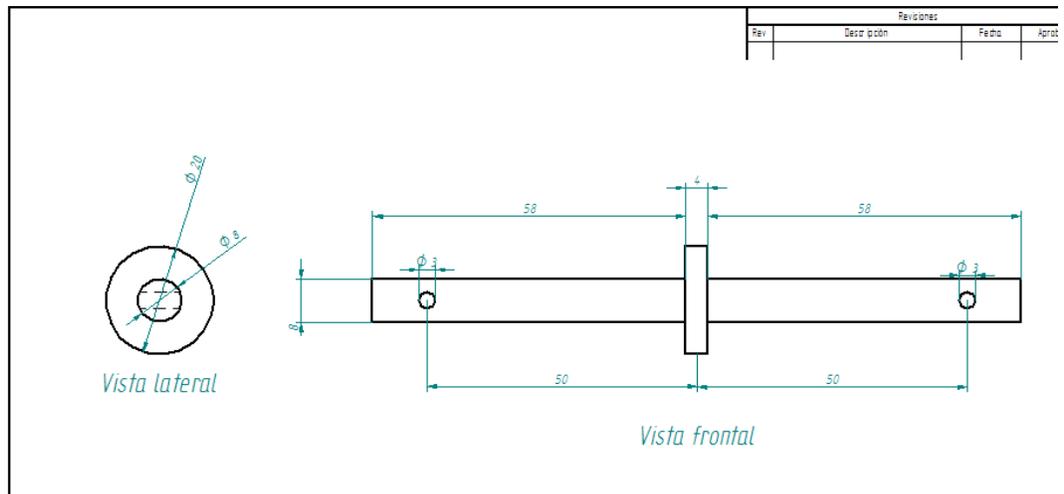


Figura 3.22. Especificación de diseño de los ejes.



Figura 3.23. Fabricación de los ejes de las articulaciones.



Figura 3.24. Fabricación de los ejes de las articulaciones.

Fabricación de los acoples de los motores y los brazos superiores

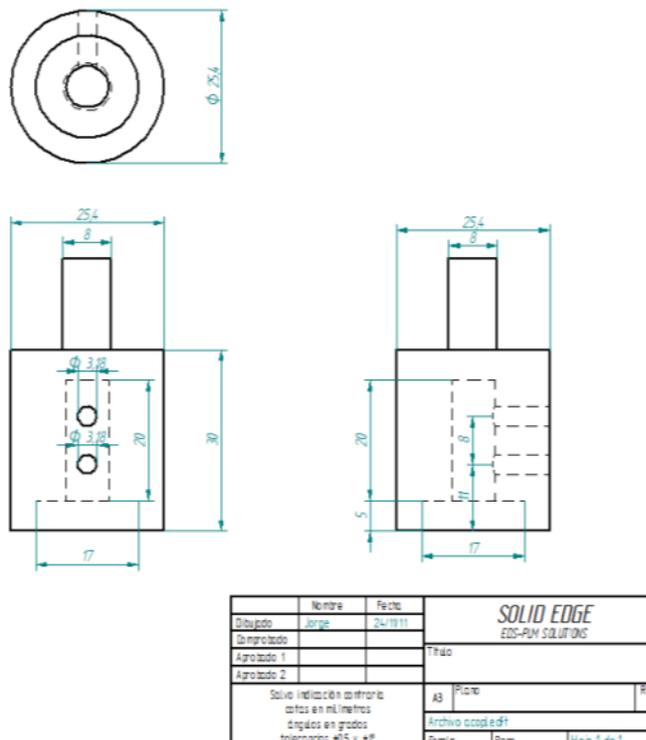


Figura 3.25. Especificaciones de diseño de los acoples.

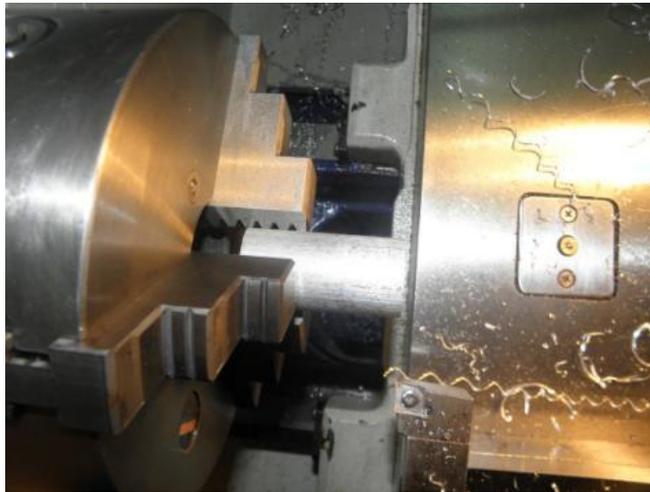


Figura 3.26. Maquina CNC en el proceso de construcción de los acoples.



Figura 3.27. Devastado en la construcción de los acoples.



Figura 3.28. Acoples de los motores.



Figura 3.29. Ejes de las articulaciones.

Fabricación de los acoples de los brazos y los rodamientos



Figura 3.30. Fabricación de los cojinetes de los brazos superiores.

El modelo del Robot Delta construido es presentado en la siguiente figura. En esta, se identifican las juntas de los brazos, los acoples con los motores y otros detalles. Los acoples de los brazos a los ejes, se realizo con tornillos metálicos de 1/8"

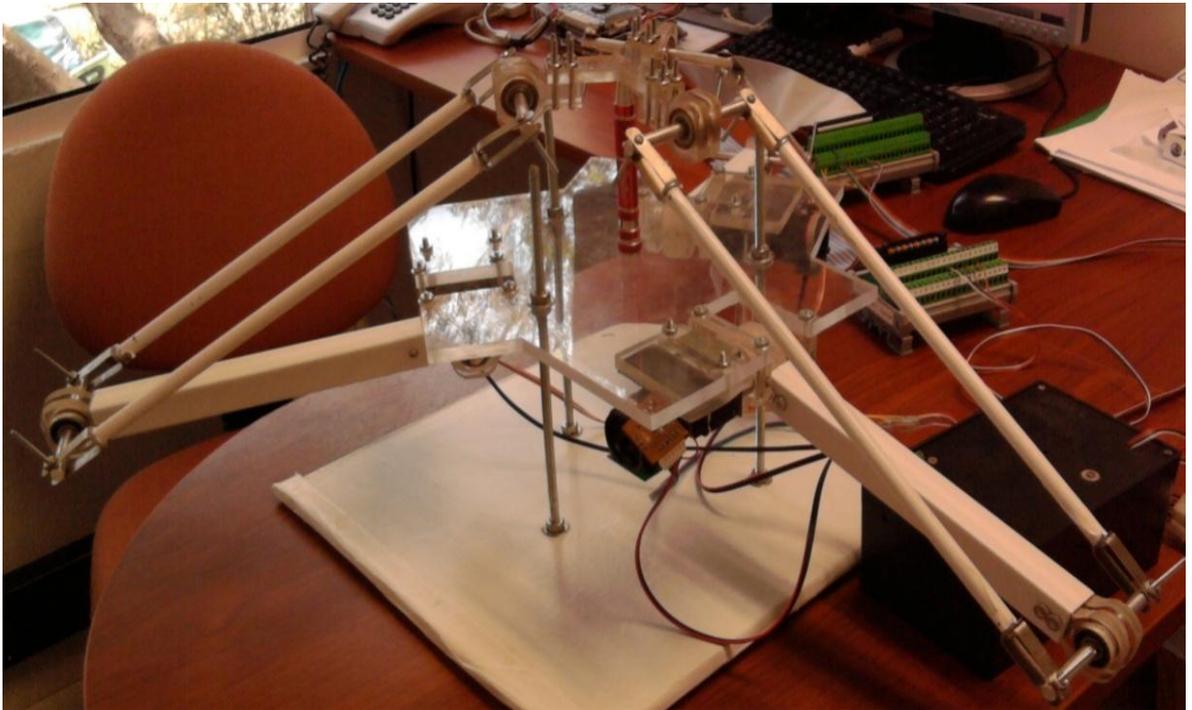


Figura 3.31. Robot Delta construido.

3.4. Diseño del Hardware de control.

El hardware de control del Robot Delta se diseñó inicialmente pensando en incentivar la investigación posterior en este tipo de dispositivos, razón por lo cual se basó en materiales encontrados usualmente en el mercado, como motores DC (con reductor y encoder), integrados como puentes H, todo controlado con la PC104, como se presenta en la figura 3.32.

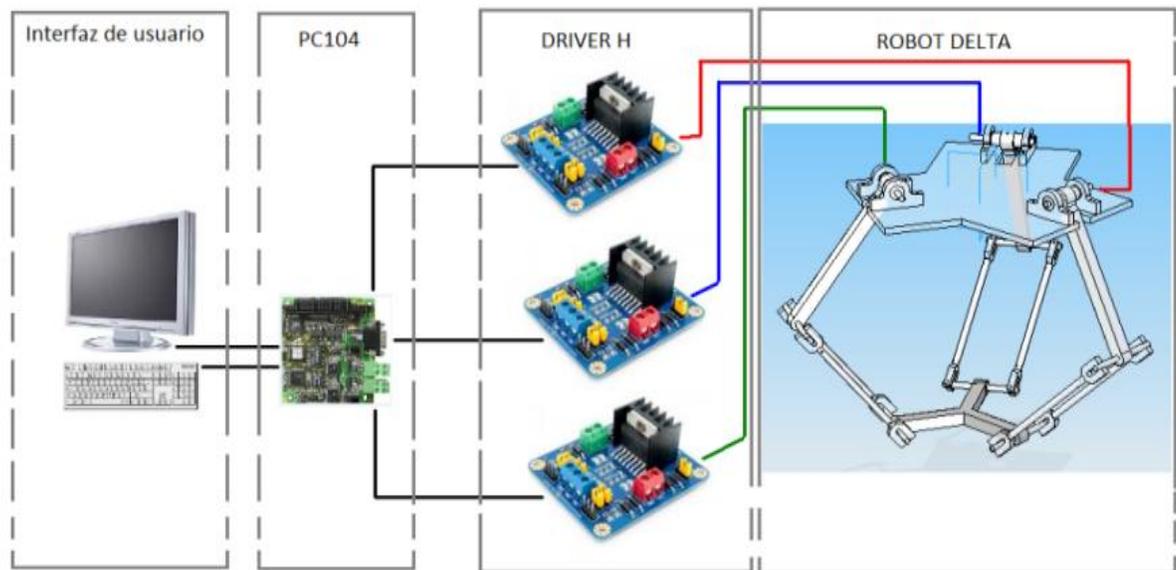


Figura 3.32. Esquema del Hardware de control.

El hardware se compone de tarjetas que reciben una señal análoga desde la PC104, y la traducen en una equivalencia de la corriente que se desea circule por los actuadores. Esto se logra con amplificadores operacionales, y el monitoreo de la corriente que circula por el motor.

3.4.1. Tarjeta PC104.

PC/104 o PC104 es el sistema que permite realizar el control y la comunicación de los motores mediante los algoritmos de control y las tarjetas de control.



Figura 3.33. Tarjeta de control PC104.

La utilización de esta tarjeta es fundamental, ya que es el centro de control del robot como tal. Sus aplicaciones como convertor digital análogo (DAC) facilita mediante un algoritmo de control el envío de señales que se traduzcan en dirección y magnitud de corriente para los motores que controlan al robot. Así, es posible mediante un sistema electrónico hacer el tratamiento respectivo de la señal para que sea amplificada y empleada en el control de los motores.

3.4.2. Circuito de control del motor.

El circuito de control, se basa en un sistema para controlar la corriente que circula por el motor. Utilizando la combinación de varios circuitos que emplean amplificadores operacionales, y que son recomendados por algunos fabricantes de controladores de motores, es posible a partir del setpoint decodificar la señal de magnitud y de dirección.

El modelo desarrollado, consta de 5 secciones o módulos, las cuales son descritas a continuación:

La primera recibe la señal análoga de la tarjeta PC104 y realiza un tratamiento a la señal con un amplificador instrumental (uno para cada motor), para el rechazo al modo común, ya que la señal análoga de otro sistema posee una referencia de tensión diferente a la que se trabaja en el sistema de los motores. Así se elimina diferencias de tensión entre la referencias de las señales.

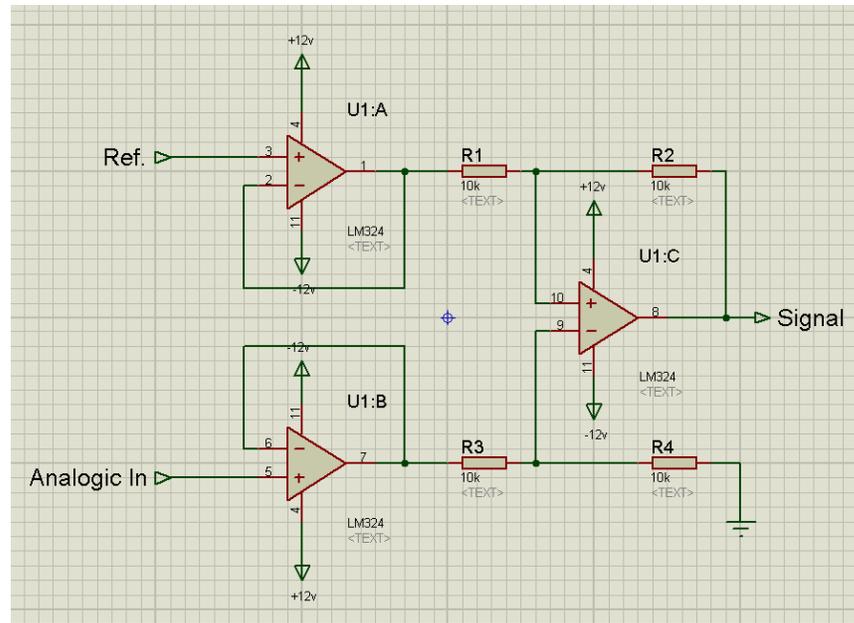


Figura 3.34. Amplificador instrumental.

La segunda sección, toma la señal tratada por los amplificadores instrumentales, y con un OPAM traduce la dirección de giro del motor. Se emplea un diodo zener 1N4733, el cual rectifica valores de tensión negativos a 0V, y mayores que 0V a 5.1 v. Cuando el valor es 0V la dirección de giro será por ejemplo derecho, pero si es 5.1V, el sentido de giro será izquierdo.

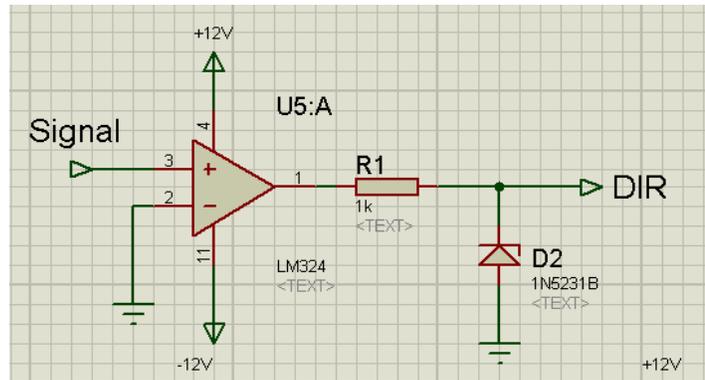


Figura 3.35. Módulo de dirección.

La tercera sección entrega la magnitud de corriente que deberá circular por el motor. Se compone básicamente de OPAMs que amplifican la señal recibida, obteniendo siempre solo la magnitud de la señal, independientemente si es positiva o negativa.

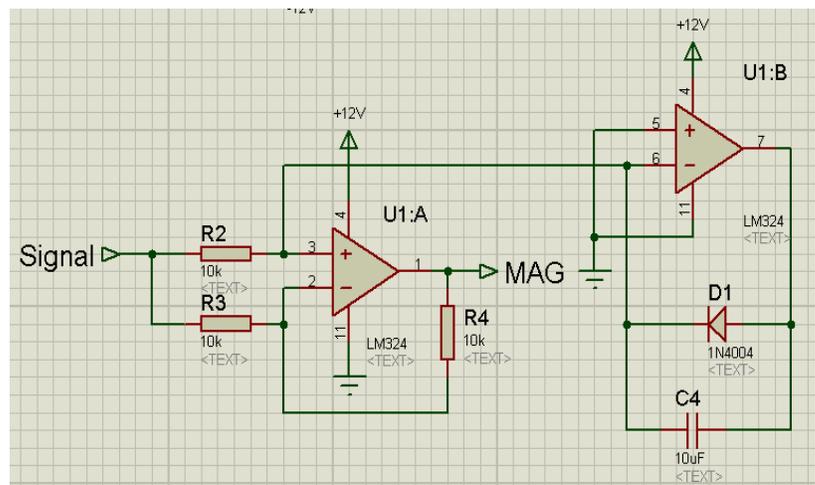


Figura 3.36. Modulo de Magnitud.

La cuarta sección es el circuito de control on/off. Se compone de un OPAM (U1:C Figura 4.31) En la entrada, que monitorea que el valor de corriente sea el deseado a partir del valor de la magnitud (MAG) y del valor de la corriente de sensado (IMON). La diferencia entre estos valores es la que activa el CI NE555. Este es un temporizador bipolar capaz de producir retrasos u oscilaciones con alta estabilidad. Al activarse este CI el OPAM (U1:D) aumentara la salida PWM hasta

que se cumpla un retardo dado del valor de la resistencia R11 y el capacitor C3. Después de este retardo se desactiva el NE555 y el valor de PWM decrece, hasta que la diferencia del OPAM (U1:C) sea menor que la deseada y así el ciclo se inicia otra vez al activarse el CI NE555. A este control se le conoce como on/off, y el valor de la corriente será el rms de la señal de que se activa y desactiva, un PWM.

Según la hoja de especificaciones del oscilador NE555 (ver anexo), se permite calcular el valor del tiempo de descarga mediante la fórmula: $T_{off}=1.1RC$, donde R y C son los valores de la resistencia R11 y C3, previamente señalados. Para un valor aproximado de frecuencia de 40KHz, el producto RC debe ser igual a 20×10^{-6} . De los cuales los valores de R11 y C3 son $2K\Omega$ y 10nF, respectivamente.

