



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL
ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS
APLICADAS**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO DE
CONFIGURACIÓN “DELTA” DE CUATRO GRADOS DE LIBERTAD**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

JOSÉ RICARDO ERAZO FERNÁNDEZ

DIRECTOR: ING. ESTEBAN GABRIEL MONTÚFAR AYALA, M.Sc.

D. M. Quito

2017

DECLARACIÓN

Yo, JOSÉ RICARDO ERAZO FERNÁNDEZ declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mí autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.



José Ricardo Erazo Fernández
C.C. 1716073315

CERTIFICACIÓN

El docente de la Escuela de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas Ingeniero Esteban Montúfar, M.Sc.

CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO DE CONFIGURACIÓN DELTA DE CUATRO GRADOS DE LIBERTAD” fue desarrollado por: JOSÉ RICARDO ERAZO FERNÁNDEZ y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

Ing. Esteban Gabriel Montúfar Ayala, M.Sc.

C.C. 1712949419

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por su cariño, contribución y soporte para que culminase este trabajo.

A mi director de proyecto de titulación Ing. Esteban Montufar, M.Sc., por su guía y consejos que me ayudaron a solventar varios problemas desde otro punto de vista.

A todos los profesores que tuve a lo largo de mis estudios puesto que cada uno aportó conocimiento para mi formación profesional.

A Lucía Vera por creer en mí e inspirarme a luchar en todo momento por lo que uno ama.

A mis amigos por su apoyo en el día a día hasta en las cosas más pequeñas.

Muchas gracias a todos.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado hacia aquellas personas que desean cambiar la patria. A los que dejan de fantasear y convierten sus ideas en hechos. Hacia aquellos héroes silenciosos que buscan un desarrollo científico y tecnológico de nuestro querido Ecuador y no se rinden pese a todas las barreras que hay en el diario vivir.

Este trabajo es una pequeña muestra de que si se imagina algo, se lo puede alcanzar. Así mismo invito a quien lo lea a realizar sus metas y no mirar hacia atrás más que para ver cómo se ha progresado desde aquel entonces donde se pensaba que algo era imposible.

Persevera por lo que amas y si ya lo has alcanzado, persevera aún más por hacerlo mejor. Ciertamente no hubo quien diga que el camino de la vida iba a ser fácil para los justos, pero luchando pese a toda adversidad un sueño se hace realidad.

José Ricardo Erazo Fernández

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN A LOS ROBOTS PARALELOS.....	1
1.1. TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3. HIPÓTESIS.....	1
1.4. MARCO TEÓRICO.....	2
1.4.1. RESEÑA DE LOS ROBOTS DELTA.....	2
1.4.2. COMPONENTES DEL PROTOTIPO.....	3
1.4.2.1. Microcontrolador.....	3
1.4.2.2. Servomotor.....	4
1.4.2.3. Sensor de Efecto Hall.....	4
1.4.3. TIPOS DE ROBOT DELTA.....	6
1.5. ESTADO DEL ARTE.....	8
1.5.1. REALIDAD DE LOS ROBOTS DELTA.....	8
1.5.2. SITUACIÓN ACTUAL.....	10
1.5.3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT A DESARROLLAR...	11
1.5.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL ROBOT PROPUESTO.....	11
CAPÍTULO II: ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	13
2.1. SELECCIÓN DE MOTORES PARA EL ROBOT.....	13
2.2. SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL ELECTRÓNICO.....	15
2.3. SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN DE LA HMI.....	17
CAPÍTULO III: DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	20
3.1. ANÁLISIS POR CINEMÁTICA INVERSA.....	20
3.2. SIMULACIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA.....	25
3.3. DISEÑO MECÁNICO DE LOS ELEMENTOS DEL ROBOT.....	28
3.3.1. ANÁLISIS DEL ESPACIO DE TRABAJO.....	28
3.3.2. DISEÑO DEL ESPESOR DE LAS BASES.....	30
3.3.3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS MOTORES Y ESLABONES.....	32
3.3.3.1. Análisis de cinemática directa.....	32
3.3.3.2. Análisis de velocidades.....	37

3.3.3.3. Análisis estático de torque	40
3.3.3.4. Selección del actuador	42
3.3.3.5. Cálculo de eslabones	43
3.3.3.6. Cálculo de los acoples	46
3.4. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA	55
3.4.1. CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES EN LA ESTRUCTURA	56
3.4.2. DISEÑO DE LA SOLDADURA EN LA ESTRUCTURA	63
3.4.3. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA EN SOLIDWORKS	70
3.5. DIMENSIONAMIENTO ELECTRÓNICO	77
3.5.1. CIRCUITO DE CONTROL PARA EL ELECTROIMÁN	77
3.5.2. CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN PARA LOS SERVOMOTORES	80
3.5.3. CÁLCULO DE LOS DISIPADORES DE CALOR	82
3.5.4. CÁLCULO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN	83
3.5.5. PLACA ELECTRÓNICA DEL CIRCUITO DE CONTROL	85
3.6. DISEÑO DE LA INTERFÁZ HUMANO MÁQUINA	87
3.6.1. FORMATO DE LAS INSTRUCCIONES	87
3.6.2. DESARROLLO DE LA INTERFAZ HUMANO MÁQUINA	88
3.6.3. FUNCIONAMIENTO DE LA HMI	91
CAPÍTULO IV: CONSTRUCCIÓN Y VERIFICACIÓN DEL SISTEMA	93
4.1. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA	93
4.1.1. BRAZOS DEL ROBOT	93
4.1.2. BASES DEL ROBOT Y CAJA DEL CIRCUITO	96
4.1.3. ENSAMBLE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS	99
4.1.4. INSTALACIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS	105
4.2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	109
4.2.1. RESPUESTAS DE LA HMI	109
4.2.2. PRUEBA DE MOVIMIENTO Y REPETITIVIDAD	112
4.2.3. PRUEBAS DE MOVIMIENTO CON CARGA	115
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características del sensor de efecto Hall ACS712	5
Tabla 2.1. Determinación del peso ponderado de cada criterio de selección de los actuadores.....	14
Tabla 2.2. Evaluación de peso ponderado para el criterio consumo eléctrico.....	14
Tabla 2.3. Evaluación de peso ponderado para el criterio conexiones eléctricas	14
Tabla 2.4. Evaluación de peso ponderado para el criterio relación torque/precio	14
Tabla 2.5. Evaluación de peso ponderado para el criterio control de posición.....	14
Tabla 2.6. Evaluación de peso ponderado para el criterio espacio requerido	15
Tabla 2.7. Selección de la mejor alternativa para los actuadores del robot	15
Tabla 2.8. Evaluación del peso ponderado de los criterios de selección para el control electrónico	16
Tabla 2.9. Evaluación de criterios ponderados respecto al consumo eléctrico del elemento de control.....	16
Tabla 2.10. Evaluación de criterios ponderados respecto al costo del elemento de control	16
Tabla 2.11. Evaluación de criterios ponderados para la programación del elemento de control.....	16
Tabla 2.12. Evaluación de criterios ponderados para la protección del elemento de control	16
Tabla 2.13. Evaluación de criterios ponderados para el espacio requerido del elemento de control.....	17
Tabla 2.14. Selección de la mejor alternativa respecto al elemento de control electrónico.....	17
Tabla 2.15. Ponderación de los criterios de selección para el lenguaje de programación	18
Tabla 2.16. Evaluación de criterios ponderados para el desarrollo de interfaz gráfica de usuario.....	18
Tabla 2.17. Evaluación de criterios ponderados para la robustez del lenguaje de programación	18
Tabla 2.18. Evaluación de criterios ponderados para la simplicidad de sintaxis	18
Tabla 2.19. Evaluación de criterios ponderados para la portabilidad del lenguaje de programación	18

Tabla 2.20. Selección de la mejor alternativa de lenguaje de programación para la HMI del robot.....	19
Tabla 3.1. Características del servomotor AHBS-3713HTG	42
Tabla 3.2. Elementos electrónicos del robot delta.....	83
Tabla 3.3. Resumen del consumo energético del robot	83
Tabla 3.4. Tamaños de pista según la corriente utilizada	86
Tabla 3.5. Variables de las instrucciones de código G para el robot.....	87
Tabla 4.1. Cálculos del error en el movimiento del robot	114
Tabla 4.2. Cálculo de errores en el movimiento del robot con carga.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Partes del robot delta	2
Figura 1.2. Diagrama de bloques de un microcontrolador	3
Figura 1.3. Servomotor HS-311	4
Figura 1.4. Sensor de efecto Hall ACS712	4
Figura 1.5. Robot delta de 2 GDL.....	6
Figura 1.6. Robot delta LLL.....	6
Figura 1.7. Robot paralelo LLLL.....	7
Figura 1.8. Robot paralelo de 5 GDL.....	7
Figura 1.9. Plataforma de Stewart.....	8
Figura 1.10. Robot paralelo de Gwinnett.....	9
Figura 1.11. Robot paralelo de Pollard.....	9
Figura 1.12. Simulador de vuelo con la Plataforma de Stewart.....	9
Figura 3.1 Ilustración del robot delta para el análisis cinemático inverso	20
Figura 3.2. Vista lateral de un brazo del robot delta	21
Figura 3.3. Vista frontal de un antebrazo del robot delta	22
Figura 3.4. Captura de pantalla del código de programación en Python 2.7	25
Figura 3.5. Captura de Pantalla de los resultados de la ejecución del programa.....	26
Figura 3.6. Captura de pantalla del código del programa en Matlab 2013	26
Figura 3.7. Robot delta simulado en Matlab 2013	27
Figura 3.8. Vista superior del robot delta simulado en Matlab 2013.....	27
Figura 3.9. Vista lateral del robot delta simulado en Matlab 2013	28
Figura 3.10. Ilustración del espacio de trabajo de un delta con su brazo más largo que el antebrazo.....	29
Figura 3.11. Ilustración del espacio de trabajo de un delta con el antebrazo más largo que su brazo.....	29
Figura 3.12. Ilustración del espacio de trabajo con brazos y antebrazos de igual longitud.....	29
Figura 3.13. Esferas originadas en cada articulación del robot.....	33
Figura 3.14. Ilustración de las distancias necesarias para estimar el torque	40
Figura 3.15. Servomotores AHBS-3713HTG.....	43
Figura 3.16. Diagrama de cuerpo libre del eslabón del brazo	45

Figura 3.17. Diagramas de momento, esfuerzos y deflexiones del eslabón del brazo del robot	45
Figura 3.18. Diagrama de cuerpo libre de la varilla del antebrazo	46
Figura 3.19. Diagramas de momento, esfuerzos y deflexiones del eslabón del antebrazo del robot	46
Figura 3.20. Esquema de la ubicación de los acoples del robot en Autocad 2013 ...	47
Figura 3.21. Esquema de fuerzas sobre el acople intermedio en Autocad 2013	47
Figura 3.22. Acople intermedio dimensionado en Solidworks 2013	50
Figura 3.23. Primer dimensionamiento del acople superior en Solidworks 2013	50
Figura 3.24. Acople superior para el robot paralelo en Solidworks 2013	55
Figura 3.25. Estructura de trípode modelada para el robot delta	56
Figura 3.26. Brazo aislado de la estructura trípode modelada	56
Figura 3.27. Diagrama de cuerpo libre de la viga superior	57
Figura 3.28. Diagramas de momento, esfuerzos y deflexiones en la viga superior...	59
Figura 3.29. Diagrama de cuerpo libre de la viga vertical	60
Figura 3.30. Diagramas de momento, esfuerzos y deflexiones en la viga vertical	63
Figura 3.31. Cordón de soldadura en la esquina de la estructura	64
Figura 3.32. Área de la soldadura en la esquina de la estructura	64
Figura 3.33. Cordón de soldadura en el centro de la estructura.....	67
Figura 3.34. Área de la soldadura en el centro de la estructura	67
Figura 3.35. Simulación de los esfuerzos de Von Mises sobre el brazo del robot.....	71
Figura 3.36. Simulación de las deformaciones sobre el brazo del robot	71
Figura 3.37. Curva de convergencia de la deformación en el brazo del robot	72
Figura 3.38. Convergencia de la deformación en escala logarítmica del brazo del robot.....	72
Figura 3.39. Simulación de los esfuerzos de Von Mises sobre el brazo de la estructura	73
Figura 3.40. Simulación de las deformaciones sobre el brazo de la estructura	73
Figura 3.41. Curva de convergencia de la deformación del brazo de la estructura...	74
Figura 3.42. Convergencia de la deformación en escala logarítmica del brazo de la estructura	74
Figura 3.43. Simulación de los esfuerzos de Von Mises sobre el trípode	75
Figura 3.44. Simulación de las deformaciones sobre el trípode	75

Figura 3.45. Curva de convergencia de la deformación en el brazo del robot	76
Figura 3.46. Convergencia de la deformación en escala logarítmica del trípode	76
Figura 3.47. Robot PREDUIN Simulado en Solidworks 2013.....	77
Figura 3.48. Circuito de control para el electroimán desde el microcontrolador en Proteus 7.7	80
Figura 3.49. Fuente de alimentación de 8V para los servomotores en Proteus 7.7 ..	81
Figura 3.50. Circuito electrónico completo simulado en Proteus 7.7	85
Figura 3.51. PCB del Robot Paralelo	86
Figura 3.52. Captura de pantalla de la interfaz en Qt Designer.....	89
Figura 3.53. Pantalla principal de la HMI para el Robot PREDUIN	91
Figura 4.1 Materia prima para la construcción del brazo del robot paralelo	93
Figura 4.2. Piezas creadas a partir de las barras de aluminio.....	94
Figura 4.3. Ensamble de la parte superior del brazo del robot	94
Figura 4.4. Varillas de acero inoxidable para los antebrazos del robot	95
Figura 4.5. Imán de Neodimio con su junta de bola	95
Figura 4.6. Junta de varilla con su junta rotacional	96
Figura 4.7. Diagrama ejemplo de piezas a obtener usando corte láser	97
Figura 4.8. Cuadrícula para medir la posición final del objeto trasladado	97
Figura 4.9. Piezas en MDF cortadas	98
Figura 4.10. Piezas del robot luego del recubrimiento de pintura.....	98
Figura 4.11. Servomotor colocado en la base inferior del robot	99
Figura 4.12. Electroimán colocado en la base inferior del robot.....	99
Figura 4.13. Subconjunto de la base inferior del robot.....	100
Figura 4.14. Base superior del robot delta	100
Figura 4.15. Brazos del robot delta.	101
Figura 4.16. Estructura de trípode del robot delta	101
Figura 4.17. Estructura de trípode y caja con el circuito electrónico	102
Figura 4.18. Base superior del robot colocada en la estructura	103
Figura 4.19. Base inferior del robot montada en el equipo	103
Figura 4.20. Estructura mecánica completa del robot	104
Figura 4.21. Circuito PCB del robot paralelo	105
Figura 4.22. Placa y fuente de alimentación colocadas en la caja para el circuito de control	105

Figura 4.23. Sensores de corriente montados en la caja del circuito de control	106
Figura 4.24. Cableado de la tapa superior de la caja del circuito de control	107
Figura 4.25. Conexión de los cables de los servomotores en el trípode	107
Figura 4.26. Caja con todas las conexiones electrónicas realizadas	108
Figura 4.27. Robot PREDUIN terminado de armar	109
Figura 4.28. Respuestas de conexión serial	110
Figura 4.29. Problemas con puerto serial.....	110
Figura 4.30. Ventana emergente de archivo no seleccionado.....	110
Figura 4.31. Errores en el código enviado.....	111
Figura 4.32. Ventana de sobrecorriente en uno de los motores.....	111
Figura 4.33. Ventana emergente de instrucción ejecutada exitosamente	112
Figura 4.34. Gráfica de la eficiencia del robot en su área de trabajo	115
Figura 4.35. Gráfica de relación carga vs error en movimiento del robot	116

ABREVIATURAS

A	Área
DCL	Diagrama de Cuerpo Libre
E	Módulo de Young
F	Fuerza
g	Gravedad
GDL	Grado de Libertad
GND	Tierra (Ground)
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario (Graphical User Interface)
h	Altura
HMI	Interfaz Humano Máquina (Human Machine Interface)
I	Inercia
L	Longitud
LED	Diodo Emisor de Luz (Light-Emitting Diode)
n	Factor de carga
OFW	Soldadura con Oxígeno – Combustible (Oxy-Fuel Welding)
PCB	Placa de Circuito Impreso (Printed Circuit Board)
R	Radio
RMS	Valor cuadrático Medio (Root Mean Square)
T	Torque
USB	Bus Serial Universal (Universal Serial Bus)
V	Velocidad
y	Deflexión

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un robot delta de cuatro grados de libertad. El objetivo del mismo es conseguir una herramienta para reforzar las habilidades prácticas en robots industriales de los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica que pertenecen a la UIDE. Este prototipo cuenta con tres grados de libertad para su movimiento y otro para rotar al efector.

En el primer capítulo se da la introducción a los robots paralelos. Se señalan los acontecimientos históricos más relevantes en su desarrollo y también sobre su estado del arte en la actualidad. Adicionalmente se habla de los diferentes tipos de robots delta que existen y de sus principales componentes. En la última subsección se analiza el funcionamiento esperado para el prototipo.

En el segundo capítulo se evalúan tres modelos alternativos para desarrollar el robot. A partir de criterios que influyen directamente en el proyecto se obtiene la opción más favorable para llevarlo a cabo. Al final se da un resumen de las características que poseería el robot y un esquema básico del mismo.

El capítulo tres abarca el diseño del delta. En principio se define su cinemática inversa y directa. Seguidamente se calculan las bases, los motores requeridos y la estructura de los eslabones que componen sus brazos. Los brazos de la estructura del trípode que sostiene al robot y sus respectivas soldaduras también se dimensionan. Luego de ello se añaden simulaciones en software de diseño mecánico para verificar los resultados obtenidos previamente.

Una vez terminada la sección mecánica, se dimensionan los componentes electrónicos. Con ello estos elementos pueden trabajar en condiciones seguras de alimentación y a su vez estar protegidos contra fallas eléctricas. Al final del capítulo se desarrolla la interfaz humano-máquina desde la cual se controla al robot.

Finalmente, se evidencia la construcción del robot y las pruebas para verificar su funcionamiento. En adición se analizan los resultados obtenidos para evaluar el desempeño del robot y se presentan las conclusiones del proyecto.

ABSTRACT

In this paper a four degrees of freedom delta robot is developed. The objective is to achieve a tool to strengthen the practical skills in industrial robots of mechatronics engineering students that belong to the UIDE. This prototype has three degrees of freedom for its movement and another one to rotate the effector.

In the first chapter an introduction to parallel robots is given. The most important historical events in its development and its state of the art are listed. Additionally the different types of delta robots that exist and its main components are presented. In the last subsection the expected performance for the prototype is analyzed.

In the second chapter three alternative models to develop the robot are evaluated. The most favorable option is obtained by using criteria that directly affect the project. At the end, a summary of the features of the robot and a basic outline of it is given.

The third chapter the design of the delta is covered. First, its inverse and forward kinematics are defined. Then the bases, the required motors and the structure of the links that make up its arms are calculated. The arms of the tripod structure that holds the robot and their welds are also dimensioned. After that, simulations in mechanical design software are added to verify the results obtained previously.

Once the mechanical section is finished, the electronic components are dimensioned. Thus these items can work in safe power supply conditions and be protected against power failures. At the end of the chapter the human-machine interface that controls the robot is developed.

Finally, the construction of the robot and the testing to verify its functionality is evidenced. In addition, the results of the evaluation of the performance of the robot are analyzed and the project conclusions are presented.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LOS ROBOTS PARALELOS

1.1. TEMA

Diseño y construcción de un robot paralelo de configuración "Delta" de cuatro grados de libertad.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un robot paralelo de configuración "Delta" con cuatro grados de libertad, capaz de transportar objetos mediante un electroimán.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar mediante el diseño en ingeniería la estructura de soporte y cada uno de los elementos constitutivos del robot.
- Seleccionar la mejor alternativa en la parte mecánica, electrónica y de programación de entre varias opciones propuestas para el estudio.
- Dimensionar los motores para el robot de acuerdo a las necesidades de velocidad, posicionamiento y torque.
- Desarrollar el modelo matemático para el posterior análisis del sistema del robot delta.

1.3. HIPÓTESIS

El robot Delta transporta un objeto de hasta 200g a cualquier punto dentro de su espacio de trabajo empleando entre 1,2 a 1,8 segundos para la operación "*pick & place*".

1.4. MARCO TEÓRICO

1.4.1. RESEÑA DE LOS ROBOTS DELTA

Los robots paralelos son también conocidos como manipuladores paralelos o de cinemática cerrada. Estos consisten en dos plataformas, una fija y otra móvil, conectadas por medio de varios eslabones idénticos.

Cada uno de los brazos de un robot paralelo está controlado por un actuador. La combinación de todas las posiciones de los actuadores permite alcanzar determinado punto por el centro de la plataforma móvil. Debido a su configuración, la carga que transportan los robots paralelos puede ser mayor a la que manipulan aquellos de cadena cinemática abierta, ya que a que la misma se divide para cada brazo. Sin embargo, esto dependerá de la aplicación que tenga el robot pues en algunos casos se requerirá mover cargas livianas pero a una velocidad alta.

La Figura 1.1 muestra las partes de un robot paralelo. Esta ilustración fue tomada de la obra *“Parallel Manipulators, Towards New Applications”* [1]. Puede notarse la simetría entre cada brazo que conecta a las dos bases paralelas. Este robot tiene 3 GDL, uno por cada eslabón conectado a cada borde de las bases mencionadas. En la plataforma móvil se ubica el efector final que será el encargado de manipular a los objetos. Este añade otro GDL al robot pero no se lo considera dentro de su configuración.

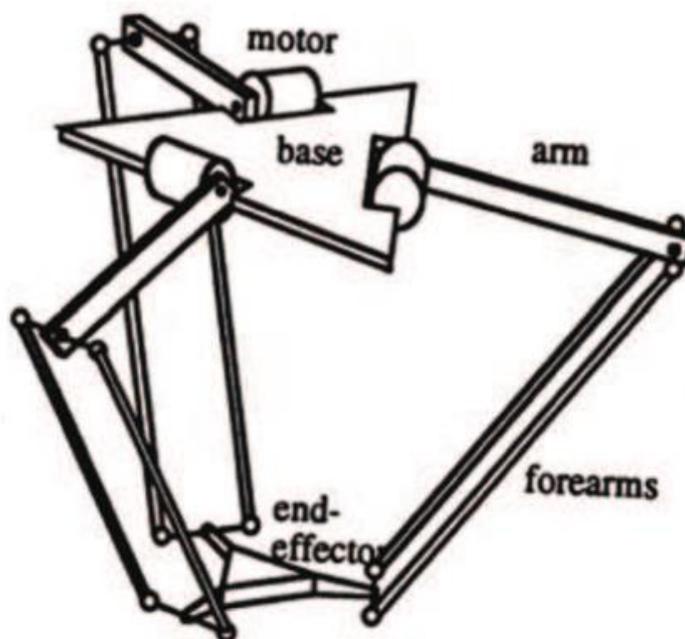


Figura 1.1. Partes del robot delta

1.4.2. COMPONENTES DEL PROTOTIPO

1.4.2.1. Microcontrolador

- Es un circuito integrado programable que se encarga de ejecutar líneas previamente insertadas en su memoria.
- Tiene las tres principales partes de un computador: la unidad central de procesamiento, una memoria y entradas-salidas periféricas.
- La primera aparición de estos se dio en el año 1971 con el Intel 4004 que trabajaba a 4 bits.
- En la actualidad existen diversas marcas y modelos de microcontroladores según las necesidades de memoria o capacidades especiales de cada uno.
- Estos pueden programarse en una amplia gama de lenguajes de alto y bajo nivel para cualquier tipo de aplicación.

La Figura 1.2 corresponde a un esquema de los bloques principales que constituyen un microcontrolador.

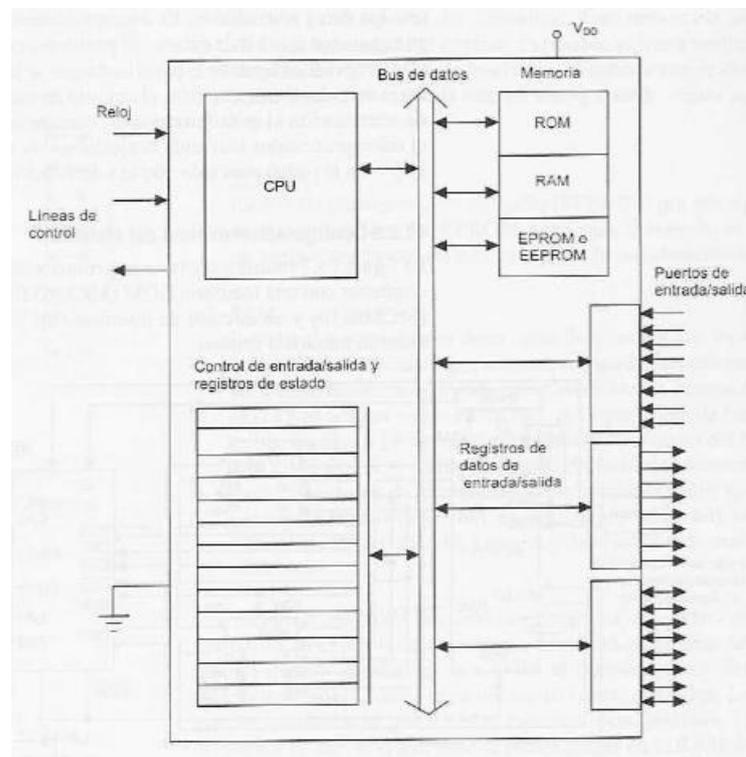


Figura 1.2. Diagrama de bloques de un microcontrolador [2]

1.4.2.2. Servomotor

- Es un dispositivo electromecánico que tiene la capacidad de ubicarse en una posición fijada por el usuario dentro de un determinado rango.
- Se basa en un motor de corriente continua, una caja reductora y un sistema de control para la posición angular de su actuador.
- El control de este se realiza por medio de PWM o modulación por ancho de pulso. Esto consiste en modificar el estado en “alto” de un pulso con una frecuencia fija.
- Son utilizados en una variedad de aplicaciones por su respuesta en velocidad, torque y precisión.

La Figura 1.3 muestra un servomotor común.



Figura 1.3. Servomotor HS-311 [3]

1.4.2.3. Sensor de Efecto Hall

El Efecto Hall es un fenómeno donde un campo eléctrico aparece por la separación de cargas en el interior de un conductor por el que circula corriente bajo un campo magnético perpendicular.

Se considera el sensor ACS712. En la salida del mismo se obtiene un voltaje proporcional a la corriente que lo circula. Este sensor aparece en la Figura 1.4.

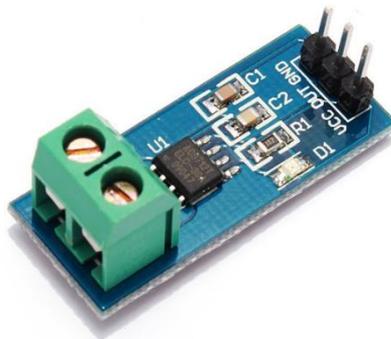


Figura 1.4. Sensor de efecto Hall ACS712 [4]

Las propiedades del sensor ACS712 se detallan en la Tabla 1.1, que se ha creado a partir de la información presentada en [5].

Tabla 1.1. Características del sensor de efecto Hall ACS712

Característica	Valor [5]
Temperatura de funcionamiento	-40 a 85°C
Voltaje de Alimentación	5V
Consumo de Corriente	10mA
Corriente máxima soportada	20 A
Dimensiones	Largo: 27,4 mm Ancho: 11,8 mm
Salida en Reposo	2,5V
Salida en Funcionamiento	0,1 V/A
Precio	\$12,99

La corriente del motor que pasa por el sensor se calcula mediante (1.1) [5].

$$I = \frac{PASO_{ADC} \cdot MEDIDA_{ADC} - 2,5}{PASO_{SENSOR}} \quad (1.1)$$

Donde:

- I corriente, en A;
- $PASO_{ADC}$ mínimo paso del ADC, en V/Pasos;
- $MEDIDA_{ADC}$ medición del ADC, en Pasos;
- $PASO_{SENSOR}$ mínimo paso del sensor, en V/A.

Utilizando el puerto ADC de 10 bits del microcontrolador, se reemplazan los valores de $PASO_{ADC} = 0,0049$ V/Paso y $PASO_{SENSOR} = 0,1$ V/A en (1.1) para obtener (1.2).

$$I = \frac{0,0049 \cdot MEDIDA_{ADC} - 2,5}{0,1}$$

$$I = 0,049 \cdot MEDIDA_{ADC} - 25 \quad (1.2)$$

Mediante el muestreo de la corriente se controla que esta no sobrepase un límite de seguridad y comprometa la integridad del circuito.

1.4.3. TIPOS DE ROBOT DELTA

Los robots delta se clasifican de acuerdo al número de GDL que tiene su plataforma móvil. Los actuadores en cada uno de estos pueden ser lineales o rotacionales dependiendo de la aplicación a la que el robot se someta. Por ejemplo, si se realizarán únicamente movimientos en dos dimensiones es recomendable utilizar el robot DELTA de 2 GDL. La Figura 1.5 [6] muestra al robot en cuestión.

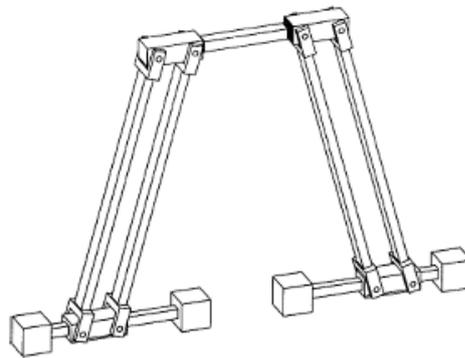


Figura 1.5. Robot delta de 2 GDL

Los robots de 3 GDL se nombran de acuerdo a la configuración de sus actuadores. Para los rotacionales se utiliza la letra “R” mientras que para los lineales la letra “L”. La Figura 1.6 [6] muestra un robot LLL.

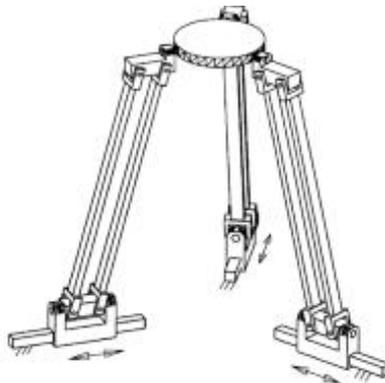


Figura 1.6. Robot delta LLL

Los robots de 4 GDL son similares a los de 3 GDL. A pesar de ello, no debe confundirse entre un robot que utiliza 4 GDL para mover su plataforma móvil y otro que utiliza 3 GDL para hacerlo mientras que el grado adicional rota a la carga respecto a un eje. La Figura 1.7 [6] muestra el delta de 4 GDL.

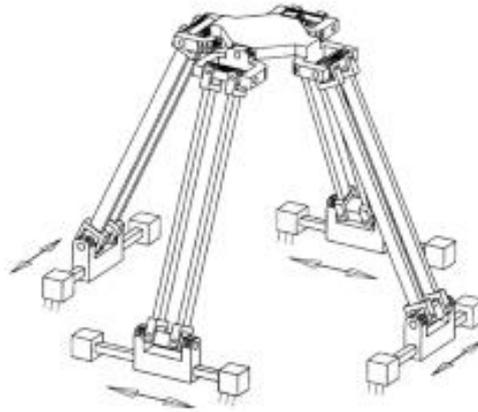


Figura 1.7. Robot paralelo LLLL

También existen manipuladores paralelos de 5 GDL en su plataforma móvil aunque estos no son tan comunes y se diseñan para aplicaciones especiales. Estos robots pueden combinar articulaciones tanto lineales como rotacionales. La Figura 1.8 [6] muestra un robot paralelo de 5 GDL.

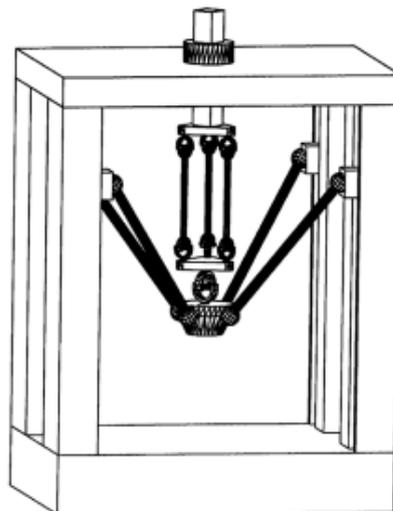


Figura 1.8. Robot paralelo de 5 GDL

Finalmente existen los robots paralelos de 6 GDL. El más común de esta clase es del tipo "*Plataforma de Stewart*". La Figura 1.9 [6] ilustra al robot mencionado. Sobre esta

configuración se inspiran los equipos de simulación de vuelo y afines. En este robot los eslabones se encuentran cruzados entre sí, dando como resultado la adición de 3 GDL adicionales en la base móvil. Dichos actuadores pueden ser lineales o rotacionales de acuerdo a las necesidades de la tarea, pero estos deberán ser idénticos para que el mecanismo funcione correctamente.

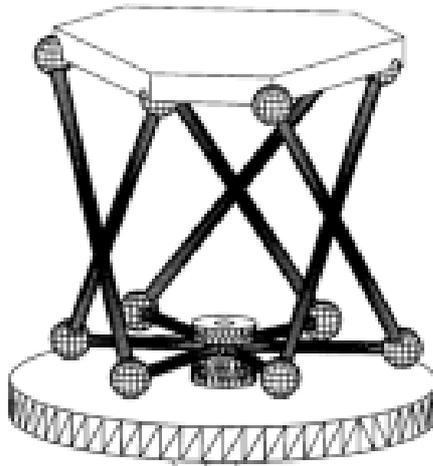


Figura 1.9. Plataforma de Stewart

1.5. ESTADO DEL ARTE

1.5.1. REALIDAD DE LOS ROBOTS DELTA

Los robots manipuladores pueden dividirse en dos clases: seriales y paralelos. Los primeros consisten en eslabones conectados en serie formando una cadena cinemática abierta. Cada articulación de esta clase de robots por lo general cuenta con un actuador.

Por otra parte, los robots paralelos tienen cadenas cinemáticas cerradas. Sus eslabones están conectados por igual a una plataforma móvil y trabajan en conjunto para trasladarla hacia alguna posición. Sobre dicha plataforma se encuentra el efector final para manipular algún objeto. Por lo general estos robots tienen un alto costo y espacio de trabajo reducido.

El primer diseño patentado de robot paralelo se registra en 1928 por el granjero James Gwinnett. Este hombre inventó una plataforma para utilizarse en cines. Un esquema de su prototipo se muestra la Figura 1.10 [7].

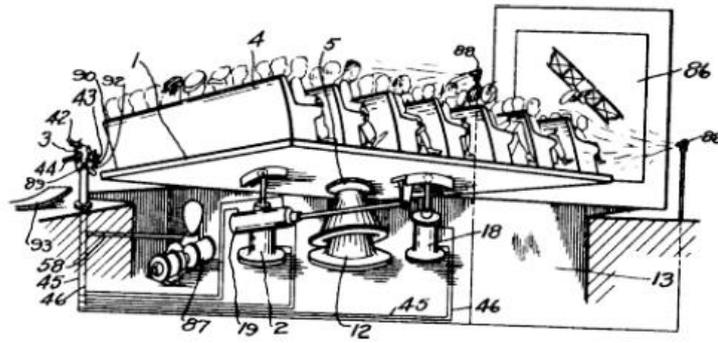


Figura 1.10. Robot paralelo de Gwinnett

Posteriormente se desarrollaron diversas aplicaciones para los mismos. Por ejemplo, Williard Pollard los implementa como una solución para automatizar la pintura de spray. La Figura 1.11 [7] muestra al prototipo mencionado.

