

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Mecatrónico*

PROYECTO TÉCNICO:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
POSICIONAMIENTO CARTESIANO ASISTIDO POR
COMPUTADOR”**

AUTORES:

DAVID SEBASTIÁN BARRERA CORDERO

ESTEBAN FABRICIO PINOS PINOS

TUTOR:

ING. PATRICIO FERNANDO URGILÉS ORTIZ, Ph.D

CO-TUTOR:

ING. JOHN IGNACIO CALLE SIGÜENCIA, Ph.D

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, David Sebastián Barrera Cordero con documento de identificación N° 0106740772 y Esteban Fabricio Pinos Pinos con documento de identificación N° 0106698772, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO CARTESIANO ASISTIDO POR COMPUTADOR”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecatrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero del 2021



Barrera Cordero David Sebastián

C.I. 0106740772



Pinos Pinos Esteban Fabricio

C.I. 0106698772

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO CARTESIANO ASISTIDO POR COMPUTADOR”**, realizado por David Sebastián Barrera Cordero y Esteban Fabricio Pinos Pinos, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero del 2021



Ing. Patricio Fernando Urgilés Ortiz, Ph.D

C.I. 0102137593

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, David Sebastián Barrera Cordero con documento de identificación N° 0106740772 y Esteban Fabricio Pinos Pinos con documento de identificación N° 0106698772, autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO CARTESIANO ASISTIDO POR COMPUTADOR”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, febrero del 2021



David Sebastián Barrera Cordero

C.I. 0106740772



Esteban Fabricio Pinos Pinos

C.I. 0106698772

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
AGRADECIMIENTOS.....	IX
DEDICATORIAS.....	X
PRÓLOGO	XI
RESUMEN	XII
1. INTRODUCCIÓN	XIII
2. PROBLEMA DE ESTUDIO.....	XIV
2.1. ANTECEDENTES.....	XIV
2.2. IMPORTANCIA Y ALCANCE	XV
3. OBJETIVOS	XVI
3.1. OBJETIVO GENERAL	XVI
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	XVI
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
4.1. CONCEPTOS MECÁNICOS	1
4.1.1. Guías lineales.....	1
4.1.2. Tornillos de bola.....	2
4.1.3. Procesos de mecanizado	3
a)Torneado.....	3
b)Taladrado.....	4
c)Fresado	5
d)Rectificado	7
4.1.4 Transmisiones de movimientos	7
4.2 CONCEPTOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	8
4.2.1. Motor a pasos	8
4.2.1.1 Imán permanente [21] [22].....	8
4.2.2. Sistema daq.....	9
4.2.2.1 Sistema CompactDAQ	11

4.2.4. Sensores o transductores.....	12
4.2.5. Protocolo de comunicación tcp/ip	13
4.2.6. Control de posicionamiento aplicando conceptos mecatronicos.....	15
5. Marco Metodológico	16
5.1. DEFINICIÓN DE PARAMETROS DE DISEÑO Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	16
5.1.1. Diseño conceptual.....	16
5.1.2. Requerimientos	16
5.1.3. Módulos de diseño.....	17
5.2. ALTERNATIVAS DE DISEÑO PARA CADA MÓDULO	17
5.2.1. Módulo 1: sistema de guiado.....	18
5.2.1.1. Sistema de riel y guía deslizante.....	18
5.2.1.2. Guía lineal con rodillos perfilados.....	19
5.2.1.3. Guiado por rodamiento lineal	19
5.2.2. Módulo 2: sistema de transmisión de movimiento.....	20
5.2.2.1. Husillo de bolas y tuerca	20
5.2.2.2. Sistema piñón-cremallera	21
5.2.2.3. Tornillo y tuerca de potencia	22
5.2.3. Módulo 3: sistema motriz.....	23
5.2.3.1. Servomotor	23
5.2.3.2. Motor a pasos	24
5.2.4. Matriz de selección.....	24
5.3. DISEÑO MECÁNICO	26
5.3.1. Requerimientos generales.....	26
5.3.1.1. Recorrido de los ejes.....	26
5.3.1.2. Dimensiones de la máquina.....	27
5.3.1.3. Condiciones críticas del sistema.....	28
5.3.1.4. Diseño del sistema mecánico.....	28
5.3.2. Selección de guías lineales	32
5.3.2.1. Selección de la guía lineal para el eje y.....	39
5.3.3 Elección del tornillo de bolas	43
5.4. DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO CARTESIANO	45
5.4.1. Selección de los actuadores	45

5.4.2. Características motor paso a paso.....	46
5.4.2.1. Control del motor mdrive	51
5.4.3. Componentes del controlador del sistema.....	58
5.4.3.1. Selección de la fuente de poder	59
5.4.3.2. Módulos para el chasis cdaq-9178	60
5.4.3.3. Selección de los sensores.....	62
5.4.4. Diseño electrónico	64
5.4.5. Selección del software de control.....	65
5.4.5.1 Diseño de la lógica de control	66
5.5. DESARROLLO DEL SISTEMA MECÁNICO	73
5.5.1. Implementación de la estructura de los ejes	74
5.5.1.1. Estructura eje x	74
5.5.1.2. Estructura eje y	80
5.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO	83
5.7. DISEÑO DEL SOFTWARE.....	85
6. RESULTADOS	86
6.1. PRUEBAS DE POSICIONAMIENTO	87
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. COMPARACIÓN RENDIMIENTO HUSILLO DE BOLAS [4].....	2
FIGURA 2. DIFERENTES PROCESOS DE MECANIZADO [5]	3
FIGURA 3. PROCESO DE AVELLANADO [5].....	5
FIGURA 4. DIFERENTES PROCESOS PARA FRESADORA [6].....	5
FIGURA 5. VELOCIDAD DE CORTE EN FRESADORA [5]	6
FIGURA 6. RODAMIENTOS [15]	7
FIGURA 7. MOTOR DE PASO DE IMAN PERMANENTE [22]	9
FIGURA 8. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DAQ[24].....	10
FIGURA 9. PROCESO DE COMUNICACIÓN MEDIANTE DISPOSITIVO DAQ[25]	11
FIGURA 10. COMPONENTES DE LA COMPACTDAQ [27].....	12
FIGURA 11. NIVELES FUNCIONALES PARA COMUNICACIÓN TCP/IP [30]	13
FIGURA 12. CONTROL EN UN SISTEMA MECATRÓNICO [15].....	15
FIGURA 13. GUÍA DE PERFIL [31]	18
FIGURA 14. GUÍA POR PERFILES C [32]	19
FIGURA 15. GUÍA POR RODAMIENTO LINEAL [33]	20
FIGURA 16. HUSILLOS DE BOLAS [34].....	21
FIGURA 17. PIÑÓN-CREMALLERA[35].....	21
FIGURA 18. TORNILO Y TUERCA CONVENCIONAL [36]	22
FIGURA 19. ARQUITECTURA DE UN SERVOMOTOR[37]	23
FIGURA 20. MOTOR PASO A PASO [38].....	24
FIGURA 21. COMBINACIONES MECÁNICAS POSIBLES.....	25
FIGURA 22. DIMENSIONES GENERALES DE LA MÁQUINA.....	27
FIGURA 23. DISPOSICIÓN DE EJES	28
FIGURA 24. DISEÑO DEL SISTEMA EN SOLIDWORKS	29
FIGURA 25. SISTEMA MECÁNICO EJE X	29
FIGURA 26. SISTEMA MECANICO EJE Y	30
FIGURA 27 ELEMENTOS EJE Y	32
FIGURA 28. ÁNGULO DE RIEL [39]	33
FIGURA 29. GUÍAS LINEALES [40].....	34
FIGURA 30. ELEMENTOS DEL EJE Y CON SUS RESPECTIVOS PESOS Y DISTANCIAS.....	36
FIGURA 31. MARCO DE ALUMINIO CON SU CENTRO DE GRAVEDAD.....	40
FIGURA 32. MOMENTOS GENERADOS EN EL EJE Y	40