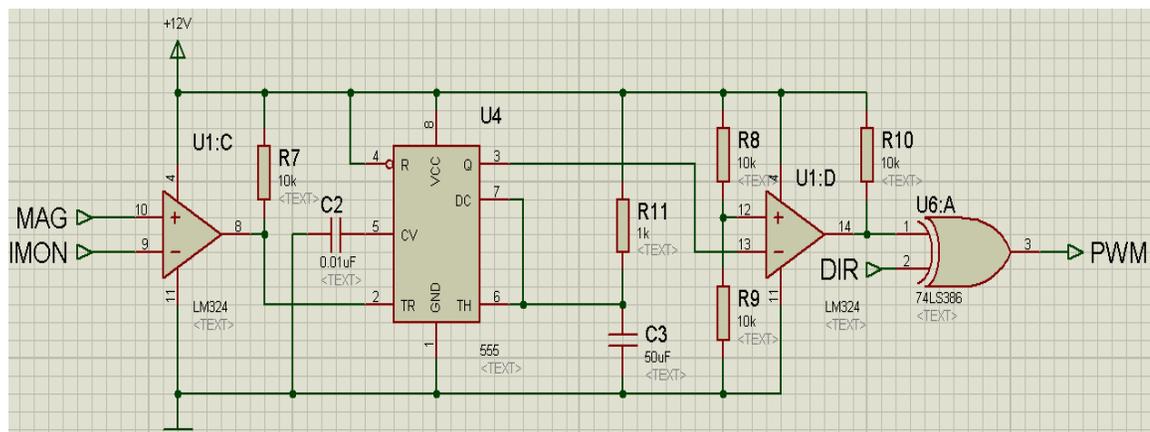


Figura 3.37. Modulo de control on/off de corriente.

La quinta sección, es la sección de amplificación de potencia. En esta parte se encuentra el CI L298 y la sección de amplificación de la señal de monitoreo de corriente IMON, para lo cual se emplea un amplificador LM358. El driver H es un driver que soporta altos voltajes de fuente y altas corrientes, para el manejo de los motores. Este integrado posee dos puentes H, conectados con una interfaz lógica de TTLs, que permiten el cambio de sentido de giro del motor, sin incurrir en la activación simultánea de los transistores de potencia que lo componen. Por

sección posee dos pines de control In1 e In2, con los cuales se maneja el sentido de la corriente, o el sentido de giro en este caso, y un pin de activación (Enable) con el cual el puente H estará disponible para funcionar. Así mismo cada puente H posee un pin para sensado de corriente, al cual se le conecta una resistencia de baja carga, y alta disipación de potencia generando un voltaje proporcional a la corriente que circula por el circuito. Este voltaje es amplificado por el OPAM LM358 con una ganancia de 100, para que sea empleado en la sección de control on/off.

Una de las ventajas de este dispositivo es que posible conectar en paralelo los puentes H que contiene para manejar así mayores cargas. Esta configuración será empleada para el manejo de los motores y así tener mayor potencia disponible, en total 4 amperios permisibles.

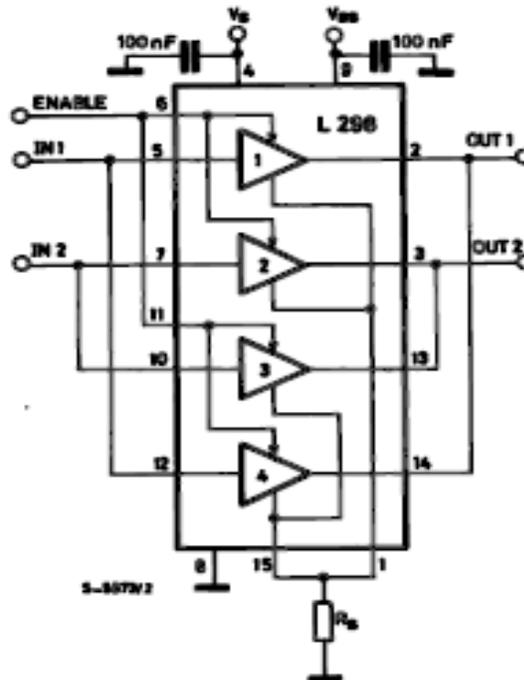


Figura 3.38. Conexión en paralelo del L298.

Fuente: Datasheet ST electronic.

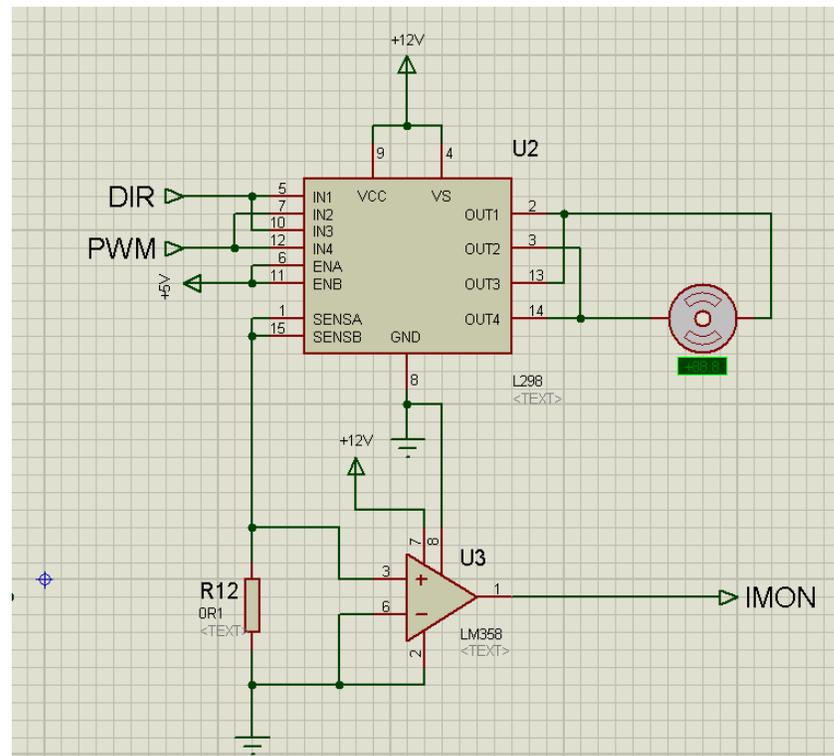


Figura 3.39. Circuito Integrado L298 conectado en paralelo para control del motor, y sección de amplificación. .

3.4.3. Diseño de módulos de encoders.

Los módulos de encoders seleccionados para los motores son ópticos, por lo que emplean sensores opto acopladores. Estos módulos requieren la conexión de las resistencias de alimentación de los LEDs y para las barreras foto-receptoras. El circuito es el ilustrado en la siguiente Figura 4.40. QA y QB son las señales de salida de los encoders.

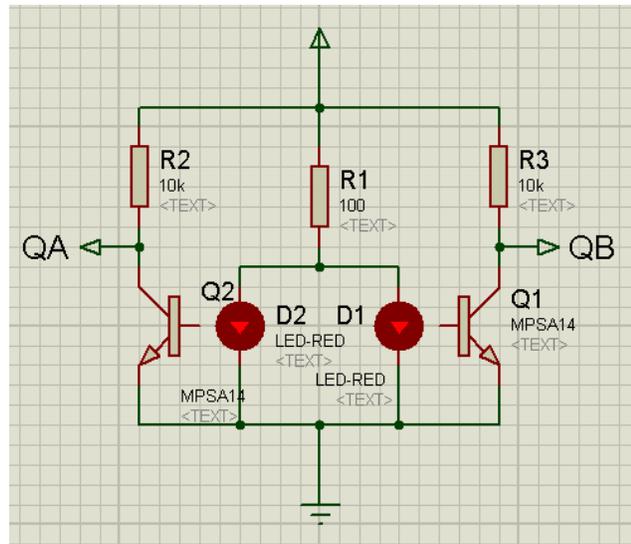


Figura 3.40. Conexión de encoders.

3.4.4. Características generales de los circuitos integrados

Amplificador de potencia L298: Como ya se mencionó en un manejador con dos puentes H incluidos (ver anexo), soporta una tensión de alimentación de 46V, y cargas de 2A por cada puente. En la configuración en paralelo soporta 4A. La alimentación de este integrado será de 12V, debido a que esta es la máxima tensión que soportaran los motores en funcionamiento. Como posee un circuito de control de dirección conformado por compuertas AND e inversoras TTL, es necesario alimentarlas además con 5V. Las entradas de dirección (In1 e In2) así como la de activación (En), trabajan en el rango de -0.3V a 7V. Un voltaje mayor destruye la compuerta. Este integrado es capaz de disipar 25W.

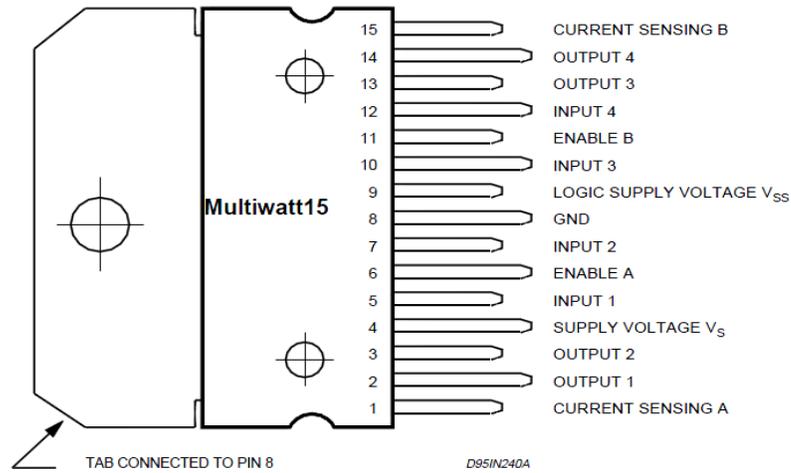


Figura 3.41. Diagrama de Pines del L298.

Fuente: Datasheet ST electronics.

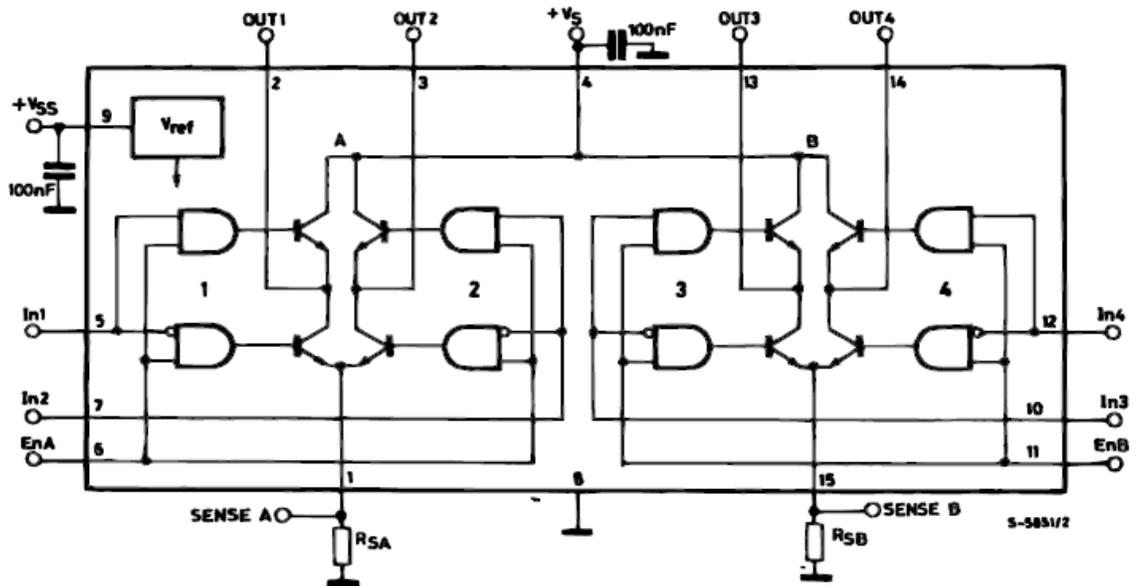


Figura 3.42. Diagrama del circuito del L298.

Fuente: <http://www.st.com/internet/analog/product/63147.jsp>

Temporizador NE555: Este temporizador trabajara como un oscilador, el cual tendrá un ciclo útil controlador por una resistencia y un capacitor que producirán el retardo necesario para mantener el control on/off. El valor de las resistencia es 2KΩ y el del capacitor 1μF. lo cual produce un retardo de 2ms. Este integrado se

puede alimentar hasta con 18V, por lo que los 12V serán suficientes para su funcionamiento. Su consumo de corriente máximo es de 15mA.

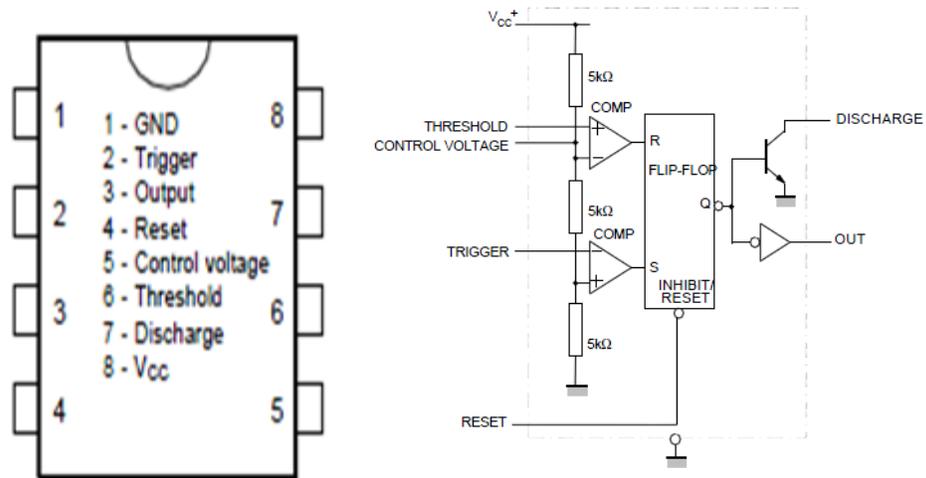


Figura 3.43. Temporizador NE555.

Fuente: Datasheet ST electronics.

OPAMs: Debido a la gran cantidad de OPAMs a utilizar para controlar cada motor es necesario emplear un CI que contenga varios amplificadores. Se encuentra el CI LM324, un encapsulado que posee 4 OPAMs. Este integrado se puede alimentar en el rango de $\pm 16V$, o 0-32V. Por lo que el rango de $\pm 12V$, es factible para este integrado, ahorrando además la compra de varios encapsulados, espacio y routing en las PCB de los módulos. De este modelo se empleara 1 encapsulado para cada amplificador instrumental, y 1 en cada tarjeta de control para el on/off y para MAG, y 1 para el valor DIR. Para la sección de ganancia de 100 para IMON (voltaje de sensado) se empleara el encapsulado LM358, el cual contiene 2 OPAMs en su interior, y puede ser alimentado con una fuente simple de voltaje de hasta 32V, por lo que los 12V de alimentación es funcional.

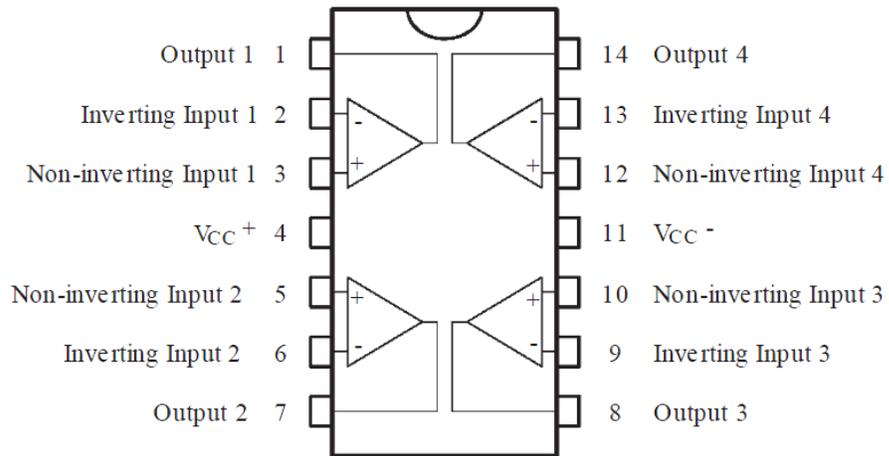


Figura 3.44. Amplificador operacional LM324.

Fuente: Datasheet ST Electronics.

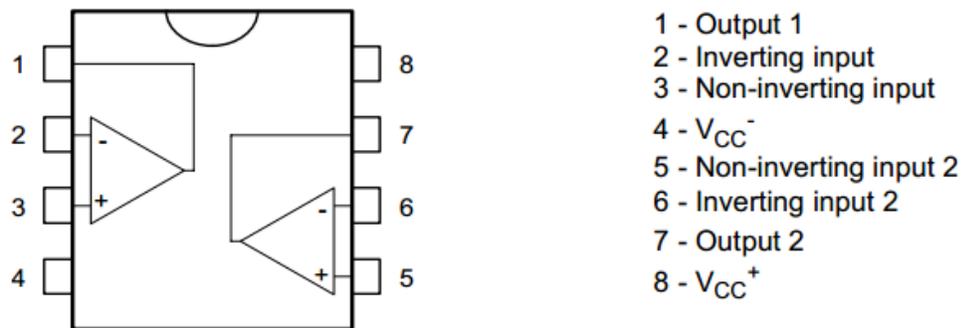


Figura 3.45. Amplificador operacional LM358.

Fuente: Datasheet ST Electronics.

OR exclusiva: Estos integrados es posible encontrarlos actualmente en encapsulados de 14 pines, con 4 compuertas que los constituyen. Esto resulta conveniente al ser requeridas 3 compuertas, una para cada motor. Además su alimentación de 5V, por ser tecnología TTL resulta manejable para la alimentación de 12V.

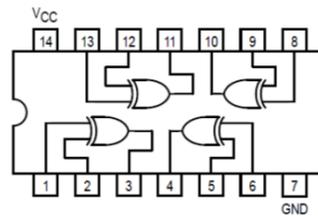


Figura 3.46. OR exclusivas 74LS386.

Fuente: Datasheet National Semiconductor.

3.4.5. Diseño de las PCBs.

Para el diseño de las PCB, se tuvo en cuenta la cantidad de OPAMs requeridos para cada sección, de las 5 mencionadas anteriormente. De esta forma y teniendo en cuenta que el LM324 posee 4 amplificadores incluidos, se llegó a los modelos presentados a continuación.