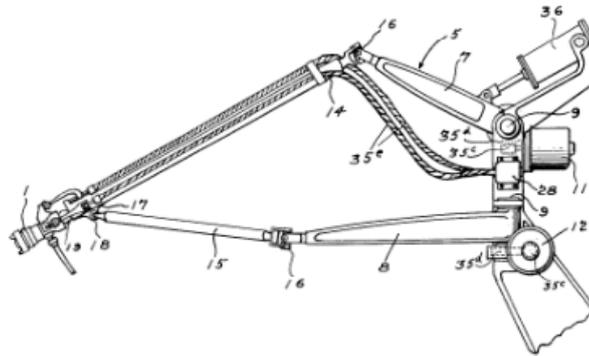


Figura 1.11. Robot paralelo de Pollard

La forma peculiar de estos robots aparece en 1965 con la denominada “*Plataforma de Stewart*” que estaba destinada originalmente para simuladores de vuelo. El prototipo de este simulador se aprecia en la Figura 1.12 [7]. Los deltas fueron propuestos oficialmente por Clavel en 1986. La publicación de su estudio se dio 2 años después.



Figura 1.12. Simulador de vuelo con la Plataforma de Stewart

Los GDL del robot paralelo dependen de la aplicación. La configuración más común utiliza 3 GDL. Éstos se utilizan en tareas de posicionamiento, manufactura de alta velocidad, empaçado de alimentos y en máquinas CNC. En la actualidad los robots tipo delta son aplicados a nivel industrial para las líneas de empaçado de alta velocidad en empresas como Bosch y ABB Robotics, entre otras.

En el Ecuador se han desarrollado proyectos con robots tipo SCARA¹, esféricos, y cartesianos. Existen carencias respecto a la implementación de manipuladores paralelos en su industria. No obstante, en la Escuela Politécnica del Ejército se ha realizado un proyecto de grado de esta clase de robots. Este se encuentra titulado como *“Diseño y construcción de un prototipo de robot Delta con implementación de un cortador láser CNC utilizando la plataforma Robotic Operating System(ROS) para la elaboración de artículos publicitarios”* [8]. La documentación disponible no hace referencia al espacio de trabajo del robot ni tampoco dimensiona sus eslabones apropiadamente. A nivel interno de la misma institución se han realizado pequeños proyectos relativos al robot delta, pero no hay acceso a su documentación.

1.5.2. SITUACIÓN ACTUAL

Los laboratorios de la Facultad de Ciencias y Tecnologías Aplicadas de la UIDE carecen de equipo apropiado para realizar trabajos de laboratorio en la asignatura *“Robótica Industrial”*. Con prácticas sobre el robot paralelo propuesto se potenciaría el conocimiento respecto al manejo de robots manipuladores reales.

Es importante resaltar que los simuladores de robótica complementan el aprendizaje de los estudiantes. El problema es que estos programas no brindan la misma experiencia ni presentan consideraciones prácticas para manipular robots verdaderos.

El robot delta desarrollado lleva por nombre PREDUIN². Su diseño se inspira sobre el robot DELTA de Clavel [9] y las dimensiones de sus brazos parten del análisis del espacio de trabajo requerido. Las simulaciones desarrolladas en SOLIDWORKS permiten evaluar la estructura diseñada, encontrar las dimensiones reales que tendría el manipulador y verificar que los motores seleccionados sean los adecuados.

¹ SCARA es un acrónimo para Selective Compliant Assembly Robot Arm

² PREDUIN corresponde a Prototipo Educativo de robot Industrial

1.5.3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT A DESARROLLAR

El prototipo se orienta a la manipulación de objetos mediante un efector electromagnético. Inicialmente se plantea que el usuario identifique en que zona se encuentra el objeto y se introduzca este estado base a la HMI. Se registra la posición final deseada con la respectiva orientación del objeto.

El robot tomará ambos datos de posición y los evaluará para verificar que ambos existan en su espacio de trabajo, en otras palabras, que sean alcanzables. Este procedimiento se suele automatizar con cámaras en los robots comerciales. Tras conocer los puntos de localización, el robot planifica una trayectoria lineal por la que pasaría la carga sujeta al efector. Una vez realizado todo esto y con la aprobación del usuario, el robot ejecuta las acciones previstas y manipula al objeto.

Para las instrucciones que maneja el robot se utiliza el estándar ISO-6983, también conocido como código G. Esta norma simplifica la escritura e interpretación de las órdenes que el robot recibe. En el prototipo se usan tres instrucciones básicas: G1, M3 y M5. Estos comandos permiten mover el objeto a cualquier posición dentro del espacio de trabajo. Debe tomarse en cuenta que las unidades que se emplean en los códigos para este robot pertenecen al sistema internacional y sus submúltiplos.

Como medio de verificación para la posición final se utiliza una cuadrícula enumerada que se encuentra sobre la base de la estructura. Esta serviría para la realización de las pruebas de funcionamiento y también como herramienta para los laboratorios propuestos. Este procedimiento describe el trabajo esperado del prototipo.

1.5.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL ROBOT PROPUESTO

En base a la información recopilada entre [7], [8] y [9], se definió un volumen de trabajo semiesférico con un radio de 200 mm para el robot delta. Mediante (1.3) se calcula la dimensión de este espacio:

$$V = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (1.3)$$

Donde:

- V volumen de trabajo, en m^3 ;
- r radio del volumen de trabajo, en m.

Reemplazando $r = 0.2\text{m}$ en (2.1) se calcula el volumen de trabajo:

$$V = 0,0168 \text{ m}^3$$

Adicionalmente se consideran otros factores como una carga útil de 0,2 kg en el efector. A este valor se añade el peso propio del efector y el del actuador para hacerlo girar. Al ser estos elementos desconocidos hasta el momento, se considera un factor de diseño de 1,5 como una aproximación al valor real de la carga en el efector. La carga útil para el diseño inicial del robot sería 0,3 kg.

En cuanto a la parte electrónica se estima que los elementos trabajarán con los voltajes comunes de 5 y 12 voltios de corriente continua. La intensidad que debe proveer la fuente de alimentación aún no puede definirse debido a que los elementos del robot todavía no han sido dimensionados.

Para la parte informática se pretende utilizar software libre en la creación y programación de la interfaz humano-máquina. Esto a su vez involucra la adaptación de las instrucciones del estándar de código G en el programa de control y comunicación con el robot a desarrollarse.

En el siguiente capítulo se presenta el análisis de alternativas para realizar el robot delta. En el mismo se detallan diferentes criterios importantes para este proyecto. En base a ellos se da la selección de la mejor opción entre las propuestas.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En este capítulo se muestran diferentes opciones en cuanto a motores, elementos de control electrónico y lenguajes de programación que podrían intervenir en la realización del proyecto. Posteriormente el método ordinal corregido de los criterios ponderados se aplica para encontrar la mejor alternativa en cada caso.

2.1. SELECCIÓN DE MOTORES PARA EL ROBOT

Para seleccionar el actuador correcto en el robot a desarrollar se plantean los siguientes criterios de evaluación [10]:

- Consumo eléctrico: Debido a que mayor consumo representa un aumento en la potencia de la fuente de alimentación y costos en la disipación de calor.
- Conexiones eléctricas: Ya que el aumento de cables que requieren estos elementos complica el acople de los mismos a la estructura mecánica.
- Relación torque/precio: Un motor con mayor torque para el actuador representa un costo más elevado para el prototipo.
- Control de la posición: Facilidad para manipular y monitorear la posición del actuador desde el microcontrolador.
- Espacio requerido: Se refiere al tamaño que ocupa el motor y cualquier elemento adicional que requiera para su funcionamiento.

Las siguientes soluciones presentan un torque nominal similar:

- a) Solución A: Servomotor Turnigy TGY-DS3509MG x3
- b) Solución B: Servomotor AHBS-3713 x3
- c) Solución C: Motor a Pasos Nema 23 Ultra Torque x3

En la Tabla 2.1 se muestra la determinación del peso ponderado de cada uno de los criterios para la selección del actuador adecuado para el prototipo.

Tabla 2.1. Determinación del peso ponderado de cada criterio de selección de los actuadores

Criterio	Consumo	Conexiones	Torque/Precio	Control Posición	Espacio	$\sum + 1$	Ponderación
Consumo		1	0,5	0,5	1	4	0,27
Conexiones	0		0	0,5	0,5	2	0,13
Torque/Precio	0,5	1		1	0,5	4	0,27
Control Posición	0,5	0,5	0		1	3	0,20
Espacio	0	0,5	0,5	0		2	0,13
Total						15	1

Seguidamente se evalúa en la Tabla 2.2 el criterio consumo eléctrico, en la Tabla 2.3 el criterio de las conexiones eléctricas, en la Tabla 2.4 el criterio de la relación torque/precio, en la Tabla 2.5 el criterio de control de posición y en la Tabla 2.6 el criterio del espacio requerido. La Tabla 2.7 muestra los resultados de la selección del actuador, donde la Solución B: Servomotor AHBS-3717 es la mejor alternativa.

Tabla 2.2. Evaluación de peso ponderado para el criterio consumo eléctrico

Consumo	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5		1	2,5	0,42
Solución C	0	0		1	0,17
Total				6	1

Tabla 2.3. Evaluación de peso ponderado para el criterio conexiones eléctricas

Conexiones	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5		1	2,5	0,42
Solución C	0	0		1	0,17
Total				6	1

Tabla 2.4. Evaluación de peso ponderado para el criterio relación torque/precio

Torque/Precio	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum + 1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,17
Solución B	1		1	3	0,50
Solución C	1	0		2	0,33
Total				6	1

Tabla 2.5. Evaluación de peso ponderado para el criterio control de posición

Control Posición	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	0	1,5	0,25
Solución B	0,5		0	1,5	0,25
Solución C	1	1		3	0,50
Total				6	1

Tabla 2.6. Evaluación de peso ponderado para el criterio espacio requerido

Espacio	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5		1	2,5	0,42
Solución C	0	0		1	0,17
Total				6	1

Tabla 2.7. Selección de la mejor alternativa para los actuadores del robot

Conclusión	Consumo	Conexiones	Torque/Precio	Control Posición	Espacio	\sum	Prioridad
Solución A	0,1111	0,0556	0,0444	0,0500	0,0556	0,3167	2
Solución B	0,1111	0,0556	0,1333	0,0500	0,0556	0,4056	1
Solución C	0,0444	0,0222	0,0889	0,1000	0,0222	0,2778	3

2.2. SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL ELECTRÓNICO

En la selección del elemento para el control electrónico del robot se consideran los siguientes criterios de evaluación [11]:

- Consumo eléctrico: Debido a que mayor consumo representa un aumento en la potencia de la fuente de alimentación.
- Costo moderado: Se busca minimizar costos puesto que es un robot prototipo.
- Programación: Se busca que el software de programación para este elemento sea sencillo de entender para el usuario pero que provea diversas herramientas para el desarrollo del código de control.
- Protección: Seguridades que protejan la integridad del elemento electrónico.
- Espacio requerido: Se refiere al tamaño que ocupa el elemento y cualquier otro adicional que se requiera para su funcionamiento.

Se estudia las siguientes soluciones cuyos periféricos y capacidad de expansión mediante módulos son similares:

- Solución A: Microcontrolador Atmega328 con arranque Arduino
- Solución B: Microcontrolador dsPIC33F
- Solución C: PLC OMRON C200H-CPU21

En la Tabla 2.8 se muestra la determinación del peso ponderado de cada uno de los criterios para la selección del elemento electrónico de control para el prototipo.

Tabla 2.8. Evaluación del peso ponderado de los criterios de selección para el control electrónico

Criterio	Consumo	Costo	Programación	Protección	Espacio	$\Sigma + 1$	Ponderación
Consumo		0,5	0	0,5	0,5	2,5	0,17
Costo	0,5		0,5	0,5	1	3,5	0,23
Programación	1	0,5		1	0,5	4	0,27
Protección	0,5	0,5	0		0,5	2,5	0,17
Espacio	0,5	0	0,5	0,5		2,5	0,17
Total						15	1

A continuación se evalúa en la Tabla 2.9 el criterio consumo eléctrico, en la Tabla 2.10 el criterio costo, en la Tabla 2.11 el criterio programación, en la Tabla 2.12 el criterio protección y en la Tabla 2.13 el criterio espacio requerido. La Tabla 2.14 muestra los resultados de la selección del elemento de control electrónico, donde la Solución A: Microcontrolador Atmega328 con arranque Arduino es la mejor alternativa.

Tabla 2.9. Evaluación de criterios ponderados respecto al consumo eléctrico del elemento de control

Consumo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5		1	2,5	0,42
Solución C	0	0		1	0,17
Total				6	1

Tabla 2.10. Evaluación de criterios ponderados respecto al costo del elemento de control

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,50
Solución B	0		1	2	0,33
Solución C	0	0		1	0,17
Total				6	1

Tabla 2.11. Evaluación de criterios ponderados para la programación del elemento de control

Programación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	0	2	0,33
Solución B	0		0	1	0,17
Solución C	1	1		3	0,50
Total				6	1

Tabla 2.12. Evaluación de criterios ponderados para la protección del elemento de control

Protección	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	0	1,5	0,25
Solución B	0,5		0	1,5	0,25
Solución C	1	1		3	0,50
Total				6	1

Tabla 2.13. Evaluación de criterios ponderados para el espacio requerido del elemento de control

Espacio	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,42
Solución B	0,5		1	2,5	0,42
Solución C	0	0		1	0,17
Total				6	1

Tabla 2.14. Selección de la mejor alternativa respecto al elemento de control electrónico

Conclusión	Consumo	Costo	Programación	Protección	Espacio	Σ	Prioridad
Solución A	0,0694	0,1167	0,0889	0,0417	0,0694	0,3861	1
Solución B	0,0694	0,0778	0,0444	0,0417	0,0694	0,3028	3
Solución C	0,0278	0,0389	0,1333	0,0833	0,0278	0,3111	2

2.3. SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN DE LA HMI

Para la selección del lenguaje de programación para desarrollar la interfaz humano-máquina (HMI) se consideran los siguientes criterios de evaluación:

- Desarrollo de interfaces gráficas de usuario (GUI): Se refiere a la capacidad de las herramientas del software para crear interfaces gráficas de usuario.
- Robustez: Es la respuesta apropiada del programa ante condiciones excepcionales fuera de su alcance.
- Simplicidad de sintaxis: Facilidad para leer y entender el código desarrollado.
- Portabilidad: Capacidad de funcionar en múltiples plataformas sin requerir de cambios mayores en el programa.

Se analizan las siguientes alternativas³ para el desarrollo de la HMI:

- Solución A: Java
- Solución B: C++
- Solución C: Python

En la Tabla 2.15 se determina el peso ponderado de cada criterio para la selección del lenguaje de programación de la HMI del robot en desarrollo.

³ <http://www.python.org.ar/wiki/RendimientoPythonVsJavaVsNet>

Tabla 2.15. Ponderación de los criterios de selección para el lenguaje de programación

Criterio	GUI	Robustez	Simplicidad	Portabilidad	$\Sigma + 1$	Ponderación
GUI		0,5	0,5	1	3	0,30
Robustez	0,5		0,5	1	3	0,30
Simplicidad	0,5	0,5		0,5	2,5	0,25
Portabilidad	0	0	0,5		1,5	0,15
Total					10	1

Seguidamente se evalúa el criterio del desarrollo GUI en la Tabla 2.16, el criterio robustez en la Tabla 2.17, el criterio simplicidad de sintaxis en la Tabla 2.18 y el criterio portabilidad en la Tabla 2.19. La Tabla 2.20 muestra los resultados de esta selección, donde la Solución C: Python es la mejor alternativa.

Tabla 2.16. Evaluación de criterios ponderados para el desarrollo de interfaz gráfica de usuario

GUI	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,50
Solución B	0		0	1	0,17
Solución C	0	1		2	0,33
Total				6	1

Tabla 2.17. Evaluación de criterios ponderados para la robustez del lenguaje de programación

Robustez	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	0,5	2	0,33
Solución B	0,5		0	1,5	0,25
Solución C	0,5	1		2,5	0,42
Total				6	1

Tabla 2.18. Evaluación de criterios ponderados para la simplicidad de sintaxis

Simplicidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	0	1,5	0,25
Solución B	0,5		0	1,5	0,25
Solución C	1	1		3	0,50
Total				6	1

Tabla 2.19. Evaluación de criterios ponderados para la portabilidad del lenguaje de programación

Portabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	0,5	2	0,33
Solución B	0,5		0,5	2	0,33
Solución C	0,5	0,5		2	0,33
Total				6	1

Tabla 2.20. Selección de la mejor alternativa de lenguaje de programación para la HMI del robot

Conclusión	GUI	Robustez	Simplicidad	Portabilidad	Σ	Prioridad
Solución A	0,1500	0,1000	0,0625	0,0500	0,3625	2
Solución B	0,0500	0,0750	0,0625	0,0500	0,2375	3
Solución C	0,1000	0,1250	0,1250	0,0500	0,4000	1

En el siguiente capítulo se diseña cada uno de los elementos que componen al robot delta PREDUIN. También se da una introducción a la cinemática directa, inversa y al manejo de velocidades en los robots paralelos. El correcto desarrollo de estos factores y el dimensionamiento de los elementos mecánicos son aspectos fundamentales para el control y movimiento adecuado del prototipo.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL PROTOTIPO

3.1. ANÁLISIS POR CINEMÁTICA INVERSA

La cinemática inversa es un método de resolución de posicionamiento en sistemas robóticos, donde se conoce la posición actual o la deseada del efector y se buscan las coordenadas articulares que satisfacen dichos puntos.

En los robots seriales no es siempre posible encontrar una respuesta a la cinemática inversa y en la mayoría de los casos se utilizan métodos numéricos para tratar de aproximarse a la solución. En el caso del robot paralelo, la cinemática inversa es sencilla y se resuelve por geometría con el fin de aprovechar la simetría entre sus brazos. Para realizar los esquemas del prototipo y de los diferentes elementos del mismo se utiliza AutoCAD 2013 versión estudiantil. La Figura 3.1 muestra al robot delta con el eje de coordenadas escogido para resolver su cinemática inversa [12].

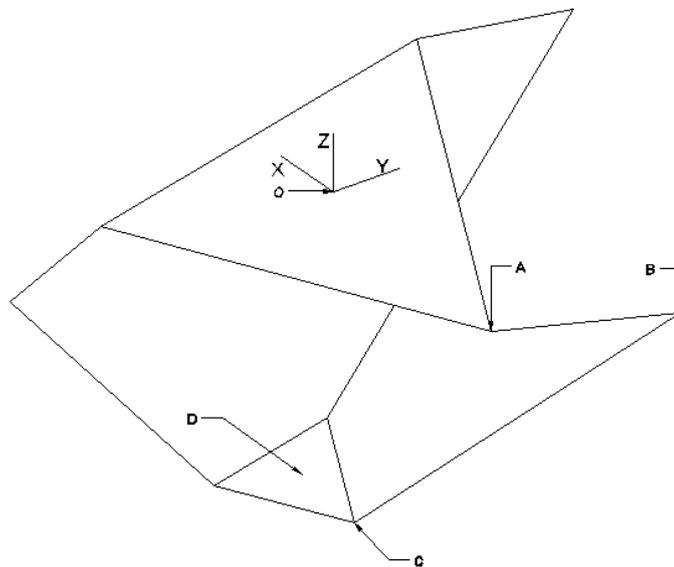


Figura 3.1 Ilustración del robot delta para el análisis cinemático inverso

El análisis se realiza sobre un brazo aislado del robot. La vista de la Figura 3.2 es útil para identificar las relaciones geométricas a establecer y las variables involucradas en el movimiento del mismo.

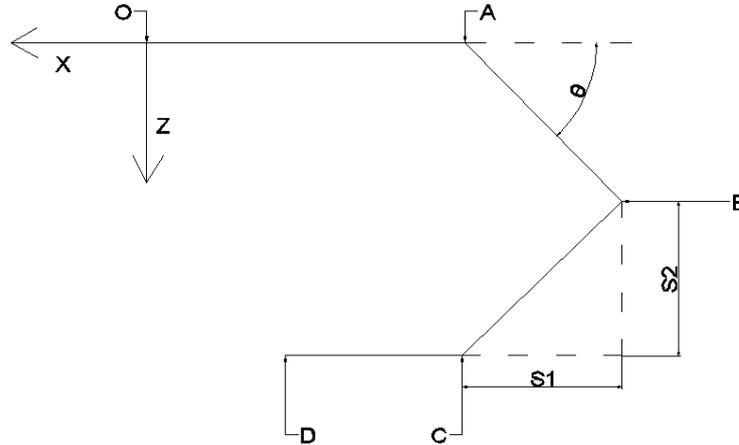


Figura 3.2. Vista lateral de un brazo del robot delta

Donde:

- OA distancia del centro de la base superior hasta el centro de un actuador, en m;
- DC distancia del centro de la base inferior hasta su antebrazo, en m;
- AB segmento correspondiente al brazo, en m;
- BC segmento correspondiente al antebrazo, en m;
- θ ángulo que ha girado el actuador para obtener esa posición, en $^{\circ}$;
- $S1$ componente rectangular horizontal del antebrazo, en m;
- $S2$ componente rectangular vertical del antebrazo, en m.

Se igualan las dos distancias horizontales desde O hasta B en (3.1):

$$OA + AB \cdot \cos(\theta) = -X + DC + S1 \quad (3.1)$$

Donde:

- X Distancia desde el origen hasta el punto sobre el eje "X", en m.

De (3.1) se despeja una expresión para definir $S1$ en (3.2):

$$S1 = T + AB \cdot \cos(\theta) \quad (3.2)$$

Donde se asume una variable T que abarca los términos constantes que existen en (3.1). El valor de la misma está dado por (3.3):

$$T = OA + X - DC \quad (3.3)$$

Igualando las distancias verticales desde O hasta B se encuentra $S2$ en (3.4):

$$S2 = Z + AB \cdot \sin(\theta) \quad (3.4)$$

Donde:

Z distancia desde el origen hasta la carga respecto al eje "Z", en m.

El segmento BC en la Figura 3.2 está alineado con el eje X. En un desplazamiento real debe considerarse que también pueden existir movimientos sobre el eje "Y". Esto implica que, sobre el plano lateral del robot (Figura 3.2), en realidad se muestre una proyección del antebrazo BC . Para analizar adecuadamente a este segmento se utiliza un plano frontal como el de la Figura 3.3.

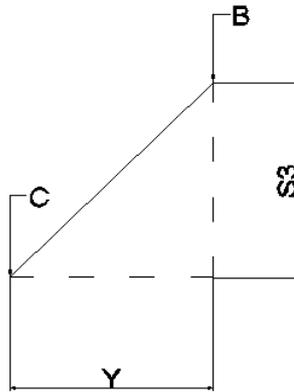


Figura 3.3. Vista frontal de un antebrazo del robot delta

Donde:

BC segmento real del antebrazo del robot, en m;

$S3$ proyección del antebrazo sobre el plano lateral, en m;

Y distancia desde el plano lateral hasta la carga respecto al eje "Y", en m.

Se aplica el Teorema de Pitágoras para encontrar $S3$ con (3.5):

$$BC^2 = S3^2 + Y^2$$

$$S3^2 = BC^2 - Y^2 \quad (3.5)$$

$S1$ y $S2$ se relacionan por el Teorema de Pitágoras con $S3$ debido a que esta es la proyección del antebrazo sobre el plano de la Figura 3.2, resultando (3.6):

$$S3^2 = S1^2 + S2^2 \quad (3.6)$$

Se igualan (3.5) y (3.6) con el respectivo reemplazo de sus términos correspondientes para obtener (3.7):

$$S1^2 + S2^2 = BC^2 - Y^2$$

$$BC^2 - Y^2 = (T + AB \cdot \cos(\theta))^2 + (Z + AB \cdot \sen(\theta))^2$$

$$\begin{aligned}
 BC^2 - Y^2 &= T^2 + 2 \cdot AB \cdot T \cdot \cos(\theta) + AB^2 \cdot \cos^2(\theta) \\
 &+ Z^2 + 2 \cdot Z \cdot AB \cdot \sin(\theta) + AB^2 \cdot \sin^2(\theta)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Pero en (3.7) se puede aplicar la identidad geométrica (3.8):

$$\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1 \tag{3.8}$$

De esta forma se obtiene (3.9):

$$2 \cdot AB \cdot T \cos(\theta) + 2 \cdot AB \cdot Z \sin(\theta) = K \tag{3.9}$$

En este caso la variable K estaría determinada por (3.10):

$$K = BC^2 - Y^2 - AB^2 - Z^2 - T^2 \tag{3.10}$$

Para resolver (3.9) se aplican dos identidades trigonométricas, (3.11) y (3.12):

$$\cos(\theta) = \frac{(1-t^2)}{(1+t^2)} \tag{3.11}$$

$$\sin(\theta) = \frac{2t}{(1+t^2)} \tag{3.12}$$

Con la variable t definida como (3.13):

$$t = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{3.13}$$

Se reemplazan (3.11) y (3.12) en (3.9) y se agrupan términos en común para obtener como resultado (3.14):

$$\begin{aligned}
 2 \cdot AB \cdot T \cdot \left(\frac{1-t^2}{1+t^2}\right) + 2 \cdot AB \cdot Z \cdot \left(\frac{2t}{1+t^2}\right) &= K \\
 2 \cdot AB \cdot T \cdot (1-t^2) + 2 \cdot AB \cdot Z \cdot 2t &= K \cdot (1+t^2) \\
 2 \cdot AB \cdot T - 2 \cdot AB \cdot T \cdot t^2 + 4 \cdot AB \cdot Z \cdot t &= K + K \cdot t^2 \\
 0 = K \cdot t^2 + 2 \cdot AB \cdot T \cdot t^2 - 4 \cdot AB \cdot Z \cdot t + K - 2 \cdot AB \cdot T & \\
 0 = P \cdot t^2 + Q \cdot t + R &
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Donde cada una de las variables P , Q y R se expresan por medio de las ecuaciones (3.15), (3.16) y (3.17) respectivamente.

$$P = K + 2 \cdot AB \cdot T \quad (3.15)$$

$$Q = -4 \cdot AB \cdot Z \quad (3.16)$$

$$R = K - 2 \cdot AB \cdot T \quad (3.17)$$

Se resuelve (3.14) como un binomio cuadrado, obteniendo (3.18):

$$t = \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P} \quad (3.18)$$

Reemplazando (3.18) en (3.13) y aplicando la función inversa a la tangente de este resultado, se determina θ por (3.19):

$$\theta = 2 \cdot \text{atan} \left(\frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P} \right) \quad (3.19)$$

De esta forma se obtienen dos soluciones de θ por cada brazo. Esto da un total de 8 posibles configuraciones en cinemática inversa para un mismo punto. Se debe escoger la solución más cercana a cero en cada caso debido a la orientación de los actuadores respecto a los ejes de coordenadas. Así se reducen las posibilidades a un único resultado.

El discriminante que aparece en (3.19) presenta tres casos particulares:

- Si $Q^2 - 4PR > 0$ Existen dos soluciones reales para θ en cada brazo.
- Si $Q^2 - 4PR = 0$ Existe un punto singular que le es imposible alcanzar.
- Si $Q^2 - 4PR < 0$ El punto en cuestión no puede ser alcanzado.

Para resolver el ángulo de giro en el resto de actuadores se aprovecha la simetría entre los brazos del prototipo. El punto analizado debe rotarse a los otros dos brazos para reutilizar las ecuaciones obtenidas. Esta rotación se realiza por medio de (3.20):

$$P_{nuevo} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\text{sen}(\gamma) & 0 \\ \text{sen}(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot P \quad (3.20)$$

Donde:

- P_{nuevo} nuevo punto de análisis, en mm;
 P punto original de análisis cinemático, en mm;
 γ ángulo de rotación respecto al eje "Z", en °.

Para el cálculo de la cinemática inversa en el segundo brazo se realiza una rotación de 120° con (3.20) y se calculan los ángulos del actuador por (3.19). En el tercer brazo se repite el procedimiento pero utilizando una rotación de -120° en (3.20).

3.2. SIMULACIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA

Se utiliza software para simular los resultados de (3.19) y (3.20). Para la parte analítica se emplea Python 2.7 mientras que en los gráficos se usa Matlab 2013 estudiantil.

En Python se introducen las funciones ya despejadas. Se crea un programa cuya entrada sea la posición deseada y como salida se obtengan los ángulos de los tres brazos. La captura de este en la Figura 3.4. Para el ejemplo se toma un punto al azar, como $P(x; y; z) = (0, 1; -0, 15; -0, 25)$ m. Los resultados se muestran en la Figura 3.5.

```
import math

class Delta:
    def __init__(self, x0, y0, z0):

        self.cont = 0

        print(" ")
        print("Brazo 1")
        self.mundo = Mundo(x0, y0, z0)
        self.calc_T()
        self.calc_K()
        self.calc_theta()

        print(" ")
        print("Brazo 2")
        self.mundo = Mundo(self.mundo.x*math.cos(self.mundo.angulo)-self.mundo.y*math.sin(self.mundo.angulo), sel:
        self.calc_T()
        self.calc_K()
        self.calc_theta()

        print(" ")
        print("Brazo 3")
        self.mundo = Mundo(self.mundo.x*math.cos(self.mundo.angulo)-self.mundo.y*math.sin(self.mundo.angulo), sel:
        self.calc_T()
        self.calc_K()
        self.calc_theta()

        print("")
        if self.cont>0:
            print("Insoluble")
        else:
            print("Soluble")

    def calc_T(self):
        if self.cont>0: return
        self.T = self.mundo.OA + self.mundo.x - self.mundo.DC #variable T
        #print("T = " + str(self.T))

    def calc_K(self):
        if self.cont>0: return
        self.K = pow(self.mundo.BC, 2) - pow(self.mundo.y, 2) - pow(self.T, 2) - pow(self.mundo.z, 2) - pow(self.mundo.AB, 2)
        #print("K = " + str(self.K)) #variable K

    def calc_theta(self):
        if self.cont>0: return
        e_1 = self.K + 2*self.T*self.mundo.AB
        e_2 = -4*self.mundo.z*self.mundo.AB
        e_3 = self.K - 2*self.T*self.mundo.AB
        Dis = pow(e_2, 2) - 4*e_1*e_3
```

Figura 3.4. Captura de pantalla del código de programación en Python 2.7

```

>>>

Brazo 1
thetal = 53.9839395025

Brazo 2
thetal = 53.6162109129

Brazo 3
thetal = 48.6590249096

Soluble
>>>

```

Figura 3.5. Captura de Pantalla de los resultados de la ejecución del programa

Luego de obtener estos ángulos, se los introduce en Matlab 2013 versión estudiantil para graficarlos con un esquema básico del robot delta. Una captura de pantalla del código desarrollado se muestra en la Figura 3.6. El esquema en 3D del robot se aprecia en la Figura 3.7.

```

1 - R = [cos(2*pi/3) -sin(2*pi/3) 0; sin(2*pi/3) cos(2*pi/3) 0; 0 0 1];
2 - OA = 150; L1 = 250; %Brazo AB
3 - DC = 50; L2 = 250; %Antebrazo BC
4
5 - P = [10; -10; -250]; %Punto Final
6 - b1ang = 74.55*pi/180; %Ángulos obtenidos del programa en Python
7 - b2ang = 33.17*pi/180;
8 - b3ang = 77.81*pi/180;
9
10 - Pax = P(1);
11 - P(1) = P(2);
12 - P(2) = Pax;
13
14 - P2 = R*([0;-DC;0])+P; %Iniciación de vectores de cada Brazo
15 - P3 = R*R*([0;-DC;0])+P;
16 - blinit = [0;-OA;0];
17
18 - Ax0 = [blinit(1);blinit(2);blinit(3)]; %Puntos de los extremos de cada brazo
19 - Ax = [blinit(1);blinit(2)-L1*cos(b1ang);-L1*sin(b1ang)];
20 - Ax2 = [P(1);P(2)-DC;P(3)];
21
22 - Bx0 = R*[blinit(1);blinit(2);blinit(3)];
23 - Bx = R*[blinit(1);blinit(2)-L1*cos(b2ang);-L1*sin(b2ang)];
24 - Bx2 = [P2(1);P2(2);P2(3)];
25
26 - Cx0 = R*R*[blinit(1);blinit(2);blinit(3)];
27 - Cx = R*R*[blinit(1);blinit(2)-L1*cos(b3ang);-L1*sin(b3ang)];
28 - Cx2 = [P3(1);P3(2);P3(3)];
29
30 - hold on
31 - %grid on
32 - axis([-400,400,-400,400,-400,400])
33 - xlabel('Eje Y');
34 - ylabel('Eje X');
35 - zlabel('Eje Z');
36
37 - plot3([Cx0(1) Ax0(1)], [Cx0(2) Ax0(2)], [Cx0(3) Ax0(3)], 'k') %Graficas
38 - plot3([Ax0(1) Ax(1)], [Ax0(2) Ax(2)], [Ax0(3) Ax(3)], 'm')
39 - plot3([Ax(1) Ax2(1)], [Ax(2) Ax2(2)], [Ax(3) Ax2(3)], 'g')
40 - plot3([Ax2(1) P(1)], [Ax2(2) P(2)], [Ax2(3) P(3)], 'r')
41 - plot3([Ax2(1) Cx2(1)], [Ax2(2) Cx2(2)], [Ax2(3) Cx2(3)], 'b')
42 -
43 - plot3([Ax0(1) Bx0(1)], [Ax0(2) Bx0(2)], [Ax0(3) Bx0(3)], 'k')
44 - plot3([Bx0(1) Bx(1)], [Bx0(2) Bx(2)], [Bx0(3) Bx(3)], 'm')
45 - plot3([Bx(1) Bx2(1)], [Bx(2) Bx2(2)], [Bx(3) Bx2(3)], 'g')
46 - plot3([Bx2(1) P(1)], [Bx2(2) P(2)], [Bx2(3) P(3)], 'r')
47 - plot3([Bx2(1) Ax2(1)], [Bx2(2) Ax2(2)], [Bx2(3) Ax2(3)], 'b')

```

Figura 3.6. Captura de pantalla del código del programa en Matlab 2013

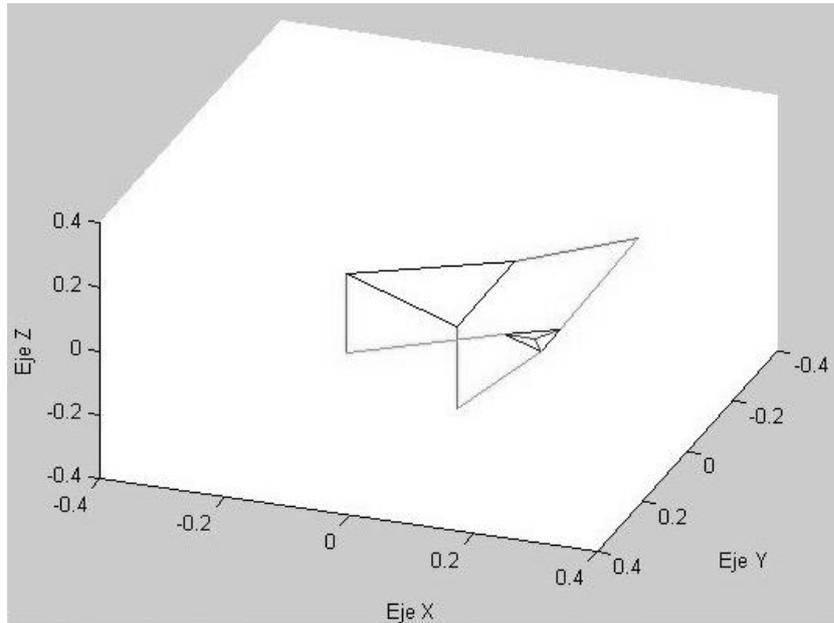


Figura 3.7. Robot delta simulado en Matlab 2013

Para verificar que el robot se encuentre sobre $P(x, y, z) = (0,1;-0,15;-0,25)$ m, se usan perspectivas auxiliares como la vista superior en la Figura 3.8 y la vista lateral en la Figura 3.9.