FIGURA 33. MOMENTO GENERADO POR EL MARCO DE ALUMINIO SOBRE EL PATÍN	41
FIGURA 34. MOMENTO GENERADO POR LAS BARRAS	42
FIGURA 35. TUERCA SFU1605 [41].....	44
FIGURA 36. SOPORTE FIJO BK12 [50].....	44
FIGURA 37. SOPORTE BF12 [51].....	45
FIGURA 38. PAR VS VELOCIDAD SEGÚN EL VOLTAJE [44]	46
FIGURA 39. FUNCIONAMIENTO MOTOR A PASOS SECUENCIA NORMAL [59].....	47
FIGURA 40. FUNCIONAMIENTO MOTOR A PASOS SECUENCIA NORMAL [59].....	48
FIGURA 41. DIMENSIONES DEL MOTOR [49].....	50
FIGURA 42. DIMENSIONES DEL MOTOR [49].....	51
FIGURA 43. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL [49].....	58
FIGURA 44. FUENTE 24VDC [53]	60
FIGURA 45. CONEXIÓN CANAL MÓDULO 9403 [54].....	61
FIGURA 46. CONECTOR NI 9923 PINOUT 48 [55]	61
FIGURA 47. MÓDULO LM 393 [56].....	63
FIGURA 48. FIN CARRERA MECÁNICO [57]	63
FIGURA 49. FUNCIONAMIENTO FIN CARRERA [58]	63
FIGURA 50. ESQUEMA DE CONTROL.....	64
FIGURA 51 MÁQUINA DE ESTADOS FINITOS	67
FIGURA 52 ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO.....	68
FIGURA 53. PERFIL PARA EL CÁLCULO DE TIEMPOS.	69
FIGURA 54. INTERPOLACIÓN LINEAL DE EJES	71
FIGURA 55. MONTAJE CON TORNILLOS DE SUJECIÓN	75
FIGURA 56. LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE	75
FIGURA 57. MONTAJE DEL RIEL.	76
FIGURA 58. ÍNGRESO DE TORNILLOS	76
FIGURA 59. AJUSTE DE TORNILLOS	76
FIGURA 60. APRIETE DE TORNILLOS DE LA GUÍA. [39]	76
FIGURA 61. SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	77
FIGURA 62. MAQUINÁRIA DE LA UNIVERSIDAD	78
FIGURA 63. RANURADO EN LA BASE DEL EJE X	78
FIGURA 64. MONTAJE DE LA ESTRUCTURA DEL EJE X.....	79
FIGURA 65. MONTAJE DE LA ESTRUCTURA DEL EJE Y.....	82
FIGURA 66. DIAGRAMA DE CONEXIONES EJE X.....	83

FIGURA 67. DIAGRAMA DE CONEXIONES EJE Y.....	84
FIGURA 68. DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL TABLERO.....	84
FIGURA 69 PROGRAMA MODO POSICIONAMIENTO	85
FIGURA 70 PROGRAMA MODO ESCÁNER	85
FIGURA 71 PROGRAMA MODO GEOMETRÍA	86
FIGURA 72 IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA/ELÉCTRICA	86
FIGURA 73. MÁQUINA FINAL	87
FIGURA 74. ESPACIO DE POSICIONAMIENTO.....	87
FIGURA 75. DIFERENTES COORDENADAS UBICADAS	88
FIGURA 76. PATRÓN A DIFERENTES ALTURAS	89
FIGURA 77. PRUEBAS MODO ESCANER	90
FIGURA 78. PRUEBAS MODO GEOMETRIA, SOFTWARE.....	90
FIGURA 79. GEOMETRIA DEFINIDA	91

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FENÓMENOS DE DIVERSOS SENSORES.....	12
TABLA 2. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN EN DIFERENTES NIVELES FUNCIONALES.....	14
TABLA 3. MÓDULOS CONSIDERADOS DENTRO DEL DISEÑO.....	17
TABLA 4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS GUÍA DE PERFIL.....	18
TABLA 5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS CARROS PERFIL C.....	19
TABLA 6. VENTAJA Y DESVENTAJA DEL RODAMIENTO LINEAL.....	20
TABLA 7. VENTAJA Y DESVENTAJA DEL HUSILLO DE BOLAS.....	21
TABLA 8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PIÑÓN CREMALLERA.....	22
TABLA 9. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA TORNILLO TUERCA.....	22
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DEL SERVOMOTOR.....	23
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS MOTOR PASO A PASO.....	24
TABLA 12. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	26
TABLA 13. DIMENSIONES.....	27
TABLA 14. PESOS DE ELEMENTOS PARA EL EJE Y.....	30
TABLA 15. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS GUÍAS.....	34
TABLA 16. PATRÓN DE MONTAJE DE LA GUÍA.....	35
TABLA 17. CÁLCULO DEL MOMENTO M_p GENERADO POR LOS ELEMENTOS.....	37
TABLA 18. MOMENTO M_r GENERADO EN EL EJE Y.....	38
TABLA 19. FACTOR DE SEGURIDAD EJE X.....	39
TABLA 20. FACTOR DE SEGURIDAD EJE Y.....	42
TABLA 21. MODELOS TORNILLOS DE BOLAS.....	43
TABLA 22. DIFERENCIAS ENTRE ACTUADORES.....	45
TABLA 23. ÁNGULOS DE PASO.....	47
TABLA 24. SELECCIÓN DEL MOTOR.....	49
TABLA 25. CARACTERÍSTICAS MOVIMIENTO MDRIVE.....	50
TABLA 26. TORQUES MOTOR MDRIVE.....	51
TABLA 27. COMANDOS MDRIVE.....	51
TABLA 28. ESPECIFICACIONES DEL CHASIS CDAQ.....	58
TABLA 29. ESPECIFICACIONES FUENTES DC.....	60
TABLA 30. CARACTERÍSTICAS MODULO 9403.....	61
TABLA 31. CARACTERÍSTICAS MODULO 9223.....	62

TABLA 32. ELEMENTOS SISTEMA DE CONTROL	65
TABLA 33. SECUENCIA DE OPERACIONES DEL SISTEMA	66
TABLA 34. PARÁMETROS DE MOVIMIENTO	70
TABLA 35. TIEMPOS DE MOVIMIENTO	72
TABLA 36. CARACTERÍSTICAS DE MATERIA PRIMA EJE X	74
TABLA 37. COMPONENTES MECANICOS ADQUIRIDOS.....	79
TABLA 38. CARACTERÍSTICAS DE MATERIA PRIMA EJE Y	80
TABLA 39. MEDICIONES DE POSICIONAMIENTO	88
TABLA 40. PARÁMETROS DE PRUEBA	89

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios y la Virgen María por haberme acompañado siempre, no sólo dentro de la vida estudiantil sino durante toda la vida.