PCB de amplificación: Esta placa contiene el integrado L298 para el módulo de amplificación de potencia, el módulo de amplificación de corriente de sensado, parte del módulo de control on/off, y la sección de MAG.

Las conexiones de entrada a la PCB son los 12V. Las salidas son los ocho pines: dos para conectar el motor, dos para alimentación de 5V para los encoders, uno para la señal de DIR, uno para la señal SIGNAL de los amplificadores de instrumentación, ya que es empleada en el módulo de MAG, y dos últimos para la salida hacia la or exclusiva y su respectiva entrada que es PWM para el L298. Las dimensiones del modelo son 10 x 5 cm. El modelo es siguiente:

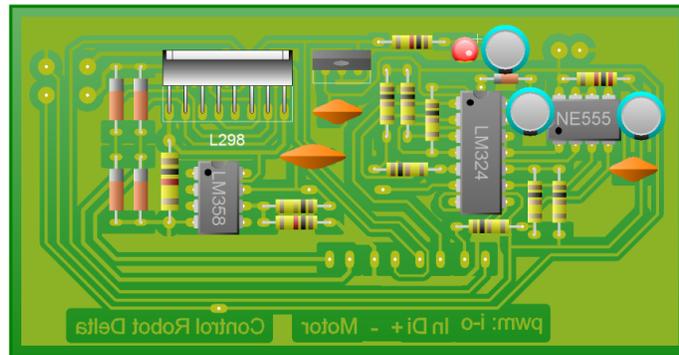


Figura 3.47. PCB de control de motor.

La construcción del modelo paso por paso es el siguiente:

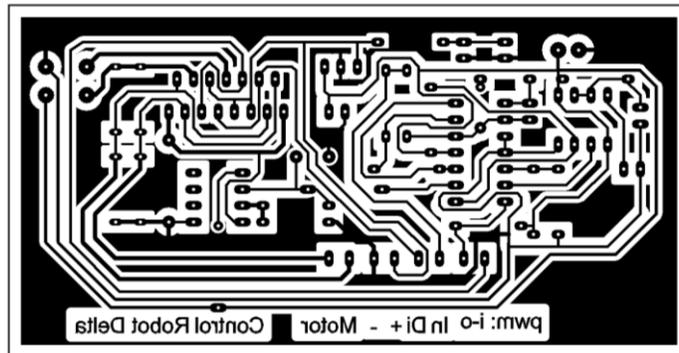


Figura 3.48. Modelo de pistas para quemar en la baquelita.

Modelo plasmado en baquelita:

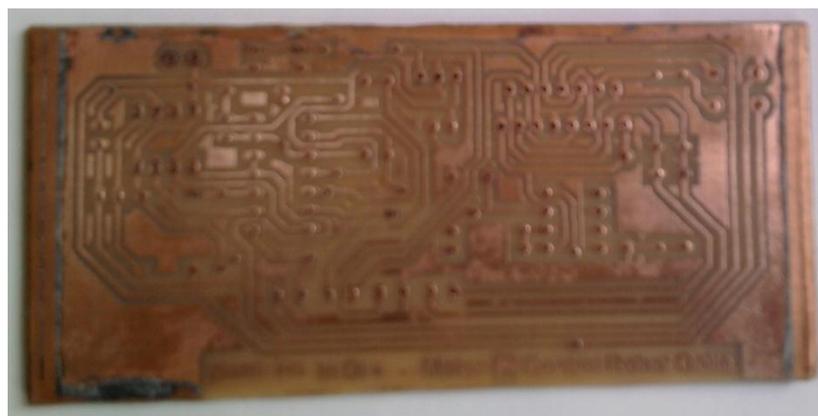


Figura 3.49. Baquelita con el routing elaborado, y agujeros hechos.

Modelo taladrado e instalando puentes y resistencias:

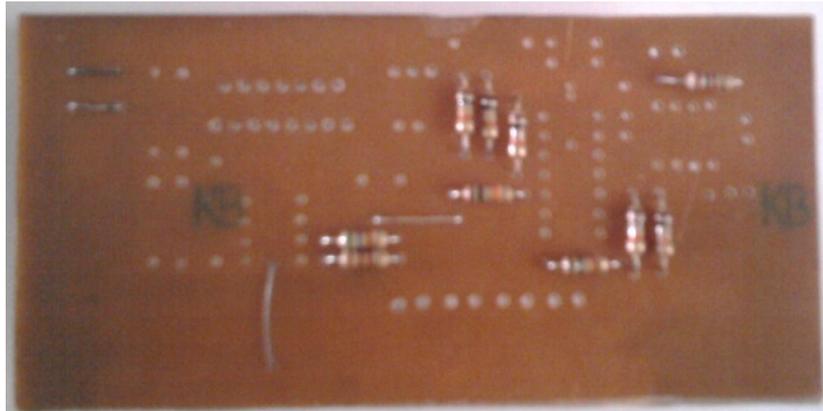


Figura 3.50. Posicionamiento de algunos componentes.

Instalando otros componentes:

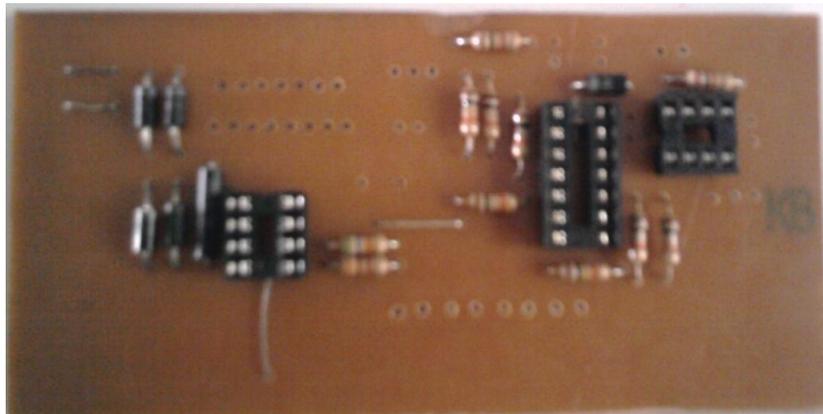


Figura 3.51. Posicionamiento de bases de integrados.

Modelo terminado:

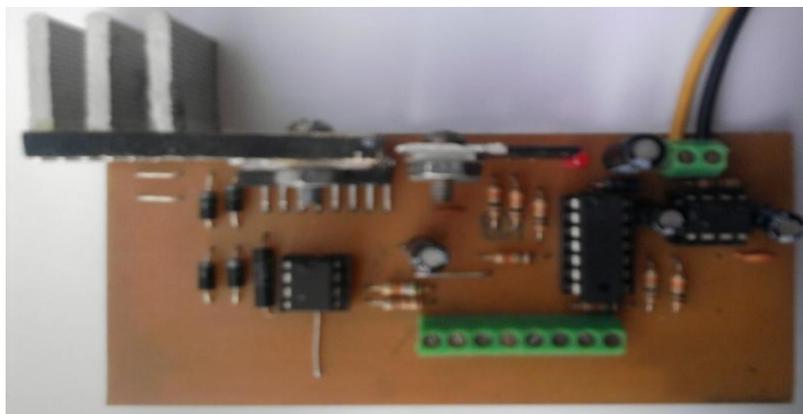
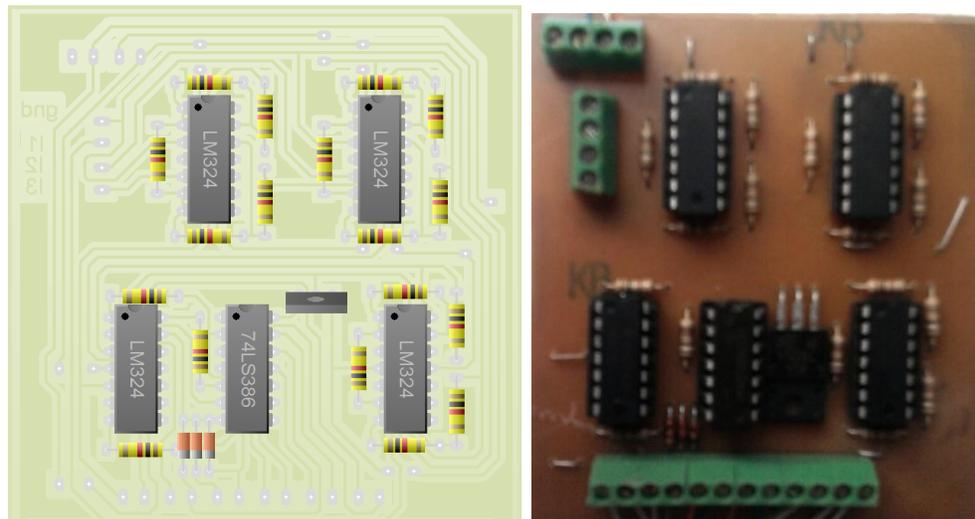


Figura 3.52. Tarjetas de control de motores terminadas.

Cabe resaltar que fueron 3 de estas tarjetas la que se construyeron para cada motor. A parte de esto tanto al puente H como al regulador se le instalaron disipadores de calor, elementos necesarios para su funcionamiento.

PCB de OPAMs de instrumentación: Esta placa a parte de contener los amplificadores de instrumentación, también contenía el modulo de DIR y el encapsulado de las compuertas or exclusivas. Como se menciona anterior mente se empleo un encapsulado para cada amplificador de instrumentación y un encapsulado para tratar a las tres señales de DIR. Así el modelo planteado es el siguiente:



(a) Layout del modulo de tratamiento de señal (b) Modelo construido

Figura 3.53. Modelo de tratamiento de señales de la PC104.

3.4.6. Diseño final del hardware de control.

Para almacenar apropiadamente las tarjetas de control desarrolladas anteriormente, se empleó una caja contenedora de dimensiones 17x11x8 cm. Se le adicionaron terminales de conexión para los motores, los cuales son 3 pares,

uno para cada motor. Además, se agregó un terminal para la conexión de las señales de entrada que provienen de la tarjeta de control PC104, empleando un cable USB tipo B, el cual se compone de 4 líneas, una de estas se emplea como referencia para las tres señales de control, una para cada motor. Así mismo posee sus respectivas conexiones para la fuente de energía.



Figura 3.54. *Modulo de control de motores integrado.*

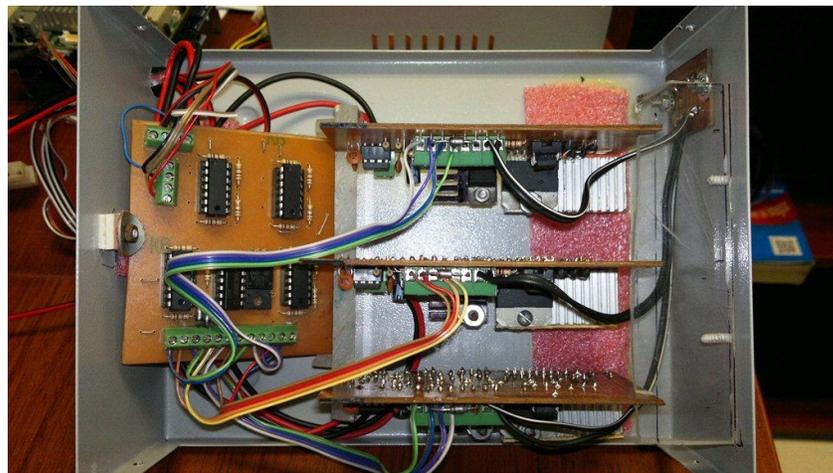


Figura 3.55. *Tarjetas en el interior de la caja contenedora.*

3.5. Prueba del hardware de control.

Ya construidas las PCBs para el control de los motores, se procedió a realizar una prueba de ejes para los motores. En esta prueba solo se requería comprobar el correcto funcionamiento de la circuitería instalada en las tarjetas. Para ello se diseñó, mediante el complemento Simulink de MATLAB, un sistema de control cerrado sencillo para el control de los motores. Este se aprecia en la siguiente figura:

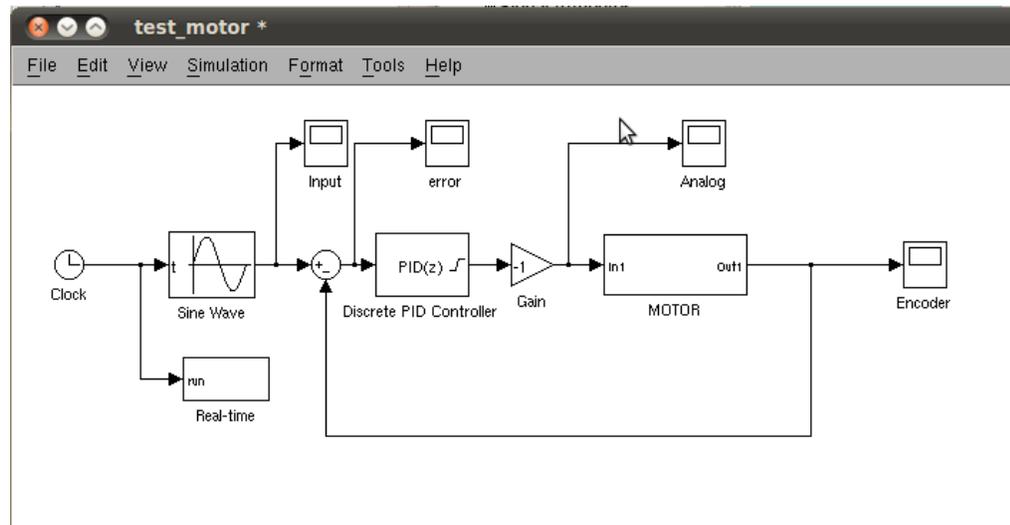


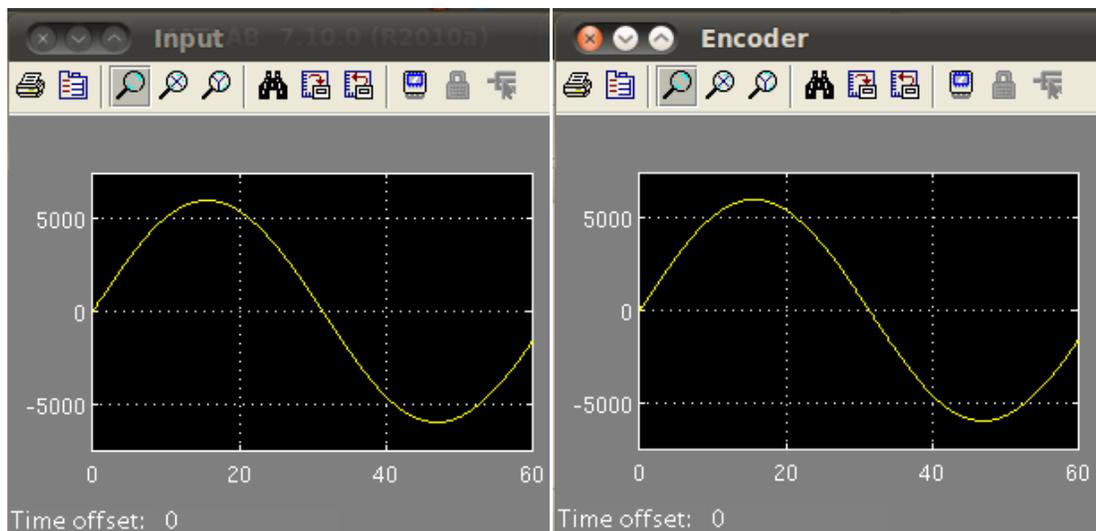
Figura 3.56. Sistema de control para la prueba de las PCBs en Simulink. .

El sistema de control está constituido de un reloj que sincroniza el tiempo de muestreo de las tarjetas análogas de la PC104, con el tiempo de muestreo de Simulink, para así mantener control en tiempo real. Como señal de entrada o setpoint, se seleccionó una onda senoidal, cuyos valores representan la posición deseada del eje del motor. La amplitud que se configuro para la señal fue de 120 pulsos, teniendo en cuenta que el encoder del motor entrega la relación de 12 pulsos/vuelta, y una frecuencia baja de ondulación, para que fuese posible apreciar el desplazamiento del eje.

Se agregó también un controlador PID discreto, debido a la naturaleza digital de los computadores. Este controlador permite la opción de configurar las constantes proporcional, integral y derivativa, para un control preciso. Estas variables se configuraron a pequeñas ganancias, la proporcional: 0.01 y la derivativa: $10e-5$. El bloque motor, representa lógicamente al motor de prueba. La entrada de esta función es la señal análoga proveniente del PID, y que traduce la posición deseada del eje, y la salida es la lectura de posición del encoder.

Una de las ventajas de Simulink es que permite agregar Scopes, o funciones de monitoreo, que grafican en tiempo real el comportamiento de las señales que se requieran. En este caso se agregaron 4 scopes, "input" (entrada-posición), "error" (la diferencia entre el setpoint, y la salida del encoder), "Analog" (la salida del PID) y "encoder" (la posición actual del eje del motor).