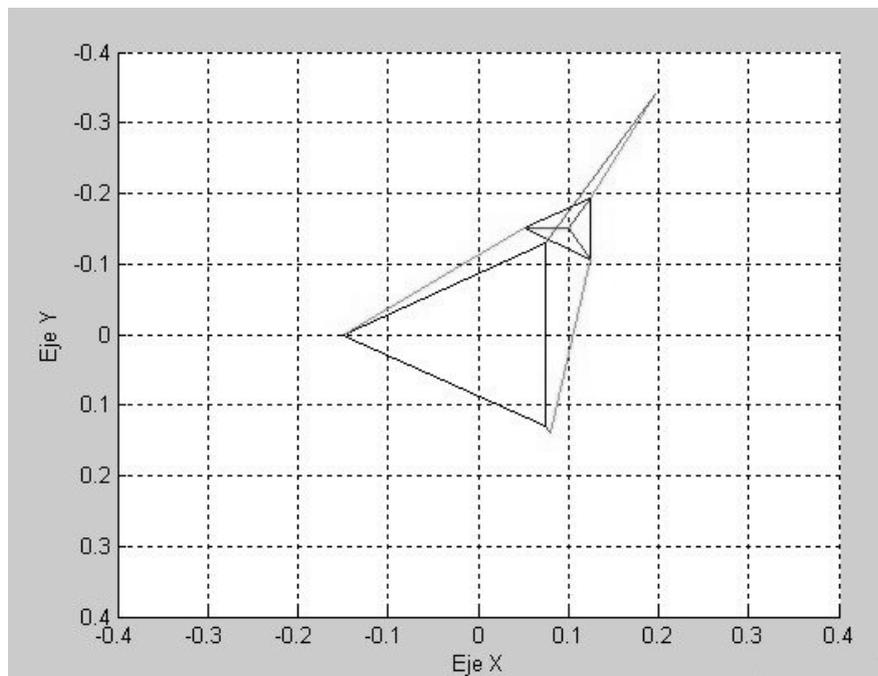


Figura 3.8. Vista superior del robot delta simulado en Matlab 2013

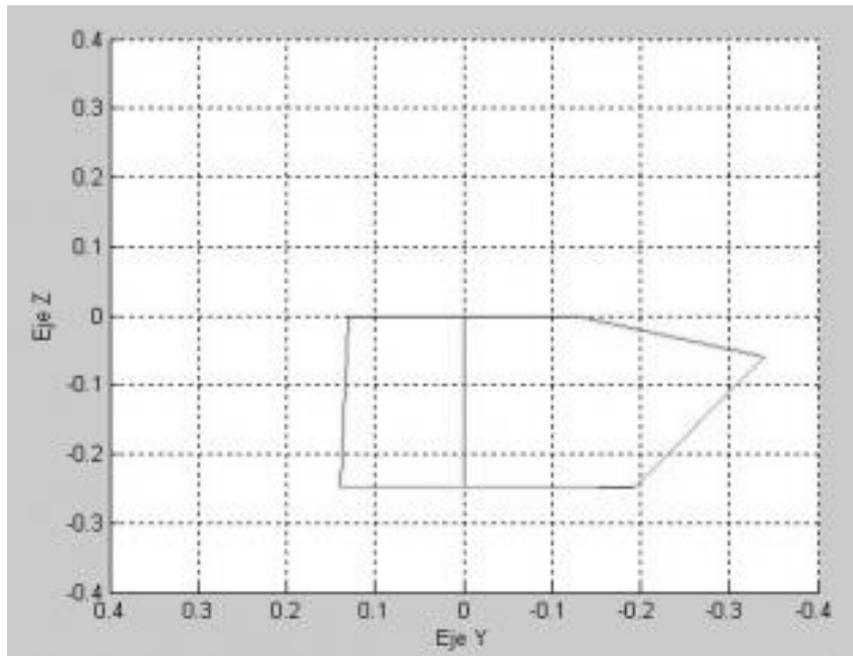


Figura 3.9. Vista lateral del robot delta simulado en Matlab 2013

En la Figura 3.8 puede notarse que el centro del triángulo pequeño (plataforma inferior) se ubica en el punto $P(x; y) = (0,1;-0,15)$ m. La misma base móvil está a una altura de $z = -0,25$ m en la Figura 3.9. El robot simulado se encuentra en la posición deseada.

3.3. DISEÑO MECÁNICO DE LOS ELEMENTOS DEL ROBOT

3.3.1. ANÁLISIS DEL ESPACIO DE TRABAJO

Modificando el programa de la cinemática inversa, se puede obtener una ilustración del espacio de trabajo haciendo un barrido de puntos. El programa se ejecuta dentro de un bucle finito y, si la cinemática inversa encuentra una solución, se guarda el resultado en un archivo separado para graficarse.

No obstante, el espacio de trabajo del robot es el resultado de la intersección entre los espacios de trabajos individuales de cada brazo. Bajo esa premisa, la dimensión depende de la longitud tanto del brazo como del antebrazo y con ello se presentan tres casos:

- Si la longitud del brazo es mayor que la del antebrazo, el espacio de trabajo del robot desde un corte vertical tendrá la forma de la Figura 3.10.

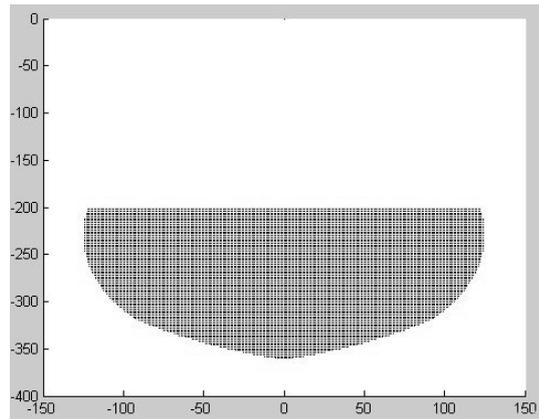


Figura 3.10. Ilustración del espacio de trabajo de un delta con su brazo más largo que el antebrazo

- Si la longitud del brazo es menor que la del antebrazo, el espacio de trabajo del robot desde un corte vertical tendrá la forma de la Figura 3.11.

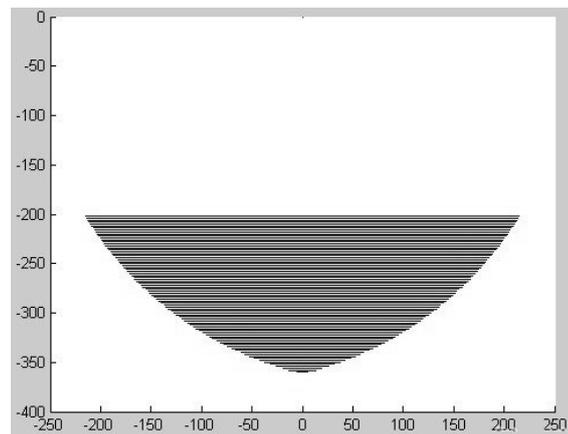


Figura 3.11. Ilustración del espacio de trabajo de un delta con el antebrazo más largo que su brazo

- Si la longitud del brazo es igual a la del antebrazo, el espacio de trabajo del robot desde un corte vertical tendrá la forma de la Figura 3.12.

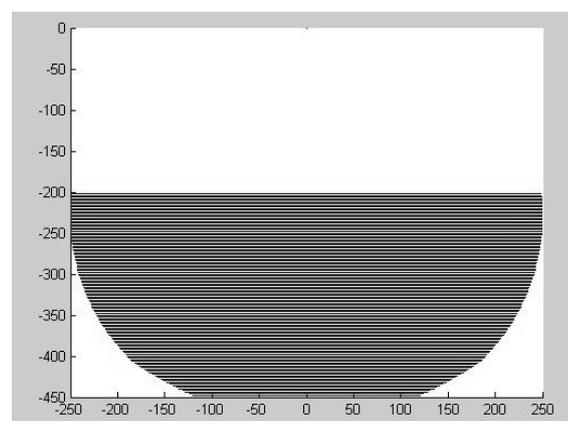


Figura 3.12. Ilustración del espacio de trabajo con brazos y antebrazos de igual longitud

Debido a que prototipo tiene una aplicación educativa, la mejor opción es aquella con la mayor cantidad posible de puntos. En consecuencia, el robot paralelo a diseñar debe tener su brazo y antebrazo de la misma longitud.

En el ejemplo y las pruebas se utiliza un brazo de 0,25 m mientras que la longitud OA (0,15 m) y DC (0,05 m) de las dos bases mantienen una relación 1/3 como se recomienda en aplicaciones generales [13]. En la Figura 3.12 se puede verificar que se satisface el área de trabajo a una altura $z = -0,35\text{m}$, por lo tanto, las medidas de los eslabones y las bases se consideran adecuadas para el robot desarrollado.

3.3.2. DISEÑO DEL ESPESOR DE LAS BASES

El factor crítico en las bases del robot es la rigidez. Una flexión sobre estas desplazaría al efector fuera de la posición ordenada desde la HMI. Para encontrar el espesor adecuado de cada base se utiliza (3.21), que corresponde a la fórmula de la Rigidez Flexional de la Hipótesis de Love-Kirchhoff [13]:

$$R = \frac{E \cdot e^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3.21)$$

Donde:

- R rigidez, en N/m;
- E módulo de Young, en Pa;
- e espesor de la base, en m;
- ν coeficiente de Poisson.

Se tiene también la expresión para la rigidez en (3.22):

$$R = \frac{F}{d} \quad (3.22)$$

Donde:

- F fuerza aplicada, en N;
- d deformación longitudinal, en m.

A partir de (3.21) y (3.22) se despeja el espesor para la base, obteniendo (3.23):

$$\frac{F}{d} = \frac{E \cdot e^3}{12(1 - \nu^2)}$$

$$e = n \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot 12(1 - \nu^2)}{d \cdot E}} \quad (3.23)$$

Donde:

n factor de carga, adimensional.

Se plantean 5 mm como una desviación máxima (que se corrige mediante pernos que sujetan al robot a su estructura de acero) y un factor de seguridad de 1,3 según [13] pues es un elemento cuya ruptura comprometería el funcionamiento del prototipo.

En el caso de la base superior, se toma a F como la carga total a soportar de estructura. Esto involucra a los 0,3 kg del objeto a cargar y al peso del robot. El resultado es $F = 9,8$ N. El material selecto es el Tablero de Fibra de Media Densidad (MDF) cuyo Módulo de Young es 14 GPA y Coeficiente de Poisson 0,33 [14]. Se obtiene entonces el espesor de la base superior reemplazando estos datos en (3.23):

$$e = 0,01487 \text{ m}$$

Es importante estimar la masa de las bases del prototipo, para ello se utiliza (3.24):

$$M = \rho \cdot V \quad (3.24)$$

Donde:

M masa de la base, en kg;

ρ densidad, en kg/m³;

V volumen, en m³.

Se calcula la masa de la placa superior con (3.24)

$$M = 760 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 0,01487 \text{ m} \cdot \left((0,15 \text{ m})^2 \cdot \frac{\sqrt{27}}{4} \right)$$

$$M = 0,3303 \text{ kg}$$

Para la base inferior se utiliza el mismo material pero F se divide a la mitad ya que esta soporta únicamente al objeto a transportar. De igual forma el factor de seguridad se reduce a 1,1 porque esta base se ve sometida a menos esfuerzos que puedan comprometer su integridad. Utilizando (3.23) para la segunda base se obtiene:

$$e = 0,009987 \text{ m}$$

Se calcula la masa de la placa inferior con (3.24):

$$M = 760 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 0,009987 \text{ m} \cdot \left((0,05 \text{ m})^2 \cdot \frac{\sqrt{27}}{4} \right)$$

$$M = 0,0246 \text{ kg}$$

Así quedan definidas las bases paralelas del prototipo. Estas servirán para calcular los eslabones y el torque necesario para mover al robot. Dicho dimensionamiento se lleva a cabo en la siguiente subsección del capítulo.

3.3.3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS MOTORES Y ESLABONES

Para dimensionar estos elementos se consideran los siguientes pasos:

- a) **Analizar la cinemática directa:** con este factor se determina la posición del efector a partir de los ángulos conocidos. La cinemática directa es necesaria para obtener las ecuaciones que definen la posición del robot en cada eje.
- b) **Análisis de la velocidad:** mediante las ecuaciones de cada coordenada del robot se determina la Matriz Jacobiana. Esta relaciona la velocidad lineal del efector con la velocidad angular de los actuadores.
- c) **Análisis estático de torque:** mediante el análisis de momentos en la posición extremo para un brazo, se determina el torque máximo. A este valor se añade un factor de carga para que el motor trabaje entre un 45 a 60% de su carga útil.
- d) **Selección del motor:** en base a la velocidad mínima requerida y el torque calculado se selecciona un motor adecuado para la aplicación.
- e) **Cálculo de los eslabones:** se conocen los datos característicos del motor real y las cargas soportadas en cada eslabón del robot. Con estos valores se calcula por rigidez el diámetro adecuado de cada eslabón para precisión moderada. Los resultados se verifican mediante un software de simulación de vigas.
- f) **Cálculo de acoples:** por medio de un análisis por carga estática y fatiga se calculan las dimensiones de los acoples intermedio y superior respectivamente. Además se encuentra el factor de seguridad de estos elementos.

3.3.3.1. Análisis de cinemática directa

La cinemática directa determina el punto $P(x; y; z)$ a partir del ángulo en cada una de las articulaciones. Se considera que en cada articulación del robot se genera una esfera (Figura 3.13) con radio igual a la longitud del antebrazo [15].

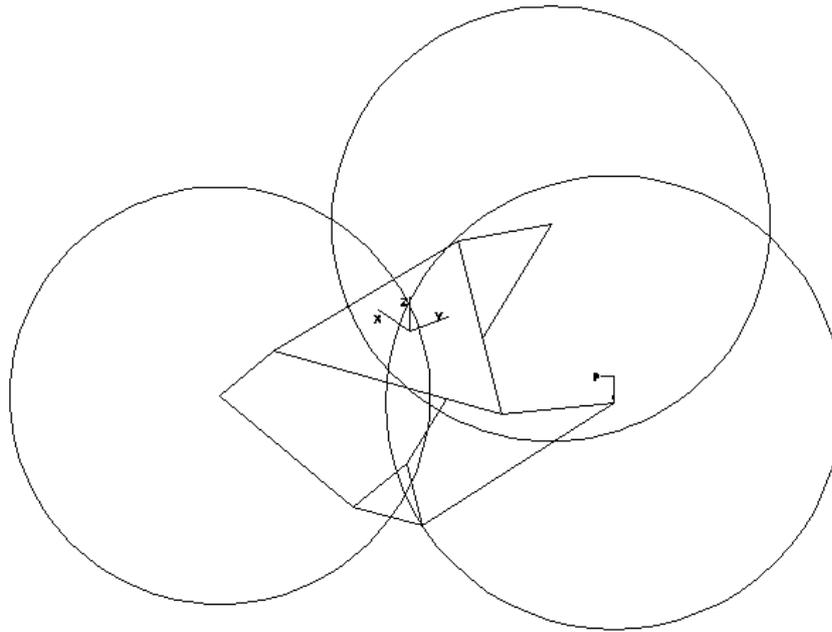


Figura 3.13. Esferas originadas en cada articulación del robot

Estas esferas se intersecarán en dos puntos. El primero se encuentra en el eje positivo “Z” y el otro en el negativo. El escoger una respuesta depende del sistema de coordenadas del robot. En este caso, el eje negativo “Z” sería el correcto.

A partir de (3.1) y (3.4) se determinan las coordenadas de la articulación a partir del centro del robot. Hay que considerar que las esferas se encuentran separadas por la longitud de la base inferior. Esta distancia debe suprimirse para lograr la intersección.

$$P_1 = \begin{bmatrix} OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_1) \\ 0 \\ BC \cdot \text{sen}(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Donde:

- P_1 punto correspondiente a la articulación intermedia en el brazo del robot, en m;
- OA distancia del centro de la base superior hasta el centro de un actuador, en m;
- DC distancia del centro de la base inferior hasta su antebrazo, en m;
- AB segmento correspondiente al brazo, en m;
- BC segmento correspondiente al antebrazo, en m;
- θ_1 ángulo que ha girado el actuador para obtener esa posición, en °.

Para describir por completo a los tres puntos que representan los centros de las esferas, se usa la matriz de rotación introducida en (3.20) para obtener (3.26):

$$P_{NUEVO} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\text{sen}(\alpha) & 0 \\ \text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_1) \\ 0 \\ BC \cdot \text{sen}(\theta_1) \end{bmatrix}$$

$$P_{NUEVO} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_1)) \\ \text{sen}(\alpha)(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_1)) \\ BC \cdot \text{sen}(\theta_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

También se introduce (3.27) como la ecuación general de una esfera:

$$(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 = r^2 \quad (3.27)$$

Se reemplaza (3.26) en (3.27) para cada caso $\left(\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \frac{2\pi}{3}, \alpha_3 = -\frac{2\pi}{3} \right)$:

$$(x - (OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_1)))^2 + y^2 + (z - BC \cdot \text{sen}(\theta_1))^2 = BC^2$$

$$BC^2 = \left(x + \frac{1}{2}(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_2)) \right)^2$$

$$+ \left(y - \frac{\sqrt{3}}{2}(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_2)) \right)^2$$

$$+ (z - BC \cdot \text{sen}(\theta_2))^2$$

$$BC^2 = \left(x + \frac{1}{2}(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_3)) \right)^2$$

$$+ \left(y + \frac{\sqrt{3}}{2}(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_2)) \right)^2 \quad (3.28)$$

$$+ (z - BC \cdot \text{sen}(\theta_3))^2$$

Estas ecuaciones pueden reescribirse como el sistema (3.29):

$$(x + A_1)^2 + (y + A_2)^2 + (z + A_3)^2 = BC^2$$

$$(x + A_4)^2 + (y + A_5)^2 + (z + A_6)^2 = BC^2 \quad (3.29)$$

$$(x + A_7)^2 + (y + A_8)^2 + (z + A_9)^2 = BC^2$$

Donde cada variable está definida por una expresión:

$$A_1 = (DC - OA - AB \cdot \cos(\theta_1))$$

$$A_2 = 0$$

$$A_3 = -BC \cdot \text{sen}(\theta_1)$$

$$A_4 = \frac{1}{2}(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_2))$$

$$A_5 = -\frac{\sqrt{3}}{2}(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_2))$$

$$A_6 = -BC \cdot \text{sen}(\theta_2)$$

$$A_7 = \frac{1}{2}(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_3))$$

$$A_8 = \frac{\sqrt{3}}{2}(OA - DC + AB \cdot \cos(\theta_3))$$

$$A_9 = -BC \cdot \text{sen}(\theta_3)$$

Al expandir (3.29) de se obtiene:

$$x^2 + 2xA_1 + y^2 + 2yA_2 + z^2 + 2zA_3 = BC^2 - A_1^2 - A_2^2 - A_3^2 \quad (3.30)$$

$$x^2 + 2xA_4 + y^2 + 2yA_5 + z^2 + 2zA_6 = BC^2 - A_4^2 - A_5^2 - A_6^2 \quad (3.31)$$

$$x^2 + 2xA_7 + y^2 + 2yA_8 + z^2 + 2zA_9 = BC^2 - A_7^2 - A_8^2 - A_9^2 \quad (3.32)$$

Restando (3.30) de (3.31) da como resultado (3.33):

$$2x(A_1 - A_4) + 2y(A_2 - A_5) + 2z(A_3 - A_6) = -A_1^2 - A_2^2 - A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + A_6^2 \quad (3.33)$$

Restando (3.30) de (3.32) da como resultado (3.34):

$$2x(A_1 - A_7) + 2y(A_2 - A_8) + 2z(A_3 - A_9) = -A_1^2 - A_2^2 - A_3^2 + A_7^2 + A_8^2 + A_9^2 \quad (3.34)$$

Se reescribe (3.33) y (3.34) como:

$$xB_1 + yB_2 + zB_3 = C_1 \quad (3.35)$$

$$xB_4 + yB_5 + zB_6 = C_2 \quad (3.36)$$

Donde cada variable está representada por una expresión:

$$B_1 = 2(A_1 - A_4)$$

$$B_2 = 2(A_2 - A_5)$$

$$B_3 = 2(A_3 - A_6)$$

$$B_4 = 2(A_1 - A_7)$$

$$B_5 = 2(A_2 - A_8)$$

$$B_6 = 2(A_3 - A_9)$$

$$C_1 = -A_1^2 - A_2^2 - A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + A_6^2$$

$$C_2 = -A_1^2 - A_2^2 - A_3^2 + A_7^2 + A_8^2 + A_9^2$$

Se convierte a (3.35) y (3.36) en una forma matricial, dando como resultado (3.37):

$$\begin{bmatrix} B_1 & B_2 \\ B_4 & B_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 - zB_3 \\ C_2 - zB_6 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

El sistema se resuelve por la Regla de Cramer y se obtienen (3.38) y (3.39):

$$\Delta = B_1B_5 - B_2B_4$$

$$\Delta x = (C_1 - zB_3)B_5 - B_2(C_2 - zB_6) = (B_5C_1 - B_2C_2) + z(B_6B_2 - B_3B_5)$$

$$\Delta y = (C_2 - zB_6)B_1 - B_4(C_1 - zB_3) = (B_1C_2 - B_4C_1) + z(B_4B_3 - B_1B_6)$$

$$x = \frac{\Delta x}{\Delta} = \frac{B_5C_1 - B_2C_2}{\Delta} + \frac{B_6B_2 - B_3B_5}{\Delta} \quad (3.38)$$

$$y = \frac{\Delta y}{\Delta} = \frac{B_1C_2 - B_4C_1}{\Delta} + \frac{B_4B_3 - B_1B_6}{\Delta} \quad (3.39)$$

Entonces (3.38) y (3.39) toman una forma simplificada en (3.40) y (3.41):

$$x = T_1 + T_2z \quad (3.40)$$

$$y = T_3 + T_4z \quad (3.41)$$

Donde cada variable está representada por una expresión:

$$T_1 = \frac{(B_5C_1 - B_2C_2)}{\Delta}$$

$$T_2 = \frac{(B_6B_2 - B_3B_5)}{\Delta}$$

$$T_3 = \frac{(B_1C_2 - B_4C_1)}{\Delta}$$

$$T_4 = \frac{(B_4B_3 - B_1B_6)}{\Delta}$$

Se puede sustituir (3.40) y (3.41) en (3.42) y finalmente hallar el valor de z con (3.42):

$$\begin{aligned}
BC^2 - A_7^2 - A_8^2 - A_9^2 &= (T_1 + T_2z)^2 + 2(T_1 + T_2z)A_7 + (T_3 + T_4z)^2 \\
&\quad + 2(T_3 + T_4z)A_8 + z^2 + 2zA_9 \\
0 &= (T_2^2 + T_4^2 + 1)z^2 + (2T_1T_2 + 2T_2A_7 + 2T_3T_4 + 2A_8T_4 + 2A_9)z \\
&\quad + (T_1^2 + 2A_7T_1 + T_3^2 + 2A_8T_3 - BC^2 + A_7^2 + A_8^2 + A_9^2)
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Simplificando esta expresión da como resultado (3.43):

$$U_1z^2 + U_2z + U_3 = 0 \tag{3.43}$$

Donde cada variable está representada por una expresión:

$$U_1 = T_2^2 + T_4^2 + 1$$

$$U_2 = 2(T_1T_2 + T_2A_7 + T_3T_4 + A_8T_4 + A_9)$$

$$U_3 = (T_1 + A_7)^2 + (T_3 + A_8)^2 - BC^2 + A_9^2$$

Finalmente se resuelve (3.43) como un binomio cuadrado para encontrar (3.44):

$$Z = \frac{-U_2 \pm \sqrt{U_2^2 - 4U_1U_3}}{2U_1} \tag{3.44}$$

El procedimiento consiste en calcular Z mediante (3.44) y luego reemplazarlo en (3.40) y (3.41) para encontrar las otras dos coordenadas. La coordenada Z a utilizar depende de la orientación que tenga en el robot (negativa para este caso). Hay que considerar cuatro casos de solución [15]:

- Solución normal, con dos respuestas distintas.
- Solución unitaria, con una única respuesta.
- Solución singular, donde existe un número infinito de soluciones.
- Solución inexistente, donde las esferas no se intersecan.

3.3.3.2. Análisis de velocidades

Para el análisis de velocidad es necesario emplear (3.45) que relaciona la velocidad lineal del efector final con el movimiento de cada brazo. [16]

$$\vec{V} = J \cdot \dot{Q} \tag{3.45}$$

Donde:

\vec{V} vector de velocidad, en m/s;

J matriz Jacobiana del robot, en m/rad;

\dot{Q} arreglo de las velocidades de las juntas, en rad/s.

Se encuentra la Matriz Jacobiana del robot. Esta se conforma de las derivadas parciales de cada coordenada del efector final respecto a las articulaciones del mismo.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

A partir de (3.44), (3.40) y (3.41) se completa (3.46) con la ayuda de Matlab 2013 para facilitar el cálculo por la complejidad de las expresiones de la cinemática directa. La Matriz Jacobiana es extensa por la cantidad de funciones trigonométricas involucradas en las derivadas parciales. Con el fin de apreciar el resultado de esta matriz se aplica un ejemplo práctico.

El análisis de velocidad determina la rapidez que el robot necesita para realizar la operación “*pick&place*”. Se ha fijado el rango de 1,2 a 1,8 segundos para realizar esta operación en base a las referencias consultadas. Partiendo de (3.45) se despejan las velocidades de las articulaciones, dando como resultado (3.47):

$$\dot{Q} = J^{-1} \cdot \vec{V} \quad (3.47)$$

En el espacio de trabajo del robot se tiene un rango de -200 a 200 mm entre sus extremos. Dentro de este se toma una distancia de 300 mm para establecer la rapidez con la que debería moverse a partir de (3.48):

$$V = \frac{d}{t} \quad (3.48)$$

Donde:

V rapidez del efector final, en m/s;

d distancia recorrida, en m;

t tiempo de operación, en s.

Se toma el promedio del tiempo establecido para la operación que correspondería a 1,5 segundos. Debe considerarse que en este tiempo también se encuentra involucrado el agarre del objeto. Por ese motivo se considera únicamente 1 segundo

como el lapso para que el efector se desplace los 300mm planteados. Reemplazando estos datos en (3.48) se obtiene:

$$V = \frac{300 \text{ mm}}{1 \text{ s}}$$

$$V = 300 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Considérese los puntos P1 (150; 150; -250) mm y P2 (-150;-150;-300) mm, que se encuentran en la frontera del área de trabajo del robot. El vector desplazamiento entre estos puntos es:

$$\bar{P} = (-150; -150; -300) - (150; 150; -250) \text{ mm}$$

$$\bar{P} = (-300; -300; -50) \text{ mm}$$

Se calcula el módulo de este vector:

$$|P| = \sqrt{(-300)^2 + (-300)^2 + (-50)^2} \text{ mm}$$

$$|P| = 427,2 \text{ mm}$$

Seguidamente se obtiene el unitario del desplazamiento mediante (3.49)

$$U_p = \frac{\bar{P}}{|P|} \quad (3.49)$$

$$U_p = \frac{(-300; -300; -50) \text{ mm}}{427,2 \text{ mm}}$$

$$U_p = (-0,7022; -0,7022; -0,1170)$$

Para encontrar el vector de velocidad del robot se aplica la rapidez calculada del robot a la dirección del movimiento por (3.50)

$$\vec{V} = V \cdot U_p \quad (3.50)$$

$$\vec{V} = 300 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cdot (-0,7022; -0,7022; -0,1170)$$

$$\vec{V} = (-210,66; -210,66; -35,1) \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Se utiliza la cinemática inversa al punto de origen del desplazamiento.

$$K^{-1} (150; 150; -250) = (101,55^\circ ; 11,6^\circ ; 92,68^\circ)$$

Con estos ángulos iniciales se completa la Matriz Jacobiana del robot.

$$J(101,55^\circ ; 11,6^\circ ; 92,68^\circ) = \begin{bmatrix} 378,56 & -10,62 & -188,56 \\ -176,76 & 4,62 & 245,82 \\ 88,98 & -282,37 & -161,76 \end{bmatrix}$$

A continuación se calcula la inversa de la matriz en cuestión

$$J^{-1}(101,55^\circ ; 11,6^\circ ; 92,68^\circ) = \begin{bmatrix} 0,0041 & 0,0031 & -0,0001 \\ -4,02 e^{-4} & -0,0027 & -0,0036 \\ 0,003 & 0,0063 & -7,71 e^{-6} \end{bmatrix}$$

Finalmente se reemplazan los valores en (3.47) para obtener las velocidades angulares de las articulaciones.

$$\dot{Q} = \begin{bmatrix} 0,0041 & 0,0031 & -0,0001 \\ -4,02 e^{-4} & -0,0027 & -0,0036 \\ 0,003 & 0,0063 & -7,71 e^{-6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -210,66 \\ -210,66 \\ -35,1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{Q} = \begin{bmatrix} -1,5096 \\ 0,7697 \\ -1,9570 \end{bmatrix} \frac{\text{rad}}{\text{s}} \equiv \begin{bmatrix} \text{Articulación 1} \\ \text{Articulación 2} \\ \text{Articulación 3} \end{bmatrix}$$

Entonces para generar un desplazamiento desde un extremo del área de trabajo a otro en el tiempo planteado, se requiere que los motores puedan moverse a una velocidad igual o mayor a 1,9570 rad/s.

3.3.3.3. Análisis estático de torque

Para el análisis del torque se coloca al brazo en su punto más lejano. En el ejemplo se utiliza el punto P (x; y; z) = (205; 0; -350) mm que se encuentra sobre la frontera del área de trabajo del robot. La Figura 3.14 muestra las distancias R, S y T al centro de masa de los eslabones y la base inferior para calcular el torque en A.

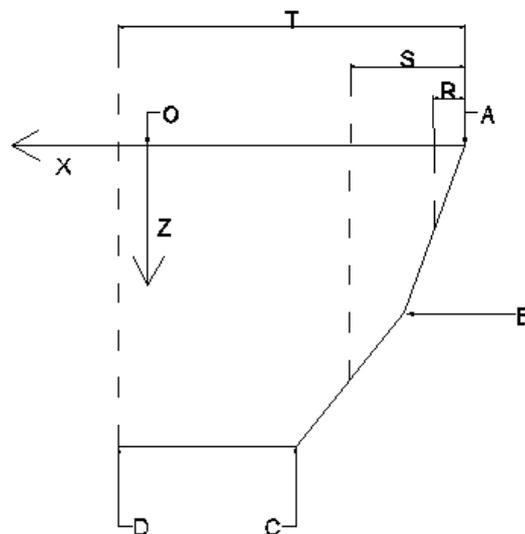


Figura 3.14. Ilustración de las distancias necesarias para estimar el torque

Utilizando la cinemática inversa se encuentran las posiciones de los brazos para alcanzar el punto deseado. Por la simulación desarrollada en Matlab 2013, subsección 3.2, se encuentran las distancias en cuestión. Así se obtiene:

$$R = 41,25 \text{ mm}$$

$$S = 193,75 \text{ mm}$$

$$T = 355 \text{ mm}$$

Para un diseño inicial se supone la masa de las extremidades del robot. En el caso de los eslabones del brazo se asumen 80 gramos y en las dos varillas del antebrazo se considera de 30 gramos cada una. Adicionalmente se añaden los 300 gramos establecidos de la carga útil del efector. La masa de la base inferior es 25 gramos. Por último se agrega la masa del servomotor (60 gramos) que rota al efector final.

Toda la carga en la base inferior se divide entre tres por la simetría del robot paralelo. Con estos parámetros se calcula el torque del motor con (3.51):

$$T = \sum_{i=1}^n d_i \cdot F_i \quad (3.51)$$

Donde:

T torque requerido, en kgf·cm;

d_i radio de palanca, en cm;

F_i fuerza que actúa sobre el centro de masa, en kgf

Reemplazando los respectivos valores en (3.51) se obtiene:

$$T = 4,125 \text{ cm} \cdot 0,08 \text{ kgf} + 19,375 \text{ cm} \cdot 0,03 \text{ kgf} + 35,5 \text{ cm} \cdot \frac{0,41}{3} \text{ kgf}$$

$$T = 5,76 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

Por motivos de seguridad, no se selecciona un motor con el torque exacto. Estos deben trabajar entre el 45 al 60% de su torque nominal. El torque real deberá ser:

$$T_N = \frac{T}{0,45}$$

$$T_N = 12,8 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

Se requiere un motor cuyo torque sea igual o superior a 12,8 kgf·cm en cada brazo para el movimiento adecuado del robot dentro del área de trabajo.

3.3.3.4. Selección del actuador

Se conoce que el motor ideal requiere una velocidad de al menos 1,957 rad/s con un torque de al menos 12,8 kgf·cm según los cálculos realizados.

Una opción sería utilizar motores a pasos. Lamentablemente para cumplir estas especificaciones se requiere motores cuyo peso y consumo de energía es relativamente alto (alrededor de 1 kg y 3 amperios en los modelos revisados). En adición debe agregarse su precio y la necesidad de drivers para controlarlo.

Por tal motivo se prefiere el uso de servomotores de la gama de alto torque (con engranes metálicos en su caja reductora). Entre las opciones encontradas en el mercado se selecciona el servomotor AHBS-3713HTG cuyos principales aspectos se muestran en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1. Características del servomotor AHBS-3713HTG

Servomotor AHBS-3713HTG	
Característica	Valor [17]
Modulación	Digital
Torque (8V)	30 kgf·cm
Velocidad (8V)	7,48 rad/s
Peso	0,078 kg
Dimensiones	Largo: 40,7 mm Ancho: 19,7 mm Altura: 42,9 mm
Rango de Ángulos	$\pm 60^\circ$
Engranajes	Metálicos
Precio	\$47,99

La Figura 3.15 muestra los servomotores AHBS-3713HTG:



Figura 3.15. Servomotores AHBS-3713HTG

Con este motor se satisfacen los requisitos de 12,8 kgf-cm de torque y 1,952 rad/s de velocidad angular. El AHBS-3713HTG es recomendado en la gama de servomotores de alto torque ya que existen diversas demostraciones donde se cumplen las características que especifica el fabricante. Por tanto su selección es adecuada para realizar el prototipo en cuestión.

3.3.3.5. Cálculo de eslabones

Los eslabones que conforman los brazos del robot requieren dimensionarse por rigidez a fin de que las deflexiones sobre los mismos sean mínimas. Para ello se utiliza el criterio de precisión moderada [18]. Se seleccionó este criterio debido a que el delta requiere una buena precisión y rigidez en sus elementos. Dimensionar a estos como una parte general de máquina provocaría que las deflexiones sean más significativas y repercutan en la posición del efector. Lo ideal sería utilizar el criterio de la alta precisión pero para ello se requeriría materiales de mayor calidad, mecanizados más especializados y por ende, un costo superior al ya previsto.

La precisión moderada establece que la deflexión máxima debe encontrarse dentro del rango de 0,00001 a 0,0005 mm/mm de longitud de la viga. El segundo valor corresponde a la rigidez mínima. Esta referencia se combina con la ecuación de flexión para vigas de doble apoyo y carga central [18], que representaría a los brazos y antebrazos. Se calcula la deformación mediante (3.52).

$$y = n \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (3.52)$$

Donde:

- y deflexión de la viga, en m;
 l longitud de la viga, en m;
 F fuerza aplicada, en N;
 E módulo de Young en Pa;
 I segundo momento de inercia, en m⁴;
 n factor de carga, adimensional.

De estas variables se conoce que:

- El módulo de Young para el Aluminio 6061 es 69,5 GPa.
- La deflexión máxima es 0,000125 m ($\frac{1}{2000}$ siendo $l = 0,25$ m).
- F es 6,12N (al aplicar el momento al centro de masa de la viga).
- La inercia para una sección circular es $\frac{\pi \cdot d^4}{64}$ según [18].
- El factor de carga es 1,5.

Reemplazando estos valores en (3.52) se despeja el diámetro del eslabón.

$$0,000125 \text{ m} = 1,5 \cdot \frac{6,12\text{N} \cdot (0,25 \text{ m})^3}{48 \cdot 69,5 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot \pi \frac{d^4}{64}}$$

$$d^4 = 7,009 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$d = 0,0091\text{m}$$

El software Beamboy 2.2 [19] es una herramienta gratuita para análisis en ingeniería que tiene las siguientes características:

- Permite el cálculo de esfuerzos y deflexiones en vigas estructurales y ejes.
- Cálculos asistidos de momentos de inercia.
- Posibilidad de colocar diferentes cargas lineales y distribuidas.
- Generación automática de gráficas de esfuerzo, deflexión y momento.