A mis padres Manuel y Eulalia, los cuales me ofrecieron su apoyo incondicional y por ser el oído para las anécdotas durante esta etapa universitaria.

A mis hermanos Diana, Miguel y Andrés por cuidarme y soportarme siempre

Al resto de mi familia por su apoyo y amor incondicional

A cada uno de los amigos en la universidad que de una u otra manera formaron mi carácter e hicieron que esta sea una experiencia agradable y divertida.

A los ingenieros Fernando Urgilés y John Calle por su gran apoyo, paciencia, disposición y recomendaciones en todos los retos presentados.

A mi compañero de tesis Esteban por el tiempo y éxitos compartidos.

Barrera Cordero David Sebastian

Agradezco en primer lugar a la Virgen María y a Dios por el apoyo espiritual que siempre e recibido para avanzar en este tiempo de estudio dentro de la Universidad Politécnica Salesiana.

Mis padres que fueron un apoyo fundamental en esta travesía, por ayudarme en momentos difíciles, por creer en mí en cada momento y siempre al terminar el día terminar con una sonrisa porque ellos estaban junto a mí.

Mis hermanos que siempre me han ayudado cuando les he necesitado ya que a lado de ellos es tener alegría y felicidad plena.

Mis amigos que siempre estuvieron ahí para contarles anécdotas siempre riendonos y desestresandonos porque parte de la universidad es el disfrutar.

Los Ingenieros John Calle, Fernando Urgilés y Paul Chasi que con su paciencia lograron formarme de una manera responsable y alegre para cualquier reto que se me ponga en adelante.

Por último quiero agradecer a mi gran amigo David Barrera que me hizo entender que el trabajo en equipo se puede lograr muchas cosas que en trabajo individual.

Esteban Fabricio Pinos Pinos

DEDICATORIAS

El presente proyecto va dedicado a Dios, a mis padres Manuel y Eulalia cuyo ejemplo siempre fue una guía para llegar al éxito, mis hermanos y amigos que sin ellos y su apoyo no hubiese momentos de dicha y alegría

David Sebastián Barrera Cordero

Este proyecto de titulación va dedicado especialmente para mis padres y hermanos que fueron el motor esencial para nunca bajar los brazos en momentos difíciles, a mis tíos y primos por su ayuda que me han brindado, a mis amigos que me enseñaron a disfrutar y estar siempre alegres, así mismo a los docentes que con su enseñanza y dedicación brindada no sería llamado Ingeniero.

Esteban Fabricio Pinos Pinos

PRÓLOGO

El trabajo de titulación que se va a presentar a continuación lleva como título “Diseño y construcción de un sistema de posicionamiento cartesiano asistido por computador”: ¿En qué consiste? La base de esta investigación se ha llevado a cabo en el Grupo de investigación de ingeniería Biomédica GIIB-UPS. Este documento ha sido escrito como requisito de graduación para la carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Politécnica Salesiana. El periodo de investigación para el proyecto ha sido desde octubre del 2019 hasta diciembre del 2020.

El proyecto se efectuó por solicitud del Ing. Fernando Urgilés miembro de la Carrera de Ingeniería Biomédica y del grupo de investigación GIIB-UPS para probar diferentes experimentos que nos ayudaran a entender el comportamiento de distintos fenómenos.

El proyecto inicio con un análisis del diseño de la máquina para que cumpliera con las características deseadas tanto en vibración como el desplazamiento en los dos ejes cartesianos, para lo cual se investigó sobre los componentes mecánicos que se podrá observar en la sección inicial.

En la siguiente sección se explica que metodología se va a utilizar para cumplir con los objetivos específicos planteados tanto en el ámbito mecánico, eléctrico e informático.

Así mismo se analizó la materia prima adecuada para el diseño y la construcción de los dos ejes X y Y, donde constan las propiedades físicas y químicas, mecánicas y estructura de materiales.

La implementación inicia con las etapas de mecanizado de la materia prima con los componentes mecánicos adquiridos y los elementos mecanizados dentro de los laboratorios de la Universidad.

También se establece el protocolo de comunicación para controlar los motores y los componentes electrónicos como el sensor home¹ y los fines de carrera.

Al final, se realiza un análisis de la trayectoria en ambos ejes, donde se observa la vibración, la velocidad de la trayectoria y demás parámetros que se pueden manipular en el sistema.

¹ Sensor Home:- Sensor que emite un pulso de 0 a 5V, donde se puede utilizar para posicionarse en un punto o para el cálculo de velocidad.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar, construir e implementar mecanismos de control de un sistema de posicionamiento en 2 dimensiones el cual debe poseer ciertas características especiales de acuerdo a la necesidad del GIIB-UPS. Prestando especial atención al diseño del interfaz humano máquina que sea de fácil manejo por parte de los usuarios.

En la sección cuatro se realiza una revisión bibliográfica de los términos a utilizarse en el diseño del sistema, el mismo que posee un fuerte soporte científico sobre el tema.

El diseño del sistema de posicionamiento cartesiano determina las características y especificaciones técnicas de cada una de las partes del mismo y describe aspectos teóricos y prácticos utilizados durante el diseño y construcción. Por ejemplo, la elección correcta de los diferentes elementos mecánicos para lograr una alta precisión que es lo que el sistema requiere, eligiendo así un tornillo de bolas que además de ser preciso permite reducir drásticamente la fricción, lo que permite que los motores que accionan el eje necesiten menos torque y por consecuencia su potencia y tamaño disminuye.

Dentro del diseño se define también la parte de control del sistema iniciando por los actuadores, los cuales fueron motores paso a paso elegidos por su capacidad de llegar a una posición exacta lo cual es una característica del sistema. El sistema de control se complementa con los sensores distribuidos en la máquina para la retroalimentación y el software de control elegido.

En la sección 5 y 6 describe la construcción del sistema y los resultados obtenidos en diferentes pruebas, donde al finalizar se incluye recomendaciones y planes de montaje definidos para cada uno de los elementos que conforman el sistema.

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto con enfoque investigativo se da a través de un plan estudio donde se vio la necesidad de crear una máquina que cumpla con las especificaciones planteadas tanto de vibración como desplazamiento.

Para el diseño de la máquina de posicionamiento cartesiano se debió seguir con una serie de condicionantes para que esta pueda ser apta para cualquier análisis que el Grupo de investigación en Ingeniería Biomédica lo requiera.

Una de las condicionantes planteadas fue la vibración ya que durante el barrido de la señal esta debe ser precisa para la toma de datos sin distorsión alguna ya que esto podría provocar una recolección de datos erróneos por lo que se debió analizar varios diseños mecánicos para llegar a crear un diseño que reduzca la vibración del sistema.

Otro de las condicionantes es el desplazamiento traslacional que se realizó el barrido de la posición en las coordenadas cartesianas, para lo cual se vio distintos tipos de motores que cumpla tanto en torque como el paso, el desplazamiento tendrá que hacerse de manera precisa para que las posiciones obtenidas no sean erradas.