Ya configurado el sistema de control, se realizó la debida conexión de las salidas análogas y las entradas de encoder a la tarjeta PC104, a los módulos de control de los motores. Los resultados obtenidos son los presentados a continuación:

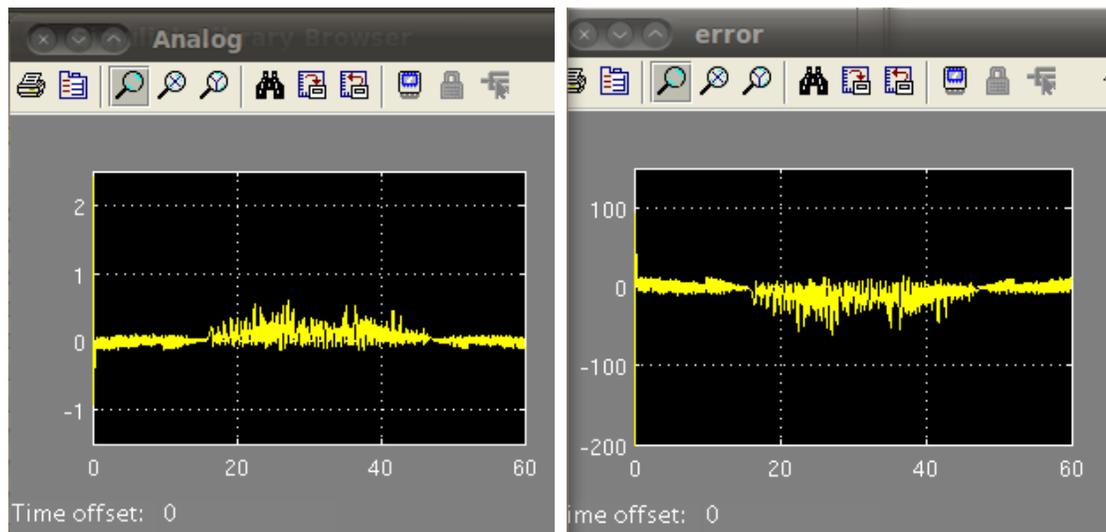


(a) Setpoint de posición

(b) Lectura de encoder

Figura 3.57. Resultados de las pruebas al hardware de control

Se aprecia en la figura de la izquierda la señal senoidal conectada como setpoint, entrega la posición deseada para el eje del motor, los valores mayores que cero, son las posiciones que debe tomar el eje en sentido horario, y los valores menores que cero, son las posición en sentido anti horario. En la figura de la derecha, se obtiene la lectura del encoder del motor, notando que este alcanza las posiciones deseadas en las mismas fracciones de tiempo.



a) Señal analógica del controlador b) Señal de error del sistema de control

Figura 3.58 Resultados de la prueba al hardware de control. Señales de control.

La prueba se realizó con las tres tarjetas diseñadas para el control de los motores. Cada una entrega exactamente las mismas respuestas para los motores, dando cuenta de su correcto funcionamiento.

3.6. Control del robot.

3.6.1. Sistema de control.

Del sistema de control depende en gran medida la precisión y el correcto funcionamiento del robot como estructura general, ya que este se encargara de que cada actuador alcance el setpoint, y consecuentemente el EF llegue a la posición deseada del operario.

Actualmente existen sistemas de control que se basan bien en principios cinemáticos o principios dinámicos. El control cinemático se centra en convertir variables puntuales, como posición o ángulos, en señales continuas que son fáciles de seguir por los actuadores. En cambio el control dinámico requiere un conocimiento profundo de comportamiento del robot desde el punto de vista dinámico, teniendo en cuenta las masas de los eslabones, la acción de la gravedad sobre el robot, la estabilidad del dispositivo como tal (se tienen presentes los ajustes y tolerancias de las partes), y las características dinámicas de los actuadores, siendo este último tipo de control mucho más complejo.

3.6.2. Control básico de posición.

Empleando el control cinemático, se tiene la ventaja de utilizar pocas variables, reduciendo en gran medida la complejidad del sistema. Se identifican en primera instancia los parámetros básicos necesarios para llevar a cabo este control, como lo son las variables de entrada (posición X, Y, Z, o ángulos de los actuadores), la cinemática inversa del robot, el tipo de motor y encoder a utilizar, y sus características de funcionamiento, como el número de pulsos.

Un orden secuencial del proceso de control es presentado en la siguiente figura:

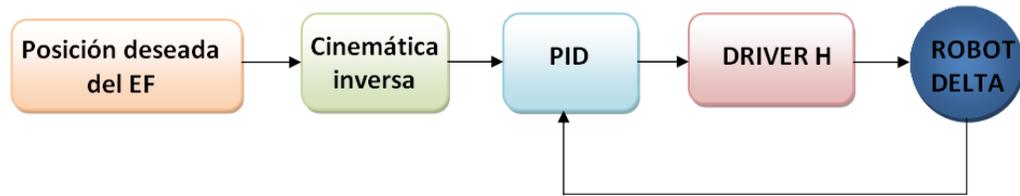


Figura 3.59. Diagrama de control del Robot Delta.

Para un correcto funcionamiento del sistema de control es necesario identificar también las variables a controlar y las variables controladas. Para el control de posición, la variable a controlar será la posición de los ejes de los motores en el reductor, y la variable controlada es el voltaje aplicado a los motores. Es de mencionar que estas variables es posible monitorearlas con la tarjeta PC104, mediante la lectura de encoders se estará sensando periódicamente la posición de los motores, y se aplicara el voltaje calculado por el PID para mantener las posiciones de setpoint.

Empleando la interfaz de Simulink, se agregan como constantes los parámetros de entrada que serán las posiciones X, Y y Z, del EF, estas son multiplexadas con un MUX para ser tratadas por el resto del sistema.

Se introduce una función de usuario que contiene la cinemática inversa del robot. Esta función utiliza las ecuaciones desarrolladas en el inciso 3.3.2., las cuales al darle de entrada los parámetros de posición del EF entregan el ángulo de giro de los ejes conectados a los eslabones. Es necesario en este punto realizar la corrección de la razón de reducción del reductor y tener en cuenta los pulsos por vuelta de los encoders para que el sistema de lazo cerrado de este modo controle el número de revoluciones del eje del motor.

El controlador PID es configurado solo para la ganancia proporcional y la integral, ya que en los sistemas discretos y con rangos tan precisos de control, la sensibilidad a esta variable puede fácilmente desestabilizar el sistema. Estos valores son optimizados en el proceso de sintonización del robot.

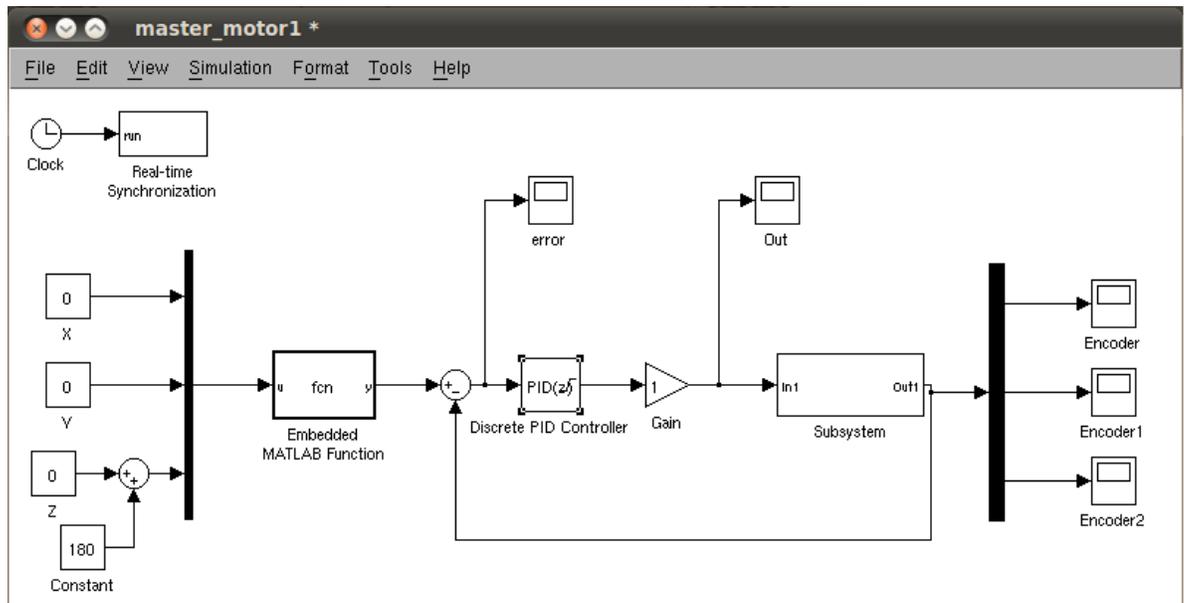


Figura 3.60. Diagrama de bloques del sistema de control del Robot Delta en Simulink.

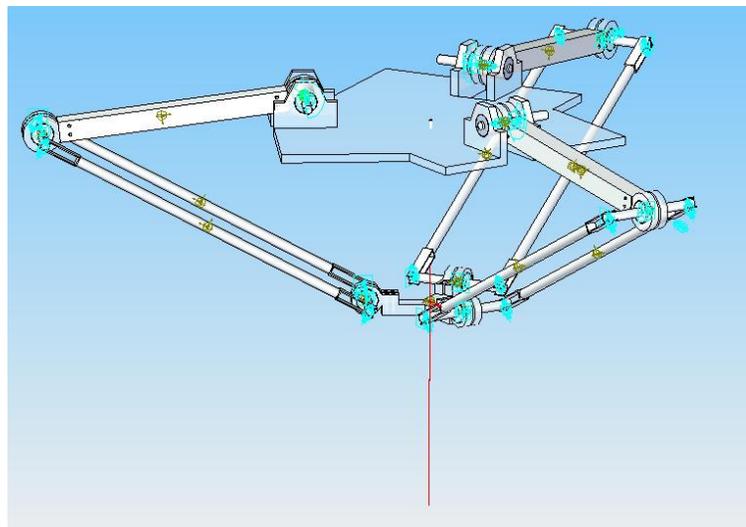


Figura 3.61. Simulación de prueba del Robot Delta

VIDEO: [Delta - Desplazamiento 1](#). La figura 3.61 fue obtenida tras la simulación presentada en este video. Si no abre el video con el hipervínculo, encontrar el video en la subcarpeta “Tesis RD2012/Videos y fotografías/ Delta - Desplazamiento 1”.

Los resultados obtenidos de la simulación del Robot Delta, durante las pruebas realizadas corresponden a las lecturas de posición de los encoders para un recorrido del EF.

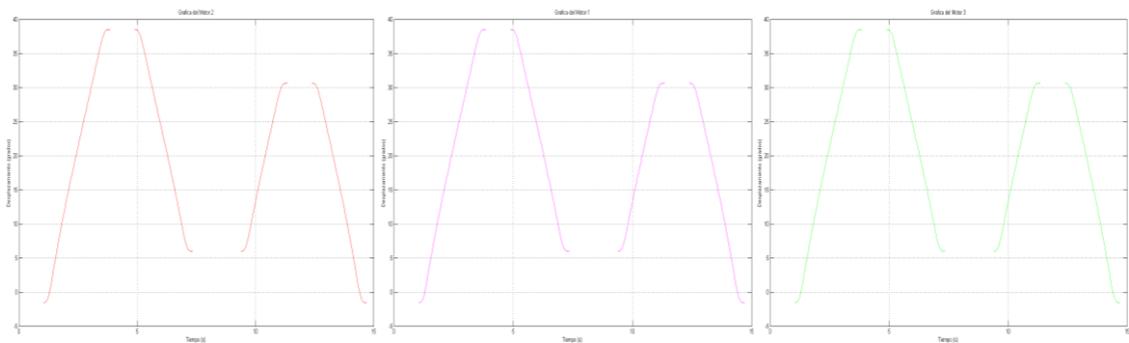


Figura 3.62. Posiciones de los encoders en la simulación.

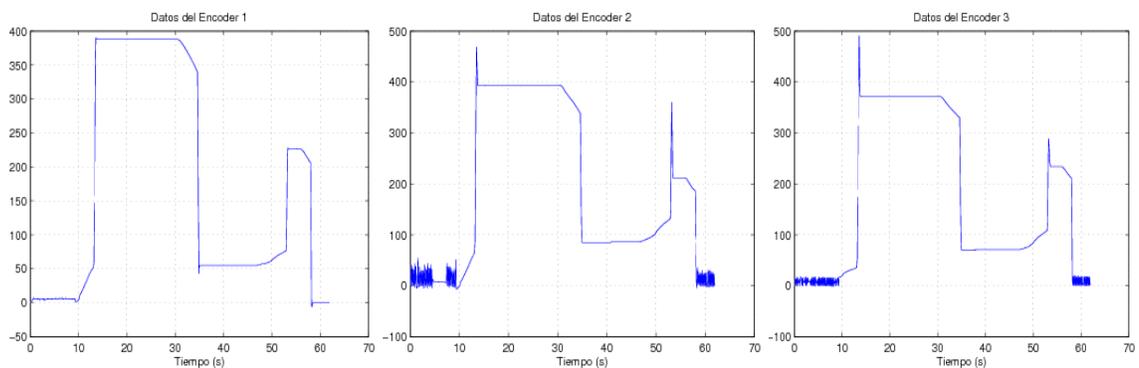


Figura 3.63. Lectura de los encoders durante la simulación.

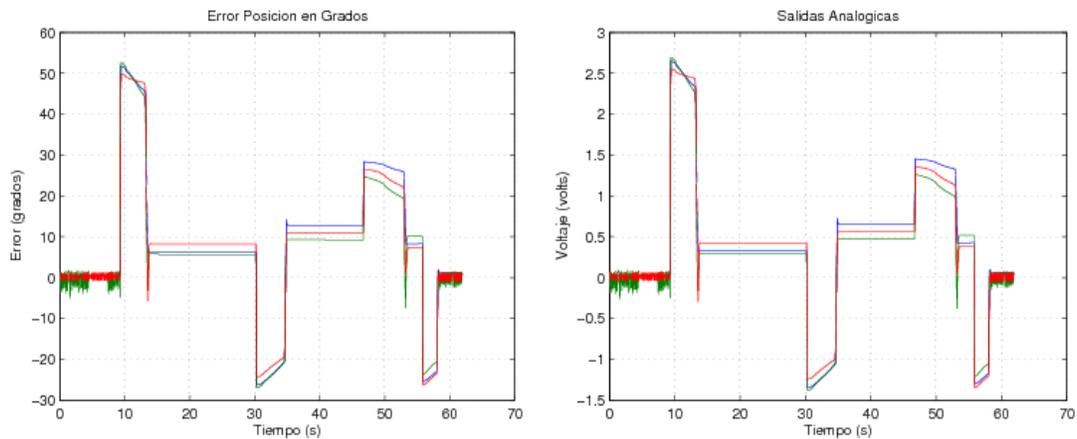


Figura 3.64. Lectura de error de posición (izquierda) y salida del PID (Derecha).

Durante el estado estable del EF los motores se mantienen cerca del valor cero, ya que el setpoint es igual a la lectura de encoders. Cuando se introduce un valor de posición, el sistema de control detecta el error inicial, y de inmediato el PID calcula el valor de tensión a aplicar para corregir el error, de este modo se inicia el movimiento de los motores para alcanzar la posición deseada (ver figura 21). Una vez se acerca a este punto hay un pequeño sobresalto, y el dispositivo se estabiliza en un error de 10° . Este error se debe a que el motor no posee ninguna carga sobre el, y el valor de la constante proporcional no lo corrige completamente.

3.6.3. Planificador de Trayectorias

El planificador de trayectorias es un programa desarrollado en Matlab, que mediante un grupo de funciones y ciertos argumentos de entrada permite la creación de recorridos para el efector final del Robot Delta. Cada función, corresponde a un subprograma que se adjunta en la misma carpeta que contiene el planificador. Cada una de estas funciones, recibe datos de la función anterior por la que es llamada, como lo son las dimensiones de los eslabones o brazos del

robot delta, la separación angular de los actuadores (120° para cada uno), velocidades y posiciones del efector final, la aceleración de los movimientos, y los ángulos de los actuadores durante los recorridos del efector final. Las funciones o subprogramas son descritos a continuación:

3.6.3.1 Planificador: La primera función o programa principal, el planificador, recibe como argumentos de entrada en la sección “Delta geometry” las dimensiones del robot, la separación angular de los actuadores y/o cadenas cinemáticas, y la orientación de los vectores de posición.

```

6 -   deltageom.h = 60;           % radio del efector final
7 -   deltageom.r = 120;       % radio de la base
8 -   deltageom.a = 220;       % longitud del primer eslabon
9 -   deltageom.b = 270;       % longitud del segundo eslabon
10
11  % Angulos de posicion de los brazos
12 -   deltageom.phi1 = 0;
13 -   deltageom.phi2 = 2*pi/3;
14 -   deltageom.phi3 = 4*pi/3;
15
16  % Descripcion de los vectores unitarios
17  % del sistema de referencia del delta
18 -   deltageom.x = [ 0; 1; 0 ];
19 -   deltageom.y = [ 1; 0; 0 ];
20 -   deltageom.z = [ 0; 0; -1 ];

```

Figura 3.65. Argumentos de entrada “Delta geometry” del planificador.

La siguiente sección del planificador contiene la generación de los recorridos para la trayectoria final del efector final, estos son lineales o circulares. En esta parte se inscriben cada una de las características de los movimientos, como lo son el punto inicial, el tiempo de inicial del movimiento, el punto final del recorrido, el tiempo de aceleración, la velocidad máxima del movimiento, y se realiza el llamado a la función “path_planning” que se describirá posteriormente. En esta sección se pueden añadir una cantidad “n” de recorridos, tantos como desee el usuario.

La última sección del planificador se encarga del acople de todos los movimientos generados por las funciones, ya que cada uno de estos, sean lineales o circulares, son enviados individualmente, y son transformados en coordenadas angulares para los actuadores, por la cinemática inversa. De este modo se genera un archivo para cada motor, en el que se inscriben los desplazamientos angulares y el tiempo de estos para cada actuador.

```

32 %% MOVIMIENTO 1: LINEAL
33 - p0 = [ 0; 0; -350 ]; % start point
34 - t0 = end_time( mot1 ); % start time
35 - pf = [ 0; 140; -350 ]; % end point
36 - tacel = 0.5; % acceleration time of 500 ms
37 - velmax = vel; % maximum velocity of 1000 mm/s
38 - mot2 = path_planning( t0, tacel, velmax, p0, pf ); % call path planning
39
40 %% MOVIMIENTO 2: MEDIO CIRCULO Y RETROCESO
41 - p0 = [ 0; 140; -350 ]; % start point
42 - t0 = end_time( mot2 ); % start time
43 - center = [ 0; 0; -350 ]; % center point
44 - normal = [ 1; 0; 0 ]; % normal axis
45 - angle = pi; % Angle displacement
46 - tacel = 0.5; % Acceleration time
47 - velmax = vel; % Maximum velocity
48 - mot3 = path_planning( t0, tacel, velmax, p0, center, normal, angle ); % call
--

```

Figura 3.66. Parámetros de los recorridos lineales y circulares para la trayectoria del efector final.

```

108 %% OPERACIONES DE EXPORTACION DE DATOS
109
110 % one big matrix
111 - motion = join_motion(mot1, mot2);
112 - motion = join_motion(motion, mot3);
113 - motion = join_motion(motion, mot4);
114 - motion = join_motion(motion, mot5);
115 - motion = join_motion(motion, mot6);
116 - motion = join_motion(motion, mot7);
117 - motion = join_motion(motion, mot8);
118 - motion = join_motion(motion, mot9);
119
120 % call joint_data
121 - jangle = joint_data( motion, deltageom );
122
123 % export motor data
124 - exportdata( jangle );
125
126 % graphics
127 - delta_graphics( motion, jangle );

```

Figura 3.67 Operaciones de exportación de datos y generación de graficas del planificador de trayectorias.