Con este programa se simula al eslabón como una viga estructural. La Figura 3.16 muestra el DCL de este elemento. En la Figura 3.17 se visualizan las curvas de momento, esfuerzo y deflexión sobre la misma.

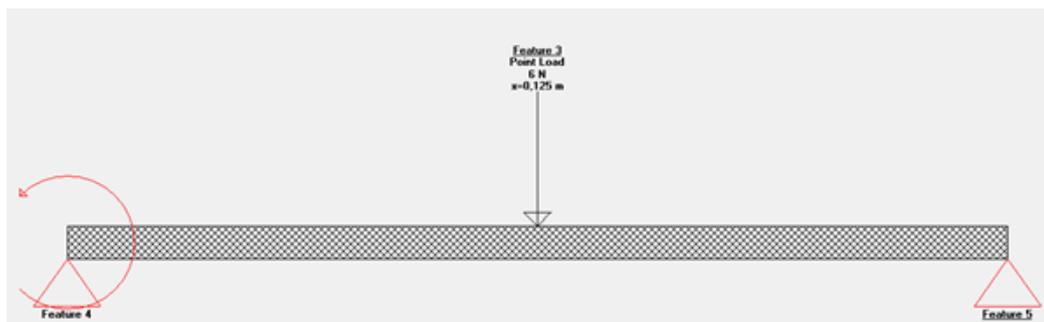


Figura 3.16. Diagrama de cuerpo libre del eslabón del brazo

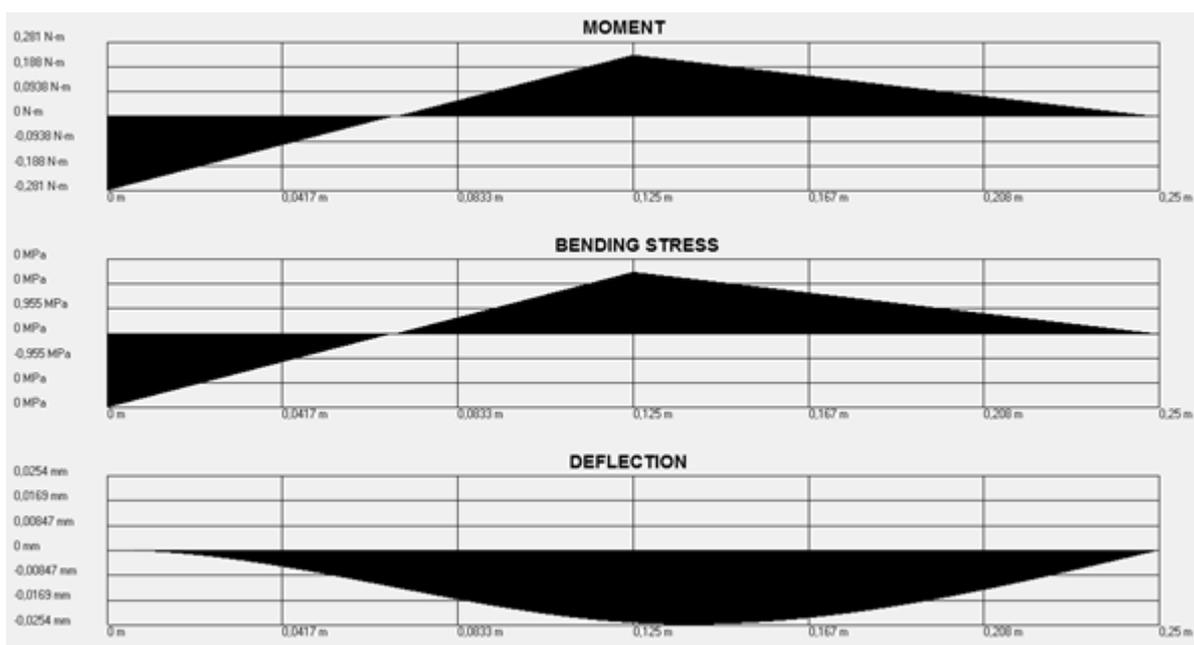


Figura 3.17. Diagramas de momento, esfuerzos y deflexiones del eslabón del brazo del robot

Se aprecia que en la simulación la deflexión es menor a la utilizada para dimensionar este elemento. Entonces el brazo del delta debería ser una varilla cilíndrica de aluminio de 0,25m de largo y 0,0091m de diámetro para el estándar de rigidez dado.

En el caso de las varillas del antebrazo es necesario emplear el mismo cálculo con el cambio en el módulo de Young por uno de acero (220GPa) [20] y considerando que cada una soporta la mitad de la carga. Adicionalmente, como la mayoría del esfuerzo lo realiza la viga superior, se reduce el factor de carga de las vigas inferiores a 1,1 para evitar sobredimensionarlas. El diámetro calculado por (3.52) de estas varillas es:

$$0,000125 \text{ m} = 1,1 \cdot \frac{0,87\text{N} \cdot (0,25 \text{ m})^3}{48 \cdot 220 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot \pi \frac{d^4}{64}}$$

$$d^4 = 2,31 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

$$d = 0,0039\text{m}$$

La Figura 3.18 muestra el DCL de la varilla del antebrazo. En la Figura 3.19 se visualizan las curvas de momento, esfuerzo y deflexión sobre esta.

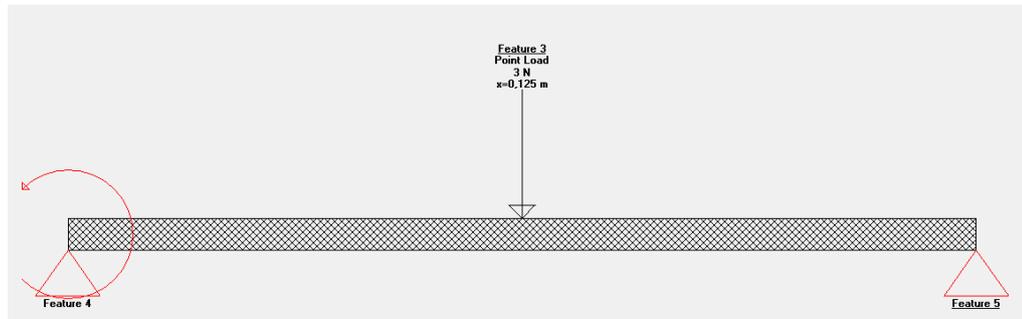


Figura 3.18. Diagrama de cuerpo libre de la varilla del antebrazo

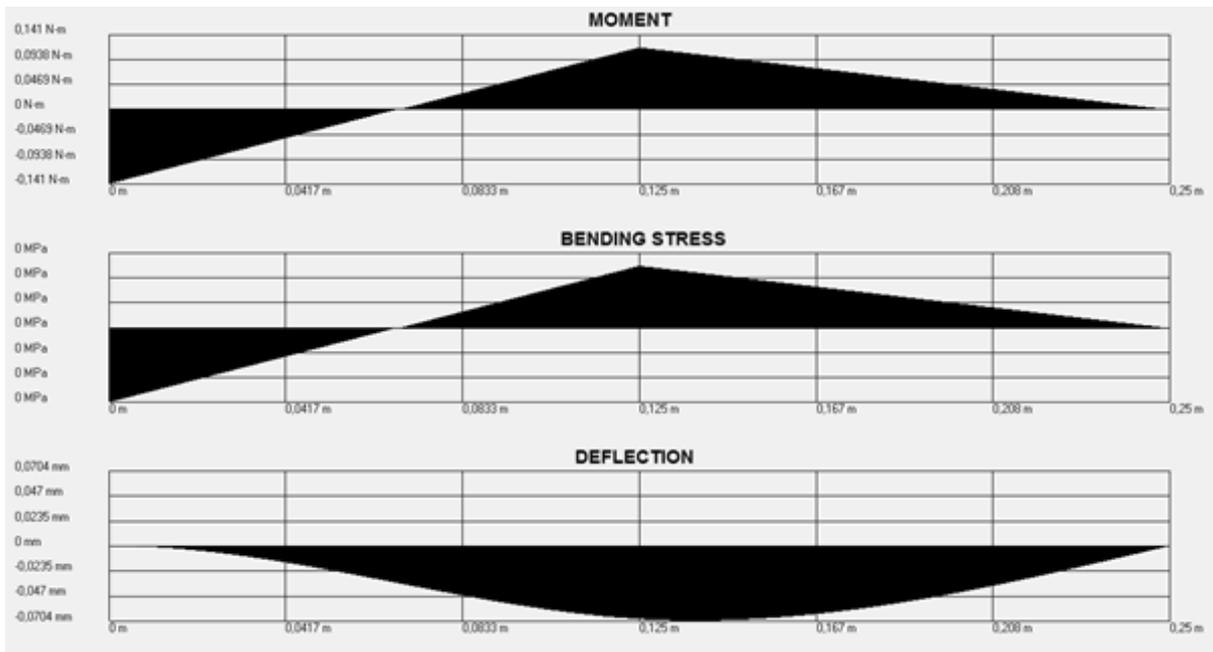


Figura 3.19. Diagramas de momento, esfuerzos y deflexiones del eslabón del antebrazo del robot

La deflexión máxima de la Figura 3.19 es menor a la utilizada para dimensionar este elemento. Entonces el antebrazo del delta involucra dos varillas cilíndricas de acero de 0,25 m de largo y 0,0039 m de diámetro para cumplir el estándar de rigidez dado.

3.3.3.6. Cálculo de los acoples

En cada brazo del robot paralelo existen dos acoples que deben ser diseñados:

- Superior: aquella que mantiene unido al actuador con el brazo.
- Intermedia: aquella que mantiene unido a cada brazo con su antebrazo.

La ubicación de ambas articulaciones puede apreciarse en la Figura 3.20:

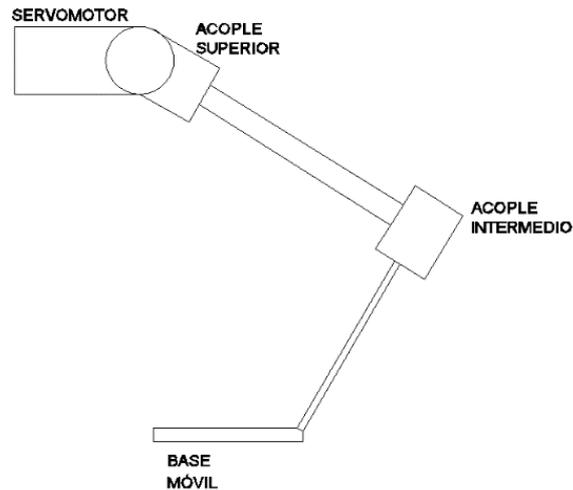


Figura 3.20. Esquema de la ubicación de los acoples del robot en Autocad 2013

Para diseñar el acople intermedio se analiza la situación más crítica que el elemento soportaría. Este caso correspondería a un forcejeo del motor mientras la base inferior está estancada al suelo. En esta circunstancia, dos caras del acople se someterían a compresión como indica la Figura 3.21:

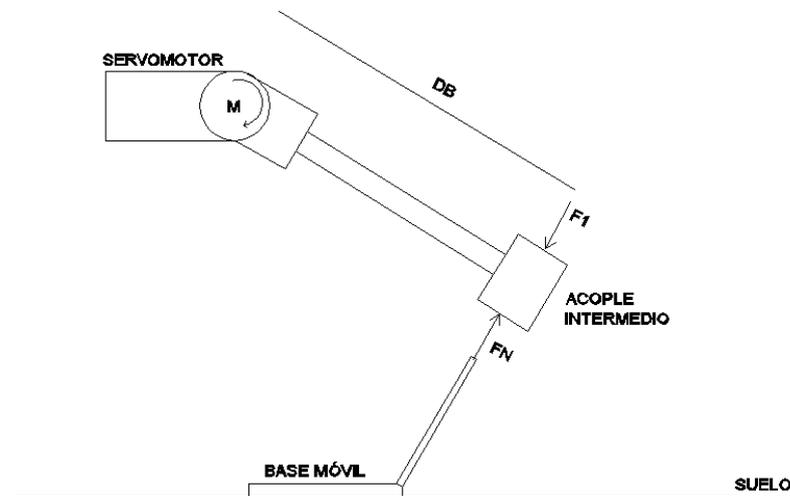


Figura 3.21. Esquema de fuerzas sobre el acople intermedio en Autocad 2013

Donde:

- M torque del servomotor, en N-cm;
- DB distancia eje del actuador al acople, en cm;
- $F1$ fuerza resultante del torque del motor, en N;
- FN fuerza de reacción desde el suelo al acople, en N.

El objetivo es encontrar las dimensiones de este acople por medio de dimensionamiento con carga estática.

El esfuerzo principal sobre la cara superior de este elemento se define por (3.53):

$$\sigma_x = \frac{M}{A_s \cdot DB} \quad (3.53)$$

Donde:

σ_x esfuerzo principal, en MPa;

A_s área de la cara superior, en m².

La Teoría de la Energía de la Distorsión de Von Mises [20] establece (3.54):

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (3.54)$$

Donde:

σ_{eq} esfuerzo equivalente, en MPa;

τ_{xy} esfuerzo cortante, en Mpa.

El factor de seguridad para este diseño estático está dado por (3.55):

$$n_s = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} \quad (3.55)$$

Donde:

n_s factor de seguridad, adimensional;

S_y límite de fluencia del material, en MPa.

Considerando que no existe esfuerzo cortante sobre el elemento ($\tau_{xy} = 0$) y reemplazando (3.54) y (3.53) en (3.55) se obtiene (3.56):

$$n_s = \frac{S_y \cdot A_s \cdot DB}{M} \quad (3.56)$$

De estas variables e conoce:

- El material selecto para esta pieza es Aluminio 6061 cuyo límite a la Fluencia (S_y) es 234 MPa [20].

- El torque del servomotor (M) es 30 N·cm.
- DB es 26,5 cm aproximadamente.
- Se asume un factor de seguridad $n_s = 2$.

Reemplazando estos valores en (3.56) se obtiene el área mínima que debería tener la cara superior del acople intermedio:

$$2 = \frac{234\text{MPa} \cdot A_s \cdot 26,5\text{cm}}{30\text{N} \cdot \text{cm}}$$

$$A_s = 9,67 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$$

Cualquier área mayor a esta asegura que el factor de seguridad sea mayor a 2. Considerando que los imanes de neodimio para sujetar los brazos tienen un diámetro de 12 mm, se asumen las dimensiones para la cara superior e inferior del acople como 35 x 20 mm. El área de esta cara rectangular está dada por (3.57):

$$A_s = b \cdot h \quad (3.57)$$

Donde:

b base del rectángulo, en m;

h altura del rectángulo, en m.

Reemplazando los valores asumidos en (3.57) se obtiene el área de la cara superior:

$$A_s = 0,35\text{m} \cdot 0,2\text{m}$$

$$A_s = 0,07 \text{ m}^2$$

Con este valor se recalcula el factor de seguridad mediante (3.56):

$$n_s = \frac{234\text{MPa} \cdot 0,07\text{m}^2 \cdot 26,5\text{cm}}{30\text{N} \cdot \text{cm}}$$

$$n_s = 14469000$$

Este elemento está sobredimensionado con el área asumida y no puede fallar con la magnitud de la fuerza a la que está sometido. Debido a esto se considera la altura del acople como 20 mm teniendo en cuenta el diámetro de 15 mm del brazo superior sin que esto afecte al elemento gracias a su factor de seguridad tan alto. Las dimensiones de este acople serían 35x20x20 mm y su diseño se muestra en la Figura 3.22.

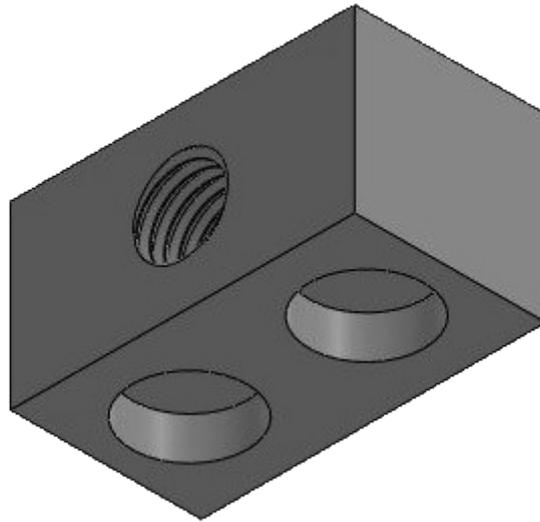


Figura 3.22. Acople intermedio dimensionado en Solidworks 2013

Para el primer análisis del acople superior se asume que este tiene la forma que se muestra en la Figura 3.23:

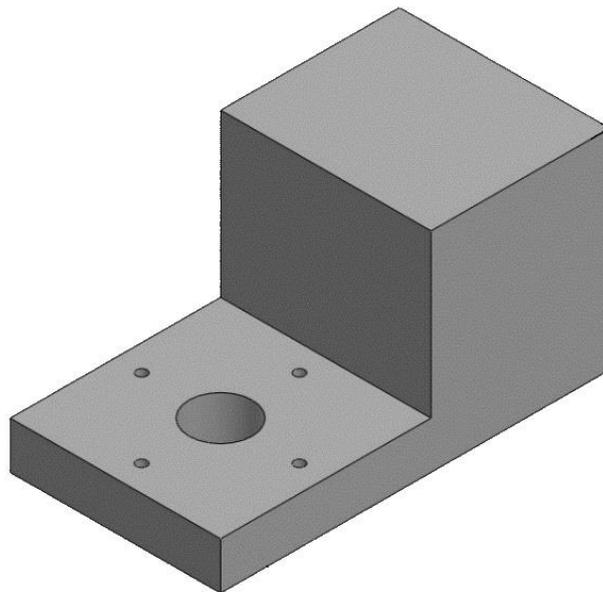


Figura 3.23. Primer dimensionamiento del acople superior en Solidworks 2013

Este elemento se encuentra en movimiento constantemente por lo que se pretende encontrar su factor de seguridad en un dimensionamiento por fatiga a vida infinita. El punto de análisis es el cambio de sección debido a que esto representa un concentrador de esfuerzos. El esfuerzo máximo en el cambio de sección se calcula por medio de (3.58):

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (3.58)$$

Donde:

$\sigma_{\text{máx}}$ esfuerzo máximo, en MPa;

M torque del servomotor, en N·cm;

c distancia centro de gravedad - extremo más lejano del área de análisis, en m;

I segundo momento de inercia del área de análisis, en m⁴.

Considerando la sección rectangular del área de análisis, su segundo momento de inercia se define por (3.59):

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.59)$$

Donde:

b base del rectángulo, en m;

h altura del rectángulo, en m.

De estas variables se conoce que:

- El torque del servomotor (M) es 30 N·cm.
- La base del área de análisis (b) es 20 mm.
- La altura del área de análisis (h) es 5 mm.
- La distancia del centro de gravedad (c) es igual a la mitad de la base del área de análisis (10 mm).

Con estos datos se calcula el segundo momento de inercia mediante (3.59):

$$I = \frac{(0,02) \cdot (0,005)^3}{12}$$

$$I = 2,08 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

Seguidamente se calcula el esfuerzo máximo por medio de (3.58):

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{0,3 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 0,01 \text{ m}}{2,08 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 14,42 \text{ MPa}$$

El esfuerzo mínimo también se calcula por medio de (3.58) pero el torque del servomotor tiene dirección opuesta:

$$\sigma_{\min} = \frac{-0,3\text{N} \cdot \text{m} \cdot 0,01\text{m}}{2,08 \cdot 10^{-10} \text{m}^4}$$

$$\sigma_{\min} = -14,42\text{MPa}$$

El esfuerzo medio está dado por (3.60):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3.60)$$

Donde:

σ_m esfuerzo medio, en MPa.

Reemplazando los valores de esfuerzo máximo y mínimo en (3.60) se obtiene el esfuerzo medio:

$$\sigma_m = \frac{14,42\text{MPa} - 14,42\text{MPa}}{2}$$

$$\sigma_m = 0\text{MPa}$$

Este resultado se obtiene debido a que se presenta una inversión completa en el movimiento del elemento.

Por otra parte, el esfuerzo alternante se calcula por (3.61):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3.61)$$

Donde:

σ_a esfuerzo alternante, en MPa.

Reemplazando los valores de esfuerzo máximo y mínimo en (3.61) se obtiene el esfuerzo alternante:

$$\sigma_a = \frac{14,42\text{MPa} + 14,42\text{MPa}}{2}$$

$$\sigma_a = 14,42\text{MPa}$$

El factor de seguridad para el diseño a vida infinita con inversión completa está dado por (3.62):

$$n_{sf} = \frac{S_e}{\sigma_a} \quad (3.62)$$

Donde:

n_{sf} factor de seguridad del diseño por fatiga, adimensional;

S_e límite a la fatiga del material, en MPa.

El límite a la fatiga del material está dado por (3.63):

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot (0,5 \cdot S_{ut}) \quad (3.63)$$

Donde:

K_a factor de superficie, adimensional;

K_b factor de tamaño, adimensional;

K_c factor de carga, adimensional;

K_d factor de temperatura, adimensional;

K_e factor de confiabilidad, adimensional;

K_f factor de efectos varios, adimensional;

S_{ut} resistencia a la tensión, en MPa.

El factor de superficie se utiliza (3.64):

$$K_a = a \cdot (S_{ut})^b \quad (3.64)$$

Donde:

a factor proporcional, adimensional;

b factor exponencial, adimensional.

De la Tabla 6-2 del Anexo A se obtiene que $a = 4,51$ y $b = -0,265$ debido a que el material de este elemento tiene un acabado superficial de maquinado en frío. Para el Aluminio 6061 el límite a la tensión (S_{ut}) son 310 MPa [20]. Se reemplazan estos valores en (3.64):

$$K_a = 4,51 \cdot (310)^{-0,265}$$

$$K_a = 0,986$$

Para calcular el factor de tamaño (Ecuación 6-20 del Anexo A) se utiliza (3.65):

$$K_b = 1,24 \cdot (d)^{-0,107} \quad (3.65)$$

Donde:

d altura de la sección analizada, en mm

Considerando que $d = 5\text{mm}$ en la forma asumida del acople superior, se calcula K_b mediante (3.65):

$$K_b = 1,24 \cdot (5)^{-0,107}$$

$$K_b = 1,044$$

Las variables K_c , K_d y K_e se obtienen directamente en [20]:

- El factor de carga K_c es igual a 1 debido a que el momento generaría una flexión en la sección de análisis. (Ecuación 6-26 del Anexo A)
- El factor de temperatura K_d es igual a 1 debido a que trabaja en condiciones de temperatura ambiente. (Tabla 6-4 del Anexo A)
- El factor de confiabilidad K_e es igual a 0,868 debido a que se otorga un 95% de confiabilidad al diseño. (Tabla 6-5 del Anexo A)

El factor de efectos varios se calcula por medio de (3.66):

$$K_f = \frac{1}{1 + q \cdot (K_t - 1)} \quad (3.66)$$

Donde:

q sensibilidad a la muesca, adimensional

K_t factor concentración del esfuerzo, adimensional

Se determinó que $q=0,3$ (Figura 6-20 del Anexo A) y $K_t=3$ (Figura A-15-6 del Anexo A) considerando un radio de muesca de 0mm y una relación de 4:1 entre la sección grande y pequeña del acople. Reemplazando esto en (3.66) se obtiene el factor de efectos varios:

$$K_f = \frac{1}{1 + 0,3 \cdot (3 - 1)}$$

$$K_f = 0,625$$

Reemplazando los factores modificadores del límite de resistencia a la fatiga y la resistencia a la tensión en (3.63) se obtiene el límite a la fatiga de este elemento:

$$S_e = 0,986 \cdot 1,044 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,868 \cdot 0,625 \cdot (0,5 \cdot 310 \text{ MPa})$$

$$S_e = 86,56 \text{ MPa}$$

Utilizando los valores calculados del esfuerzo alternante y el límite a la fatiga se encuentra el factor de seguridad en el diseño de este acople por medio de (3.62):

$$n_{sf} = \frac{86,56 \text{ MPa}}{14,42 \text{ MPa}}$$

$$n_{sf} = 6$$

La forma asumida para el acople cumple con el diseño de fatiga a vida infinita con un factor de seguridad alto, por lo tanto, se acepta a este modelo como el acople superior del robot paralelo. Las dimensiones de esta articulación serían 37x20x20 mm y su diseño se muestra en la Figura 3.24.

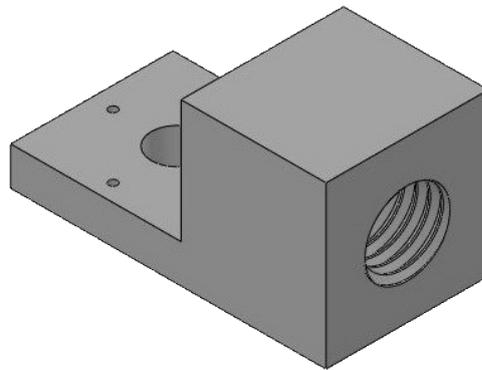


Figura 3.24. Acople superior para el robot paralelo en Solidworks 2013

Debido a sus altos factores de seguridad, ninguno de los acoples será considerado como un elemento crítico que deba simularse más adelante. En la siguiente subsección se lleva a cabo el análisis y dimensionamiento de la estructura que soporta al robot paralelo sobre el nivel del suelo.

3.4. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA

El análisis de la estructura para el robot se lleva a cabo en tres etapas:

- a) **Cálculo analítico de las deflexiones:** dimensionamiento el espesor de los tubos con el fin de obtener una precisión moderada.
- b) **Dimensionamiento de la soldadura:** para asegurar que los cordones que unen a la estructura sean los adecuados con las cargas que soporta.
- c) **Análisis en software:** verificación de los resultados y la convergencia de la solución.

3.4.1. CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES EN LA ESTRUCTURA

La estructura que soporta al robot delta es un trípode de tubos de acero como fue señalado en el Capítulo II. Es necesario dimensionar el espesor de estos tubos para dar rigidez al prototipo. Esto se realiza con el fin de que las deflexiones tengan un efecto mínimo sobre el posicionamiento del efector final del robot. La Figura 3.25 es una ilustración de la estructura deseada con tubos cuadrados de acero.

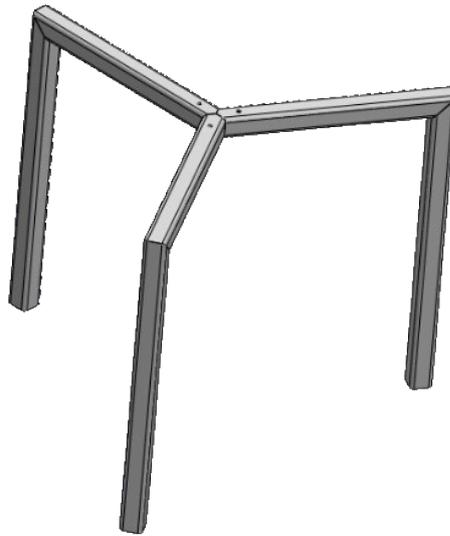


Figura 3.25. Estructura de trípode modelada para el robot delta

Para el análisis se aísla un brazo de la estructura como muestra la Figura 3.26. Este elemento se diseña como dos vigas separadas, asumiendo que la otra es un cuerpo rígido. De esta forma, al conformar el trípode, la rigidez de la estructura aumentará.

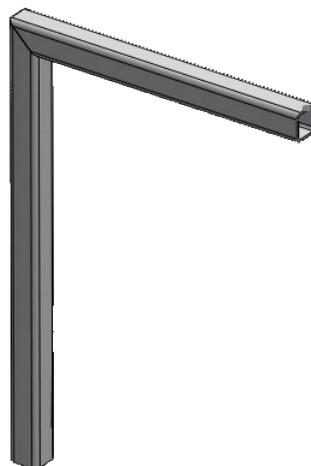


Figura 3.26. Brazo aislado de la estructura trípode modelada

Primero se analiza la viga superior. Se realiza el DCL como indica la Figura 3.27. En este se detalla la carga del robot (F) y el peso de la viga (P) junto al momento y la fuerza de reacción que aparecen por efecto de las mismas.

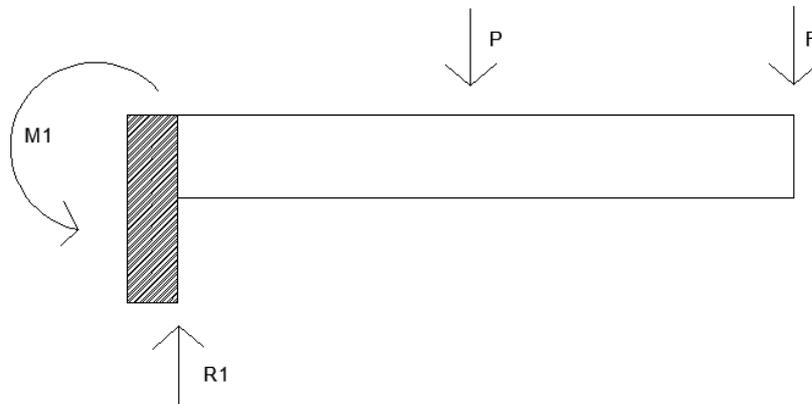


Figura 3.27. Diagrama de cuerpo libre de la viga superior

De [20] se obtienen las ecuaciones para la deflexión y momento sobre una viga para las cargas dadas. En el caso de la desviación por fuerza aplicada en un extremo se aplica (3.67):

$$y_a = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (3.67)$$

Donde:

- y_a deflexión de la viga, en m;
- l longitud de la viga, en m;
- F fuerza aplicada, en N;
- E módulo de Young en Pa;
- I segundo momento de inercia, en m^4 .

El momento resultante por esta fuerza en un extremo se expresa en (3.68):

$$M_a = F \cdot l \quad (3.68)$$

Donde:

- M_a momento sobre la viga, en N·m;
- l longitud de la viga, en m;
- F fuerza aplicada, en N.

La deformación provocada por una carga central en la viga se expresa en (3.69):

$$y_b = \frac{5 \cdot P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (3.69)$$

Donde:

- y_b deflexión de la viga, en m;
- l longitud de la viga, en m;
- P fuerza aplicada, en N;
- E módulo de Young en Pa;
- I segundo momento de inercia, en m⁴.

El momento provocado por la carga central en la viga se define por (3.70):

$$M_b = \frac{P \cdot l}{2} \quad (3.70)$$

Donde:

- M_b momento sobre la viga, en N m;
- l longitud de la viga, en m;
- P peso de la viga, en N.

Aplicando el principio de superposición para las deflexiones se obtiene (3.71):

$$y_{máxl} = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{5 \cdot P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (3.71)$$

Teniendo en cuenta que el tubo de acero utilizado es cuadrado, la inercia del mismo puede encontrarse tabulado en [20]. No obstante esta inercia es de una sección completa, por lo que debe extraerse el hueco en su interior. La inercia del tubo cuadrado está dada por (3.72):

$$I = \frac{(B^4 - b^4)}{12} \quad (3.72)$$

Donde:

- I segundo momento de inercia, en m⁴;
- B longitud del lado transversal externo del tubo, en m;
- b longitud del lado transversal interno del tubo, en m.

Reemplazando (3.72) en (3.71) y simplificando se obtiene la expresión (3.73):

$$y_{máxl} = \frac{(16F + 5P) \cdot l^3}{4 \cdot E \cdot (B^4 - b^4)} \quad (3.73)$$

Para el cálculo del momento se realiza el mismo procedimiento y se obtiene (3.74):

$$M_l = \frac{l \cdot (P + 2F)}{2} \quad (3.74)$$

Considerando los valores de:

- La longitud del tubo es el doble que la longitud de la base superior ($l = 0,3 \text{ m}$).
- La carga del robot ($F = 15,89 \text{ N}$).
- Los datos proporcionados a raíz del catálogo de acero de la empresa DIPAC [21] (Con Acero A-500: $P = 5,24 \text{ N}$; $B = 0,03 \text{ m}$; $b = 0,026 \text{ m}$ y $E = 200 \text{ GPa}$).
- Un factor de carga de 1,5.

Se obtiene la deflexión y el momento de la viga en cuestión.

$$y_{\text{máx1}} = 2,681 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$M_1 = 5,553 \text{ Nm}$$

Esta deflexión se encuentra dentro del límite de rigidez moderada expresada como una dosmilésima parte de la longitud de la viga.

$$y_{\text{máx1}} < \left(\frac{l}{2000} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m} \right)$$

Usando el software Beamboy 2.2 se simula esta viga. El programa determinó que la desviación pliegue de esta viga sería de $0,0075^\circ$. Las curvas de momentos, esfuerzos y deflexiones se muestran en la Figura 3.28:

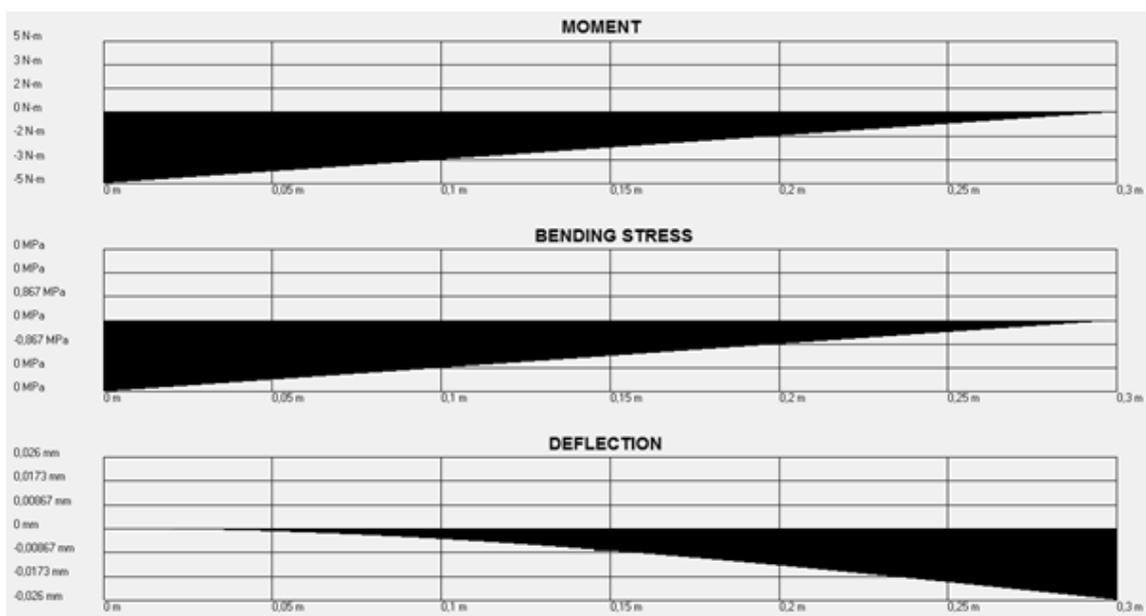


Figura 3.28. Diagramas de momento, esfuerzos y deflexiones en la viga superior

Se aprecia que el momento obtenido de la simulación se encuentra alrededor de los 5 N·m mientras que la deflexión máxima es 0,026mm. El programa solo permite introducir cargas en unidades enteras, ese es el motivo del ligero error frente a los valores calculados. El dimensionamiento de este elemento es correcto.

El mismo procedimiento se realiza para la viga vertical. En este diagrama el peso no influye como una carga pues se encuentra a lo largo del eje principal de la viga. Cabe mencionarse que el momento generado en la primera viga sí influye en la segunda y se añade una carga horizontal por efecto del movimiento de los motores. Las cargas que actúan sobre esta segunda viga se muestran en la Figura 3.29.