Este tipo de máquina nació de la necesidad de poder generar ciencia que beneficie a la humanidad ya que se podrá realizar análisis de diferentes fenómenos que la academia lo requiera dentro de la Universidad Politécnica Salesiana.

2. PROBLEMA DE ESTUDIO

2.1. ANTECEDENTES

La mecánica de precisión se puede definir como una técnica para la fabricación de piezas caracterizadas por la exactitud de su trabajo y el alto rendimiento en su posterior uso, el problema se inicia con la necesidad de un mecanismo que genere un desplazamiento en dos ejes (X, Y), el cual mantenga una tolerancia de error mínima de 0.1mm.

El eje X necesita ser diseñado de tal manera que su desplazamiento logre mantenerse rígido en todo el recorrido y el eje Y estará acoplado en el eje X, tendrá un diseño especial en forma de U el cual permita obtener dos puntos fijos en el eje Z.

El dispositivo estará destinado para su uso en el Grupo de Investigación de Ingeniería Biomédica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca (GIIB-UPS), como un sistema para la ejecución de pruebas y estudios.

El diseño y construcción tiene como meta obtener un mecanismo de desplazamiento mediante una reducción del tiempo de asentamiento de los actuadores que permitan el movimiento del sistema bajo las tolerancias establecidas.

La principal restricción del sistema mecatrónico estará basada en la supresión de las respuestas mecánicas no deseadas como la vibración, la cual podrá ser medida mediante un equipo para medición de vibraciones (ADASH) en cada uno de los movimientos lineales. La posición y velocidad de los actuadores serán controlados mediante una interfaz, la cual permite observar los parámetros del sistema (posición del actuador, posición eje, velocidad del actuador) en tiempo real.

La pregunta es:

¿Qué tan robusto debe ser el sistema mecatrónico para lograr el accionamiento preciso de los actuadores para el desplazamiento de cada uno de los ejes bajo las tolerancias dadas?

Esta pregunta será respondida en la sección de Conclusiones en este documento.

2.2. IMPORTANCIA Y ALCANCE

La Universidad Politécnica Salesiana se caracteriza por contar con una infraestructura adecuada para el ámbito preprofesional con laboratorios de última generación manteniéndose a la vanguardia de las últimas tecnologías, al contar con dichos laboratorios es posible construir un sistema mecatrónico de precisión que se encuentre a la par de sistemas similares existentes en el mercado[1] [2] como tornillos sin fin, tornillos de bolas, cremalleras, etc.; los cuales se encuentran en sistemas tales como impresoras 3D, máquinas de control numérico computarizado, estas máquinas necesitan de tal precisión para cada uno de sus movimientos.

Los sistemas de control actuales como el de una máquina de control numérico (FAGOR) son bastante robustos y aplicables a una diversidad de sistemas en el cual se necesita un tiempo rápido de respuesta, el cual es un factor clave en el diseño del sistema de posicionamiento dejando a un lado los efectos de la vibración presentes en el mismo.

El objetivo de diseñar un sistema de posicionamiento cartesiano que permita el desplazamiento en dos ejes (X,Y) con dos puntos fijos en el eje Z, es debido a que no existen este tipo de sistemas en el mercado por lo que se ve la necesidad de desarrollar un sistema con características específicas, teniendo como principal la reducción de la magnitud de la vibración en el diseño mecánico. En este caso los actuadores fueron adquiridos por el grupo GIIB y poseen las tolerancias definidas para el diseño, los sensores del sistema están adaptados a la necesidad de una toma de datos continua para lograr el control exacto de la posición del actuador en cada instante para obtener una tolerancia mínima de error con el uso de dispositivos que están a la vanguardia tecnológica.

El sistema mecatrónico a desarrollarse es la base para futuros proyectos en el Grupo de Investigación de Ingeniería Biomédica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca (GIIB-UPS), permitiendo el aporte a la universidad con el fin de generar ciencia que beneficie a la humanidad, entre ellos tenemos análisis de fisuras en aisladores eléctricos, medición de vibraciones, análisis de sonido entre otros.

El diseño de un sistema de posicionamiento asistido por computador es una excelente oportunidad para desarrollar habilidades profesionales, adquiriendo y aplicando conocimientos en diseño mecánico y sistemas de control, y la utilización de nuevas tecnologías poniéndonos a la vanguardia para competir ante la globalización mundial.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un sistema de posicionamiento cartesiano (X, Y) con dos puntos fijos en el plano Z, asistido por computador.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las variables requeridas para el diseño, considerando el problema planteado y un análisis del estado del arte para garantizar funcionalidad en el equipo.
- Diseñar un sistema mecánico el cual permita desplazamientos traslacionales en los ejes (X, Y), con el fin de obtener las tolerancias establecidas en función de la aplicación del equipo.
- Diseñar un sistema electrónico y de control que permita el movimiento de cada uno de los ejes de manera independiente, el cual pueda expandirse a otros dispositivos que el grupo de investigación lo requiera.
- Construir y ensamblar los componentes mecánicos, electrónicos y de control garantizando la funcionalidad de cada componente y su integración sinérgica en el sistema mecatrónico.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este punto se tratará sobre conceptos mecánicos en donde hace referencia a sistemas de guiado, transmisiones de movimientos, diferentes tipos de mecanizado, etc. Posteriormente se tratará sobre conceptos eléctricos y electrónicos donde se verá diversos tipos de motores, sensores, fuentes de protección entre otros. Por último, se verá un sistema de control óptimo para el sistema de posicionamiento cartesiano para eso se tendrá el protocolo de comunicación y posición de los ejes.

4.1. CONCEPTOS MECÁNICOS

4.1.1. GUÍAS LINEALES

Una guía lineal es un sistema empleado en máquinas para permitir un movimiento de traslación relativa entre dos piezas, este sistema debe tener la característica de favorecer la traslación entre las piezas con las menores pérdidas por fricción y a la vez tolerar las fuerzas que actúan en dirección perpendicular a la trayectoria, además de soportar los momentos generados en las 3 direcciones. [1]

Existen tres sistemas de guiado lineal, los cuales son: [2]

- 1) Guía lineal de contacto deslizante: En este tipo, el contacto entre los componentes del par prismático es de forma directa.
- 2) Guía lineal de contacto rodante: En este tipo, existen componentes entre las superficies de contacto (bolas, rodillos o ruedas) lo que permite reducir pérdidas por fricción frente al contacto deslizante.
- 3) Guía lineal hidrostática: En este tipo, existe un fluido a presión (aire, aceite, etc.) para evitar el contacto directo entre las superficies con el fin de reducir las pérdidas por fricción.