3.6.3.2. Path planning: La función `path_planning` se encarga de calcular los tiempos que tardara cada recorrido, a partir del tiempo de aceleración, la velocidad, y las distancias a recorrer dependientes del punto final y el punto inicial del recorrido.

3.6.3.3. Joint motion: Esta función genera una matriz, que unificara todos los recorridos inscritos en el planificador, respectivamente con el tiempo para ello.

3.6.3.4. Joint data: La función `joint_data` se encarga de llamar a la función de la cinemática inversa para el calculo de los desplazamientos.

3.6.3.5. invkin_delta: Esta función aplica la cinemática inversa a cada uno de los brazos mediante un ciclo “for”. Emplea los datos calculados por las funciones anteriores y así determinar los desplazamientos angulares para cada uno de los actuadores.

```

16      % Valores del delta
17 -    h = deltageom.h; % 50
18 -    r = deltageom.r; % 80;
19 -    a = deltageom.a; % 110;
20 -    b = deltageom.b; % 110;
21
22      % angulos de las juntas
23 -    phi = [ deltageom.phi1; deltageom.phi2; deltageom.phi3 ];
24
25      % restaurar puntos
26 -    Px = P(1);
27 -    Py = P(2);
28 -    Pz = P(3);
29
30      % respuesta
31 -    theta = zeros(3,1);
32

```

Figura 3.68. Datos de entrada de la función `invkin_delta`.

```

33 | % para cada pata
34 - | for i=1:3
35 |
36 |     % Cinematica inversa para la primera pata
37 - |     Cxi = cos(phi(i))*Px + sin(phi(i))*Py + h - r;
38 - |     Cyi = -sin(phi(i))*Px + cos(phi(i))*Py;
39 - |     Czi = Pz;
40 |
41 - |     t3i = acos( Cyi/b );
42 - |     K   = ( Cxi^2 + Cyi^2 + Czi^2 - a^2 - b^2 )/( 2*a*b*sin(t3i) );
43 - |     t2i = acos(K);
44 |
45 - |     A = a + b*cos(t2i)*sin(t3i);
46 - |     B = b*sin(t2i)*sin(t3i);
47 - |     sint1i = (A*Czi - B*Cxi) / ( A*A+B*B );
48 - |     cost1i = (A*Cxi + B*Czi) / ( A*A+B*B );
49 |
50 - |     theta(i,1) = atan2( sint1i, cost1i );
51 - |     if ( theta(i,1) < 0 )
52 - |         theta(i,1) = theta(i,1) + 2*pi;
53 - |     end
54 |
55 - | end
56 |
57 - | return

```

Figura 3.69. Cinemática inversa para cada brazo del Robot Delta.

3.2.6.6. Expordata: Expordata hace posible generar un archivo de texto individual para cada actuador, con los recorridos angulares y los tiempos respectivos para cada uno de estos.

3.2.6.7. Delta_graphics: La función delta_graphics es la última función en ser llamada, y entrega una visualización de los recorridos de cada actuador, para que de este modo se corrobore que el robot se mueve dentro del espacio de trabajo.

A continuación se presenta el diagrama de flujo del proceso de elaboración de una trayectoria empleando el planificador de trayectorias.

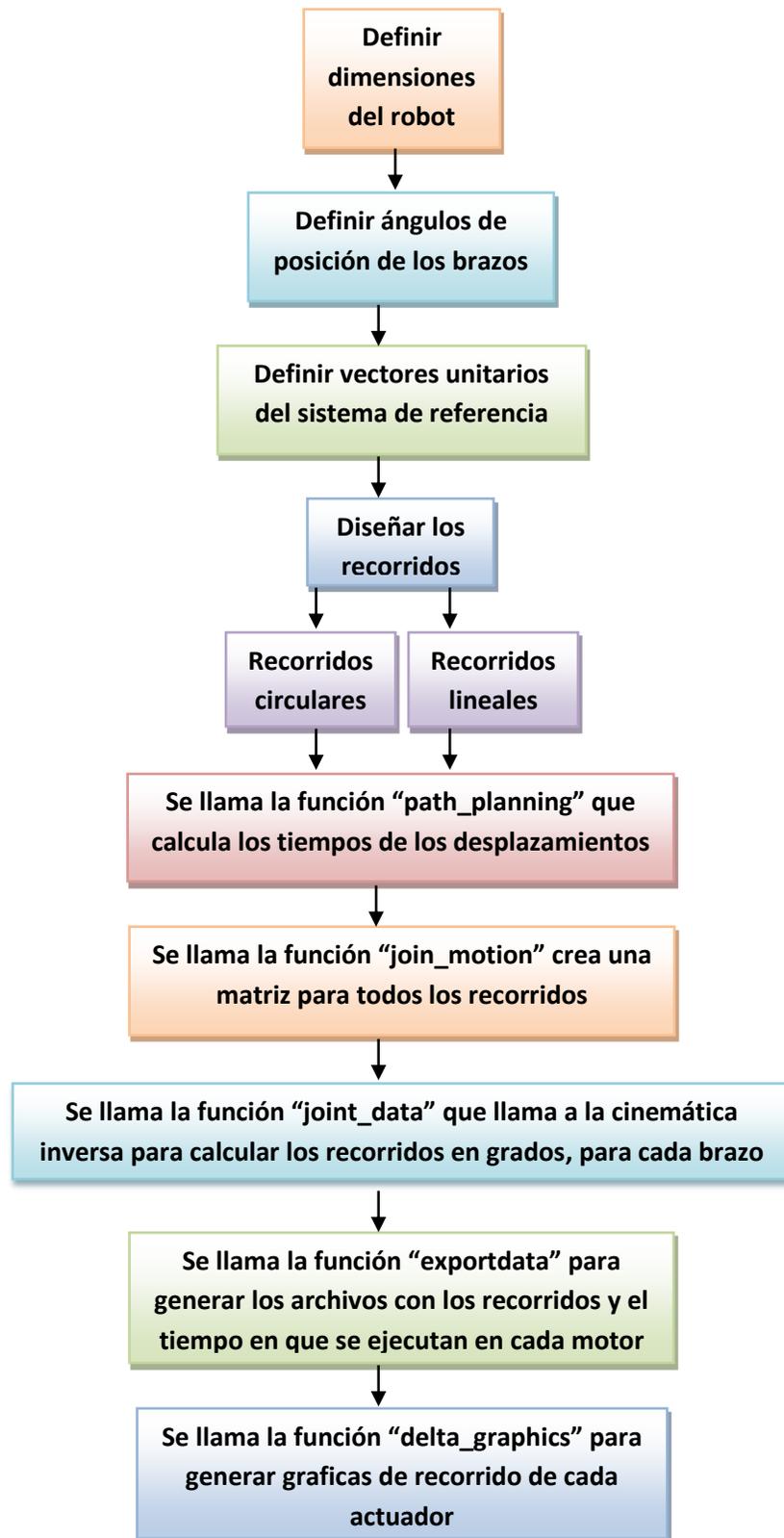


Figura 3.70. Diagrama de flujo del planificador para generar trayectorias.

3.6.4. Control de posición con planificadores de trayectoria.

Para el control de posición con planificadores se requiere un replanteamiento del esquema de control. Como es sabido el planificador entrega los valores de posición en su respectivo intervalo de tiempo, y por esto es necesario agregar una función capaz de enviar los datos de las posiciones en sincronía con el tiempo de muestreo del computador y del robot. Además, este proceso debe ser semiautomático. Un esquema del proceso es presentado en la figura 3.71.



Figura 3.71. Esquema del sistema de control con planificadores

El planificador diseñado es un algoritmo que recibe los parámetros de dimensiones del robot y los recorridos deseados por el usuario, como los son movimientos lineales o circulares, estos en modo secuencial, determinando además la velocidad y la aceleración de cada movimiento. Este programa se encarga al mismo tiempo, de llamar varias subfunciones, cada una de ellas cumple un objetivo en particular. La primera realiza los cálculos de la cinemática inversa y enlaza los resultados con otra función que distribuye cada movimiento en el tiempo, haciendo posible que el desplazamiento final sea continuo. Todos los datos obtenidos de tiempo y desplazamiento angular son almacenados como datos que serán posteriormente utilizados en el sistema de control.

Conocidos los parámetros necesarios para la funcionalidad del sistema se diseña el sistema de control del Robot Delta con planificadores de trayectoria. Este se muestra en la figura 3.72.

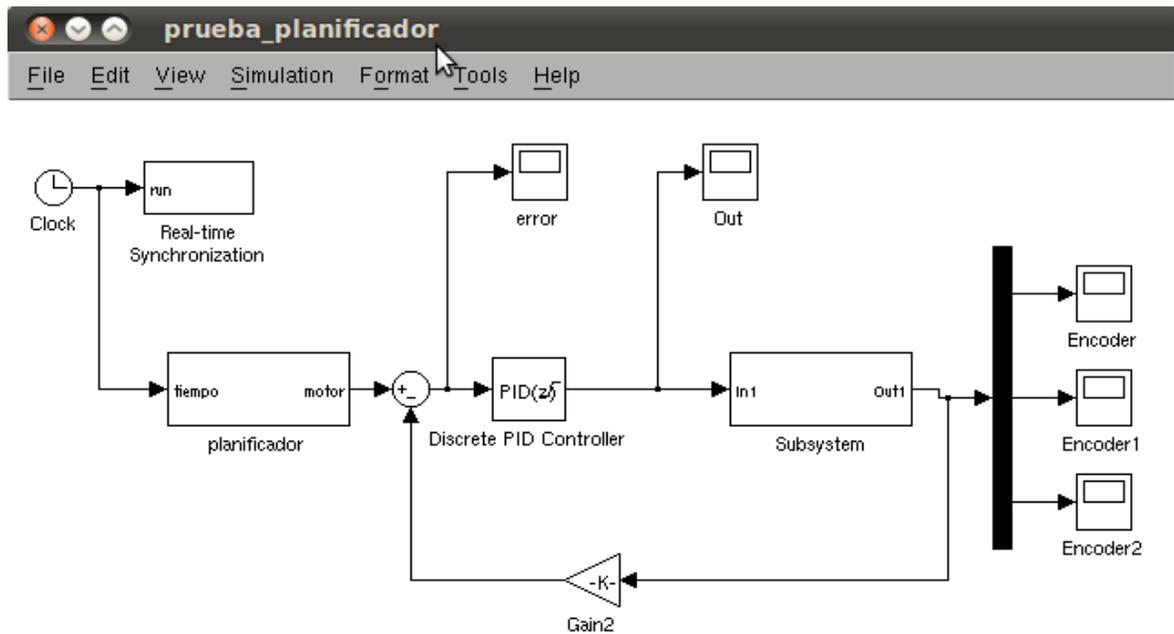


Figura 3.72. Sistema de control con planificadores de trayectoria.

El subsistema “planificador”, es el encargado de cargar los desplazamientos en grados de cada uno de los actuadores, y así mismo los tiempos en que se debe ejecutar cada movimiento. Esto se realiza mediante la función “Lookup Table Dinamic” (figura 3.73.), que toma los datos almacenados previamente, y que corresponden a los desplazamientos de los motores. Los movimientos son multiplexadas para ser tratados por el sistema de control y posteriormente enviados a los actuadores.

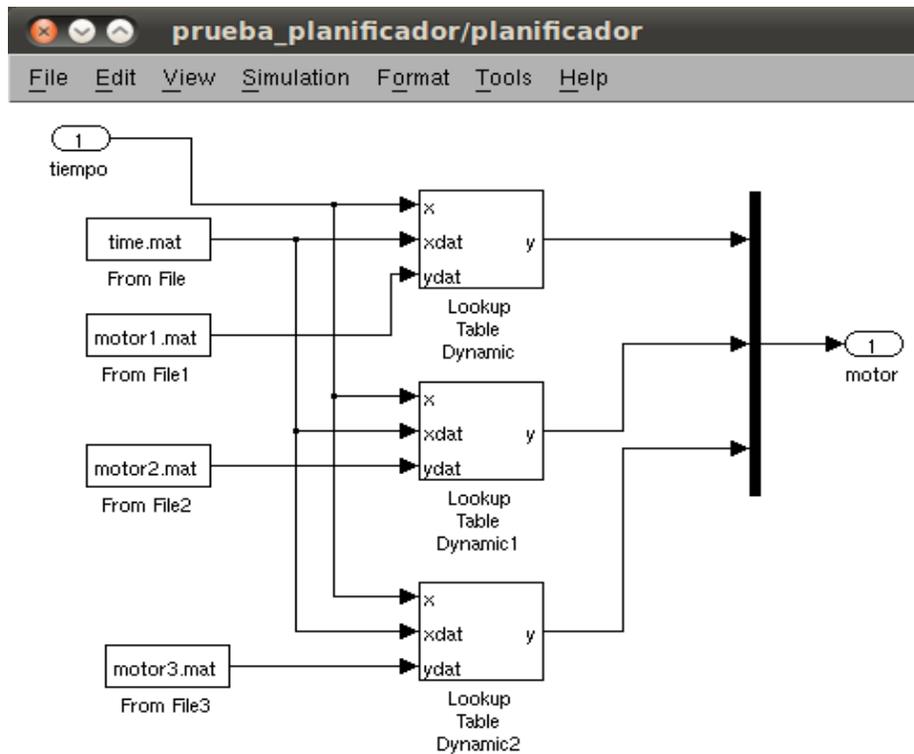


Figura 3.73. Bloques de control para las posiciones de cada motor.

Para la puesta en marcha del circuito se prosiguió a la simulación de un desplazamiento más elaborado que el ya presentado anteriormente. En este recorrido se le ordena al robot que ejecute un desplazamiento en el eje “Z” desde el punto 0 (cero) del efector final hasta una distancia de 150 mm, a partir de ese punto debe seguir el recorrido de media circunferencia hasta volver al punto inicial. La representación gráfica de este recorrido es presentado en la figura 3.74.

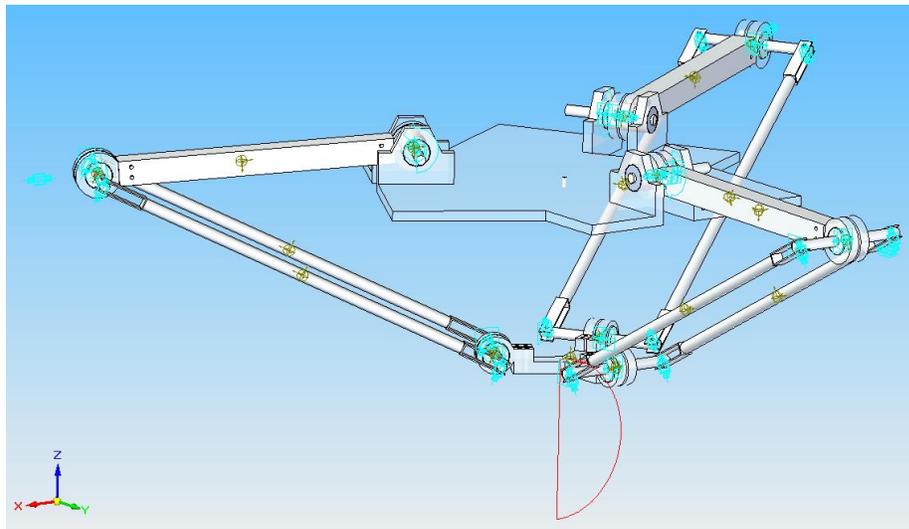


Figura 3.74. Desplazamientos de la trayectoria planificada.

VIDEO: [Delta – Desplazamiento 2](#). La figura 3.74 fue obtenida tras la simulación presentada en este video. Si no abre el video con el hipervínculo, encontrar el video en la subcarpeta “Tesis RD2012/Videos/ Delta - Desplazamiento 2”.

Los resultados obtenidos de las simulaciones son graficados junto con los desplazamientos generados por el planificador de trayectorias, estos resultados son los recorridos sensados por cada uno de los encoders. En las figuras de la 3.75. A la 3.77. Es posible apreciar estos resultados. En los tres casos la señal en color azul representa la lectura de los encoders, mientras que la otra señal, el setpoint de desplazamiento.

Es notable en las tres imágenes un error entre el valor sensado y el setpoint, este es aproximadamente 5° para las tres señales. La justificación a esta diferencia es la presencia de un “Backslash”, este es un error presente en los motores con reductor, y se nota cuando en un cambio del sentido de giro del eje del motor, el eje del reductor no inicia inmediatamente el movimiento, sino después de transcurridos algunos grados de giro del motor o incluso algunas vueltas del eje de este último. Este varía principalmente con la calidad de los reductores, ya que los

ajustes y tolerancias de los engranajes es su interior son los que determinan esta característica.

Así para los tres motores implementados para el Robot Delta, existe un error de 5° para todos los desplazamientos que ejecute este. Aun así las señales conservan cierta similitud con el recorrido original del robot.

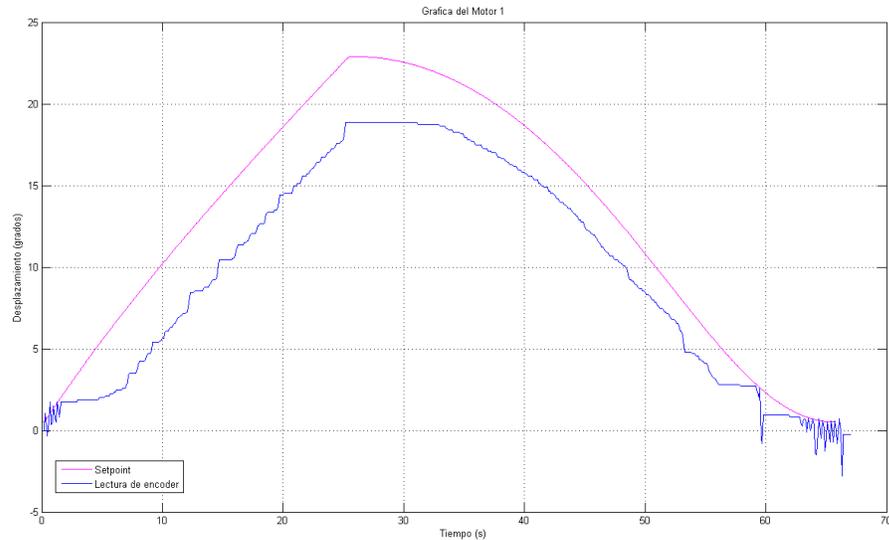


Figura 3.75. Desplazamientos sensados del encoder 1.