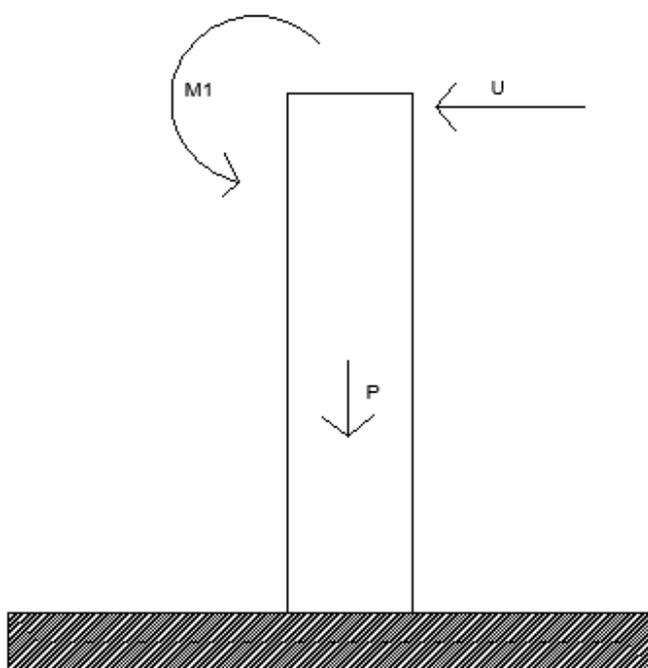


Figura 3.29. Diagrama de cuerpo libre de la viga vertical

La carga horizontal se estima asumiendo que los motores trabajan con la carga requerida (13 kgf·cm) y el efector final está en su posición extremo. Adicionalmente se considera que los tres motores influyen en la magnitud de esta fuerza y se añade un factor de carga de 1,5. La fuerza horizontal se define por (3.75):

$$U = n \cdot g \cdot (F_1 + F_2 \cos(\theta_2) + F_3 \cos(\theta_3)) \quad (3.75)$$

Donde:

- U fuerza resultante, en N;
- n factor de carga, adimensional;
- g aceleración de la gravedad, en m/s^2 ;
- F_n fuerza aportada por cada brazo, en kgf;
- θ_n ángulo entre los brazos y el eje de referencia, en $^\circ$.

Reemplazando los respectivos valores en (3.75) se obtiene la fuerza resultante U :

$$U = 1,5 \left(\frac{13\text{kgf} \cdot \text{cm}}{35\text{cm}} + \frac{13\text{kgf} \cdot \text{cm}}{35\text{cm}} \cos(60^\circ) + \frac{13\text{kgf} \cdot \text{cm}}{35\text{cm}} \cos(-60^\circ) \right) \cdot \frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U = 10,93\text{N}$$

Para encontrar la primera deflexión se aplica (3.76):

$$y_c = \frac{U \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (3.76)$$

Donde:

- y_c deflexión de la viga, en m;
- H longitud de la viga vertical, en m;
- U fuerza aplicada, en N;
- E módulo de Young en Pa;
- I segundo momento de inercia, en m^4 .

De [20] se extrae (3.77) que define la deflexión de la viga a raíz de un momento:

$$y_d = \frac{M_1 \cdot H^2}{2 \cdot E \cdot I} \quad (3.77)$$

Donde:

- y_d deflexión de la viga, en m;
- M_1 momento sobre la viga, en N·m;
- H longitud de la viga vertical, en m;
- E módulo de Young en Pa;
- I segundo momento de inercia, en m^4 .

Se aplica el Principio de superposición para las deflexiones en (3.78):

$$y_{m\acute{a}x2} = \frac{U \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{M_l \cdot H^2}{2 \cdot E \cdot I} \quad (3.78)$$

Reemplazando la inercia de tubo cuadrado (3.72), el momento de la viga superior (3.74) en (3.78) y simplificando el resultado se obtiene la expresi3n (3.79):

$$y_{m\acute{a}x2} = \frac{(4 \cdot U \cdot H + 3 \cdot L \cdot (P + 2 \cdot F)) \cdot H^2}{E \cdot (B^4 - b^4)} \quad (3.79)$$

Para encontrar la longitud de la columna se a\ntade:

- La altura del espacio de trabajo (0,35m)
- El espesor de la base inferior (0,01m) y superior (0,015m)
- El ancho de la viga superior (0,03m)
- Un espesor adicional para la tabla cuadriculada de la base inferior de la estructura (0,04m).

El resultado es un valor de $H = 0,4325$ m. Tambi3n t3ngase en cuenta que:

- La longitud de la viga superior delta ($l = 0,3$ m).
- La carga que representa el robot ($F = 15,89$ N).
- Los datos del tubo acero [21] ($P = 5,24$ N; $B = 0,03$ m; $b = 0,026$ m y $E = 200$ GPa).
- La carga horizontal U .
- Un factor de carga de 1,5.

Con estos valores se calcula la deflexi3n m\acute{a}xima de la viga en cuesti3n:

$$y_{m\acute{a}x2} = 1,383 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Este valor de deflexi3n se encuentra dentro del l\acute{i}mite de rigidez moderada, expresada como una dosmil3sima parte de la altura de la viga.

$$y_{m\acute{a}x2} < \left(\frac{h}{2000} = 2,162 \cdot 10^{-4} \text{ m} \right)$$

Mediante el programa de simulaci3n se determin3 que la desviaci3n pliegue de esta viga ser\acute{a} de $0,0353^\circ$. Las curvas de momentos, esfuerzos y deflexiones se muestran en la Figura 3.30:

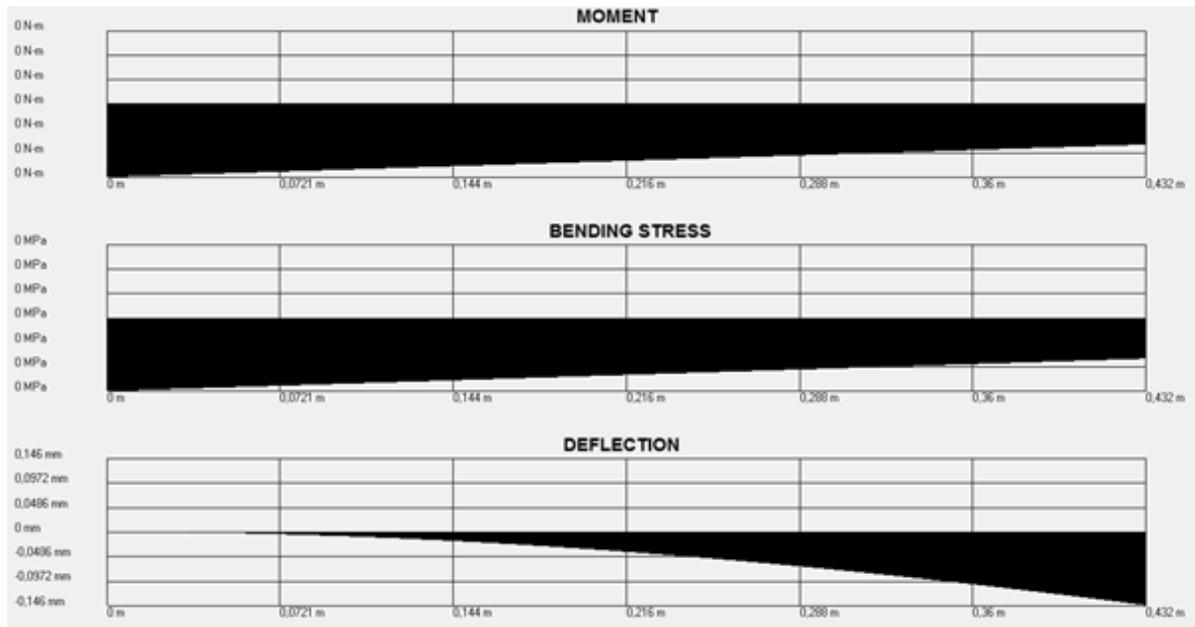


Figura 3.30. Diagramas de momento, esfuerzos y deflexiones en la viga vertical

La deflexión máxima en la simulación es 0,146mm. Debido al error ya mencionado del programa, este valor no es exactamente el calculado pero se aproxima mucho. Por tanto el dimensionamiento de este elemento es el correcto.

De esta forma están dimensionadas ambas vigas de tal modo que la rigidez de las mismas se encuentre dentro de los límites establecidos. Este diseño consideró un brazo aislado de la estructura soportando toda la carga. Eventualmente cuando se forme el trípode la rigidez resultante será superior.

3.4.2. DISEÑO DE LA SOLDADURA EN LA ESTRUCTURA

El proceso se lleva a cabo por OFW (Oxy-Fuel Welding) con gas propano. Se asume el material de aporte AWS RB CuZn-C (18 ksi de esfuerzo cortante permisible) para el diseño inicial. Debido a que el material del tubo a soldar es acero A500 (acero dulce cuyo porcentaje de carbono es de 0,23%), es recomendable utilizar una llama neutra para el proceso. Con este tipo de llama se asegura una soldadura fuerte, dúctil, con buena resistencia a la tracción y no se aporta nada al depósito que afecte las propiedades del acero dulce. Una llama carburante aumentaría la resistencia a la tracción en la soldadura pero esta perdería ductilidad y resistencia a esfuerzos cortantes e impactos. Por otra parte una llama oxidante, haciendo referencia a su nombre, oxidaría esa zona del acero dulce. El resultado sería un cordón de baja resistencia y alta porosidad.

El espesor del tubo de acero que conforma la estructura dimensionada es de 2 mm. Utilizando este espesor en la Tabla 9-6 del Anexo A, se encuentra que el valor apropiado del cateto de soldadura sería 1/8 in (3,175 mm). La primera soldadura a dimensionar está sometida a flexión y se encuentra ilustrada en la Figura 3.31:



Figura 3.31. Cordón de soldadura en la esquina de la estructura

El área de la soldadura se aprecia en la Figura 3.32:

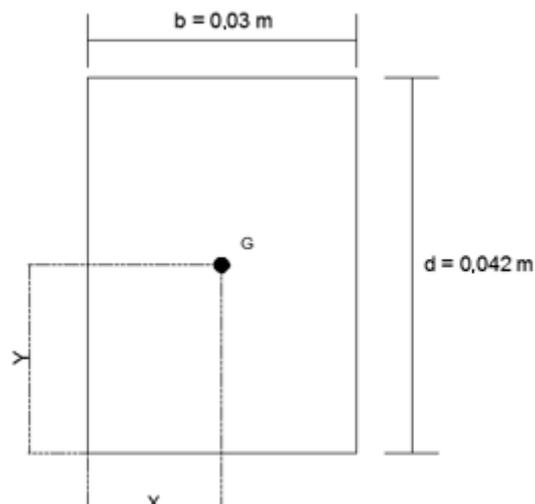


Figura 3.32. Área de la soldadura en la esquina de la estructura

De la Tabla 9-2 del Anexo A se extrae (3.80) y (3.81) para esta forma de soldadura:

$$A_g = 1,414 \cdot h \cdot (b + d) \quad (3.80)$$

Donde:

A_g área de la garganta, en m^2 ;

h tamaño del cateto de soldadura, en m;

b longitud del cordón horizontal de la soldadura cerrada, en m;

d longitud del cordón vertical de la soldadura cerrada, en m.

$$I_U = \frac{d^2}{6}(3b + d) \quad (3.81)$$

Donde:

I_U segundo momento unitario de área, en m^3 ;

b longitud del cordón horizontal de la soldadura cerrada, en m;

d longitud del cordón vertical de la soldadura cerrada, en m.

En (3.80) y (3.81) se cumple que $d = \sqrt{2} b$, entonces se reescriben como (3.82) y (3.83):

$$A_g = 1,414 \cdot h \cdot b \cdot (1 + \sqrt{2}) \quad (3.82)$$

$$I_U = \frac{b^3}{3}(3 + \sqrt{2}) \quad (3.83)$$

Para encontrar el segundo momento de área debe aplicarse (3.84):

$$I = 0,707 \cdot h \cdot I_U \quad (3.84)$$

Donde:

I segundo momento de área, en m^4 ;

h tamaño del cateto de soldadura, en m;

I_U segundo momento unitario de área, en m^3 .

Se reemplaza los valores de $h=0,003175m$ y $b= 0,03m$ en (3.82), (3.83) y (3.84), resultando:

$$A_g = 3,25 \times 10^{-4} m^2$$

$$I_U = 3,97 \times 10^{-5} m^3$$

$$I = 8,92 \times 10^{-8} m^4$$

El cortante primario se define por (3.85):

$$\tau' = \frac{F}{A_g} \quad (3.85)$$

Donde:

- τ' cortante primario, en kPa;
- F carga aplicada, en N;
- A_g área de la garganta, en m².

Reemplazando F (15,89 N) y A_g en (3.85) se obtiene el cortante primario:

$$\tau' = 48,86 \text{ kPa}$$

El cortante secundario se define por (3.86)

$$\tau'' = \frac{M \cdot c}{I} \quad (3.86)$$

Donde:

- τ'' cortante secundario, en kPa;
- M momento flector, en Nm;
- c distancia perpendicular, en m;
- I segundo momento de área, en m⁴.

Reemplazando los respectivos valores en (3.86) se obtiene el cortante secundario:

$$\tau'' = 1133,92 \text{ kPa}$$

Se calcula el cortante máximo por medio de (3.87)

$$\tau_{MÁX} = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} \quad (3.87)$$

Donde:

- $\tau_{MÁX}$ cortante máximo, en kPa;
- τ' cortante primario, en kPa;
- τ'' cortante secundario, en kPa.

Aplicando los esfuerzos calculados se obtiene:

$$\tau_{MÁX} = 1134,97 \text{ kPa}$$

$$\tau_{MÁX} = 1,13 \text{ MPa}$$

Este esfuerzo es mucho menor al cortante permisible del material de aporte asumido (18ksi = 124 MPa). Por tanto la varilla AWS RB CuZn-C es adecuada para la soldadura en cuestión.

La segunda soldadura a dimensionar está sometida a torsión y se encuentra en la unión de los tres brazos de la estructura. Esta se aprecia en la Figura 3.33.

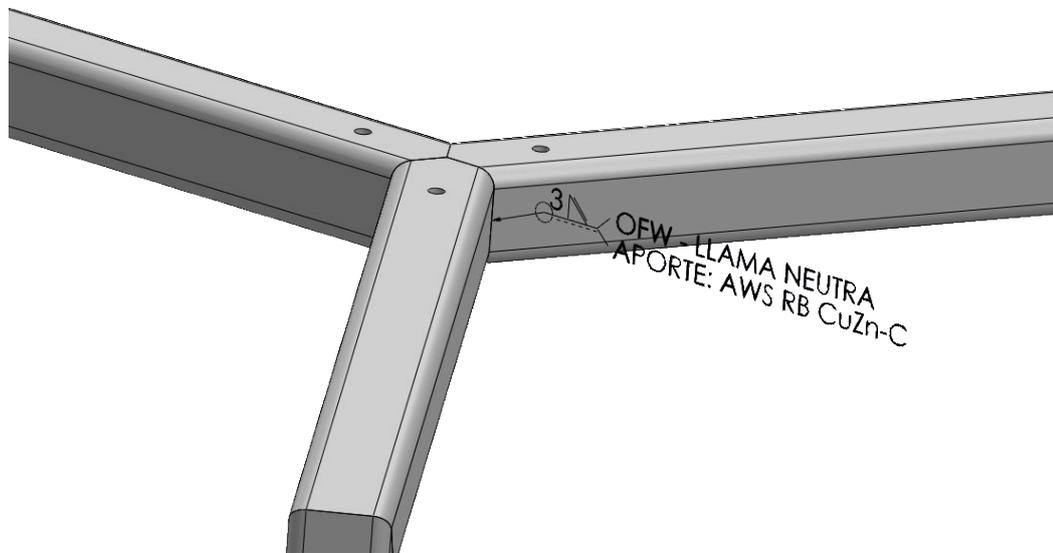


Figura 3.33. Cordón de soldadura en el centro de la estructura

El área de soldadura “en C” se muestra en la Figura 3.34.

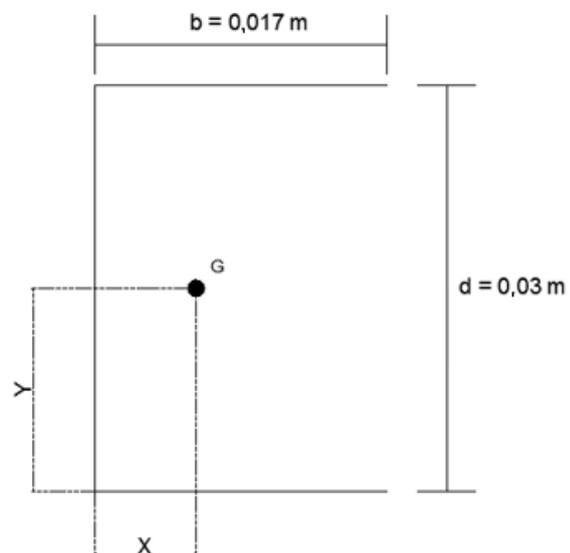


Figura 3.34. Área de la soldadura en el centro de la estructura

De la Tabla 9-1 del Anexo A se extraen (3.88) y (3.89) para esta forma de soldadura:

$$A_g = 0,707 \cdot h \cdot (2b + d) \quad (3.88)$$

Donde:

- A_g área de la garganta, en m²;
- h tamaño del cateto de soldadura, en m;
- b longitud del cordón horizontal de la soldadura cerrada, en m;
- d longitud del cordón vertical de la soldadura cerrada, en m.

$$J_U = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b + d} \quad (3.89)$$

Donde:

- J_U segundo momento polar unitario de área, en m³;
- b longitud del cordón horizontal de la soldadura cerrada, en m;
- d longitud del cordón vertical de la soldadura cerrada, en m.

Para encontrar el segundo momento de área debe aplicarse (3.90):

$$J = 0,707 \cdot h \cdot J_U \quad (3.90)$$

Donde:

- J segundo momento polar de área, en m⁴;
- h tamaño del cateto de soldadura, en m;
- J_U segundo momento polar unitario de área, en m³.

Se reemplaza $h= 0,003175\text{m}$; $b= 0,0173\text{m}$ y $d= 0,03\text{m}$ en (3.88), (3.89) y (3.90), resultando:

$$A_g = 1,45 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$J_U = 1,21 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

$$J = 2,72 \times 10^{-8} \text{m}^4$$

Utilizando $F (15,89 \text{ N})$ y A_g se obtiene el cortante primario con (3.71):

$$\tau' = 109,59 \text{ kPa}$$

El cortante secundario se define por (3.91):

$$\tau'' = \frac{T \cdot r}{J} \quad (3.91)$$

Donde:

- τ'' cortante secundario, en kPa;
- T torque generado, en Nm;
- r radio del torque, en m;
- J segundo momento polar de área, en m⁴.

Para encontrar r se utiliza (3.92)

$$r = \sqrt{\left(b - \frac{b^2}{2b+d}\right)^2 + \left(d - \frac{d}{2}\right)^2} \quad (3.92)$$

Reemplazando $b = 0,0173\text{m}$ y $d = 0,03\text{m}$ en (3.92) da como resultado:

$$r = 0,0196 \text{ m}$$

Utilizando los reemplazos respectivos en (3.91) se obtiene el cortante secundario:

$$\tau'' = 145,63 \text{ kPa}$$

Para calcular el cortante máximo debe encontrarse antes el valor de α con (3.93)

$$\alpha = 90 + \beta \quad (3.93)$$

Donde:

- α ángulo formado entre el cortante primario y el secundario, en °;
- β ángulo que forma el radio de torque al punto de aplicación de la carga, en °.

Pero β está definido por (3.94)

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{x_g}{y_g}\right) \quad (3.94)$$

Donde:

- x_g coordenada en X del centro de gravedad de la soldadura, en m;
- y_g coordenada en Y del centro de gravedad de la soldadura, en m.

El centro de gravedad en el eje “X” está definido por (3.95):

$$x_g = \frac{b^2}{2b + d} \quad (3.95)$$

El centro de gravedad en el eje “Y” está definido por (3.96):

$$y_g = \frac{d}{2} \quad (3.96)$$

Reemplazando los respectivos valores en (3.94), (3.95) y (3.96) se obtiene:

$$\beta = 17,05^\circ$$

Usando este valor en (3.93) se calcula α :

$$\alpha = 107,05^\circ$$

El cortante máximo está dado por (3.97):

$$\tau_{M\acute{A}X} = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2 - 2 \tau' \cdot \tau'' \cdot \cos(\alpha)} \quad (3.97)$$

Donde:

$\tau_{M\acute{A}X}$ cortante máximo, en kPa;

τ' cortante primario, en kPa;

τ'' cortante secundario, en kPa.

Aplicando los esfuerzos calculados se obtiene:

$$\tau_{M\acute{A}X} = 206,34 \text{ kPa}$$

Este esfuerzo es mucho menor al cortante permisible del material de aporte asumido (18ksi = 124 MPa). Por tanto la varilla AWS RB CuZn-C también es adecuada para esta soldadura.

En la siguiente subsección se obtienen, mediante una simulación en software para piezas mecánicas, las deflexiones y esfuerzos críticos en el robot. Estos valores deben ser similares a los calculados para validar el diseño.

3.4.3. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA EN SOLIDWORKS

Se analiza el comportamiento del robot bajo la influencia de las cargas por una simulación con elementos finitos en Solidworks 2013. Para reducir el tiempo de

procesamiento y la generación de los elementos finitos se analizan solamente los elementos críticos del robot. Primero se analiza el brazo. La simulación de los esfuerzos por Von Mises se encuentra en la Figura 3.35. Los resultados de los desplazamientos a causa de las cargas se encuentran en la Figura 3.36:

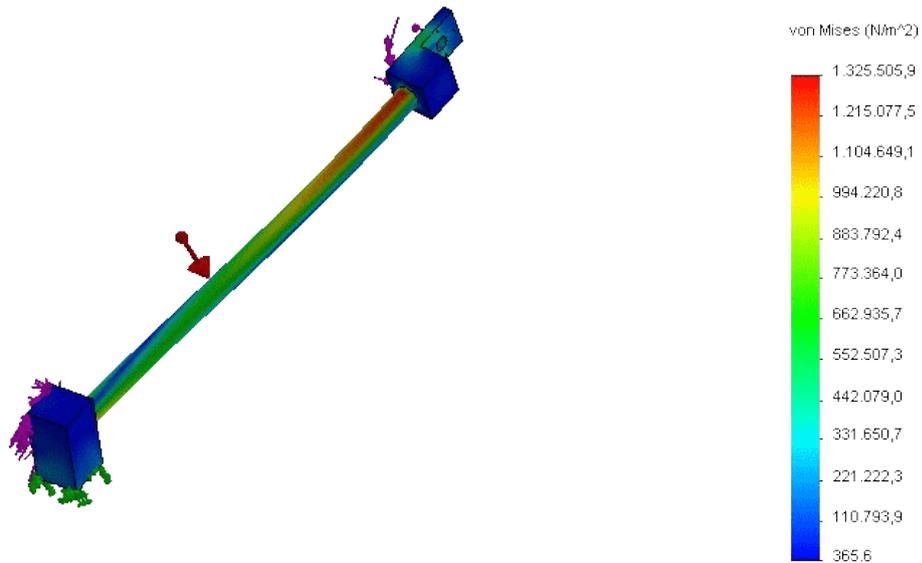


Figura 3.35. Simulación de los esfuerzos de Von Mises sobre el brazo del robot

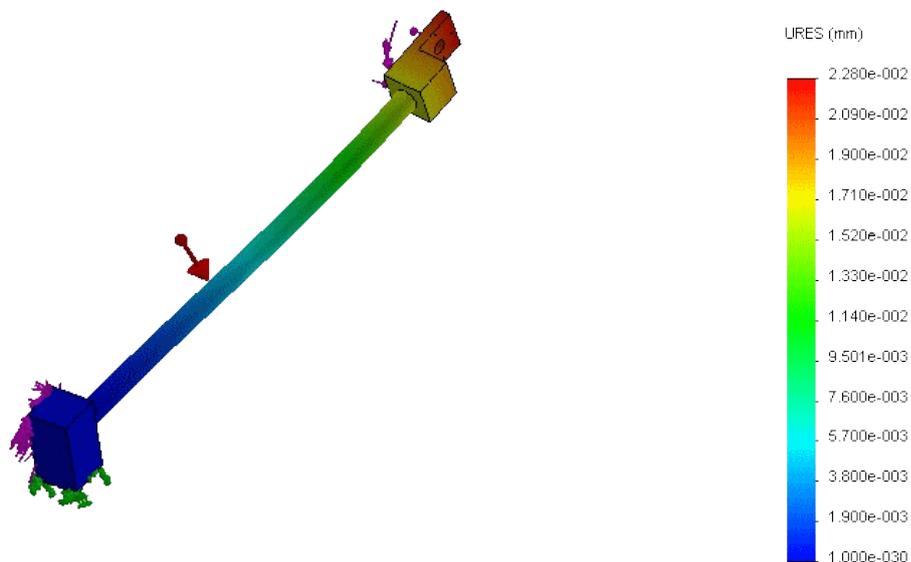


Figura 3.36. Simulación de las deformaciones sobre el brazo del robot

El aluminio 6061 que compone al elemento, con una resistencia a la fluencia de 255 MPa, es capaz de soportar con facilidad los 1,32 MPa de esfuerzo sobre este. Se aprecia que el desplazamiento máximo de la simulación es 0,0228 mm. Este elemento se dimensionó con un límite de desplazamiento posible de 0,125mm. Debe verificarse

la convergencia de la solución por medio de los datos provistos por el software. La Figura 3.37 muestra la curva de convergencia de la deformación según aumentan los elementos en la malla. Estos gráficos están realizados en Microsoft Excel 2013.

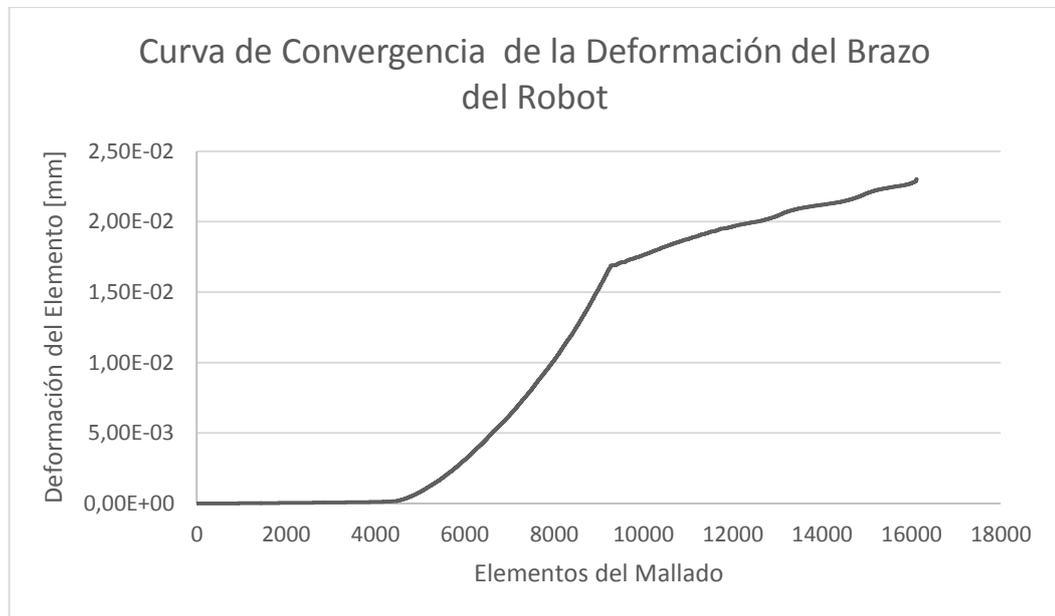


Figura 3.37. Curva de convergencia de la deformación en el brazo del robot

Por la distribución de la escala en el eje vertical, no puede apreciarse correctamente la curva. Se aplica una escala logarítmica de base 10 al eje como en la Figura 3.38.

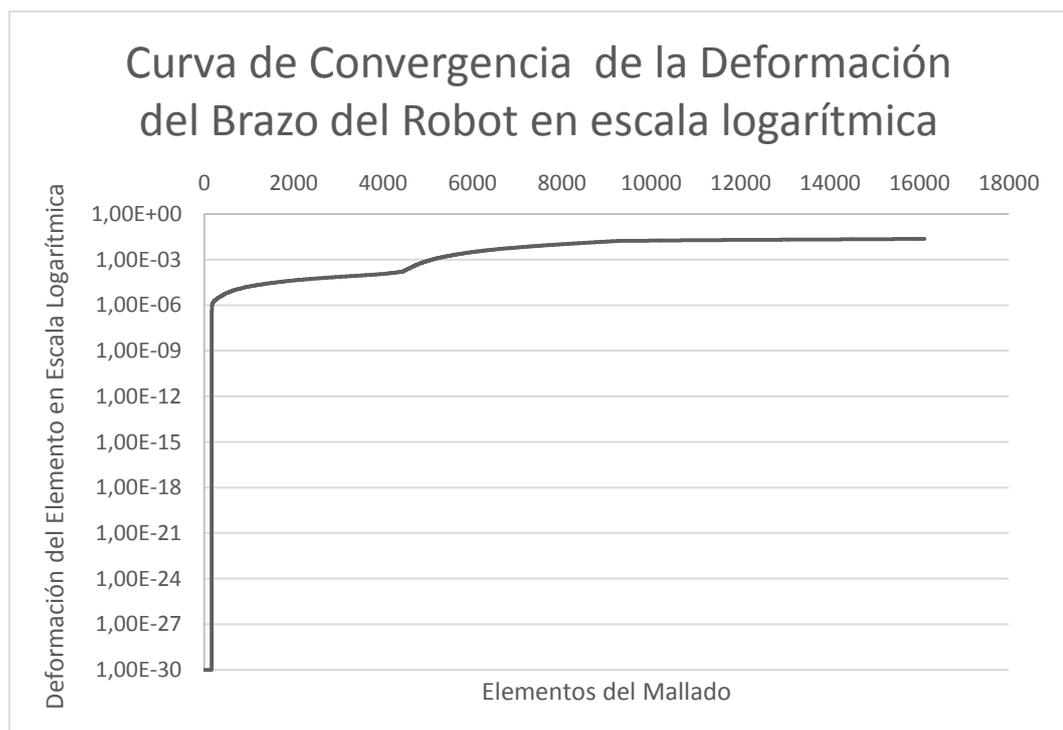


Figura 3.38. Convergencia de la deformación en escala logarítmica del brazo del robot

En esta última gráfica se aprecia que la solución converge en el resultado obtenido de la simulación. Con esto se afirma que el elemento está diseñado correctamente.

Otro elemento crítico a simular es la estructura. Primero se analiza el caso en que un solo brazo está soportando al robot. El análisis por esfuerzos de Von Mises se encuentra en la Figura 3.39. El análisis de las deformaciones está en la Figura 3.40.

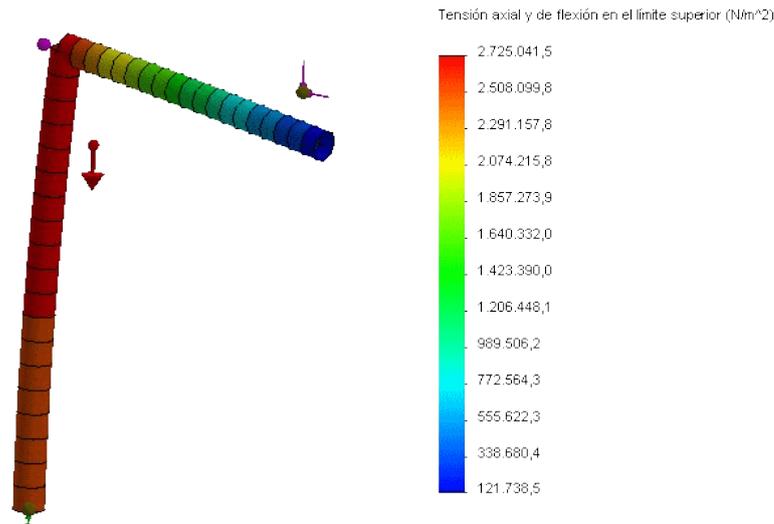


Figura 3.39. Simulación de los esfuerzos de Von Mises sobre el brazo de la estructura

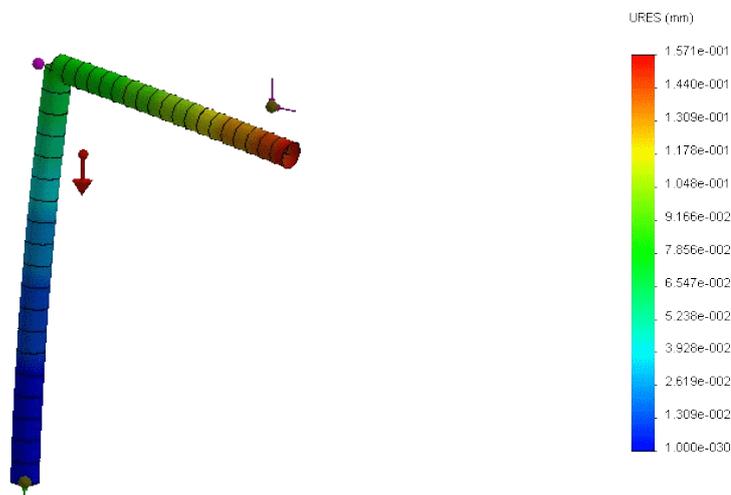


Figura 3.40. Simulación de las deformaciones sobre el brazo de la estructura

La simulación retorna 2,77 MPa como el esfuerzo máximo que aparece sobre la estructura. Este valor es muy pequeño frente al esfuerzo a la fluencia de 230 MPa del acero ASTM A-500 de la tubería cuadrada [21] de 30x30x2 mm. Se determinó mediante cálculos que la máxima deformación que podía tener la viga superior era 0,15 mm. En esta simulación el resultado devuelve 0,157mm que es un valor apenas

sobrepasando el límite planteado. Este error se debe a que no está siendo considerado el efecto de la deflexión de la viga vertical. La Figura 3.41 muestra la curva de convergencia de la deformación para este elemento.

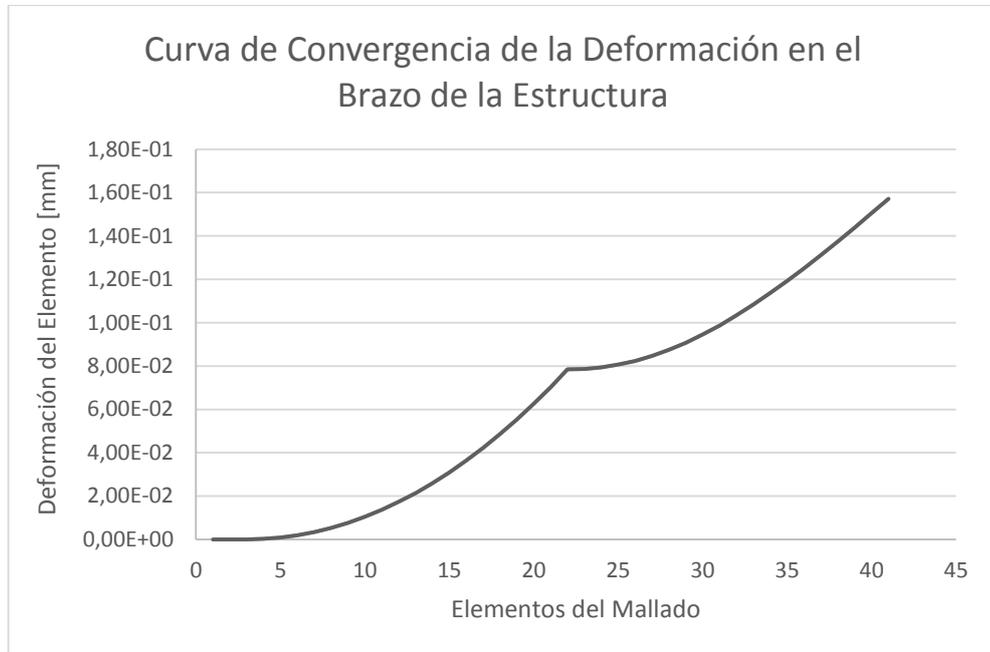


Figura 3.41. Curva de convergencia de la deformación del brazo de la estructura

Se aplica la escala logarítmica de base 10 al eje vertical para visualizar adecuadamente los datos. Esta gráfica corresponde a la Figura 3.42.