Las guías lineales que poseen un riel de perfil son adecuadas para aplicaciones donde se requiera una alta carga con una buena rigidez y gran exactitud, estas características son alcanzadas por el preciso mecanizado de las guías de bolas que se ajustan de forma estrecha logrando así un suave desplazamiento. [2]

4.1.2. TORNILLOS DE BOLA

Un tornillo de bolas convierte un movimiento de rotación en un movimiento lineal con la ventaja de conseguir la más baja pérdida por fricción posible, el mecanismo consiste en intercalar una hilera de bolas entre el tornillo y la tuerca con el fin de disminuir el desgaste. [3]

El mecanismo consiste en un eje roscado helicoidal que funciona como un tornillo de precisión consiguiendo un menor rozamiento y por lo tanto la fricción es baja, el esfuerzo se distribuye entre las bolas por lo que el mecanismo puede resistir cargas de mayor magnitud, además de poseer una alta precisión por lo que es adecuado para mecanismos de posicionamiento de alta precisión como máquinas de control numérico computarizado. [3]

El tornillo de bolas es superior a un tornillo normal ya que el mecanismo de bolas reduce la fricción logrando una mayor eficiencia en el rendimiento del mismo tal como se muestra en la figura 1, el porcentaje de rendimiento incrementa al incluir canales para bolas, reduciendo drásticamente la fricción. [3][4]

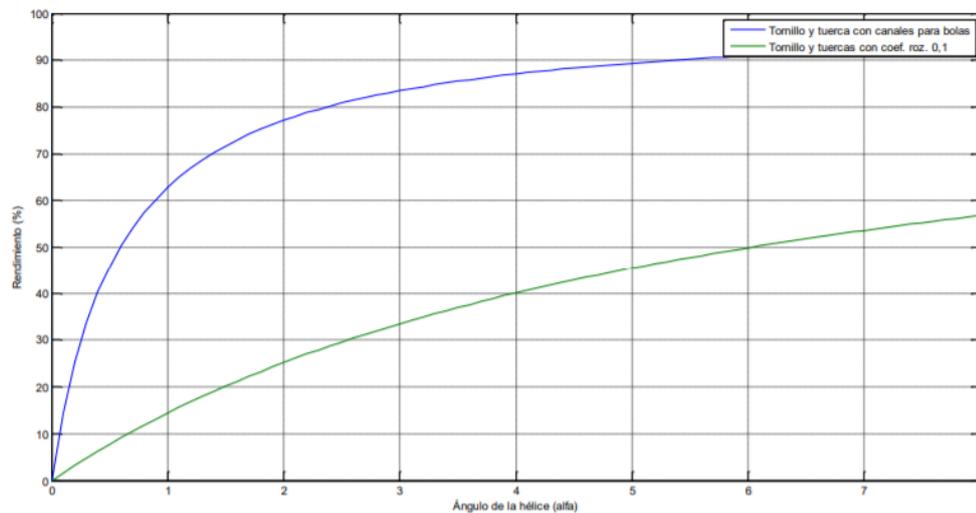


Figura 1. Comparación rendimiento husillo de bolas [4]

Los tornillos soportan una alta carga dinámica y larga vida útil, características que se logran en la precisión de su mecanizado que incluye laminado y rectificado. [4]

4.1.3. PROCESOS DE MECANIZADO

El proceso de fabricación mediante arranque de viruta es separar partes de material por procedimientos mecánicos mediante los filos de una herramienta con geometría definida. La figura 2 representa distintos procesos de mecanizado presentes en la industria. Los procedimientos de fabricación por arranque de viruta pueden clasificarse mediante la forma de corte DIN 8580. [5]

El arranque de virutas puede realizarse mediante máquinas en las cuales se necesita:

- Máquina-herramienta: torno, fresadora, taladro, cepilladora, etc.
- Herramienta: de un solo filo, por ejemplo, la cuchilla de torno, fresa, broca.
- Elementos de sujeción: elementos que unen la herramienta y la pieza a la máquina. [5]

Para lograr el arranque de viruta se necesita los siguientes movimientos relativos

- Movimiento de corte: movimiento en el cual se arranca viruta durante una revolución o durante una carrera
- Movimiento de avance: hace posible el arranque continuo de virutas
- Movimiento de penetración: determina el espesor de la capa de viruta a arrancar
- Movimiento de aproximación: lleva la herramienta hasta la superficie a trabajar. [5]

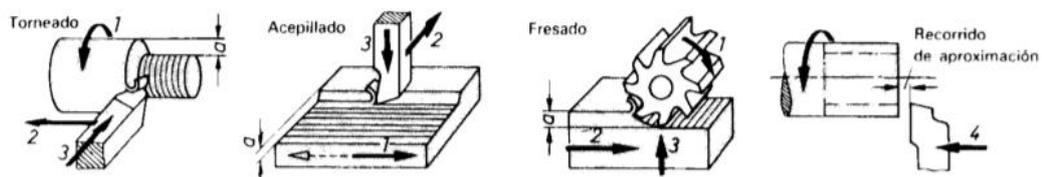


Figura 2. Diferentes procesos de mecanizado [5]

a) Torneado

El proceso de torneado consta de arrancar virutas con un útil de un filo, con una forma geométrica determinada, obteniendo piezas con sección transversal circular como bulones, casquillos, etc. [5]

La diversidad de la forma de las piezas de revolución se obtiene mediante distintos procesos de torneado, el cual puede ser interior o exterior, por ejemplo, las piezas cilíndricas se obtienen mediante cilindrado, las superficies planas mediante refrentado o torneado al aire, los conos mediante roscado cónico, etc. [5]

El fluido de corte es fundamental en el torneado, ya que ayuda a disminuir la temperatura entre la pieza y la herramienta y tiene además la tarea de lubricar el procedimiento de arranque de viruta. [5]

La tolerancia es una consideración dentro de la fabricación de la pieza, cuando se fabrica una pieza no se consigue la medida teórica prescrita, lo que se necesita es que la discrepancia de la medida se mantenga dentro de determinados límites. Por ejemplo, en un plano se indica una medida de 100mm con notación de 100 ± 0.2 , se le llama medida tolerada la cual está compuesta por la medida teórica (100) y las diferencias superior e inferior de 0.2mm, así la medida mínima es $100-0.2=99.8\text{mm}$ y la medida máxima es $100+0.2=100.2\text{mm}$. La diferencia entre estas medidas se le llama tolerancia ($100.2-99.8=0.4\text{mm}$), la medida obtenida en la fabricación se la denomina medida real y debe estar comprendida entre la medida mínima y la máxima. [5]

b) Taladrado

El taladrado es la operación para lograr agujeros en una pieza mediante el arranque de viruta mediante uno o varios filos (brocas), estas máquinas tienen los más diversos fines, se usa para alojar tornillos, remaches, o para dar paso a un líquido o gas. [5]

Para realizar esta operación se usa preferentemente los taladros, pero también se puede usar el torno. Además de por arranque de viruta, se pueden practicar agujeros mediante otros procedimientos, por ejemplo, mediante punzonado o taladrado. [5]

No se puede conseguir un taladrado si no se parte de un buen apoyo horizontal, la mesa debe estar libre de virutas y cuerpos pequeños y evitar que la broca cree un agujero que la mesa y tener en cuenta que al taladrar se generan momentos de giro que tienen tendencia a hacer girar la pieza, estos esfuerzos son sensibles cuando la punta de la broca sale del taladro por lo que la pieza debe ser asegurada ante ese giro con una entenalla o prensa, si la pieza es grande el propio peso las mantiene fijas. [5]

Por medio del avellanado se vuelven a trabajar agujeros previamente taladrados o dejados de fundición mediante las herramientas de penetrar adecuadas, la herramienta tiene filos que trabajan todos a la vez. En la figura 3 se presenta el proceso para el avellanado. [5]