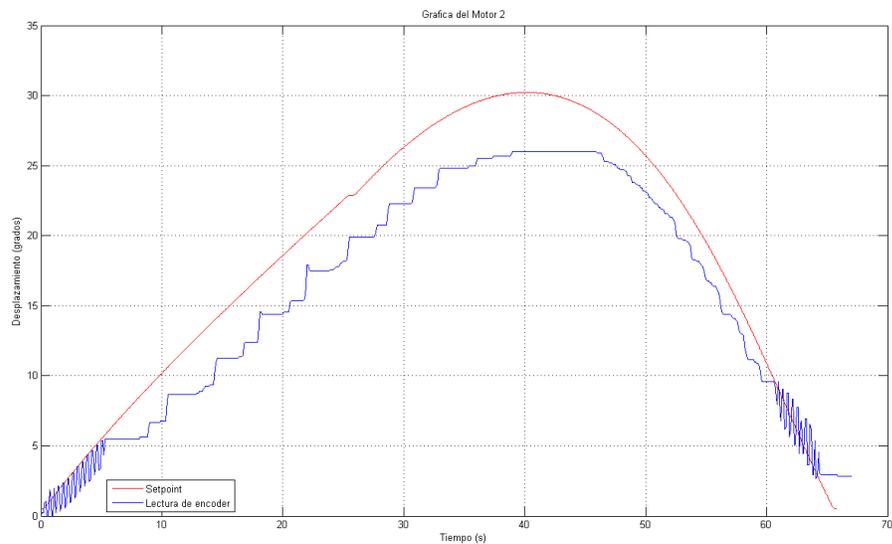


Figura 3.76. Desplazamientos sensados del encoder 2.

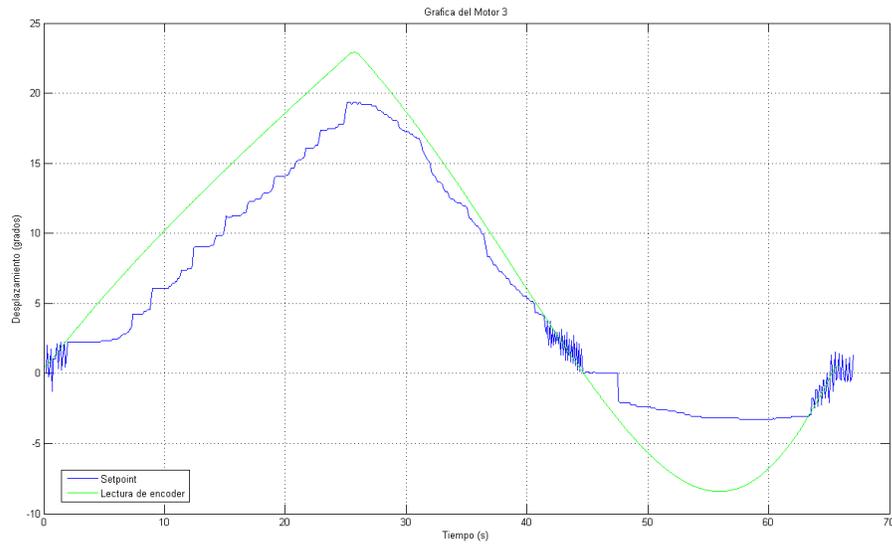


Figura 3.77. Desplazamientos sensados del encoder 3.

En la figura 3.78. se ilustran los errores sensados por el sistema de control durante el recorrido ejecutado. A partir de estas señales el controlador PI calcula la acción a ejecutar para la puesta en marcha de los motores y la corrección del error. Estas graficas confirman además el error de backlash descrito anteriormente, pues este se encuentra en el margen de 5° .

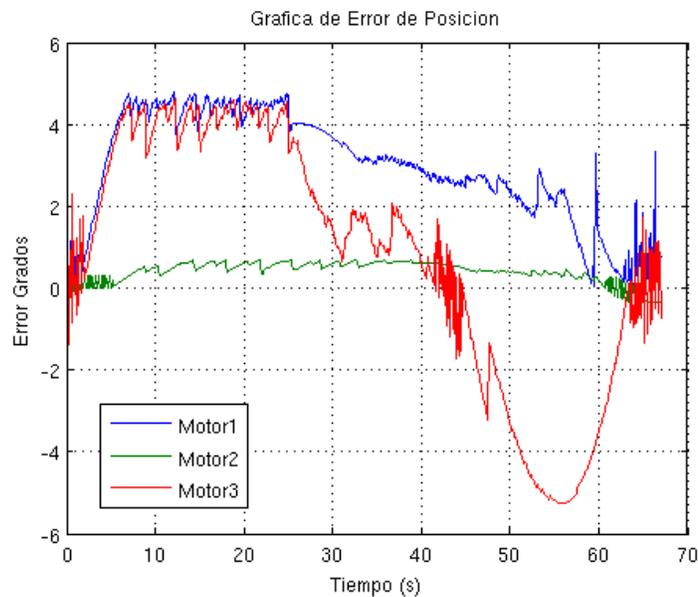


Figura 3.78. Errores de posición para cada motor en grados.

En la figura 3.79. se muestran las señales del controlador PD, que van directamente a las tarjetas de control del robot para que efectivamente los motores ejecuten los desplazamientos requeridos en los setpoints de posición.

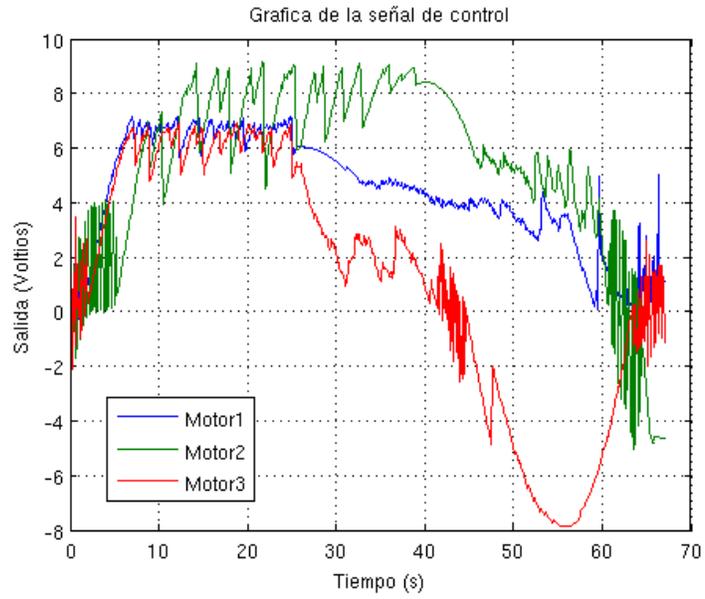


Figura 3.79. Señales de control del controlador PI

4. RESULTADOS

4.1. Descripción del robot construido.

El Robot Delta construido, está hecho en su mayor parte de materiales de bajo costo como aluminio y acrílico, accesibles en el mercado local. Su peso es reducido a menos de 7Kg incluido los motores. El diseño es visualmente atractivo. Las piezas específicas fueron fabricadas en máquinas CNC, y su ensamble es de forma fácil y rápida. Se modeló, diseñó y construyó en un tiempo de 7 meses con un presupuesto de \$1.000.000.

La base superior hecha en acrílico, esta soporta el peso de los motores y el robot como tal, pues los cojinetes transmiten esta carga hacia su ella. Debido a que no soporta cargas de fatiga, no es necesario emplear un material extremadamente resistente. Además, este material le da muy buena apariencia al modelo. Los soportes laterales se soportan los brazos superiores y se ubicaran los motores.

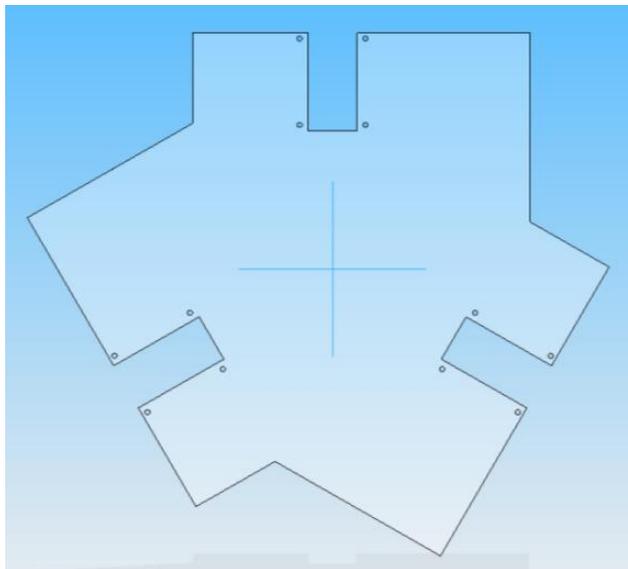
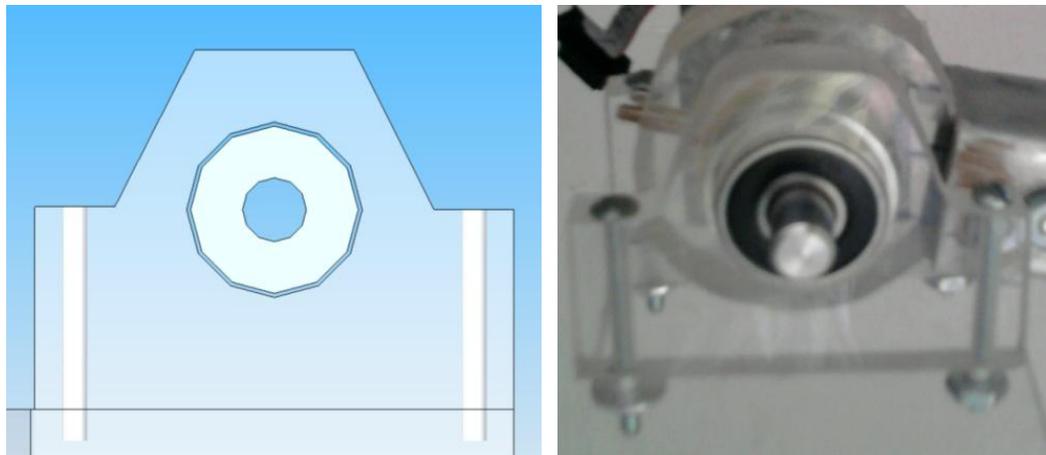


Figura 4.1. Base superior

Los soportes de los rodamientos de bolas donde se ensambla el eje de acople del brazo superior con el motor, solo soporta las cargas producidas por el peso de los brazos del robot. Estos soportes se fijan a la base superior mediante tornillos de 1/8" de paso basto con su respectiva arandela y tuerca. Se emplean dos tornillos por soporte. El agujero que alberga el rodamiento es realizado con una broca de 3/4", que corresponde a la dimensión exterior del rodamiento. Este se fija con goma liquida, solo para evitar cualquier deslizamiento. En total se construyen 6 soportes, para los cuales se destinan 12 tornillos y 6 rodamientos.

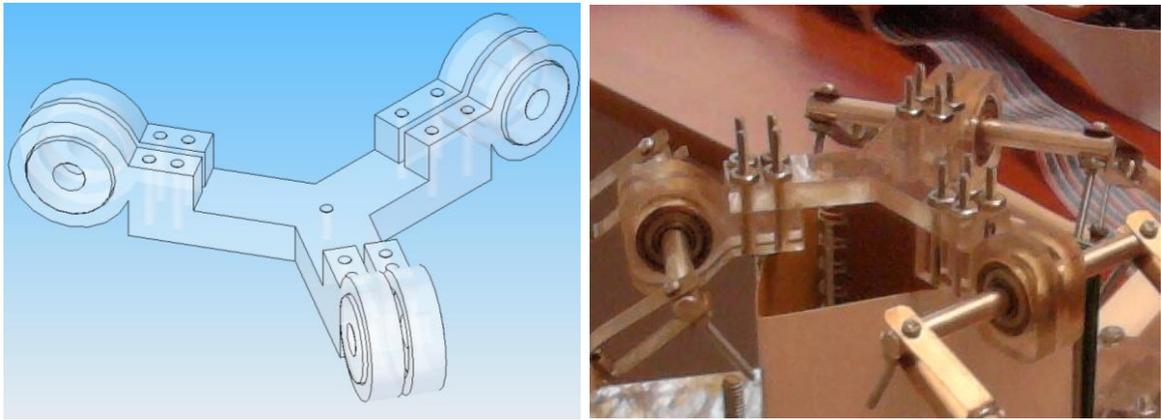


a) Modelo CAD del soporte

b) Prototipo construido

Figura 4.2. Soporte para el eje superior

El efector final se forma de una base triangular de acrílico, con efecto de no añadir peso a la estructura, la resistencia de este material es apta para el diseño. Se añade a esta pieza seis terminales de acrílico que portan los rodamientos de bolas, y así alojar el eje de articulación para los brazos inferiores. Estos terminales se fijan con tornillos de 1/8" paso basto, dos por cada terminal, para un total de 12 tornillos.



a) Diseño CAD del efector final

b) Prototipo del efector final

Figura 4.3. Efector final

Los brazos superiores fueron diseñados empleando un tubo cuadrado de aluminio, con un espesor de pared de 1 mm. Se diseñaron y maquinaron dos terminales de acrílico para este brazo, en uno se instalan rodamientos para el eje de articulación con los brazos inferiores, y en el otro extremo se deja libre para la conexión mediante pasadores con el eje superior. Estos terminales se sujetan al tubo con tornillos de 1/8" de paso basto. Los pasadores para conectar con los ejes superiores son de acero.

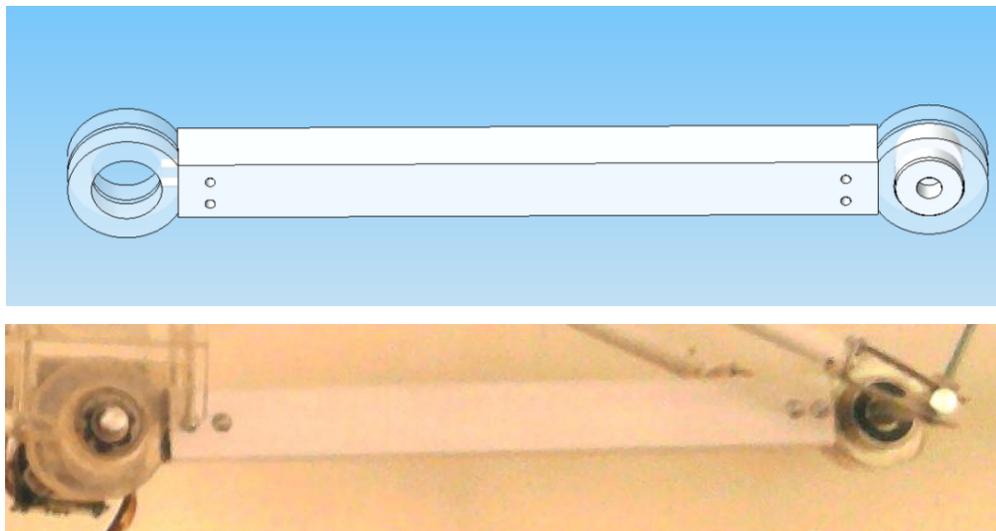
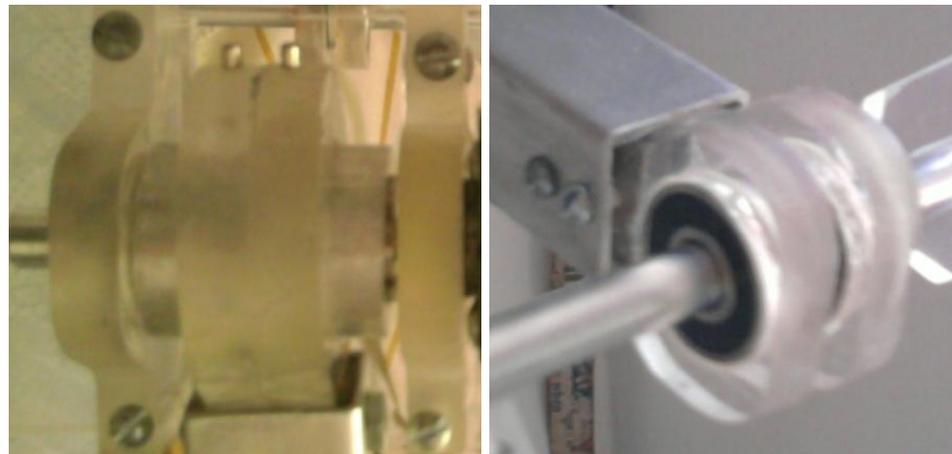


Figura 4.4. Brazo superior, diseño CAD y prototipo construido.



a) Terminal superior b) Terminal inferior

Figura 4.5. Terminales del brazo superior

Los brazos inferiores están hechos de un tubo cilíndrico de aluminio de 9 mm de diámetro exterior. A este se unen mediante anclajes, los terminales de acero que se conectarán a los ejes de las articulaciones. En su extremo tienen agujeros de 1/8" para los respectivos tornillos de sujeción.