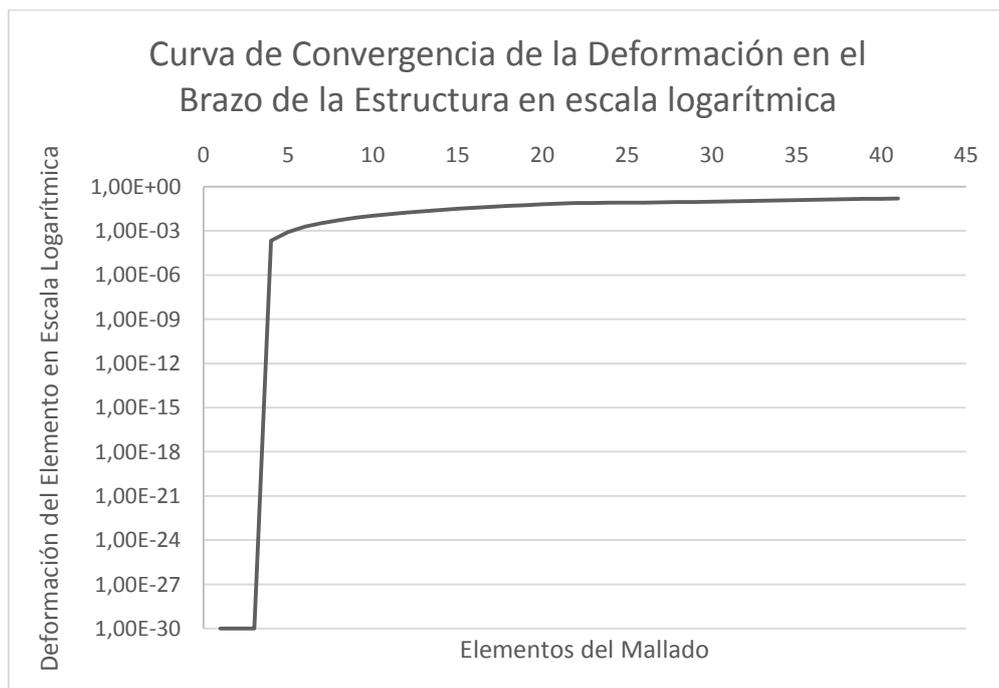


Figura 3.42. Convergencia de la deformación en escala logarítmica del brazo de la estructura

Se aprecia que la solución converge en el resultado de 0,157mm. Por tanto este valor es la deformación correcta del elemento. No obstante, este error frente a la deformación asignada para el diseño es irrelevante pues se asumió que un solo brazo soportaba todas las cargas. La estructura completa es un trípode y debe analizarse como tal. La Figura 3.43 muestra los efectos de los esfuerzos de Von Mises en la estructura del trípode. La Figura 3.44 da una apreciación de las deformaciones reales que se presentarían en esta.

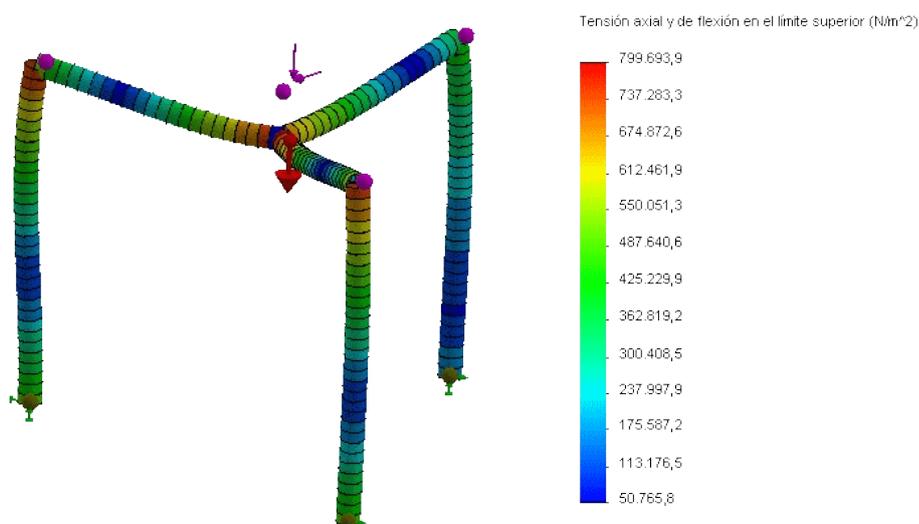


Figura 3.43. Simulación de los esfuerzos de Von Mises sobre el trípode

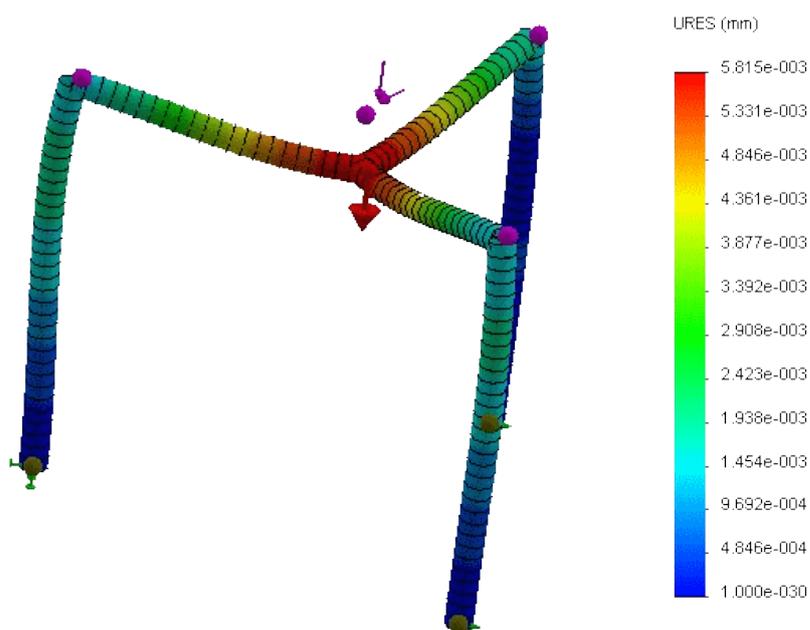


Figura 3.44. Simulación de las deformaciones sobre el trípode

En base a la simulación realizada se encuentra que el esfuerzo máximo de la estructura es 0,8 MPa y su deformación corresponde a 0,0058 mm. Se analiza la convergencia de la deformación para la estructura del trípode en la Figura 3.45.

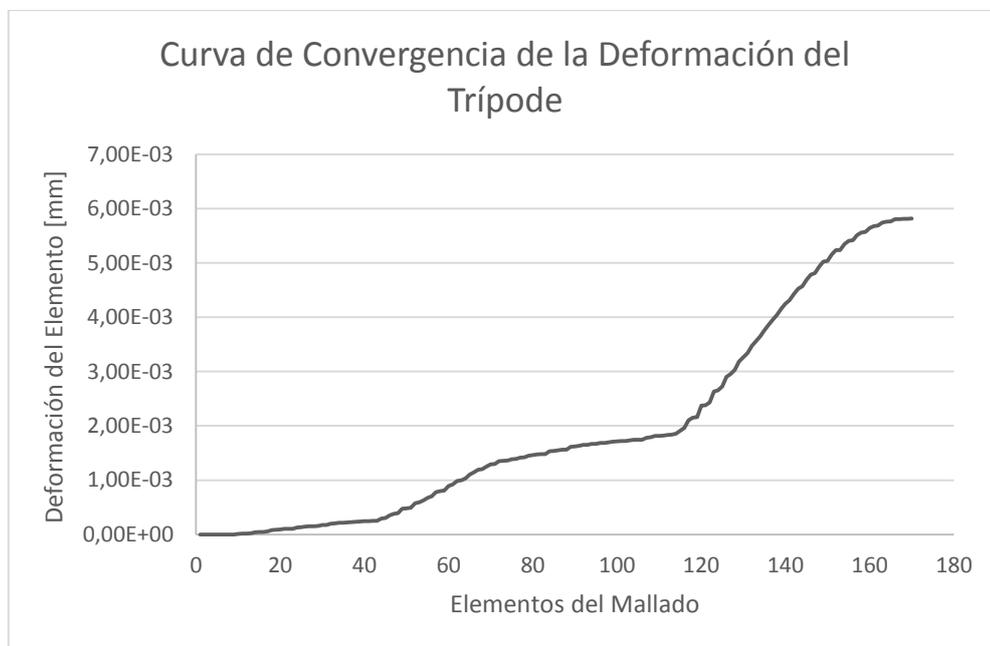


Figura 3.45. Curva de convergencia de la deformación en el brazo del robot

Se aplica la escala logarítmica de base 10 al eje vertical de la curva para verificar su convergencia. Esta gráfica corresponde a la Figura 3.46.

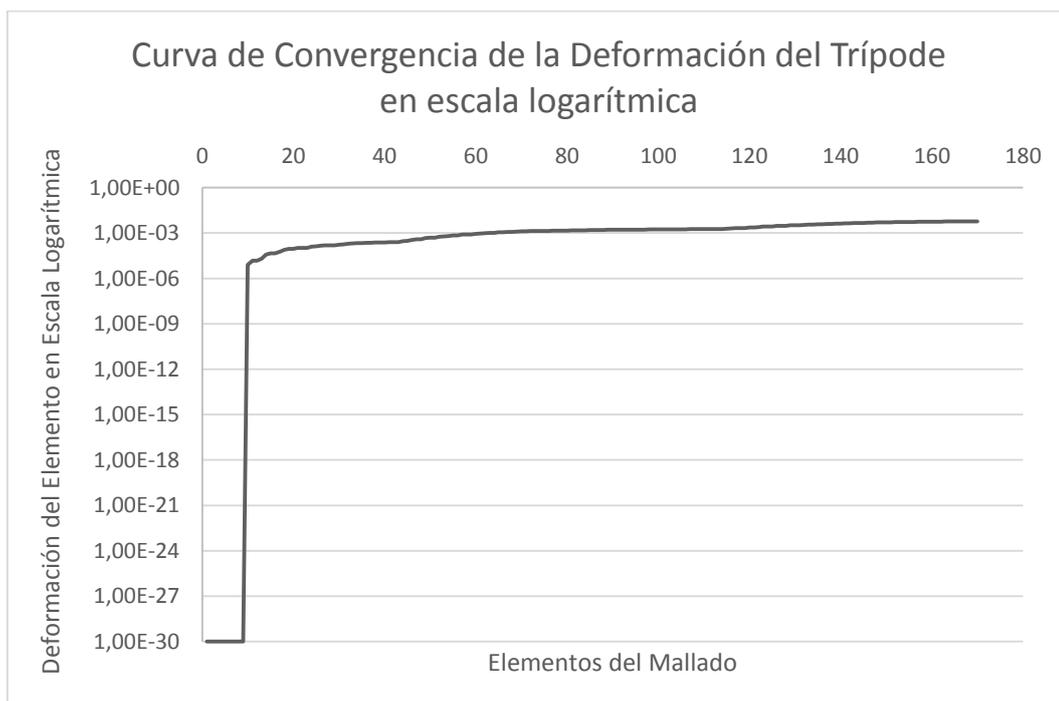


Figura 3.46. Convergencia de la deformación en escala logarítmica del trípode

Con estas últimas dos gráficas se aprecia que la deformación converge para el valor de 0,0058mm, siendo esta la solución correcta. Eventualmente al conformar el trípode la rigidez de la estructura aumenta. Como se había considerado en las subsecciones anteriores, las deformaciones y los esfuerzos se reducen al juntarse los tres brazos. La Figura 3.47 muestra al prototipo completo en el software de simulación.

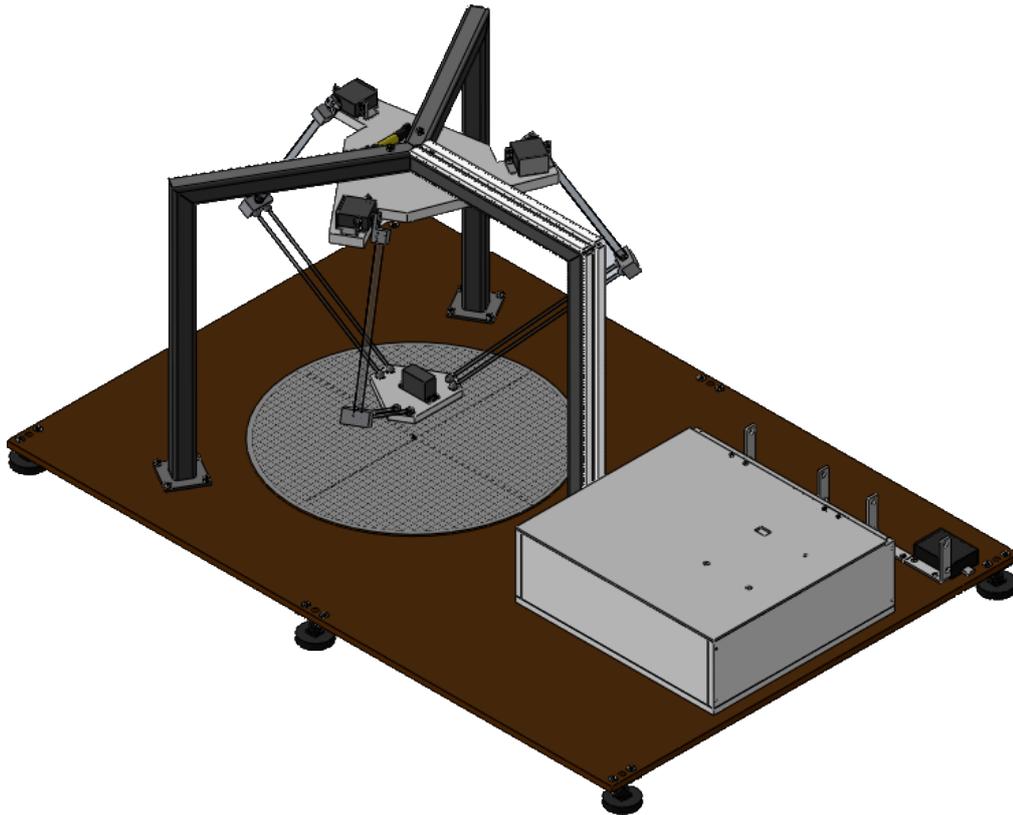


Figura 3.47. Robot PREDUIN Simulado en Solidworks 2013

Con esto se ha dimensionado la parte mecánica del prototipo. En la siguiente sección se dimensiona la parte electrónica que permite el funcionamiento del robot.

3.5. DIMENSIONAMIENTO ELECTRÓNICO

3.5.1. CIRCUITO DE CONTROL PARA EL ELECTROIMÁN

El control del relé para activar al electroimán se lleva a cabo por un transistor que se energiza desde el microcontrolador [22]. Se dimensiona la resistencia de base del transistor para que este se convierta en un switch. Para ello se utiliza (3.98):

$$\frac{I_C \cdot R_B}{\beta} + V_{BE} = V_B \quad (3.98)$$

Donde:

- I_C corriente del colector del transistor, en A;
- R_B resistencia de la base del transistor, en Ω ;
- V_{BE} voltaje de la juntura base-emisor del transistor, en V;
- V_B voltaje que recibe la base desde el microcontrolador, en V;
- β factor de amplificación del transistor, adimensional.

El factor de β varía para cada transistor y tiene comúnmente valores superiores a 200. Esta variable determina la relación entre la corriente del colector y la corriente de base a la que se somete el transistor. Para asegurar que este actúe como un interruptor debe proveérsele de una corriente de base lo suficientemente grande para saturar su juntura. Para ello se asume un β pequeño. En este caso se toma $\beta = 4$.

El relé a utilizar es de 5V y consume 50mA, que corresponde a la corriente de colector. La juntura típica de base-emisor consume 0,7V y el voltaje desde el pin del microcontrolador es 5V. Con estos valores se calcula la resistencia de base.

$$\frac{50\text{mA} \cdot R_B}{4} + 0,7\text{V} = 5\text{V}$$

$$R_B = 344\Omega$$

Se toma el valor comercial más cercano que es 330 Ω . La potencia de esta resistencia se calcula por medio de (3.99):

$$P = \frac{V_R^2}{R_B} \quad (3.99)$$

Donde:

- P potencia de la resistencia, en W;
- R_B resistencia de la base del transistor, en Ω ;
- V_R voltaje de la resistencia, en V.

Reemplazando los valores conocidos se obtiene:

$$P = 0,056\text{W}$$

Se requiere una resistencia de 330 Ω a una potencia de $\frac{1}{4}$ W.

En cuanto al transistor se necesita que este soporte por lo menos 5V en su juntura de base-emisor y también en la juntura colector-emisor. Además su corriente de colector máxima debe ser superior a 50mA. Se selecciona el transistor 2N3904 [23].

Para la protección contra el rebote de corriente se coloca un diodo en paralelo al relé con su cátodo unido a los 5V provistos de la fuente de alimentación. Esto evita que la corriente de rebote por el campo magnético del relé afecte al circuito digital. Este diodo en un caso extremo se vería sometido a 5V y 50mA, que son valores pequeños para estos semiconductores. Se selecciona el diodo 1N4007 [24] en esta protección.

Es necesario agregar una indicación luminosa para señalar si la fuente está encendida o algo ha fallado en la activación del electroimán. Se utiliza un LED RGB de alto brillo para que la señal sea captada con claridad. Este LED emitiría el color azul si el efector está alimentado y rojo si se encuentra apagado. Para dimensionar la resistencia del LED se utiliza (3.100):

$$I_L \cdot R_L + V_L = V_F \quad (3.100)$$

Donde:

I_L corriente del LED, en A;

R_L resistencia para el LED, en Ω ;

V_L voltaje del LED, en V;

V_F voltaje de la fuente, en V.

Considerando que el LED consume 40mA y 2V [22] mientras que su alimentación son 12V, se calcula su resistencia con (3.100):

$$R_L = \frac{V_F - V_L}{I_L}$$

$$R_L = \frac{12V - 2V}{50 \text{ mA}}$$

$$R_L = 250\Omega$$

Utilizando (3.99) se calcula la potencia de la resistencia con los valores dados.

$$P = 0,4W$$

Se requieren dos resistencias de 220 Ω a una potencia de ½ W una vez ajustados los cálculos a valores comerciales. Un led adicional de color verde se añade al inicio de

la fuente de alimentación de 12V con el fin de indicar la disponibilidad de esta. La resistencia de este será la misma de los ya dimensionados debido a que sus condiciones de trabajo son idénticas. Con la implementación de los elementos mencionados se obtiene el circuito para el control del electroimán desde el microcontrolador. Para simular al circuito se utiliza el software Proteus versión 7.7 con licencia de prueba. Este circuito corresponde a la Figura 3.48:

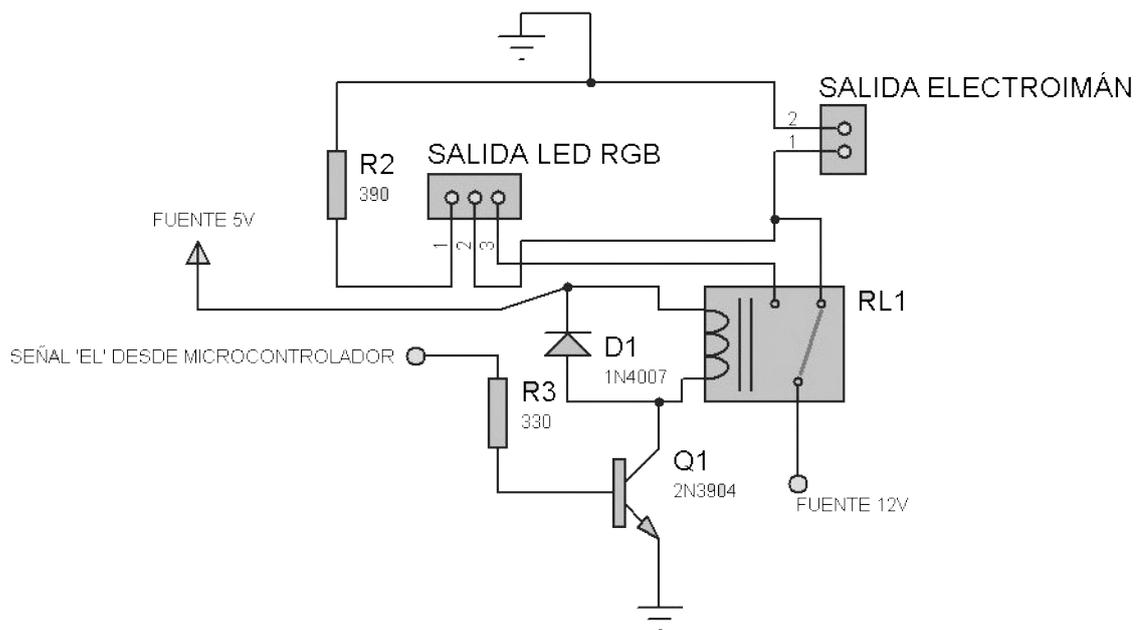


Figura 3.48. Circuito de control para el electroimán desde el microcontrolador en Proteus 7.7

El circuito recibe las órdenes del microcontrolador mediante la señal “EL”. De esta forma activa o desactiva al efector y el operador es capaz de distinguir su estado mediante la respectiva señal luminosa.

3.5.2. CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN PARA LOS SERVOMOTORES

Es necesario dimensionar la fuente de alimentación de los motores para que estos funcionen con su máximo torque. A partir de la entrada de 12V, se coloca un regulador 7808[25] cuya salida de voltaje es 8V. Este elemento sería suficiente para la tarea encomendada de no ser porque este no soporta corrientes superiores a 0,5A sin disminuir su voltaje de salida.

Para solucionar este problema se coloca en paralelo transistores de potencia los cuales se encargan de soportar la corriente requerida mientras el regulador mantiene el voltaje en su valor nominal.

Con una corriente de carga de 3A y 4V entre su colector-emisor, los transistores TIP42 [26] son adecuados para la tarea pues soportan el doble de esta intensidad y más de diez veces dicho voltaje. La Figura 3.49 muestra la fuente propuesta:

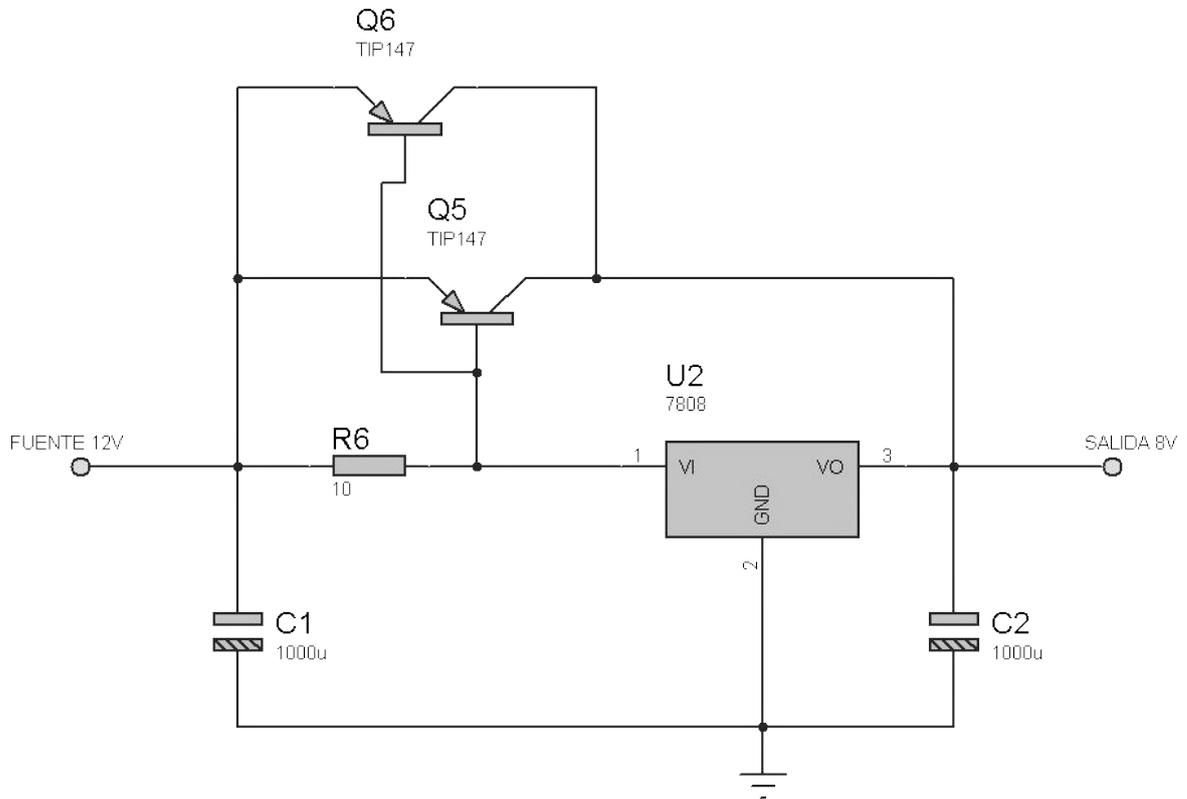


Figura 3.49. Fuente de alimentación de 8V para los servomotores en Proteus 7.7

Los condensadores de $1000\mu\text{F}$ cumplen la función de almacenar energía y reducir los picos de corriente provocados por los servomotores al encenderse. La resistencia de 10Ω sirve para polarizar a los transistores y asegura la alimentación del regulador de voltaje. Su valor es netamente aleatorio e influye únicamente en el momento en que se activan los transistores. Mediante (3.101) se encuentra la corriente de activación:

$$I_A \cdot R = V_{BE} \quad (3.101)$$

Donde:

- I_A corriente de activación, en A;
- R resistencia de polarización, en Ω ;
- V_{BE} voltaje Base-Emisor del transistor, en V.

Considerando los 10Ω seleccionados y que $V_{BE} = 0,7V$ se obtiene mediante (3.101):

$$I_A = 70mA$$

Este valor indica que, cuando la carga supere los 70mA, los transistores se activarán y el regulador de voltaje no elevará su potencia. De esta forma se asegura el aporte tanto en voltaje como en corriente hacia el elemento de carga.

Cuando un servomotor se traba o se ve sometido a una fuerza opuesta significativa, drena más corriente de la que debería. Para prevenir esto se utilizan sensores de corriente ACS712, mostrados en la subsección 1.4.2.3, que transmiten sus mediciones al microcontrolador. Este último se encarga de monitorear y desconectar cualquier actuador que sufra una sobrecorriente eléctrica. Cabe mencionarse que el sensor se coloca entre la salida GND del circuito de control y el respectivo terminal de alimentación del servomotor.

3.5.3. CÁLCULO DE LOS DISIPADORES DE CALOR

Es importante considerar que los transistores se calentarán y el efecto Joule podría comprometer su funcionamiento. Por tal motivo es necesario dimensionar un disipador de calor para los mismos. Estos elementos se dimensionan mediante (3.102) [27]:

$$R_{jc} + R_{cd} + R_{da} = \frac{T_{Max} - T_{Amb}}{W} \quad (3.102)$$

Donde:

- R_{jc} resistencia de juntura, en $^{\circ}C/W$;
- R_{cd} resistencia carcasa-disipador, en $^{\circ}C/W$;
- R_{da} resistencia disipador-ambiente, en $^{\circ}C/W$;
- T_{Max} temperatura máxima del elemento, en $^{\circ}C$;
- T_{Amb} temperatura ambiente, en $^{\circ}C$;
- W potencia, en W .

Teniendo en cuenta que $T_{Amb} = 40^{\circ}C$ para los dispositivos electrónicos, $T_{Max} = 100^{\circ}C$ y $R_{jc} = 1,5^{\circ}C/W$ para el TIP42 [26], $R_{cd} = 0,5^{\circ}C/W$ para la mica térmica y la potencia es de 12 W con los tres motores activos, se calcula R_{da} :

$$1,5^{\circ}C/W + 0,5^{\circ}C/W + R_{da} = \frac{100^{\circ}C - 40^{\circ}C}{12 W}$$

$$R_{da} = 3^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Debe utilizarse un disipador de calor que tenga al menos $3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ de resistencia térmica de disipación al ambiente para que los transistores trabajen en condiciones óptimas.

3.5.4. CÁLCULO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Es importante dimensionar adecuadamente la alimentación eléctrica del robot. Esto asegura el funcionamiento y la seguridad energética de los elementos electrónicos involucrados en el prototipo. La Tabla 3.2 muestra los elementos que consumen energía en el delta con sus voltajes e intensidades de corriente.

Tabla 3.2. Elementos electrónicos del robot delta

Elemento	Cantidad	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)
Atmega 328 [28]	1	5	0,05
Servomotor AHBS-3713HTG	3	8	0,9
Electroimán HCNE P20	1	12	0,21
Servomotor HS311	1	5	0,15
Elementos misceláneos (LED, resistencias, entre otros)	1	5	0,3

Se clasifica a los componentes mencionados en la Tabla 3.2 de acuerdo a su voltaje. Cabe mencionarse que la salida de 8V se deriva a partir de la fuente de 12V, por tanto, la intensidad de corriente de los servomotores se suma a la de esta última fuente. Adicionalmente, se añade un factor de carga de 2 por seguridad para los elementos. La Tabla 3.3 presenta los resultados de este análisis.

Tabla 3.3. Resumen del consumo energético del robot

Voltajes (V)	Corriente Total (A)	Corriente con Factor de Carga (A)	Potencia (W)
5	0,5	1	5
12	2,91	5,82	69,84
Total		6,82	74,84

Se requiere una fuente de al menos 75 W para el robot. Esta debe proveer voltajes de 5V y 12V con capacidad de corriente de al menos 1A y 5,8A respectivamente. De las fuentes de alimentación disponibles en el mercado se selecciona la ATX-750 [29] cuya capacidad es de 5V / 27A y 12V / 33A. Con estos valores se garantiza que los elementos electrónicos tengan una alimentación adecuada para funcionar. Al dividir a estos según su consumo, se asegura que ninguno se exponga a corrientes o voltajes mayores a los que soportan.

Si bien la fuente ATX-750 cuenta con protecciones internas para soportar cortocircuitos y sobrevoltajes hasta cierto punto, se puede añadir un fusible como una seguridad externa adicional. Asumiendo que no hay pérdidas significativas de energía, para dimensionar el fusible requerido se utiliza (3.103):

$$V_{En} \cdot I_{En} \cdot f_p = W_{Sal} \quad (3.103)$$

Donde:

W_{Sal} potencia de salida de la fuente, en W;

V_{En} voltaje RMS de entrada a la fuente, en V;

I_{En} corriente RMS de entrada a la fuente, en A;

f_p factor de potencia, adimensional.

Considerando la potencia calculada del circuito de control, en la Tabla 3.3 de la subsección 3.5.3, como $W_{Sal} = 74,84W$, un factor de potencia igual a 1 y un voltaje de red eléctrica de $110V_{RMS}$, se despeja la corriente en (3.103):

$$110V \cdot I_{En} \cdot 1 = 74,84 W$$

$$I_{EN} = 0,68 A$$

La corriente pico se calcula mediante (3.104):

$$I_{Pico} = \sqrt{2} \cdot I_{RMS} \quad (3.104)$$

Donde:

I_{Pico} corriente pico de entrada a la fuente, en A;

I_{RMS} corriente RMS de entrada a la fuente, en A.

Reemplazando el valor conocido de corriente RMS en (3.104) se obtiene:

$$I_{Pico} = 0,962A$$

Para mejorar el tiempo de respuesta ante cualquier inconveniente se recomienda el uso de fusibles rápidos. Al ajustar el valor dado a los fusibles comerciales, se selecciona un fusible rápido de 1A. En cuestión del voltaje del fusible se recomienda que este soporte por lo menos el doble del voltaje normal al que se sometería. En otras palabras, el fusible seleccionado debería tolerar por lo menos 220V_{RMS}.

El circuito completo se muestra a breves rasgos en la Figura 3.50 y con todos sus detalles en el plano D02-001 del Anexo B.

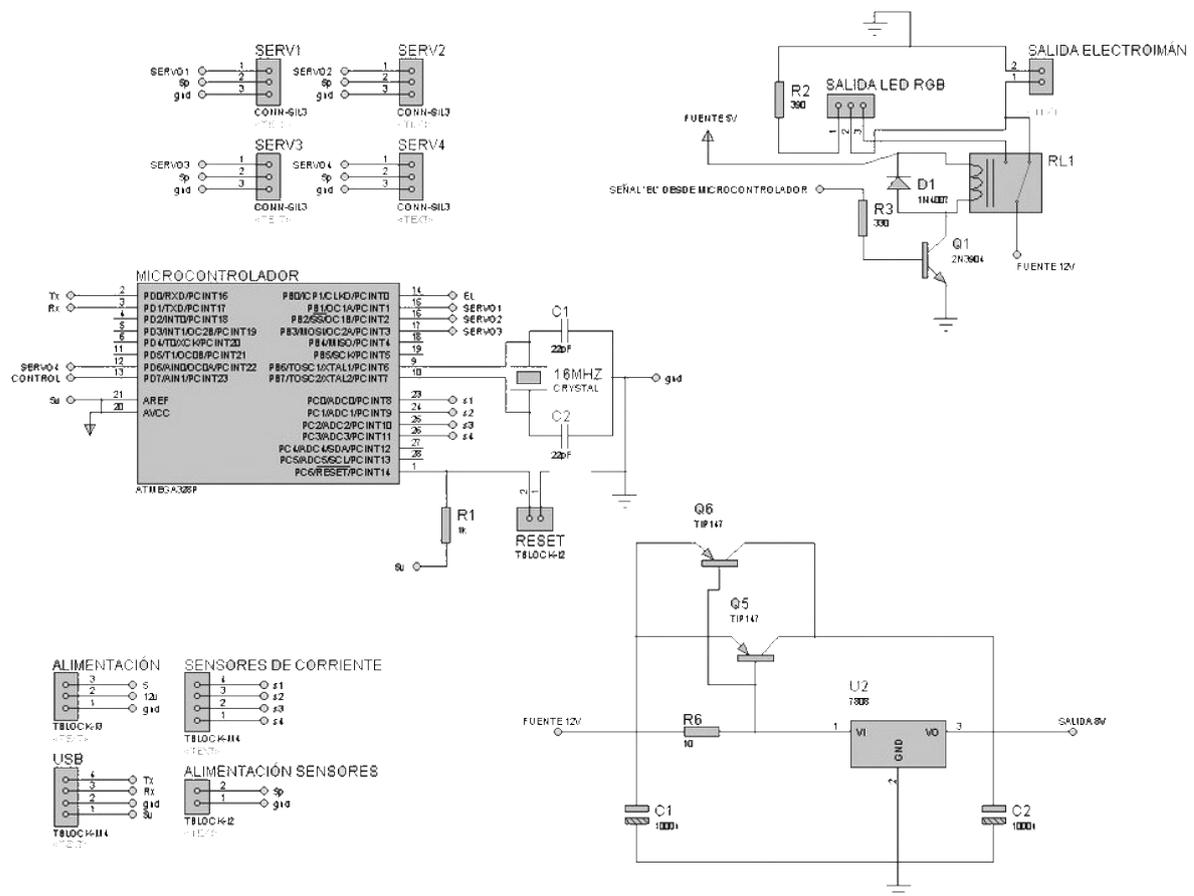


Figura 3.50. Circuito electrónico completo simulado en Proteus 7.7

3.5.5. PLACA ELECTRÓNICA DEL CIRCUITO DE CONTROL

A partir del circuito dimensionado de la Figura 3.50, se genera el circuito impreso PCB en la extensión ARES del mismo software Proteus 7.7. La Tabla 3.4 muestra los tamaños de pista según los requisitos de corriente [30].