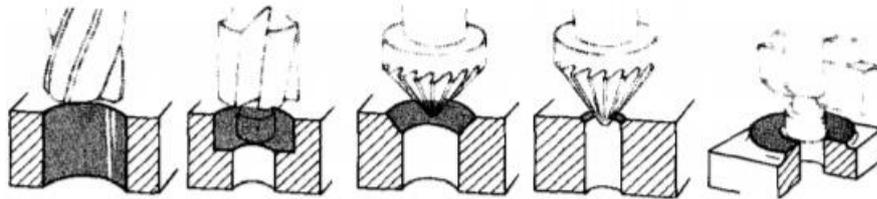


Figura 3. Proceso de avellanado [5]

c) Fresado

Fresar es arrancar virutas con una herramienta llamada fresa, la cual lleva múltiples filos de corte en movimiento de rotación, mediante este proceso se puede obtener a las piezas de superficies planas o curvas, de entalladuras, ranuras, dentados, etc. Para las piezas que tienen la mejor calidad superficial se acaban por rectificado. [5]

Existen dos procedimientos de fresado básicos:

- Fresado cilíndrico: el eje de la fresa se halla dispuesto de forma paralela a la superficie de trabajo de la pieza, la fresa arranca virutas con los filos de su periferia.
- Fresado frontal: el eje de la fresa es normal a la superficie de trabajo, la fresa corta con los dientes de la periferia y con los dientes frontales. [5]

Cada uno de los procedimientos de fresado conllevan diferentes procesos tales como contorneado, ranurado, etc. Los cuales se presentan en la siguiente figura.

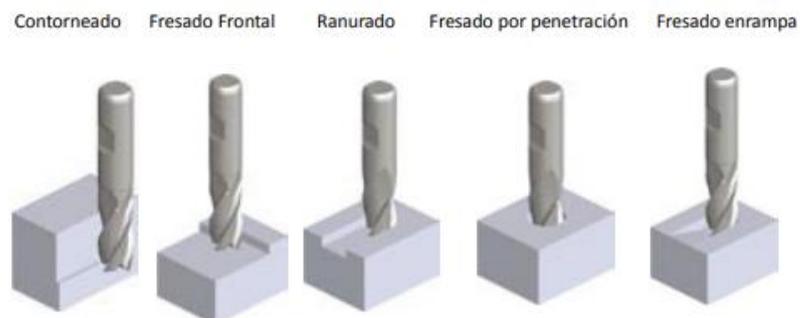


Figura 4. Diferentes procesos para fresadora [6]

La sujeción de las piezas tiene que ser firmes y seguras, si se aflojan pueden inutilizarse o romperse. Las piezas delgadas deben protegerse contra la flexión mediante piezas de apoyo. Otro aspecto importante es el número de revoluciones que depende del diámetro de la herramienta y de la velocidad de corte, el cual se entiende como el recorrido de un diente de la fresa en m/min y generalmente se toma de una tabla. Si la velocidad de corte es demasiado grande, los dientes pierden su filo de forma prematura y si, al contrario, la velocidad es baja, el rendimiento en la operación es pequeño. [6]

Para el cálculo de la velocidad de corte se usa la ecuación 1, la figura 5 presenta una tabla guía la cual nos ayuda a elegir la velocidad de corte adecuada para cada tipo de material a trabajar.

$$n = \frac{v \ 1000}{\pi d} \quad (1)$$

Donde:

v = velocidad de corte (m/min)

d = diámetro de la fresa (mm)

n = número de revoluciones (rpm)

Material	Fresa de acero rápido							Metal duro		
	v en m/min	s_z = mm/diente						v en m/min	s_z = mm/diente	
		Fresa cilíndrica	Fresa frontal cilíndrica	Fresa de disco	Fresa de vástago	Fresa de forma	Cabezal portacuchillas		Fresa cilíndrica	Cabezal portacuchillas
Fundición gris GG-15	18-22	0,2	0,15	0,07	0,07	0,07	0,3	55-65	0,2	0,3
Fundición gris GG-25	16-20	0,2	0,15	0,07	0,07	0,07	0,3	45-60	0,2	0,3
Fundición maleable GTW-40	16-20	0,2	0,2	0,07	0,07	0,07	0,3	45-60	0,15	0,2
Acero, p. ej.: St 50	20-24	0,2	0,15	0,07	0,06	0,07	0,3	80-120	0,15	0,2
Acero, p. ej.: St 60	18-20	0,15	0,1	0,06	0,06	0,06	0,2	70-100	0,15	0,2
Acero, p. ej.: St 70	12-16	0,1	0,1	0,06	0,06	0,06	0,2	60-100	0,15	0,2
Acero, p. ej.: 31 Ni Cro 14	12-16	0,15	0,1	0,1	0,06	0,06	0,15	60-90	0,1	0,15
Acero, p. ej.: 35 Ni Cro 18	10-14	0,1	0,1	0,07	0,05	0,05	0,1	60-90	0,1	0,1
Fund. de acero, p. ej.: GS-45	16-20	0,15	0,15	0,07	0,07	0,07	0,2	50-80	0,15	0,2
Bronce, p. ej.: GB ₂ 14	40-50	0,15	0,15	0,07	0,07	0,07	0,2	80-100	0,15	0,2
Latón, p. ej.: Ms 60	50-60	0,2	0,2	0,07	0,07	0,07	0,3	100-120	0,2	0,3
Aluminio Al	250-350	0,1	0,1	0,07	0,07	0,07	0,15	400-800	0,1	0,2
Fund. de aluminio	250-350	0,1	0,1	0,07	0,07	0,07	0,15	400-600	0,15	0,2
Materiales sintéticos	55-70	0,15	0,15	0,7	0,07	0,07	0,15	160-200	0,2	0,3

Figura 5. Velocidad de corte en fresadora [5]

d) Rectificado

Es un proceso de mecanizado en el cual se busca mejorar la tolerancia dimensional y el acabado superficial, logrando un mecanizado de precisión (con una tolerancia en μm), un acabado superficial fino. [7][8][9]

En el rectificado un grano abrasivo arranca una cantidad de material de pieza, las características de este proceso es que necesita una velocidad de corte mucho más alta, se obtiene un espesor de viruta mucho más pequeño. [7][8][9]

Existen diferentes tipos de rectificado: plano, cilíndrico y sin centros

4.1.4 TRANSMISIONES DE MOVIMIENTOS

Se denominan transmisiones mecánicas a los mecanismos que se emplean para transmitir la energía mecánica, desde la máquina o elemento motor a los otros órganos de trabajo de una máquina con transformaciones de velocidades, fuerzas o momentos [14].