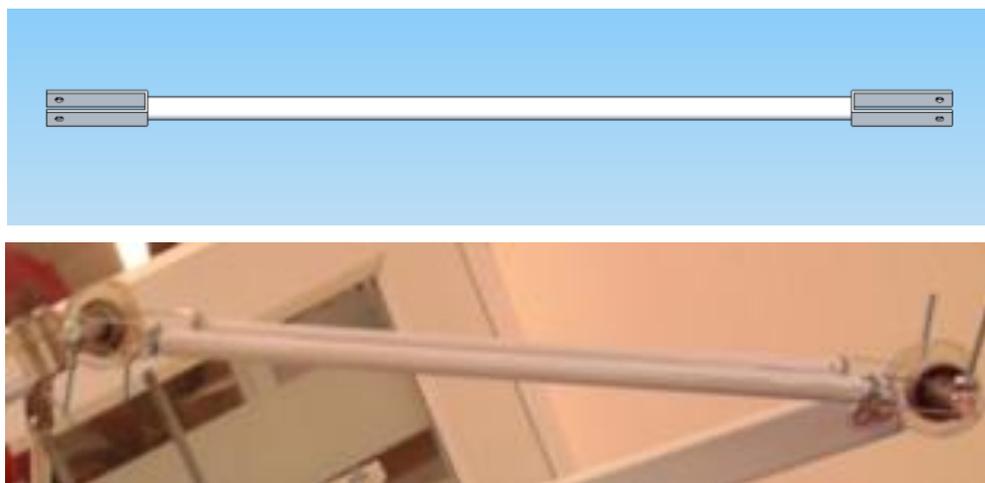


Figura 4.6. Modelo CAD y prototipo del brazo inferior

Los ejes de las articulaciones fueron diseñados a partir de los rodamientos, el diámetro de estos es de 5/16", y están fabricados en aluminio utilizando maquinas

CNC. Su construcción en aluminio atiende al fácil mecanizado y al poco peso que agregan a la estructura general. En su parte central poseen un cambio de sección que mantendrá al eje ubicado en el centro de cada brazo.

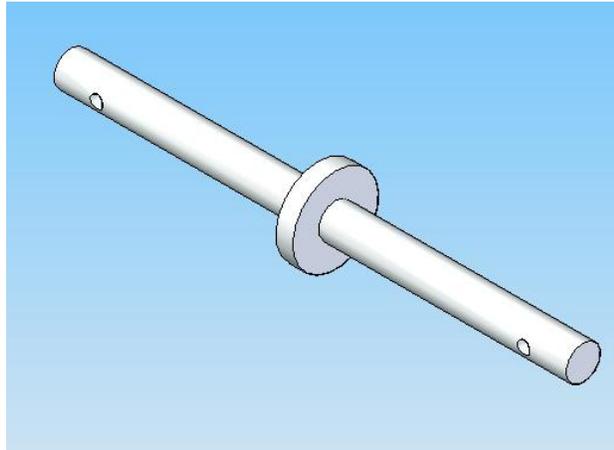


Figura 4.7. Eje de las articulaciones

Una de las principales características del modelo final ensamblado es que se reducen en gran medida las altas tolerancias entre las juntas, evitándose los juegos exagerados entre las piezas. El modelo es presentado a continuación.

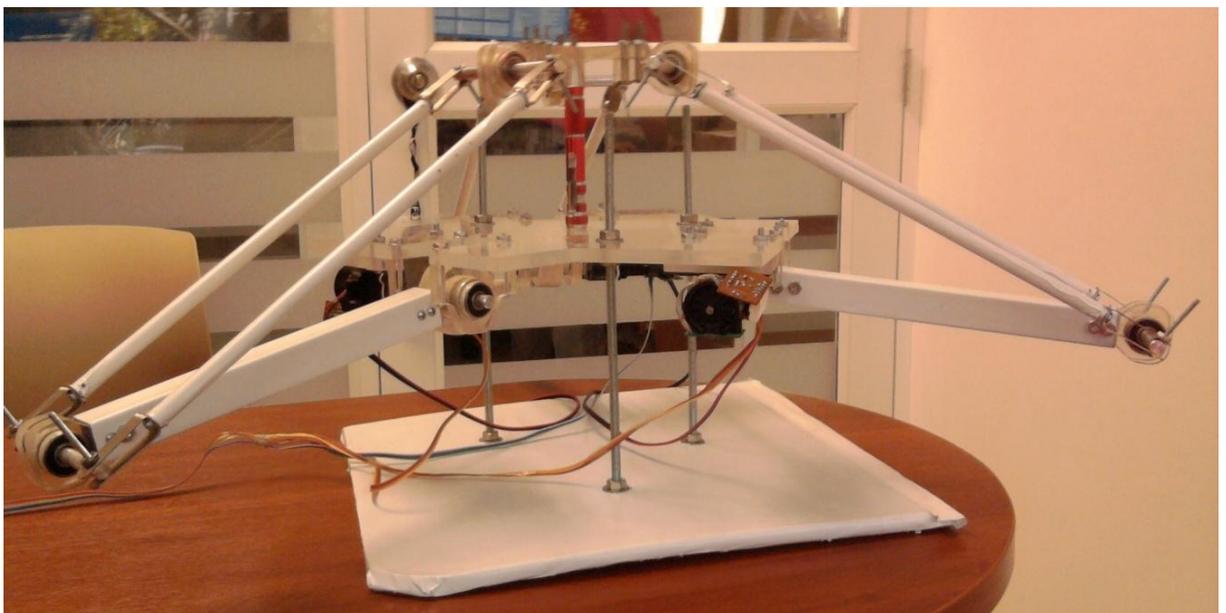


Figura 4.8. Modelo construido del Robot Delta.

4.2. Descripción de los resultados del hardware y el sistema de control.

El principio básico de funcionamiento del Robot Delta, se basa en el control de posición de los ejes de los actuadores, a partir del control de corriente del motor. Para ello, el sistema utilizó circuitos comparadores con el uso de amplificadores operacionales, y temporizadores. La limitación de corriente para los motores es de 2A, y se logra mediante el circuito de monitoreo de corriente. A continuación se presentan algunos de los resultados de las simulaciones individuales de cada uno de los módulos de los circuitos.

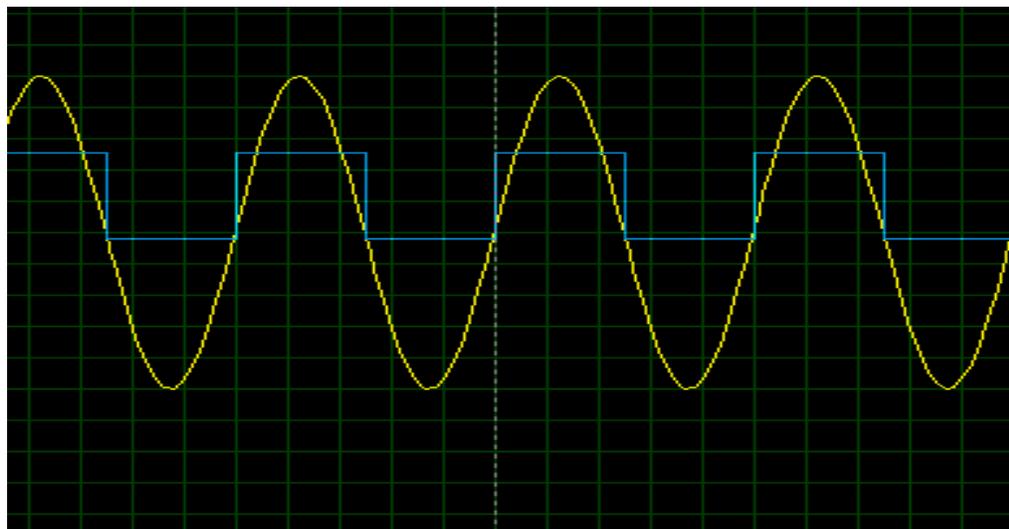


Figura 4.9. Simulación del módulo de control de dirección

La figura 4.9, se muestra el tratamiento efectivo del diodo zener sobre la señal analógica de entrada del setpoint, de este modo es posible darle el sentido de giro correspondiente al motor, mediante “0” y “1”.

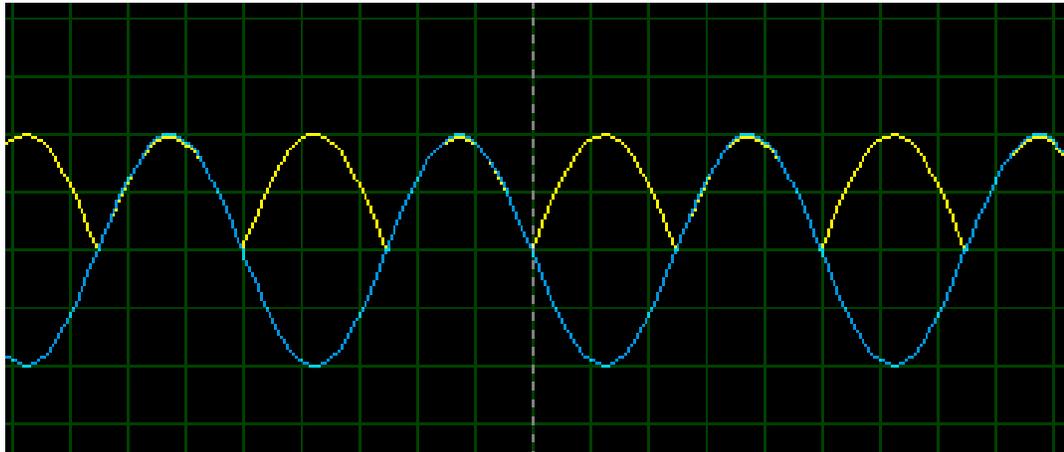


Figura 4.10. Simulación del módulo de magnitud

El módulo de magnitud, entrega efectivamente la señal rectificada del setpoint, de este modo el circuito comparador siempre puede realizar las correcciones necesarias para el control de la corriente del motor.

Una característica importante es la alimentación de voltaje de los circuitos integrados, que en su mayoría están en el rango de -12 a +12 voltios (amplificadores operacionales, temporizadores y driver H), haciendo posible su implementación en las PCBs. Otros integrados necesarios, como las compuertas OR se alimentan a 5 voltios, y para ello se utilizaron reguladores de voltaje a 5 voltios.

El diseño del hardware de control busca la menor cantidad de componentes finales adaptándose a los materiales disponibles en el mercado. Es de mencionar que la mayoría de los integrados empleados son de bajo costo. El diseño de tarjetas PCBs se realizó teniendo presente el menor uso hardware.

Del control de posición, tanto en el nivel básico como en el de alto nivel, implementado con el planificador de trayectorias, se obtuvieron resultados muy

aproximados en los recorridos realizados por los motores, esto se aprecia en las lecturas de los encoders. Las figuras 3.69. 3.70 y 3.71., demuestran que el control funciona de manera correcta, a pesar de la presencia del error de backlash, el cual se puede corregir por software. Este pequeño error de 5° , afecta a todo el robot, pero al ser un sistema de cadenas cinemáticas cerradas, este se minimiza, sin embargo es un punto importante a considerar, al momento de optimizar la precisión del robot.

Así mismo, es necesario realizar una profundización en la sintonización de los controladores P, PI y PID para el robot en general, para obtener así mejores resultados del control. Esto se hace necesario debido a que las constantes oscilaciones de las posiciones de los ejes de los motores, dan cuenta de que hay un exceso en los valores de las variables del controlador, generalmente esto se asigna a la variable proporcional (P).

Es importante mencionar que en estas simulaciones no se implementó la variable derivativa "D" del controlador, ya que en muchas ocasiones, el sistema perdía totalmente la estabilidad, produciendo oscilaciones de varios grados en los motores, y haciendo imposible los movimientos.

El uso de la interfaz de Simulink para crear los sistemas de control, resulta un aspecto importante del presente trabajo, pues dichas interfaces permitieron general el control de posición básico, y el control de posición con planificadores. Las diversas herramientas que brindan Simulink y Matlab facilitan la creación de nuevos métodos de control, más eficientes y mucho más sofisticados.

Así mismo la tarjeta de control PC104, es un hardware que brinda versatilidad y un excelente desempeño al momento de emplearse en procesos de control. Sus características básicas de funcionalidad, como lo son el uso de las HID, (human interfaz device) display, teclado y mouse, el disco de información, y los jumpers de

conexión, hacen de esta tarjeta una herramienta útil para procesos de automatización. La lectura de encoder y los conversores digital-analógico, reducen el uso de otro hardware de control.

Los modelos de control dinámico se plantean como un punto importante de investigación, ya que se requieren profundos conocimientos de la representación interna del robot como tal, sus estados, estabilidad, entre otros.

4.3. Optimización del Robot Delta.

Los variados resultados obtenidos del diseño, construcción y control del robot entregan pautas para nuevos enfoques en el diseño del robot como tal, la optimización del espacio de trabajo y de las dimensiones del mismo, el hardware utilizado y el control inherente al mismo, son algunos de los aspectos más relevantes para mejorar la plataforma diseñada.

4.3.1. Optimización del espacio de trabajo y de las dimensiones del robot.

La optimización del espacio de trabajo atiende principalmente a la obtención de las dimensiones adecuadas de las partes de robot, dependiendo del enfoque que se quiera dar, como el aprovechamiento máximo del espacio de trabajo, o el dimensionamiento apropiado para cubrir un espacio de trabajo determinado, en ambos casos, es necesario indagar sobre los métodos más convenientes para obtener los resultados deseados. Actualmente, ya se ha trabajado en esta área, y básicamente se emplean algoritmos genéticos que evalúan los espacios de trabajos, y crean opciones de espacios de trabajo a partir de los requerimientos del diseñador, de este modo los modelos finales son más acertados para cubrir los espacios reales de trabajo.

4.3.2. Optimización mecánica de las partes del robot.

Esto se centra en el uso de mejores materiales, más livianos y más resistentes, con los cuales construir el robot. La elaboración de brazos más livianos y menos esbeltos, ayudaría al hecho de que se reduzca los torques producidos por los recorridos del robot, teniendo así, mayor potencia disponible para el manejo de

cargas en el efector final. Además de esto, es posible mejorar el comportamiento físico del robot empleando configuraciones de juntas o articulaciones universales diferentes a las ya presentadas, como son las rotulas.

4.3.3. Optimización del hardware electrónico y el control de los actuadores.

Es posible mejorar el método de control de cada motor empleando sistemas modernos que integran el control de velocidad y el control por corriente, y se comunican directamente a un computador. Así mismo, es posible plantear nuevos métodos de control, como el control por USB del robot, y el control tele-operado, dos áreas con amplio campo de aplicación para la investigación.

4.4. Conclusiones.

Del presente proyecto se obtuvieron múltiples resultados y avances en el diseño mecatrónico de los robots paralelos Delta, exigiendo la interacción de múltiples factores, entre ellos el humano, técnicos y temporales, haciendo un importante aporte a los grupos de investigación de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

El modelo terminado y presentado, abre la posibilidad a la realización de trabajos de investigación respecto a este tipo de tecnologías, para su mejoramiento y optimización.

Algunos puntos clave que se lograron obtener durante la realización del proyecto son:

- Se planteó la cinemática inversa del Robot Delta, a partir de ella se desarrollaron modelos CAD para las simulaciones y obtención de los espacios de trabajo, y la posterior optimización de las dimensiones del modelo.
- A partir de los resultados de las simulaciones del espacio de trabajo y la optimización de las dimensiones, se diseñó un modelo CAD del robot con facilidades de construcción. Para este modelo se tuvo en cuenta los procesos de fabricación necesarios, así los terminales de los brazos superiores en acrílico, y los ejes de aluminio de las articulaciones, se construyeron con máquinas CNC, las cuales brindan gran precisión para los ajustes.

- Se diseñó y construyó un hardware eficiente para el control de corriente, el cual responde adecuadamente en los setpoints enviados desde la tarjeta PC104. Cada componente se pensó para ser utilizado en las mismas condiciones de funcionamiento, carga requerida, niveles de tensión necesarios, etc.
- El control de posición realizado, presento buenos resultados, de los cuales se distinguen los errores presentes, y así mismo se identifican las posibles soluciones a estos. Aun, con los resultados obtenidos, es de anotar que el control del robot requiere de un estudio más profundo, donde se estudien más variables del comportamiento del mismo, y llegar a avances más profundos en esta área.
- Esta plataforma de investigaciones permitirá realizar muchos avances respecto al estado de la tecnología robótica paralela, a medida que se desarrollen nuevas aplicaciones y se profundice en las teorías ya existentes del manejo de dispositivos paralelos, se podrán así, desarrollar aplicaciones más versátiles que no se limiten a versiones estudiantiles sino comerciales.

4.5. Trabajos futuros

El paso más importante a seguir es optimizar el sistema de control del robot. El primer eslabón a subir para incursionar en un mejor control, por ejemplo el control dinámico, es llevar a cabo el control por corriente del robot. En este, es necesario analizar las posiciones, velocidades y aceleraciones de ciertas partes del robot, para obtener un sistema estable. Actualmente se ha planteado la matemática necesaria para llevar a cabo este tipo de control, pero se deja como una puerta abierta, para futuras investigaciones.

Así mismo realizar una optimización de la estructura mecánica, sería un punto conveniente a revisar, pues un diseño con mejoras en las tolerancias y las resistencias, sin duda producirán avances significativos en el estudio de los robots paralelos tipo Delta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Tsai, L. W. (1999). Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Wiley Interscience. John Wiley and Sons.
- [2]. Clavel, R. (1989). Une nouvelle structure de manipulateur parallèle pour la robotique légère. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 23, Vol. 6, pp. 501-519.
- [3]. Clavel, R., "Device for the Movement and Positioning of an Element in Space," US Patent No. 4,976,582, December 11, 1990.
- [4]. E. Vivas, (2005). Robótica paralela: aplicaciones industriales, modelado y control. Universidad del Cauca. Popayán.
- [5]. E. Vivas; P. Poignet (2006). Control predictivo de un robot paralelo. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 3, Vol. 4, pp.45-52.
- [6]. E. Martínez; C. Peña; E. Yime. (2010). Diseño óptimo de un robot paralelo con configuración delta para aplicaciones educativas. Revista Educación en Ingeniería. Diciembre de 2010 • N°. 10 • pp 110-119 • Publicada en línea por la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería – ACOFI- www.acofi.edu.co.
- [7]. Gwinnett, J.E., "Amusement devices", US Patent No. 1,789,680, January 20, 1931.
- [8]. Pollard, W.L.G., "Spray painting machine", US Patent No. 2,213,108, August 26, 1940.
- [9]. Gough, V.E. and Whitehall, S.G., "Universal tyre test machine", Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress, pp. 117-137, May, 1962.