Tabla 3.4. Tamaños de pista según la corriente utilizada

Corriente	Uso	Tamaño (mils)
Hasta 1 A	Microcontrolador, sensores, leds, electroimán, relés, transistores y resistencias.	18
Hasta 4 A	Servomotores	70

El PCB resultante, luego de asignar los componentes y enlazarlos con su respectivo tamaño de pista según la Tabla 3.4, aparece en la Figura 3.51:

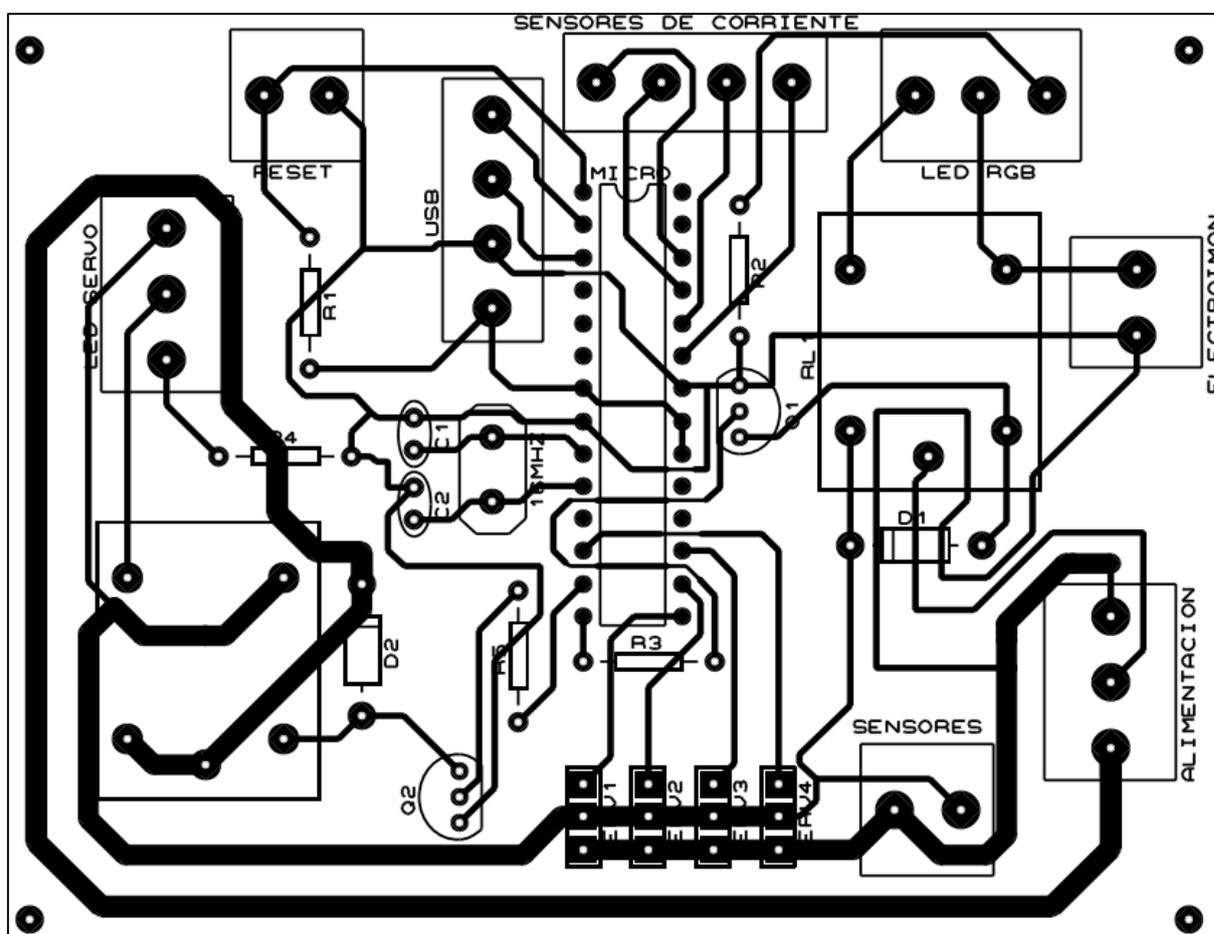


Figura 3.51. PCB del Robot Paralelo

Así quedan dimensionados los elementos electrónicos del robot. En la siguiente subsección se presenta la lógica de programación y el diseño de la HMI del robot.

3.6. DISEÑO DE LA INTERFÁZ HUMANO MÁQUINA

3.6.1. FORMATO DE LAS INSTRUCCIONES

El uso de un formato para dar instrucciones al robot asegura que la sintaxis en las mismas sea correcta y que se realice exactamente lo que se ordena. Para facilitar el envío de instrucciones, se propone que el prototipo entienda los códigos G [31].

El “*G-Code*” es estándar de lenguaje de programación para las máquinas de control numérico. Es conocido formalmente como la norma ISO-6983. Mediante una serie de combinaciones de letras y números, éste transmite instrucciones a las máquinas herramientas sobre sus tareas a realizar y de qué manera.

Existen seis variables derivadas del código G a utilizar en el robot propuesto. Estas se describen en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5. Variables de las instrucciones de código G para el robot

Variable	Descripción
G	Funciones preparatorias. Dan instrucciones de movimiento al robot.
X	Coordenada en X de la Máquina
Y	Coordenada en Y de la Máquina
Z	Coordenada en Z de la Máquina
M	Funciones misceláneas. Acciones en la máquina que no están relacionadas al movimiento de la misma.
C	Rotación entre -90° y 90° del cuarto GDL del robot sobre el eje Z.

Existen tres instrucciones propuestas para el robot: G1, M3 y M5. Para entender que hace cada una se proponen ejemplos de estas:

G1 X10 Y10 Z-200 C40

Por defecto, G1 es la instrucción para el movimiento lineal del actuador en la máquina. Esta se encarga del movimiento desde cualquier posición hacia los puntos “X”, “Y” y “Z” dados en el comando. Adicionalmente se ordena una rotación de 40° en sentido horario del cuarto GDL.

M3

La instrucción M3 se encarga del encendido del efector final. Con esta línea el electroimán se activa y el objeto bajo el mismo es capturado.

M5

La instrucción M5 se encarga del apagado del efector final. Con esta línea el electroimán se desactiva y el objeto en suspendido es liberado.

Para el buen uso de las mismas deben considerarse ciertos aspectos:

- Solo puede existir una función por línea, es decir, en una línea solo puede existir o bien un código G o un código M.
- No es necesario que todos los campos estén llenos. Si no se requiere cambiar la velocidad, la rotación o una coordenada, estas tomarán por defecto su último valor conocido.
- El robot trabaja exclusivamente en coordenadas absolutas.
- Las coordenadas están en mm.
- La velocidad se plantea en mm/s.

Siguiendo las instrucciones dadas, el robot puede transportar objetos dentro de su espacio de trabajo. En la siguiente subsección se muestra las funciones existentes en la HMI y el diseño de la misma.

3.6.2. DESARROLLO DE LA INTERFAZ HUMANO MÁQUINA

Para la creación de la HMI se recurre al software PyQt4⁴. Este software funciona como una biblioteca extendida de Python para la creación de aplicaciones GUI. Entre sus características más relevantes se destaca:

- Multiplataforma: funciona en múltiples sistemas operativos sin necesidad de alterar el programa.
- Software libre
- Modular: aporta diferentes módulos a las bibliotecas de Python con más de 300 clases y 6000 métodos para el desarrollo de aplicaciones gráficas.
- Incluye un editor gráfico llamado Qt Designer donde se diseñan las GUI para convertirlas en código interpretado por Python posteriormente.

⁴ <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/download>

Los elementos que deben aparecer en la interfaz son:

- Pestaña para selección de puerto COM.
- Botón para actualizar los puertos COM.
- Pestaña para selección de velocidad de transmisión.
- Botón para inicio de conexión serial.
- Botón para cerrar la conexión serial.
- Espacio para escritura de instrucciones individuales.
- Espacio para cargar la dirección en el ordenador del archivo de texto plano.
- Botón para abrir ventana de selección de archivo de texto plano.
- Botón de envío de instrucción en cada caso.
- Indicadores de la posición "X", "Y" y "Z" del efector.
- Botón de reseteo del robot.
- Indicadores de la posición angular de cada brazo.
- Ventana de historial de comandos.

Considerando estos aspectos se diseña la interfaz en Qt Designer. El resultado se muestra en la Figura 3.52:

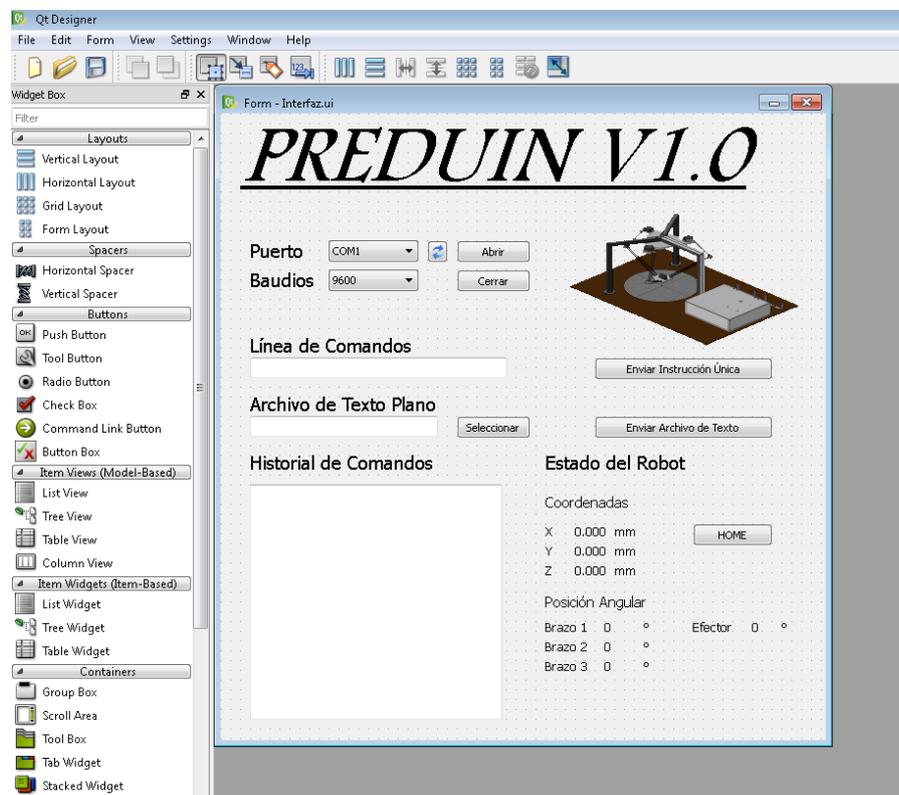


Figura 3.52. Captura de pantalla de la interfaz en Qt Designer

La rutina de programación para la HMI se describe en los siguientes pasos:

1. Conversión de la interfaz a código de Python.
2. Adición de bibliotecas de matemáticas y conexión serial en el código generado.
3. Programación del ComboBox de puertos seriales para que se añadan todos los puertos de comunicación activos del ordenador.
4. Programación del ComboBox de baudios para presentar las diferentes velocidades estándar de comunicación serial.
5. Programación del botón de recarga para reiniciar la lista de puertos seriales activos en el respectivo ComboBox.
6. A continuación se programan los botones “Abrir” y “Cerrar” para establecer o parar la comunicación con el puerto seleccionado.
7. Seguidamente se programa el botón “Enviar Instrucción Única” para el envío del contenido de la línea de comandos
8. En el caso del envío de archivos, primero se programa el botón “Seleccionar” para obtener una ventana emergente del explorador del sistema operativo para ubicar al archivo de texto con las órdenes para el robot.
9. Posteriormente se configura al botón “Enviar Archivo de Texto” donde se lee y envía línea por línea el archivo de texto plano.
10. En ambos casos de envío, antes de ejecutarse la instrucción, se verifica que el movimiento ordenado se encuentre en puntos dentro del espacio de trabajo. Adicionalmente se configuran las etiquetas de texto del “Estado del Robot” para que se actualicen las coordenadas y la posición angular de los actuadores.
11. También se configura el “Historial de Comandos” para guardar cada comando con envío exitoso que se haya ejecutado. De esta manera el usuario tendría una referencia de lo que ha realizado el robot hasta el momento.
12. Tras realizarse todo esto, se procede a programar las ventanas emergentes de todos los errores que pudieran ocurrir relacionados con la interfaz. Estos avisos ayudarán al operador a entender cualquier inconveniente en la comunicación o en las órdenes enviadas al robot.
13. Por último se programa el botón “HOME” para reiniciar el robot a su posición de origen. Cabe mencionarse que este botón no representa una interrupción al programa y esperará que culmine cualquier comando previo.

Los códigos de programación, tanto de los archivos que componen la HMI como el grabado en el microcontrolador del robot, se encuentran en el Anexo C. Considerando todos los elementos mencionados, la HMI desarrollada se muestra en la Figura 3.53:



Figura 3.53. Pantalla principal de la HMI para el Robot PREDUIN

3.6.3. FUNCIONAMIENTO DE LA HMI

El diagrama de flujo, realizado en Microsoft Visio 2016, que describe el funcionamiento de la HMI se encuentra en el plano D01-001 del Anexo D. La rutina de operación esperada en la HMI se describe de la siguiente manera:

1. Se inicia el programa con el retorno automático del robot a su origen. En tanto, en la HMI se abre el puerto de conexión con la velocidad seleccionada.

2. Si se utiliza el modo de línea de comandos, únicamente se pulsa el botón respectivo para enviar la orden.
3. Si se utiliza el modo de lectura de archivo de texto, primero se selecciona el archivo y posteriormente se pulsa el respectivo botón para enviarlo. La HMI procede a leer la siguiente línea del archivo de texto.
4. La instrucción se envía por medio de conexión UART al robot.
5. El robot se mueve según la instrucción recibida. Al finalizar envía una alerta a la HMI para continuar con el programa.
6. Si el comando era una línea única, el movimiento ha terminado.
7. Si hay más líneas en el archivo de texto, se repite el proceso desde el paso 4.
8. Con el movimiento concluido, aparece una ventana emergente que indica la ejecución exitosa de la instrucción y se actualiza el estado del robot en la HMI.

Mediante estos pasos se logra que las órdenes se cumplan como se esperan. Ante cualquier error, aparece una ventana emergente que indica lo ocurrido. Con esta HMI se han dimensionado todos los elementos fundamentales del robot delta bajo las características planteadas. En el siguiente capítulo se lleva a cabo la construcción del prototipo. También se realizan pruebas para verificar la interpretación de las instrucciones de la HMI y del movimiento resultante en el robot.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN Y VERIFICACIÓN DEL SISTEMA

4.1. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

4.1.1. BRAZOS DEL ROBOT

Para fabricar los brazos del robot se requieren barras de aluminio 6061, que fue el material seleccionado en la subsección 3.3. En el caso de los brazos superiores se utiliza comúnmente una barra de sección circular por estética y para tener un pequeño segundo momento de área. Para los acoples se emplea una barra cuadrada debido a la facilidad de manufacturar caras planas y a la perpendicularidad entre sus caras. La Figura 4.1 muestra la materia prima para los brazos del robot.



Figura 4.1 Materia prima para la construcción del brazo del robot paralelo

Mediante el uso de un torno, fresadora y taladro de precisión se manufactura las barras de aluminio según los planos D03-301, D03-302 y D03-303 en el Anexo E. Como resultado se obtiene un acople de servomotor, un brazo superior y un acople de articulación para cada extremidad del robot paralelo. Estos elementos se aprecian en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Piezas creadas a partir de las barras de aluminio

Se conecta cada brazo a sus respectivos acoples. También se junta, mediante pernos, el acople propio del servomotor. Se ajusta las piezas de tal forma que sus caras queden alineadas como muestra la Figura 4.3.



Figura 4.3. Ensamble de la parte superior del brazo del robot

Para el antebrazo de robot paralelo se requiere de seis varillas (roscadas a mano derecha) de acero inoxidable, con un diámetro M4 y 260 mm de largo como se especifica en el plano D03-304 del Anexo E. La Figura 4.4 muestra estos eslabones.

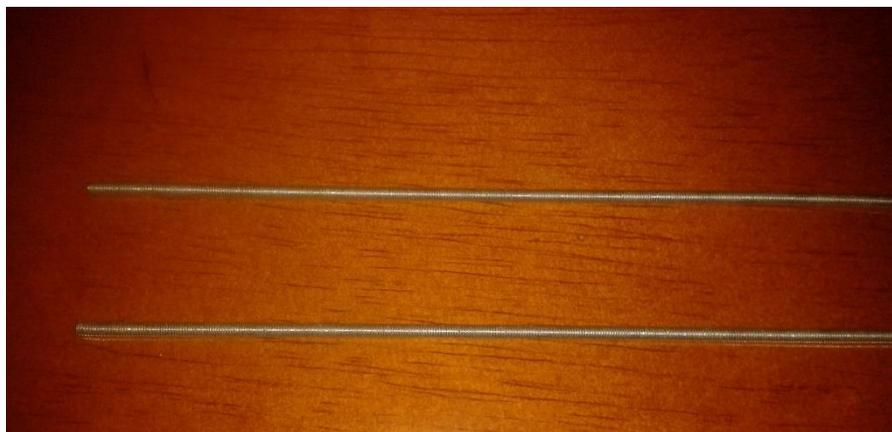


Figura 4.4. Varillas de acero inoxidable para los antebrazos del robot

Para conectar estas varillas a la articulación del brazo y a la base inferior del robot se usa juntas rotacionales. Se recurre a imanes con acople de bola para realizar la unión requerida. Estos elementos están hechos de Neodimio, que es el tipo de imán permanente hecho por el ser humano con mayor fuerza magnética. La razón para recurrir a imanes de bolas es la libertad de movimiento que presentan. Por este motivo son piezas recurrentes en las impresoras 3D de tipo delta. En la Figura 4.5 se aprecia al imán con su junta de bola.



Figura 4.5. Imán de Neodimio con su junta de bola

El acople de bola debe contar con una apertura M4 con rosca a mano derecha. De esta manera se pueden acoplar con facilidad a cada extremo de las varillas roscadas ya mencionadas. La Figura 4.6 muestra dicha unión ya ajustada.



Figura 4.6. Junta de varilla con su juntura rotacional

No obstante debe considerarse que, al no existir bordes en el imán con forma de anillo, un impulso sumamente brusco puede separar la unión. Se deben ajustar los actuadores de tal forma que no comprometan a las juntas del antebrazo durante su movimiento. Este es un aspecto a considerar durante la verificación del funcionamiento del robot. Antes de ensamblar los brazos por completo, se requiere de la base inferior y superior del robot. La construcción de las mismas se detalla en la siguiente subsección.

4.1.2. BASES DEL ROBOT Y CAJA DEL CIRCUITO

Las piezas realizadas en MDF, tales como las bases del robot y la caja para los elementos electrónicos, se obtienen a partir de una plancha del material cortada con láser. Por medio de este procedimiento, se asegura que los elementos sean exactos en sus medidas. Para emplear este método de corte se requiere la vista superior de las piezas, comúnmente en un archivo PDF con escala 1:1. Dicho archivo puede generarse a partir del software de diseño mecánico en el que se diseñaron las piezas del robot por medio de la opción de impresión y la respectiva selección de una impresora virtual de PDF. Una ilustración de archivo PDF para cortar por medio de laser se muestra en la Figura 4.7.

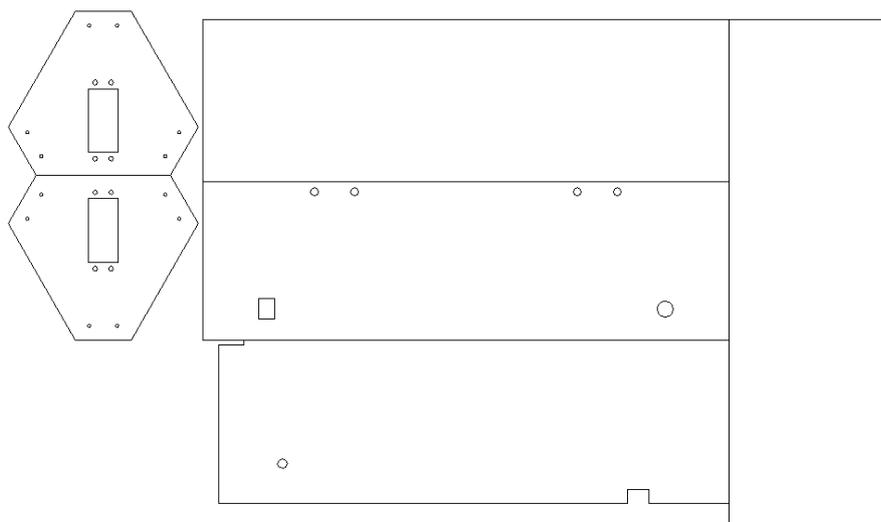


Figura 4.7. Diagrama ejemplo de piezas a obtener usando corte láser

Por defecto cada línea del archivo es tomada como un corte pasante si no se especifica de otro modo. En el caso de la cuadrícula para medir la posición final del objeto trasladado, el borde externo y el círculo central son pasantes. El resto de líneas son grabadas sobre el material. Este elemento se muestra en la Figura 4.8.

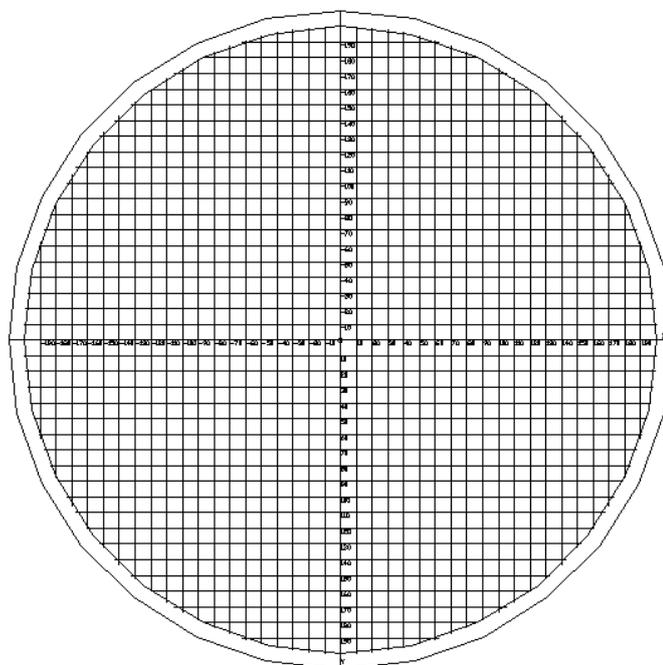


Figura 4.8. Cuadrícula para medir la posición final del objeto trasladado

La Figura 4.9 muestra algunas de las piezas ya cortadas. Todos los elementos en MDF del Anexo E se obtienen por el mismo método.



Figura 4.9. Piezas en MDF cortadas

Puede notarse en la Figura 4.9 que algunos bordes de las piezas tienen quemaduras producto del corte. Para mejorar el aspecto estético de las mismas se las recubre con pintura. El color seleccionado es Almendra 114 de la marca EVANS de aerosoles. La Figura 4.10 muestra algunas piezas tras la aplicación de la primera capa de pintura.



Figura 4.10. Piezas del robot luego del recubrimiento de pintura

Cuando la pintura se haya secado, se aplica una segunda capa para un mejor acabado estético. La siguiente subsección muestra el proceso de ensamblaje de los elementos mecánicos del robot.

4.1.3. ENSAMBLE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS

La base inferior del robot delta se ensambla de manera sencilla. En primer lugar debe colocarse adecuadamente el servomotor HS-311 de tal forma que su eje de rotación sea perpendicular a la superficie lisa de la pieza de MDF. El resultado de esto se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4.11. Servomotor colocado en la base inferior del robot

Posteriormente se colocan las dos bases que sirven de acople entre el servomotor y el electroimán. Este elemento debe atornillarse previamente al acople inferior. La base con el electroimán sujeto se muestra en la Figura 4.12.



Figura 4.12. Electroimán colocado en la base inferior del robot

En la otra cara de la base se colocan los imanes de neodimio. De esta forma se muestra este subconjunto terminado en la Figura 4.13.

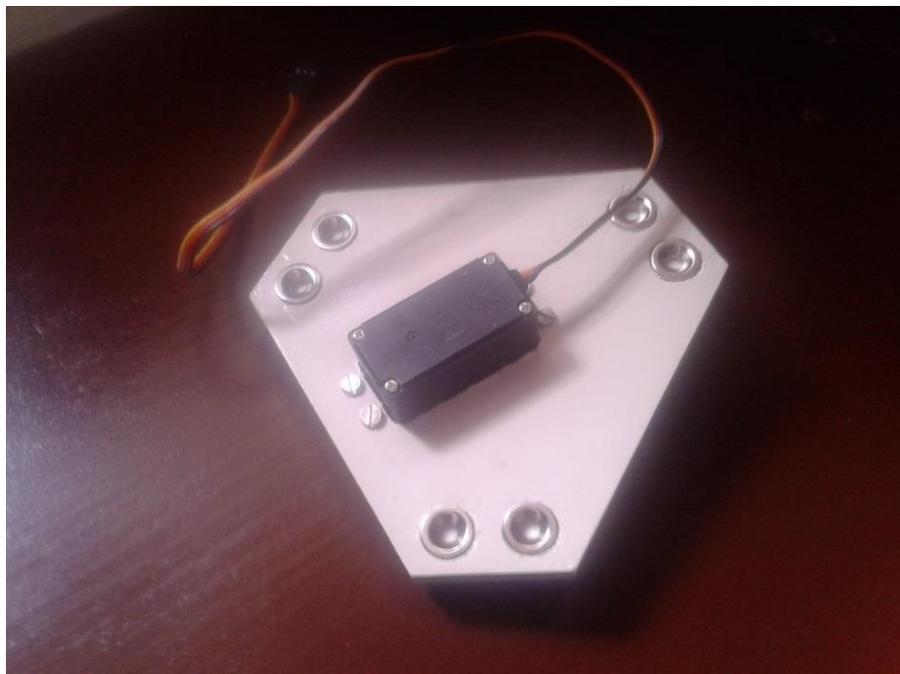


Figura 4.13. Subconjunto de la base inferior del robot

En la base superior del robot se colocan los soportes para los servomotores de los brazos. La Figura 4.14 muestra los elementos mencionados.

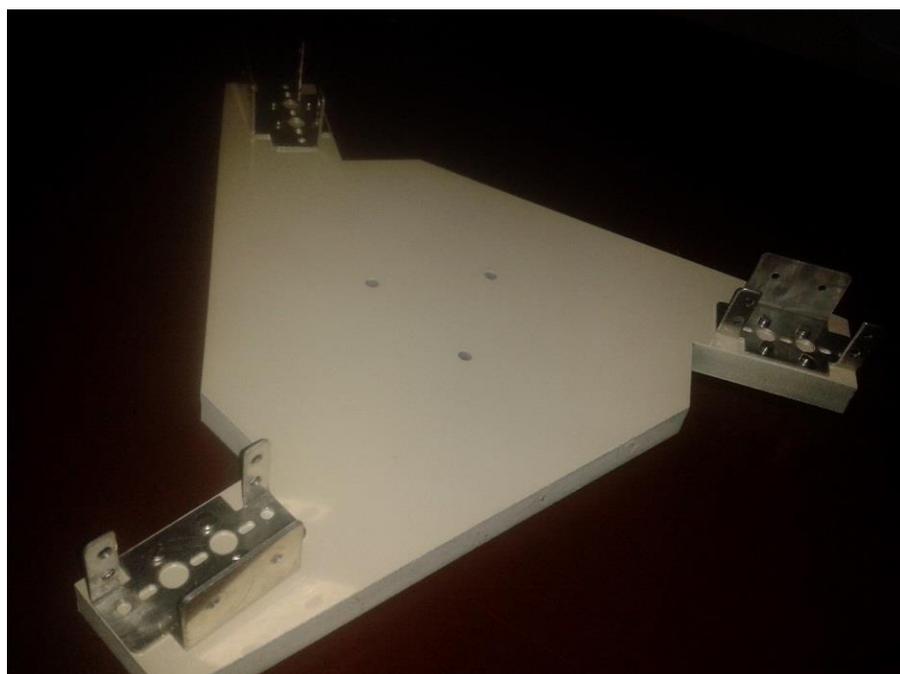


Figura 4.14. Base superior del robot delta

La parte superior del brazo se sujeta a cada uno de los servomotores AHBS-3713HTG como indica la Figura 4.15. Debe asegurarse que todos los acoples del robot terminen en la misma posición de esta figura antes de unirse a los antebrazos.



Figura 4.15. Brazos del robot delta.

La estructura de trípode está hecha con acero A500 y es mecanizada según el plano D03-004 en el Anexo E. Posteriormente se le aplican dos capas de pintura aerosol marca ABRO color Aluminio 26 para darle un buen acabado a la pieza. Esta pieza ya terminada se observa en la Figura 4.16.



Figura 4.16. Estructura de trípode del robot delta

La estructura se sujeta a la base de todo el prototipo mediante pernos al igual que la caja donde van los componentes electrónicos. Las piezas para armar a esta última se colocan de acuerdo a lo establecido en el plano mecánico D03-001 del Anexo E. En la Figura 4.17 aparecen los elementos ya sujetos en la base general del prototipo.

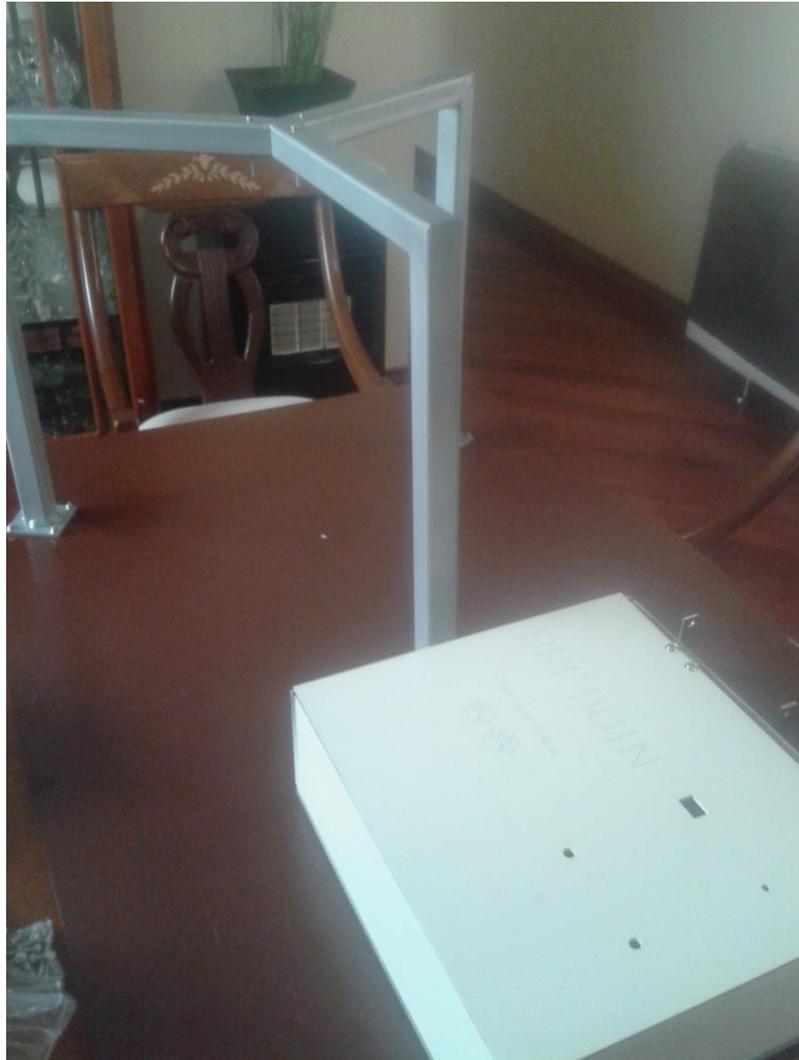


Figura 4.17. Estructura de trípode y caja con el circuito electrónico

Seguidamente se coloca la base superior del robot delta mediante tres pernos M5x50 cuyas perforaciones se encuentran en la parte central de la misma para coincidir con las del trípode. Se colocan los servomotores en cada soporte de la base y se los asegura mediante 4 pernos M3x10. La Figura 4.18 muestra a la base superior del robot delta posicionada en la estructura de trípode.



Figura 4.18. Base superior del robot colocada en la estructura

Posteriormente se colocan los seis antebrazos en cada extremidad del robot, teniendo en cuenta que los imanes de las articulaciones de los brazos apunten hacia abajo. Luego se conecta cada eslabón a su respectivo lugar en la base inferior del robot. La Figura 4.19 muestra a la base inferior montada en el prototipo.



Figura 4.19. Base inferior del robot montada en el equipo

Finalmente se fija la base cuadrículada mediante un perno en su centro y se colocan los ángulos detrás de la caja que contiene al circuito de control. Estos servirán para

envolver los cables de poder y conexión USB. La estructura mecánica armada se muestra en la Figura 4.20.



Figura 4.20. Estructura mecánica completa del robot

Así queda culminada la parte mecánica del prototipo con todas las piezas montadas en su respectivo lugar. En la siguiente subsección se montan los elementos electrónicos en el robot con sus respectivas conexiones.

4.1.4. INSTALACIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Para la creación de la placa electrónica es necesario adquirir y soldar todos los elementos dimensionados en el capítulo anterior. El resultado es un circuito electrónico como el de la Figura 4.21.

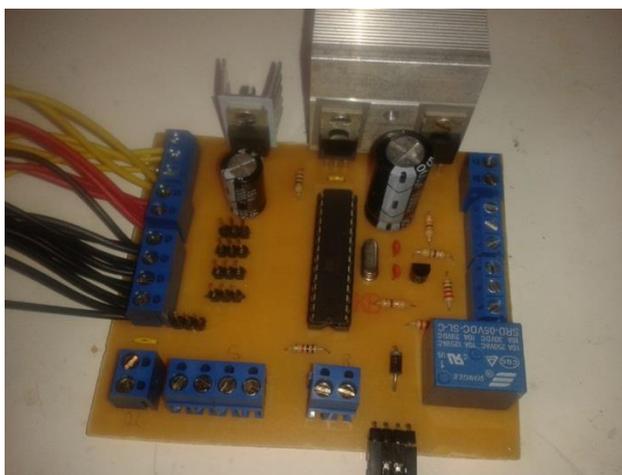


Figura 4.21. Circuito PCB del robot paralelo

En las entradas de alimentación se colocan los cables desde la fuente según el voltaje correspondiente. La conexión USB puede colocarse temporalmente en esta etapa con el motivo de realizar pruebas de funcionamiento. La placa se coloca en su respectiva posición dentro de la caja según el plano D03-002 del Anexo E. El resultado de esta acción se muestra en la Figura 4.22.



Figura 4.22. Placa y fuente de alimentación colocadas en la caja para el circuito de control

Para sujetar a los elementos en cuestión se puede utilizar pegamento epoxi líquido. El adhesivo utilizado es el “Devcon Home 2 TonEpoxy”⁵ cuyas características son:

- Resistencia a la tensión: 17,24 MPa
- Posee una elongación hasta del 10% antes de la fractura.
- Rango de temperatura de funcionamiento: -5°C a 93°C
- Tiempo de cura: 16h

Con este adhesivo se asegura que los elementos se mantengan firmes en su lugar correspondiente. Seguidamente se colocan los sensores de corriente. La Figura 4.23 muestra a los sensores en su respectiva posición y conectados a la placa electrónica.



Figura 4.23. Sensores de corriente montados en la caja del circuito de control

En la parte superior de la figura 4.23 están los cables que conectan a las luces indicadoras, el botón de reseteo y el interruptor de encendido. En la Figura 4.24 aparecen los cables de los elementos electrónicos mencionados.

⁵ http://www.devcon.com/prodfiles/pdfs/fam_tds_179.pdf

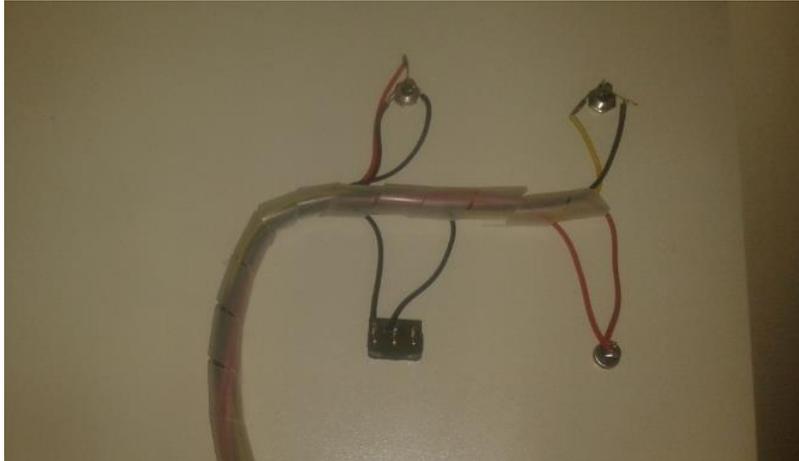


Figura 4.24. Cableado de la tapa superior de la caja del circuito de control

Los siguientes elementos a conectarse son los servomotores con sus respectivos sensores. Para ello se utiliza la convención escrita en el plano D03-001 del Anexo E. Esta establece que todos los cables de los actuadores del robot se colocan en la canaleta inferior de la Figura 4.25. En tanto, los cables del electroimán y los sensores están colocados en la canaleta superior de la misma figura. Mediante esta convención se facilita la identificación de posibles fallas en los motores o los sensores por falta de alimentación o de señales de funcionamiento.