Los rodamientos están normalizados, así como su tolerancia de fabricación. La selección y su ajuste depende de las cargas y condiciones de servicio que han de transportar. Los rodamientos pueden ser radiales o axiales (ver figura 7), según el sentido de las fuerzas actuantes. [15] [16]



Figura 6. Rodamientos [15]

4.2 CONCEPTOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

4.2.1. MOTOR A PASOS

Un motor a pasos tiene la característica principal de mover un paso a la vez por cada pulso de señal aplicada a sus bobinas, el paso puede variar desde 90 grados hasta 1.8 grados, lo que los hace ideales para la construcción de mecanismos de posicionamiento preciso. [18]

Los motores a pasos tienen la característica de un torque de detención, que no existe en los motores de corriente continua, este torque logra que el motor se mantenga firme en su posición cuando no gira, manteniendo una fuerza aplicada al eje eliminando la necesidad de un mecanismo de freno. [19] [20]

El funcionamiento del motor se basa en un estator constituido por varios bobinados en un material ferromagnético y un rotor libre en el estator, los bobinados se alimentan en serie y generan un desplazamiento angular existiendo tres tipos: Motor de reluctancia variable, de imán permanente y un híbrido que lleva la configuración de los dos anteriores. [21]

Características de un motor a pasos: [21]

1. Voltaje: Tensión eléctrica de trabajo, es necesario en ciertas ocasiones que se aplique un valor mayor para lograr el torque previsto.
2. Resistencia eléctrica: Se la denomina como a la resistencia de los bobinados la cual define la corriente que consume el motor lo que afectara a la curva del torque de motor.
3. Grados por paso: Es la cantidad de grados que el eje del motor gira para cada paso, las cantidades comunes son: 1.8, 3.6 y 90 grados, a este valor se le llama resolución del motor, para un valor de 1.8 grados se necesita 200 pulsos para lograr una vuelta completa del eje.

4.2.1.1 Imán permanente [21] [22]

Son los más usados para los motores a pasos, en este tipo el imán aporta el campo magnético para la operación como se observa la figura 9, estos se pueden dividir por el tipo de bobinado, teniendo así motores de imán permanente unipolares, bipolares y multifase.

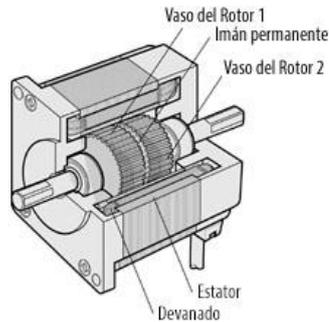


Figura 7. Motor de paso de imán permanente [22]

Unipolares: poseen devanados duplicados, tienen dos bobinas en cada eje del estator, unidas por extremos opuestos, se pueden controlar mediante tres formas: secuencia normal, secuencia wave drive y secuencia de medio paso.

Bipolares: ofrecen una mejor relación entre torque y tamaño/peso. Las bobinas reciben corriente en uno y otro sentido, lo que hace necesario un controlador “puente *H*” para cada uno de los bobinados.

4.2.2. SISTEMA DAQ

Para entender sobre lo que está sucediendo dentro del sistema de producción, es necesario adquirir un sistema para poder acceder a la información sobre sensores y aplicarlo a un formato para analizarlo. [23] [24]

Dentro de un proceso de producción se debe tomar en cuenta varios análisis sobre lo que está sucediendo en diferentes procesos como la vibración del motor, la presión de una caldera entre otras. Este tipo de análisis se da para conocer el estado de dicho proceso en cuestión y conforme a lo adquirido tomar decisiones, es decir transformarlas en datos numéricos para analizarlos y presentar ya sea en tablas o gráficos que nos ayude a entender sobre lo que está sucediendo. [23] [24]

Se encuentra una cantidad de ventajas dentro del sector minero e industrial las cuales indicaremos a continuación:

- Mayor nivel de seguridad sobre los datos
- Facilidad de control y monitoreo
- Facilita el trabajo, análisis y acceso a la información
- Ahorro de costos

La interfaz desde el sensor hacia el computador inicia con la comunicación del sensor al dispositivo DAQ, el cual posee un módulo de acondicionamiento de señales, en la cual se define los rangos de voltaje del sensor y un convertidor analógico digital encargado de convertir la señal analógica del sensor a un medio digital para su tratamiento en el software LabVIEW, en la figura 10 se presenta un esquema de dicha estructura.



Figura 8. Estructura del sistema DAQ[24]

El sistema DAQ permite la interacción tanto entre sensores y el computador donde la función principal es digitalizar las señales que le son comunicadas a partir de los sensores. Se tiene un circuito que se adaptan a las señales mediante protocolos de comunicación, a su vez se tiene un convertidos que permite transformar las señales analógicas en señales digitales, por último, un bus de comunicación para la comunicación con la PC, puede ser atraes de Ethernet, Wi-Fi, ModBus, u otro canal de comunicación. [24] [25]

El Dispositivo DAQ contiene tres componentes claves que son:

1. **Acondicionamiento de señales:** Las señales producidas por diversos sensores hacen que sea ruidosa lo que es probable que para la medición sea errónea por lo que el circuito de acondicionamiento de señales manipula la señal de tal forma que sea apropiada para entrada a un ADC. [24] [25]
2. **Convertidor Analógico-Digital (ADC):** Las señales analógicas obtenidas deben ser transformadas a una señal digital para que pueda ser adquirida y manipulada como en una PC. El ADC es un chip en la que da una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo.[24] [25]
3. **Bus de la PC:** Los distintos dispositivos DAQ se conectan a una PC a través del puerto. El bus de la PC tiene como finalidad la comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC para para los datos medidos por los diversos sensores.

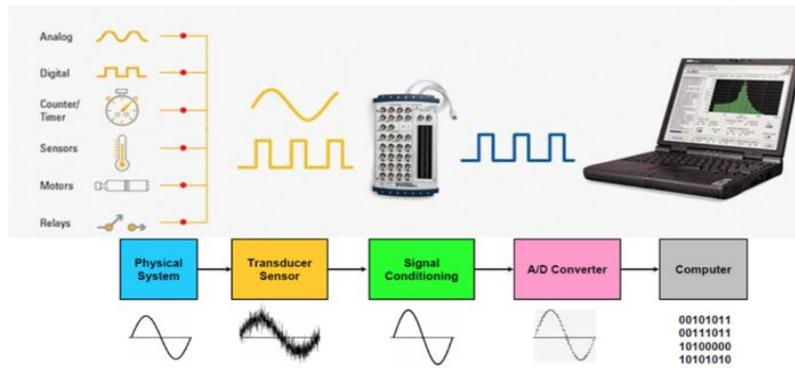


Figura 9. Proceso de comunicación mediante dispositivo DAQ[25]

Para facilitar la interacción con el usuario final, el software se divide en dos partes principales, los cuales son:

1. **Software Controlador:** Ofrece al software de aplicación la manera de interactuar con un dispositivo DAQ. Simplifica la comunicación con el dispositivo DAQ al abstraer comandos de hardware de bajo nivel.
2. **Software de Aplicación:** Facilita la interacción entre la PC y el usuario para analizar y presentar datos. [24] [25]

4.2.2.1 Sistema CompactDAQ

Es una plataforma modular de Hardware para la adquisición de datos basada en PC de National Instruments. Un chasis es conectado a su PC a través de USB o Ethernet para después colocar los diversos módulos de Entradas y Salidas que proporcionan conectividad directa con sensores como se observa en la figura 12. [26]

Se la define como modular por lo que se puede configurar al sistema con una combinación de módulos para distintos tipos de señal y sensor. [26]