- [10]. Stewart, D., "A platform with six degrees of freedom", Proceedings of the IMechE, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pp. 371-385, 1965-66.
- [11]. C.R. Boer, L. Molinari-Tosatti, K.S. Smith, (1999). Parallel Kinematic Machines: Theoretical Aspects and Industrial Requirements (Advanced Manufacturing) [Hardcover].
- [12]. <http://www.pc104.org/>
- [13]. <http://www.industriaynegocios.cl/>
- [14]. <http://www.azimadli.com/>
- [15]. García de Jalon & Bayo, 1994, Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems: The Real-Time challenge.
- [16]. J.R. Singh, J. Rastegar, 1990, Optimal synthesis of robot manipulators based on global kinematic parameters.
- [17] Tesis de Maestría - Diseño de un Robot paralelo para operaciones de "tomar y colocar". Edison Martínez, Universidad de Pamplona. 2011.
- [18]. <http://www.parallemic.org/>
- [19]. <http://www.best-microcontroller-projects.com/>

ANEXOS

Los Anexos están clasificados en subcarpetas de la siguiente manera:

- **Tesis RD2012/Archivos en eventos**

1_UTB - Propuesta de tesis

2_CIMM 2011 - U. Nacional

3_UTB VI Jornada Mecánica y V Mecatrónica

- **Tesis RD2012/Datasheets**

1N4733 - *Datasheet Diodo Zener 5.1V*

74LS386 - *Datasheet Compuertas Or exclusivas*

Hoja de Especificaciones del Motor - *Motor Faulhaber*

L298 - *Datasheet Driver H*

LM324 - *Datasheet amplificador operacional*

LM386 - *Datasheet amplificador operacional*

NE555 - *Datasheet temporizador*

- **Tesis RD2012/Diseños CAD**

Modelo Virtual Delta I - Archivos Solid Edge.

Modelo Virtual Delta II - Archivos Solid Edge.

Modelo Virtual Delta III - Archivos Solid Edge.

Modelo Virtual Delta IV - Archivos Solid Edge.

- **Tesis RD2012/ PCB Hardware de Control**

PCB modulo Potencia (I, II, II)

PCB Modulo de instrumentación (I, II, III)

Circuito proteus IC_MOTOR

Circuito proteus Test Direction

Circuito proteus Test IMON

Circuito proteus Test Magnitud

- **Tesis RD2012/ Planificador de Trayectorias**

Archivo Matlab PLANIFICADOR

Archivo Matlab delta_graphics

Archivo Matlab end_time

Archivo Matlab exportdata

Archivo Matlab invkin_delta

Archivo Matlab join_motion

Archivo Matlab joint_data

Archivo Matlab path_planning

Archivo Matlab skew

- **Tesis RD2012/ Videos y fotografías**

Delta - Desplazamiento 1

Delta - Desplazamiento 2

Delta - Desplazamiento 3

Delta

Delta 1

Delta 2

Delta 3

Delta 4

Delta 5

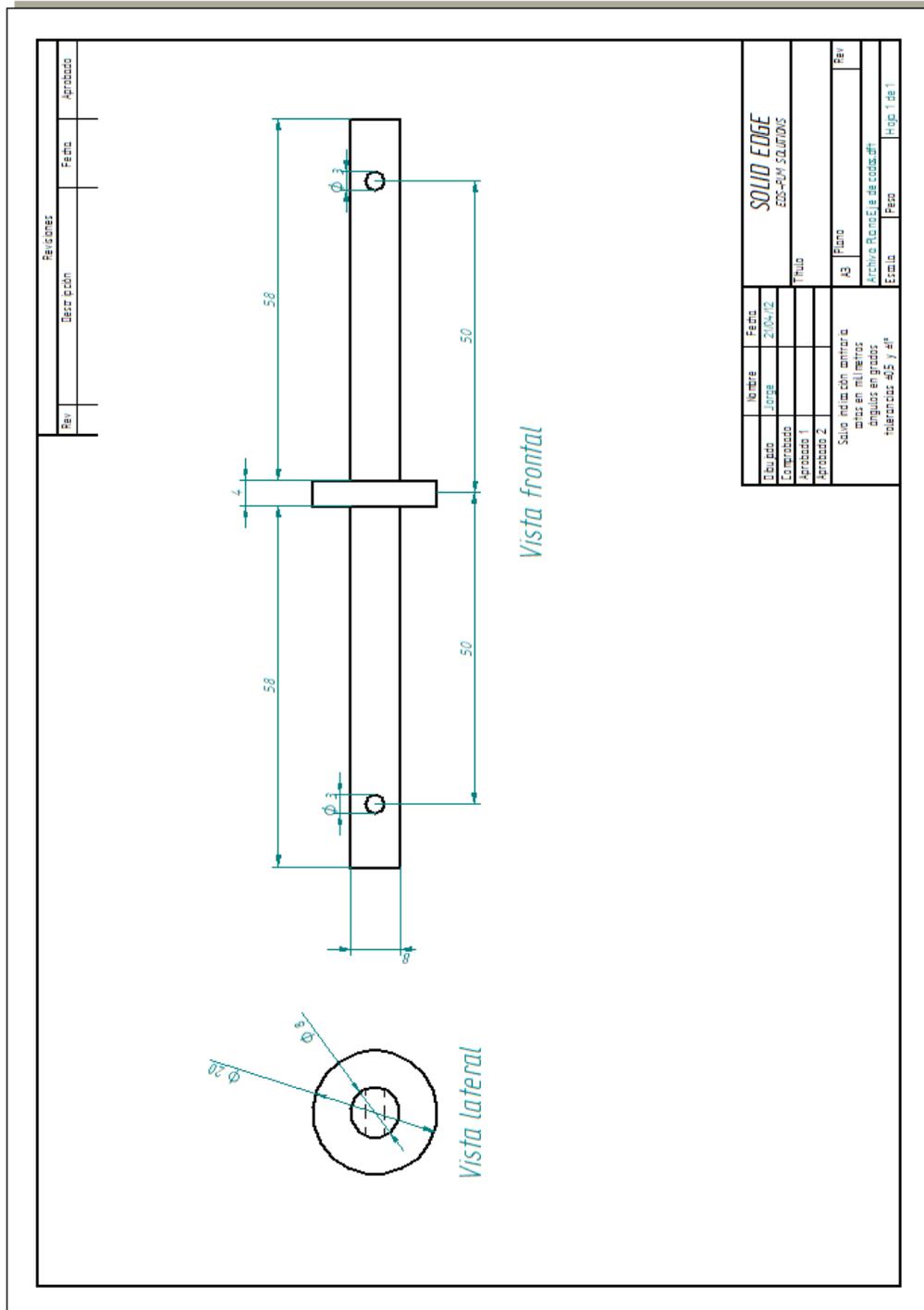
Delta 6

Delta 7

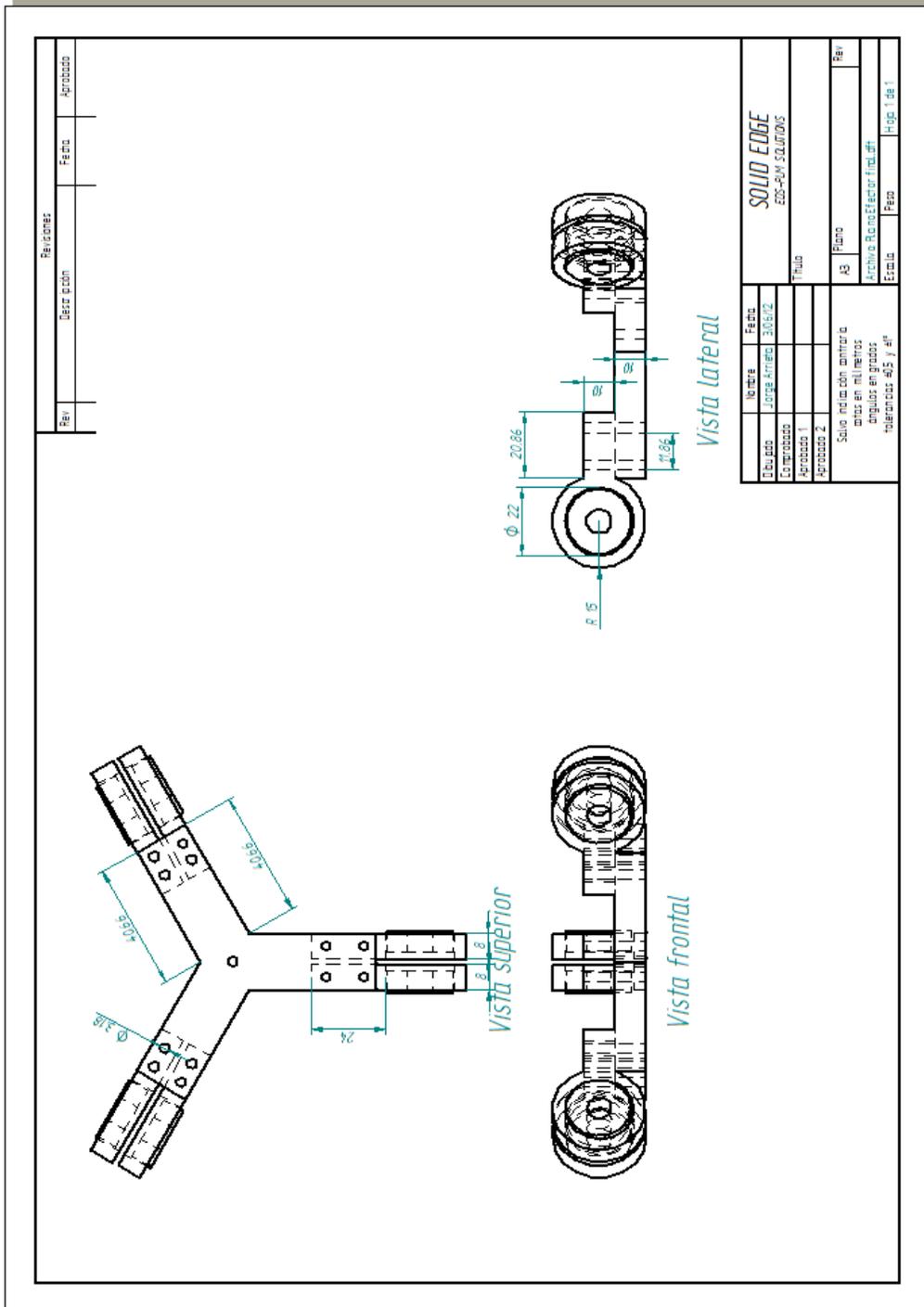
Lista de planos de construcción de cada parte del robot delta

- Plano I Acople eje superior.
- Plano II eje de articulación.
- Plano III efector final.
- Plano IV Cojinete.
- Plano V brazo superior.
- Plano VI Base superior.
- Plano VII Brazo inferior.
- Plano VIII Acople brazo superior.

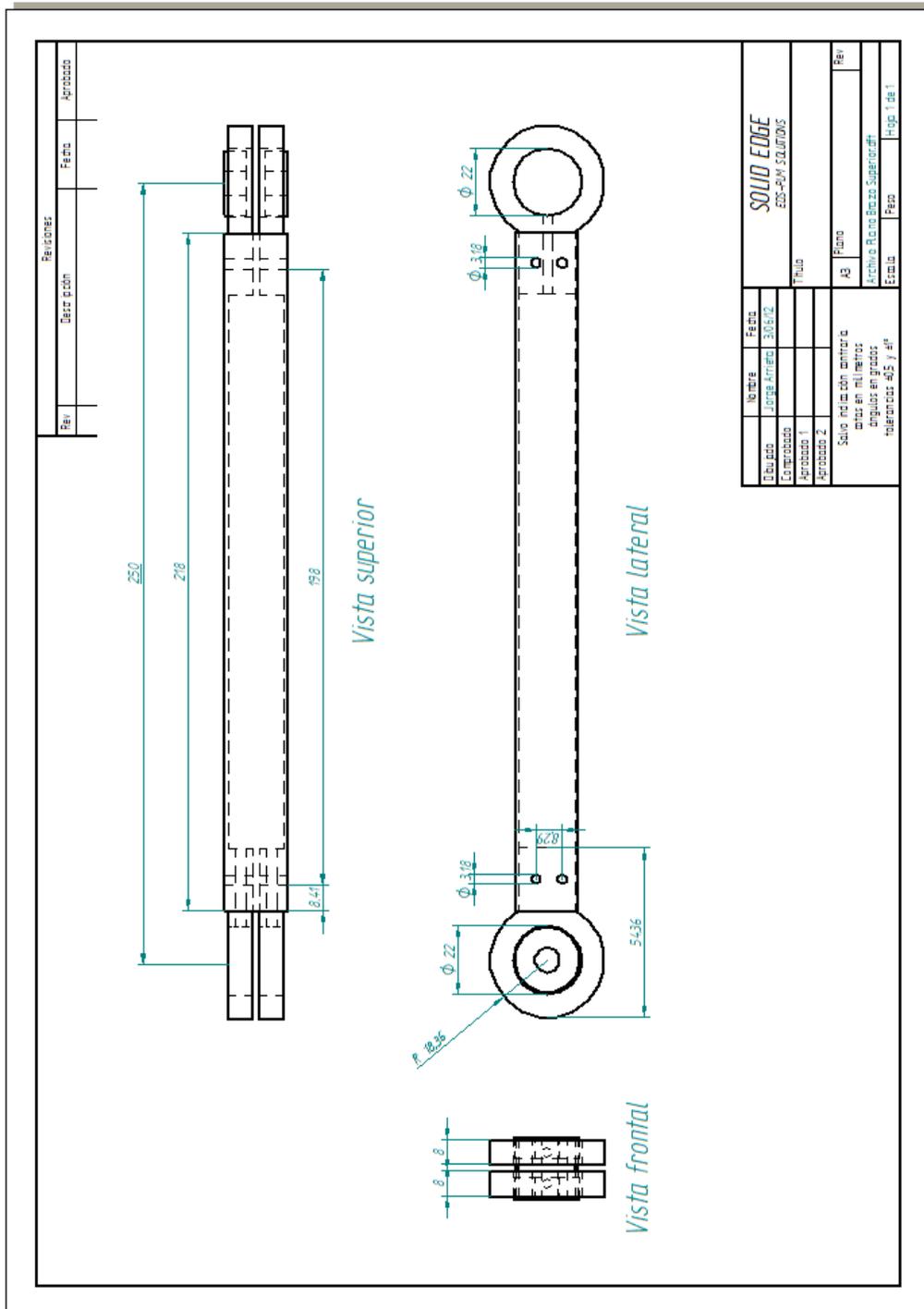
Plano II



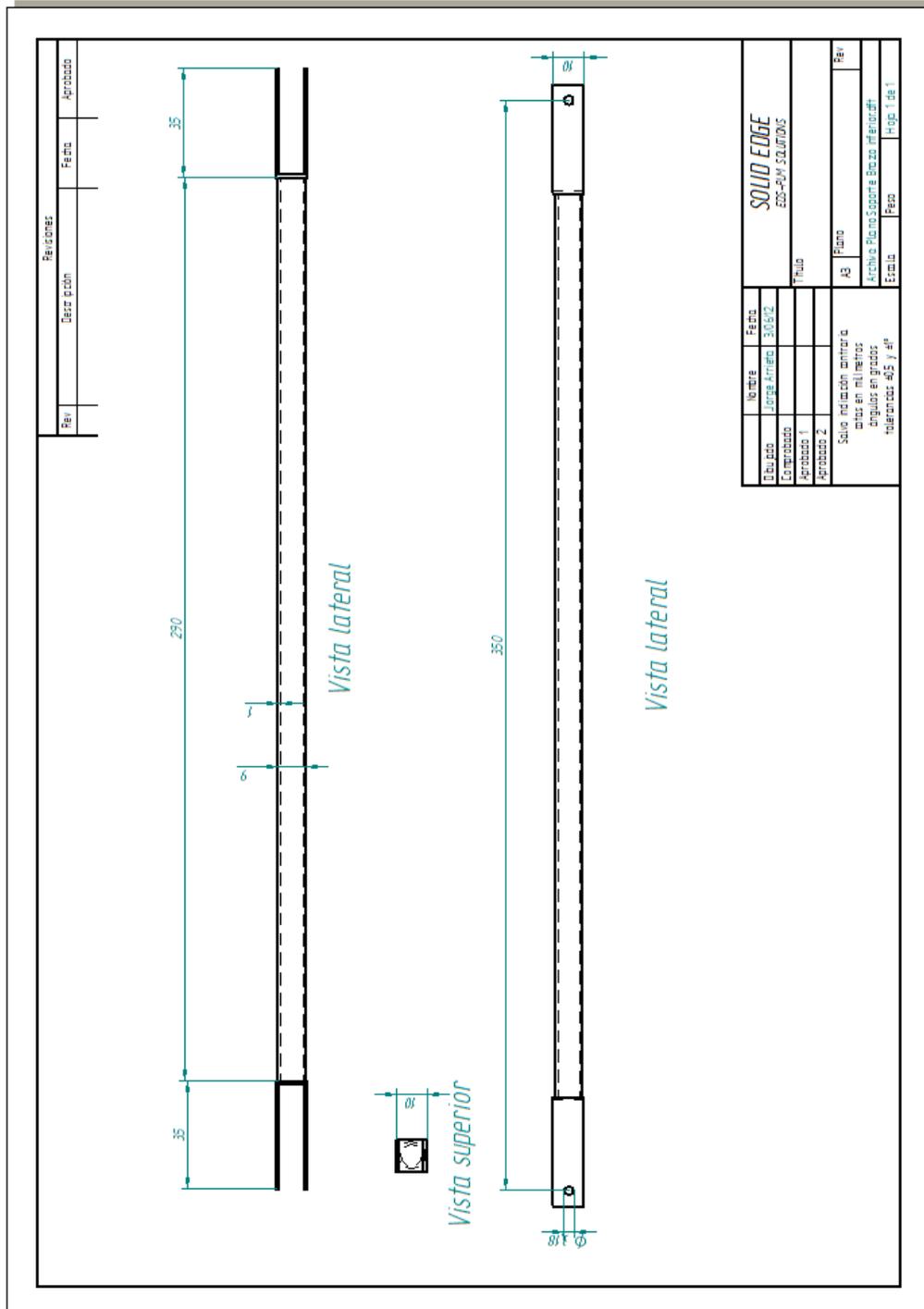
Plano III



Plano V



Plano VII



Plano VIII