Figura 4.25. Conexión de los cables de los servomotores en el trípode

Deben colocarse capacitores de $1\mu\text{F}$ en paralelo a la señal de control de los servomotores y lo más cerca posible a estos para evitar la aparición de corrientes parásitas que comprometan su funcionamiento. Por último se unen los extremos de los servomotores y sensores a sus respectivas salidas en la placa electrónica. La entrada GND del servomotor debe conectarse primero a su respectivo sensor de corriente antes que a la placa con el fin de medir dicha magnitud para cada actuador. La Figura 4.26 muestra la caja que contiene al circuito de control con todas las conexiones mencionadas.



Figura 4.26. Caja con todas las conexiones electrónicas realizadas

En la Figura 4.27 se muestra el robot PREDUIN culminado:

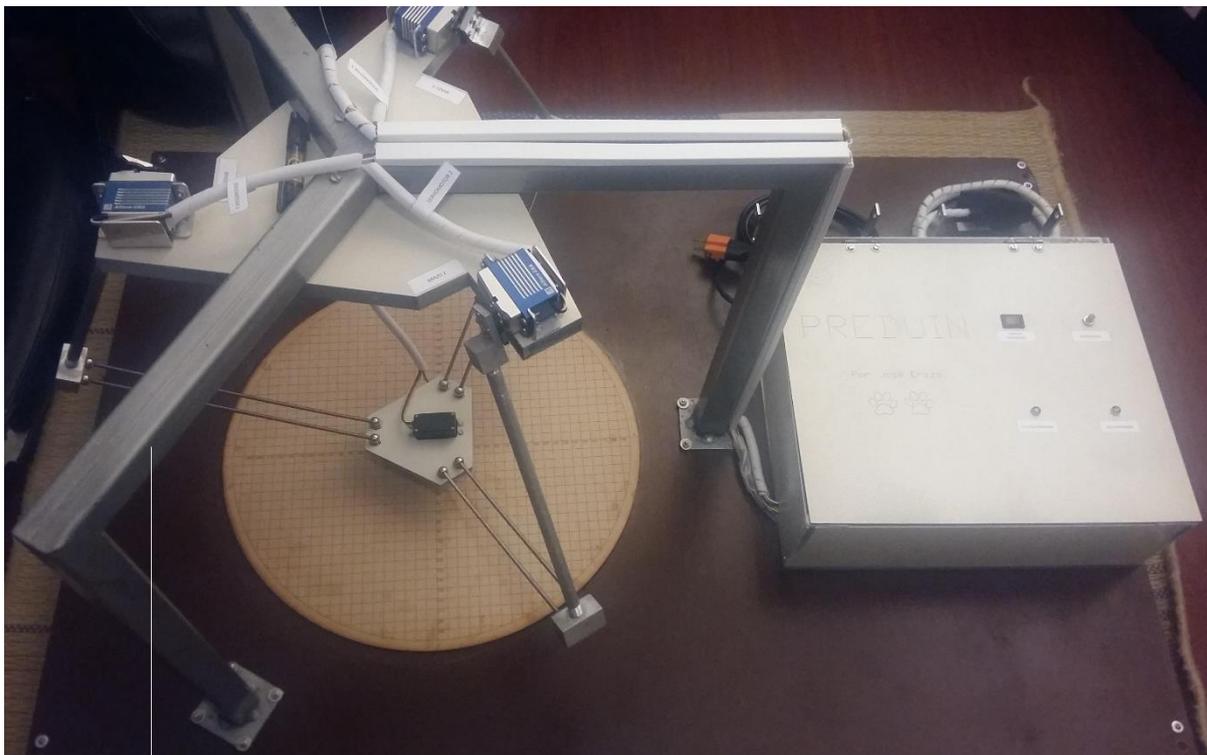


Figura 4.27. Robot PREDUIN terminado de armar

A continuación se abordan las pruebas de funcionamiento del robot delta con su respectivo análisis de resultados en cada una, con el fin de encontrar la eficiencia durante el funcionamiento del mismo.

4.2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.2.1. RESPUESTAS DE LA HMI

Es importante que la HMI esté programada para detectar errores en el funcionamiento del robot. Para ello se añaden avisos visuales que indiquen al operador si alguna falla aparece o la operación realizada ha sido exitosa.

El primer caso ocurriría al abrir o cerrar el puerto serial con la respectiva velocidad seleccionada. Tras ocurrir esta acción se informa al operador si la máquina está conectada o no. También existe la alternativa de que el puerto selecto esté en uso y requiera que se reinicie la conexión para emplearlo. La Figura 4.28 muestra los avisos de la HMI que aparecen si el puerto en el ordenador se encuentra: (a) Conectado, (b) Cerrado o (c) Actualmente en uso.

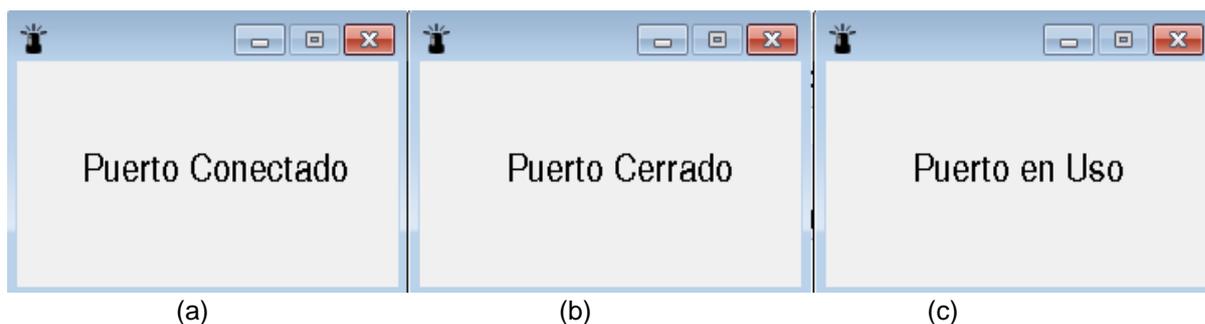


Figura 4.28. Respuestas de conexión serial

Un error común es enviar líneas de comandos manteniendo el puerto cerrado. En el caso de los textos planos existe una condición extra cuando no se haya seleccionado el archivo ni esté abierto el puerto serial. Para evitar esto, las alertas visuales de la Figura 4.29 indican al operador el error que está cometiendo al tratar de enviar un comando único (a) o un archivo de texto plano (b) a un puerto cerrado.

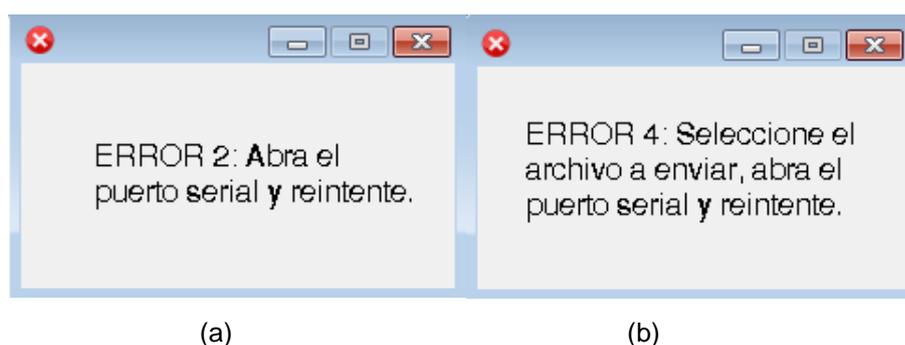


Figura 4.29. Problemas con puerto serial

En el caso de que el puerto esté conectado y se quiera enviar un archivo que no haya sido seleccionado, aparece una ventana como se muestra en la Figura 4.30:

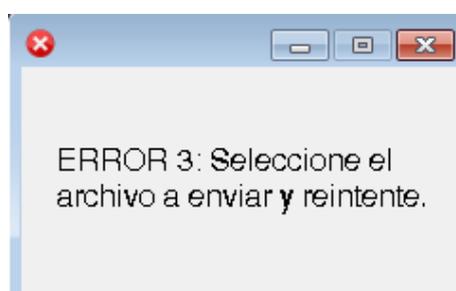


Figura 4.30. Ventana emergente de archivo no seleccionado

Cuando la conexión se haya establecido y el ordenador esté listo para enviar los comandos pueden ocurrir errores como instrucciones no reconocidas o mal escritas y órdenes de movimiento fuera del espacio de trabajo. Esto aplica tanto para comandos

únicos como para archivos de texto planos, donde es importante que el software sea capaz de reconocer la línea donde ocurre el error. La Figura 4.31 muestra las respuestas de la HMI ante errores en los códigos enviados al robot en la línea de comandos (a) o en el archivo de texto plano (b).

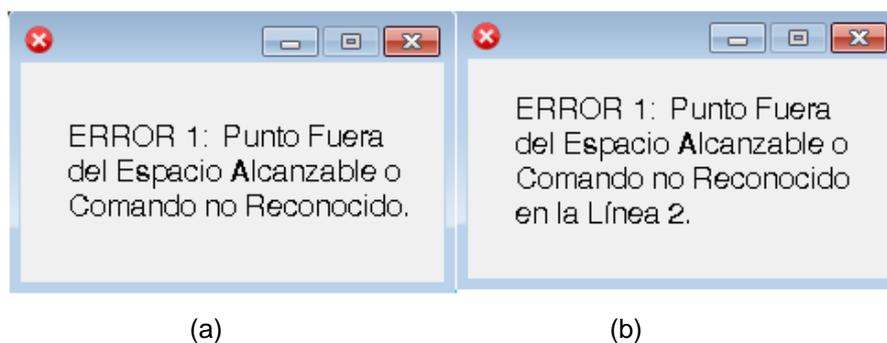


Figura 4.31. Errores en el código enviado

Otra ventana emergente necesaria es la alerta de consumo de corriente excesiva en un servomotor. Esto ocurre en el caso de que se haya trabado o que el objeto a levantar sea demasiado pesado y esté forzando al actuador. Para ello se hace uso de los sensores ACS712 que envían información al microcontrolador sobre el estado de cada uno de los actuadores. Este a su vez se encarga de enviar la información a la HMI que verifica si se ha superado el límite de corriente. En el caso de que esto ocurra, el motor es desacoplado por software, eliminando la sobrecorriente al instante. Cabe mencionar que luego de esto es recomendable reiniciar el equipo y la HMI para que todo regrese a su estado original. Además los servomotores utilizados soportan hasta 3A cada uno por lo que, en condiciones normales, no tendría por qué ocurrir una sobrecorriente. A pesar de esto, la protección es necesaria para dar seguridad a estos elementos. La ventana emergente en cuestión corresponde a la Figura 4.32:

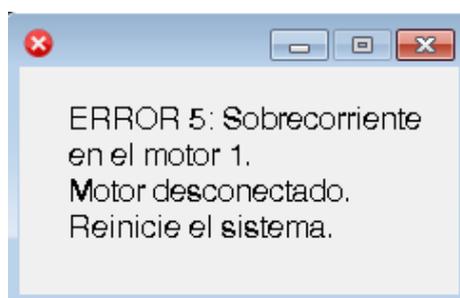


Figura 4.32. Ventana de sobrecorriente en uno de los motores

La ventana de la Figura 4.33 aparece si ningún error se ha producido y el robot ha ejecutado el código ordenado. Posteriormente la instrucción se guarda en el historial de comandos para que el operador tenga una referencia del código usado.

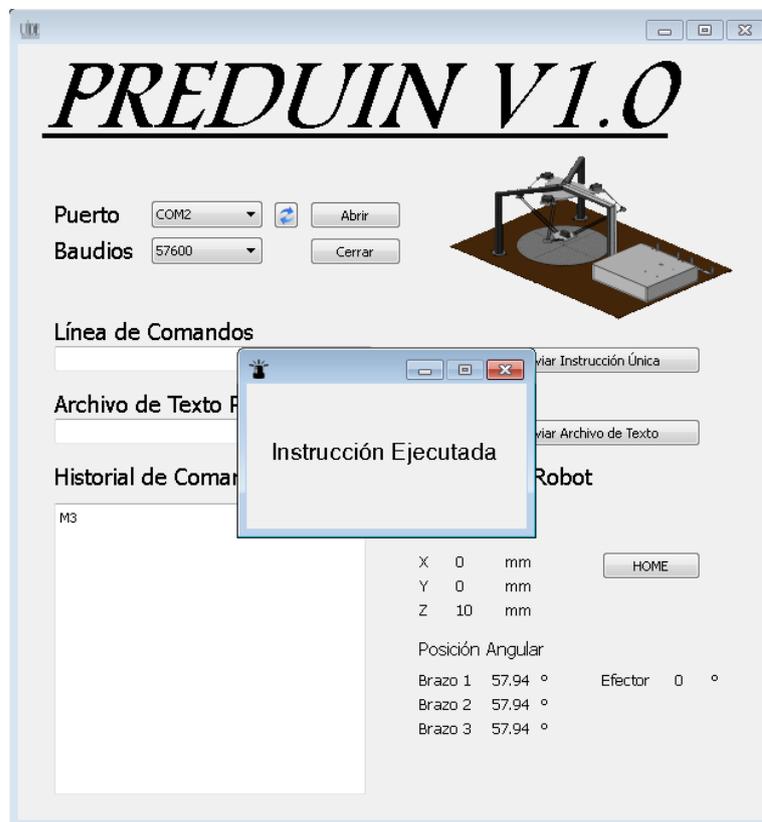


Figura 4.33. Ventana emergente de instrucción ejecutada exitosamente

4.2.2. PRUEBA DE MOVIMIENTO Y REPETITIVIDAD

Para el cálculo del error se parte del hecho que el movimiento define una línea recta desde el origen. La longitud de esta línea se define según (4.1):

$$L = \sqrt{Vx^2 + Vy^2} \quad (4.1)$$

Donde:

- L longitud de la recta, en mm;
- Vx valor en X desde el origen, en mm;
- Vy valor en Y desde el origen, en mm.

Si a esta recta se agregan los errores respectivos se obtiene (4.2):

$$L \pm e_L = \sqrt{(Vx \pm e_x)^2 + (Vy \pm e_y)^2} \quad (4.2)$$

Donde:

e_L error en la longitud, en mm;

e_x error en eje X, en mm;

e_y error en eje Y, en mm.

Según la teoría de propagación de errores [32] se tiene (4.3):

$$e_x^n = n \cdot e_x \quad (4.3)$$

Donde:

n coeficiente del error, adimensional.

Aplicando (4.3) en (4.2) se obtiene (4.4):

$$\begin{aligned} e_L &= \sqrt{(e_x)^2 + (e_y)^2} \\ e_L &= \sqrt{2 \cdot e_x + 2 \cdot e_y} \\ e_L &= \sqrt{2 \cdot (e_x + e_y)} \\ e_L &= 0.5 \cdot (2 \cdot (e_x + e_y)) \\ e_L &= e_x + e_y \end{aligned} \quad (4.4)$$

Para una mejor referencia del error se utiliza su valor porcentual respecto a la magnitud medida, el cual se define por (4.5)

$$e\% = \frac{e}{V} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Donde:

$e\%$ error porcentual de la magnitud;

e error calculado;

V valor ideal de la magnitud medida.

En esta prueba se evalúa la capacidad del robot para realizar movimientos precisos dentro de su área de trabajo. Se seleccionan 16 puntos dentro de la misma para llevar a cabo esta prueba. La misma consiste en tomar 5 muestras de la posición final del movimiento desde el origen a cada uno de estos puntos selectos. Posteriormente se

calcula el error promedio de las medidas respecto a la posición ideal que se le fue ordenada al robot. Cada movimiento parte desde el origen para facilitar el cálculo y poner a prueba la repetitividad del movimiento desde un punto fijo. La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos del muestreo de datos y cálculo de errores en los movimientos del robot. En la sección 1 del Anexo F se encuentran tabulados todos los valores obtenidos en las muestras de esta prueba.

Tabla 4.1. Cálculos del error en el movimiento del robot

Muestras	Valores Ideales		Valores Promedio Obtenidos		Errores Obtenidos por Eje		Errores Totales	
	Vx (mm)	Vy (mm)	Px (mm)	Py (mm)	ex (mm)	ey (mm)	eL (mm)	e%
1	40	40	42,2	38,6	2,2	1,4	3,6	6%
2	40	-40	44	-40,6	4	0,6	4,6	8%
3	-40	40	-44,2	39,8	4,2	0,2	4,4	8%
4	-40	-40	-38,8	-40,4	1,2	0,4	1,6	3%
5	80	80	76,2	78,2	3,8	1,8	5,6	5%
6	80	-80	82,8	-80	2,8	0	2,8	2%
7	-80	80	-82,4	80	2,4	0	2,4	2%
8	-80	-80	-77,2	-78,6	2,8	1,4	4,2	4%
9	120	120	112	114	8	6	14	8%
10	120	-120	115,4	-124,4	4,6	4,4	9	5%
11	-120	120	-117,6	106	2,4	14	16,4	10%
12	-120	-120	-114	-97	6	23	29	17%
13	200	0	197,8	1,8	2,2	1,8	4	2%
14	-200	0	-198,8	0,8	1,2	0,8	2	1%
15	0	200	2,6	177	2,6	23	25,6	13%
16	0	-200	12	-165	12	35	47	24%

Se aprecia que los errores son menores al 10% en la mayor parte del área de trabajo del robot. Cabe mencionarse que hay un factor adicional que perjudica al movimiento del robot y que no fue considerado en el diseño inicial: La adición de juntas rotacionales agrega 3 grados de libertad extra al robot. Debido a esto, la base inferior puede rotar ligeramente respecto a cualquier eje sin que dicho movimiento involucre a los actuadores. En consecuencia, al ordenar un movimiento desde la HMI existe la probabilidad de que la base inferior del robot se deforme por la falta de control sobre los 3 GDL adicionales. Sin embargo, el movimiento del robot si se aproxima al punto requerido en la mayoría de muestras.

Para visualizar de mejor manera el impacto de los errores calculados sobre el movimiento del robot, se grafica una aproximación de las zonas donde los errores calculados tienen mayor influencia. Esto se muestra en la Figura 4.34.

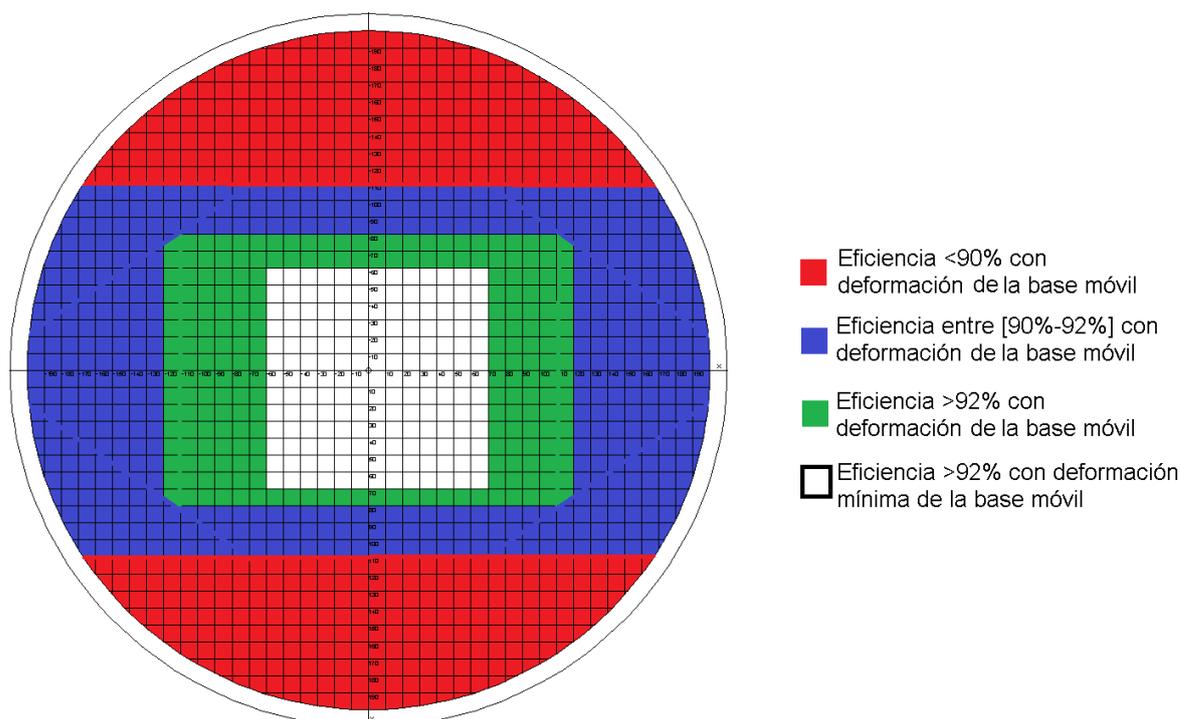


Figura 4.34. Gráfica de la eficiencia del robot en su área de trabajo

Con la ayuda de este análisis se comprueba que el robot funciona con eficiencia mayor al 92% en la mayor parte de su espacio de trabajo pese a los inconvenientes presentados. En la siguiente subsección se realiza la prueba de movimiento con diferentes valores de carga en el efector.

4.2.3. PRUEBAS DE MOVIMIENTO CON CARGA

Esta prueba pretende identificar la influencia de la carga en el efector sobre el error producido en el desplazamiento del robot. Para ello se consideran tres movimientos, cada uno más extenso que el anterior, entre dos puntos del área de trabajo. En cada uno se toman de igual manera 5 muestras para obtener un desplazamiento promedio. La peculiaridad de esta prueba es la adición de carga sobre el efector la cual puede tener valores de 50, 100, 200 y 300 g. Si bien esta última sobrepasa el límite dimensionado de 200g, servirá para obtener una respuesta del robot a un sobrepeso del 150%. Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 4.2. En la sección 2 del Anexo F se encuentran tabulados todos los valores obtenidos:

Tabla 4.2. Cálculo de errores en el movimiento del robot con carga

Factores \ Movimientos		Movimiento 1	Movimiento 2	Movimiento 3	Error % Promedio
		P1(0,40,0) P2(-100,0,0)	P1(80,-40,0) P2(-80,120,0)	P1(-150,10,0) P2(150,-10,0)	
Masa 50g	Vx	-98	-82	141	3%
	Vy	0,4	112	-7,6	
	Vz	0	0	0	
	e%	2%	4%	4%	
Masa 100g	Vx	-103	-88	140,4	5%
	Vy	1,4	113	-9,6	
	Vz	0	0	0	
	e%	4%	7%	3%	
Masa 200g	Vx	-103	-86	143	4%
	Vy	0,6	110	-9,2	
	Vz	0	0	0	
	e%	3%	7%	3%	
Masa 300g	Vx	-105	-88	141	6%
	Vy	0,4	105	-9,6	
	Vz	0	0	0	
	e%	5%	10%	3%	

Es importante determinar la relación de dependencia entre los errores promedio en el movimiento y los diferentes valores de carga. Para ello, a partir de los valores obtenidos en la Tabla 4.2, se realiza una gráfica de dispersión con el fin de encontrar la relación directamente proporcional entre los dos factores. La gráfica resultante se muestra en la Figura 4.35.

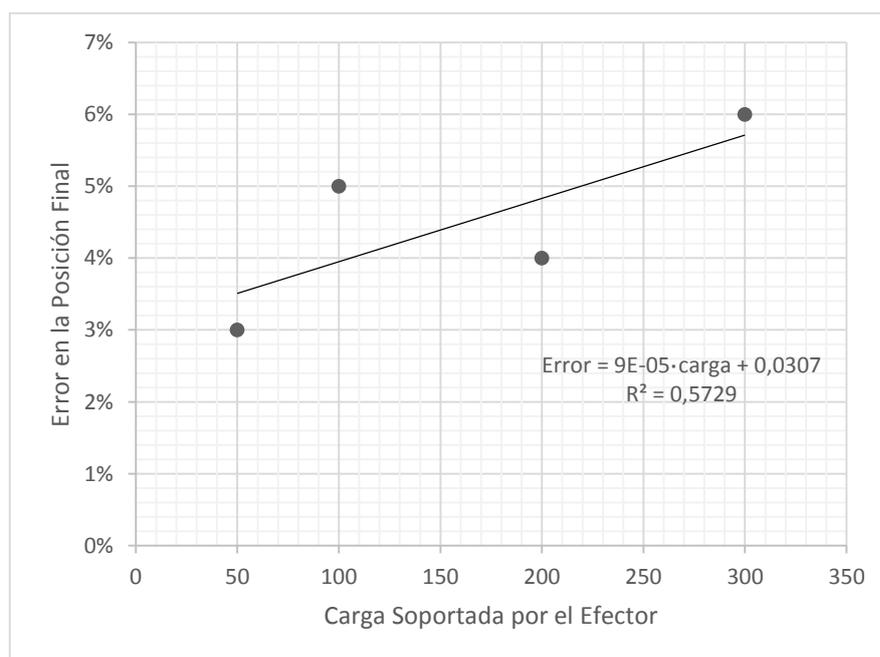


Figura 4.35. Gráfica de relación carga vs error en movimiento del robot

De esta ilustración se puede deducir que existe una ligera relación de dependencia entre los factores analizados. Una correlación de 0,57 no es representativa y puede deducirse que el error en la posición final no depende únicamente de la carga soportada sino que este a su vez se produce por otras causas como por ejemplo fallas en la construcción del prototipo. Para un análisis más confiable debería utilizarse una mayor cantidad de muestras que respalden las conclusiones del caso. Sin embargo, se aprecia que el robot ha respondido con eficiencia mayor al 92% en el movimiento de carga, inclusive en la condición de sobrepeso.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede afirmar que el robot cumple con la especificación de carga y mantiene un error del 6% en la posición final del movimiento ordenado.

CONCLUSIONES

- El robot cumple con las especificaciones planteadas con una eficiencia del 92% en su movimiento dentro del área de trabajo. El hecho que el error crezca conforme el punto sea más lejano demuestra la característica de los robots delta que indica que estos deben emplearse para áreas de trabajo pequeñas.
- Realizadas las pruebas de funcionamiento se determinó que los errores del robot están dentro de la tolerancia aceptable de diseño.
- El uso de juntas rotacionales añade 3 GDL adicionales al robot los cuales no son controlables con el modelo matemático planteado y perjudican la posición del efector final del robot delta disminuyendo su efectividad.
- Se han preparado prácticas de laboratorio para este robot que, junto a la teoría registrada en este documento, facilitan la comprensión del modelo cinemático y el manejo de robots delta cuya presencia en las industrias es cada vez más notable.
- Se ha implementado una HMI sencilla para el usuario la cual interpreta código G para facilitar la comunicación con el robot delta.
- Hay regiones a las que el robot llega con dificultad debido a diferentes factores no considerados en el diseño y también fallas en la construcción del prototipo.

- El uso de servomotores para los actuadores es óptimo en cuestiones de posicionamiento y manejo. A pesar de ello, estos también presentan ciertos problemas como son las corrientes parásitas inducidas al cable de control, la excesiva potencia consumida y la probabilidad de que los engranajes internos del servomotor se rompan debido a la fuerza ejercida por algún descontrol. Adicionalmente el control y la interpolación angular al parecer es menos eficiente de lo que se preveía en el diseño del robot.
- El uso de sensores de corriente es adecuado para proteger al circuito del robot. Los mismos informan al microcontrolador del consumo de cada actuador y, en caso del alguno entrar en zona de peligro, se desacopla automáticamente.
- Pese a que el robot fue dimensionado para soportar cargas de 200g, se mueve eficientemente con pesos mayores. Con una carga de 300g el robot alcanza los puntos ordenados sin problema. En el análisis de la Figura 4.34 se muestra que existe una ligera relación entre el peso soportado y el error en el movimiento pero debería usarse una mayor cantidad de muestras para verificar este hecho. No se tiene una referencia de cual sea el máximo peso que soporte el robot mientras se mueve pero este debe estar ligado con la capacidad del efector y la fuerza de atracción de los imanes que forman parte de las articulaciones del robot.
- Se utiliza la memoria EEPROM del microcontrolador para guardar la información de robot tal como el estado actual luego de cada movimiento. Esto permite mantener una configuración cargada antes de iniciar al robot y sirve como referencia para que este se ubique en su posición inicial al encenderse. De no existir esto se ocasionarían movimientos bruscos que afecten la integridad del robot, pudiendo romper la junta magnética de sus brazos en el peor de los casos.
- El uso de software libre para la parte informática del robot ayuda en la solución de problemas particulares en el desarrollo del proyecto, también abre las puertas a la creatividad del diseñador y da un mayor entendimiento en cada proceso de la creación del robot.

RECOMENDACIONES

- Es importante promover la teoría sobre robots delta pues estos tienen un manejo relativamente sencillo y un gran campo de aplicación en diversos proyectos.
- No manipular los sensores del robot cuando está encendido, ya que por estos pasa una gran cantidad de corriente eléctrica y el operador podría resultar herido.
- Se recomienda leer el manual de operación antes de poner en marcha al robot.
- No colocar al prototipo a trabajar en superficies inclinadas.
- Evitar manipular la base inferior del robot manualmente.
- Las juntas magnéticas deben ser revisadas periódicamente puesto que un movimiento inapropiado puede separarlas.
- Se recomienda tener instalada la HMI en una computadora única a la cual se conecte la máquina o en última instancia. También puede guardarse la HMI en una memoria USB puesto que no requiere instalación alguna.
- Para mejorar al prototipo y corregir ciertas fallas, se recomienda cambiar las juntas rotacionales para las articulaciones del robot. En el mercado existen juntas de bola que impiden la creación de los 3 GDL adicionales, pero estas tienen ciertas limitaciones como una rotación lateral de 45° y en consecuencia, reducen el área de trabajo del robot.
- Otra mejora para el prototipo actual puede ser el rediseño de los eslabones que componen la parte superior de las extremidades del robot. Lo ideal sería que el nuevo brazo constituya una sola pieza con los acoples, pues esto evitaría desviaciones en el robot ya sea por una mala unión de las partes o un mecanizado defectuoso. Este cambio podría traer como consecuencia un costo más elevado en la creación de las piezas pero también una mayor efectividad en el robot.
- Para un diseño futuro, se recomienda el uso de motores a paso para los actuadores ya que un robot delta lineal es más eficiente en el posicionamiento

dentro del área de trabajo siempre y cuando las paredes laterales que requiere no afecten al proceso sobre el cual se está trabajando.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Huapeng, “Advanced Synthesis of the DELTA Parallel Robot for a Specific Workspace” en *Parallel Manipulators, Towards New Applications*, 1era ed, Vienna, Austria: I-Tech Education and Publishing, 2008, pp. 207.
- [2] W. Bolton, *Mecatrónica: sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica*, 2da ed, México D.F, México: Alfaomega, 2001. pp. 339-350.
- [3] HITEC, “Hitec HS-311 Standard Economy Servo” [Online]. 2009. Disponible en: <http://www.servodatabase.com/servo/hitec/hs-311>
- [4] ALLEGRO, “ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor” [Online]. 2015. Disponible en: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx>
- [5] Naylamp Mechatronics, “Sensor de Corriente ACS712” [Online]. 2016. Disponible en: http://www.naylampmechatronics.com/48_sensor-de-corriente-ac712.html
- [6] F. Gao, W. Li, Z. Zhao, Z. Jin y H. Zhao, “New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs”, vol.37, pp. 1395-1411, Nov. 2002
- [7] H. Moreno, “Robots Paralelos: Conceptos y Aplicaciones” [Online]. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2012. Disponible en: <http://es.slideshare.net/htrmoreno/robots-paralelos>, pp. 4-12.
- [8] D. Tumbaco y W. Quimbita, “Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Delta con Implementación de un Cortador Láser CNC Utilizando la Plataforma Robotic Operating System (ROS) para la Elaboración de Artículos Publicitarios”, Tesis de Grado, Dep. Energ. y Mec., Univ. De las Fuerzas Armadas, Latacunga, Ecuador, 2014.
- [9] R. Clavel, “DELTA, A FAST ROBOT WITH PARALLEL GEOMETRY” presentado en el 18vo Simposio Internacional sobre robots Industriales, Lausana, Suiza, 1988, pp. 91-100.
- [10] M. Méndez, “Diseño de un Robot Paralelo”, 2009, sin publicar.
- [11] X. Meneses, M. Méndez, y E. Cortés, “Diseño y Control de un Robot Paralelo” presentado en el VI Congreso Nacional de Mecatrónica, San Luis Potosí, México, Nov. 8-10, 2007.

- [12] A. H. Alashqar, "Modeling and High Precision Motion Control of 3 DOF Parallel Delta Robot Manipulator", Tesis de Maestría, Dep. Ing. Eléc., Univ. Isl. de Gaza, Gaza, Palestina, 2007.
- [13] R. Norton, "Fundamentos de Cinemática" en *Diseño de Maquinaria*, 4ta ed, México D.F, México: McGraw-Hill, 2009, pp. 47-75.
- [14] ATCP, "Maderas" [Online]. Brasil: Asociación Brasileira de Normas Técnicas, 2014. Disponible en: <http://www.atcp.com.br/es/productos/caracterizacion-de-materiales/propiedades-materiales/tablas-propiedades/maderas.html>
- [15] J. Craig, "Inverse manipulator kinematics" en *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3era ed, Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2005, pp. 101-130.
- [16] A. Ollero, "Modelos cinemáticos de robots" en *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, 1era ed, México D.F, México: Alfaomega, 2008, pp. 39 -114.
- [17] ALTURN USA, "AHBS-3713HTG High Voltage Servo (Ultra Torque)" [Online]. 2014. Disponible en: <http://alturn-usa.com/products/PDF/AHBS-3713HTG+HV.pdf>
- [18] R. Mott, "Resistencia de Materiales", 5ta ed, México D.F, México: Pearson Education, 2009, pp. 458-476.
- [19] RichGetze, "BeamBoy Beam Analysis Tool" [Online]. 2004. Disponible en: <http://www.geocities.ws/richgetze/>
- [20] R. Budynas y J. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, 8va ed, México D.F, México: McGraw-Hill, 2006, pp. 470-476, 993, 994,1060.
- [21] DIPAC, "Catálogo de Acero", Manta, Ecuador, 2011. pp. 31.
- [22] R. Boylestad y L. Nashelsky, *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*, 10ma ed, México D.F: Prentice Hall, 2009. pp. 41-48, 161-200.
- [23] STMicroelectronics, "2N3904 Small Signal NPN Transistor" [Online]. 2003. Disponible en: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/2N3904.pdf>
- [24] VISHAY. "1N4001 thru 1N4007 Datasheet" [Online]. 2011. Disponible en: <http://www.vishay.com/docs/88503/1n4001.pdf>
- [25] SEMELAB, "LM7808 Datasheet" [Online]. 2010. Disponible en: http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/37/54063_DS.pdf
- [26] HSMC, "TIP22C Datasheet" [Online]. 2004. Disponible en: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/65228/HSMC/TIP22C.html>
- [27] M. Rashid, *Electrónica de Potencia*, 3era ed, México D.F, México: Prentice Hall, 2008. pp. 791-801.

- [28] ATMEL, “Atmega 328/P” [Online]. 2016. Disponible en: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf
- [29] ALTEK, “750 Watt ATX Power Supply” [Online]. 2009. Disponible en: http://static.highspeedbackbone.net/pdf/ULT-LSP750_Manual.pdf
- [30] N. Fink, “ANSI PCB Trace Width” [Online]. 2010. Disponible en: <http://www.desmith.net/NMdS/Electronics/TraceWidth.html>
- [31] J. Rueda, “Metodología para el Diseño de un Robot Paralelo Industrial Tipo Delta”, Tesis de Grado, Univ. Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, 2008.
- [32] B. Rodríguez, D. Abreu, M. Paiz, I. Rodríguez y A. García, “Teoría de errores” [Online]. España: Universidad de la Laguna, 2014. Disponible en: https://campusvirtual.ull.es/ocw/pluginfile.php/5887/mod_resource/content/1/tema1/ME1-errores.pdf