El sistema CompactDAQ posee diferentes componentes, cuyo trabajo permite un alto desempeño de trabajo bajo estándares industriales, estos se pueden dividir como:

- 1) Chasis CompactDAQ: Encargado del control, sincronización y transferencia de datos entre los módulos de entrada y salida
- 2) Controlador CompactDAQ: Controlador embebido de alto rendimiento con certificaciones estándares en la industria e integra un procesador multinúcleo con Entradas y salidas modulares

- 3) Módulos CompactDAQ: Se conectan a diversos sensores las cuales nos permiten medir diferentes señales como temperatura, resistencia, voltaje etc. Estos permiten ser robustos y portátiles.
- 4) Software: Permiten la exploración interactiva hasta diseño de ingeniería personalizada. [27]

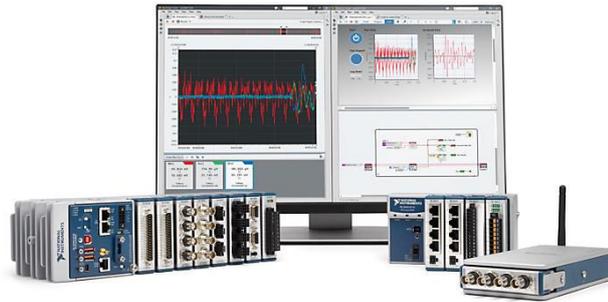


Figura 10. Componentes de la CompactDAQ [27]

4.2.4. SENSORES O TRANSDUCTORES

Miden cualquier magnitud física y convertir esa lectura en una señal eléctrica factible y comunicada de algún modo (ver tabla 1). Dependiendo del tipo de sensor, su salida puede ser voltaje, corriente, resistencia u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. [24]

Tabla 1. Fenómenos de diversos sensores

Sensor	Fenómenos
Fotosensor	Luz
Micrófono	Sonido
Termopar, RTD, Termistor	Temperatura
Acelerómetros	Aceleración
Potenciómetro, LVDT	Posición y desplazamiento.

4.2.5. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN TCP/IP

El protocolo de comunicación TCP/IP trata del conjunto de protocolos para la comunicación de datos. Toma su nombre de dos de los protocolos más significativos que son el TCP (Transmission Control Protocol) y el IP (Internet Protocol). [28]

La descripción de elementos que pertenecen al protocolo TCP/IP y aplicaciones que hacen uso del mismo, están dentro de los estándares “de facto” en los RFCs (Request For Comments) que son documentos controlados por la comunidad del Internet donde se añade los protocolos y estándares de la red de internet. [28][29][30]

Desde el punto de vista de la seguridad, el protocolo TCP/IP se verá frágiles en base a conceptos inherentes a su diseño.

1. El formato de los paquetes de los diferentes protocolos:
2. El modo de funcionamiento de los protocolos

En la figura 13 se presenta los niveles funcionales en la arquitectura del protocolo en referencia al modelo OSI estandarizado.

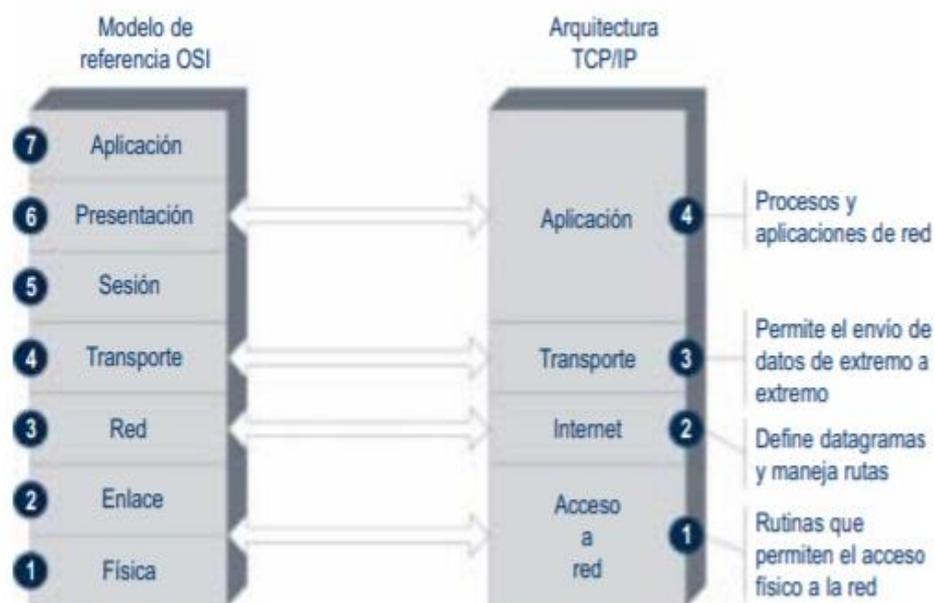


Figura 11. Niveles funcionales para comunicación TCP/IP [30]

1. **Nivel acceso a la red:** Ofrece mecanismos para que el sistema entregue los datos a otros dispositivos directamente conectado a la red
2. **Nivel internet:** Comanda la comunicación entre equipos escogiendo la más idónea para seguir los paquetes de datos hasta llegar a su destino.
3. **Nivel Transporte:** Facilita la comunicación desde el programa de aplicación a otro sin que lleguen con errores con una secuencia aceptable.
4. **Nivel de aplicaciones:** Incluye las aplicaciones y procesos con los que intercambia datos de la capa de transporte. [28][29][30]

En cada nivel jerárquico se utilizan diversos protocolos, cada uno de ellos indicados en la tabla 2. El protocolo estará implementado en el software de control.

Tabla 2. Protocolo de comunicación en diferentes niveles funcionales

Niveles	Protocolo
Acceso a la red	ARP (Address Resolution Protocol)
Internet	IP (internet Protocol)
Transporte	TCP (Transmission Control Protocol) UDP (User Datagram Protocol)
Aplicación	FTP (File transfer Protocol) HTTP (Hipertext Transfer Protocol) SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) DNS (Domain Name Server) NFS (Network File System)

4.2.6. CONTROL DE POSICIONAMIENTO APLICANDO CONCEPTOS MECATRONICOS

Las exigencias del Mercado impulsan el desarrollo de máquina y equipos más eficientes y precisos. La precisión de las máquinas herramientas dependen fuertemente de sus sistemas de posicionamiento. Para asegurar las especificaciones de alta velocidad y precisión de posicionamiento se requiere que estos sistemas sean diseñados bajo un concepto de mecatrónica. Mediante un diseño que abarque tanto el diseño mecánico como el diseño de los controladores de movimiento. Es necesario obtener modelos matemáticos de la dinámica del sistema, los controladores de movimiento y las condiciones externas que actúan sobre el sistema como por ejemplo las fuerzas de maquinado. [15]



Figura 12. Control en un sistema mecatrónico [15]

5. MARCO METODOLÓGICO

Las etapas que conforman este trabajo poseen una documentación técnica, para lograr los objetivos anteriormente planteados se realiza la siguiente metodología

5.1. DEFINICIÓN DE PARAMETROS DE DISEÑO Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Para iniciar el desarrollo de la propuesta se recopiló información sobre máquinas CNC, máquinas herramientas máquina convencionales, routers CNC, etc. Estas máquinas llevan elementos mecánicos con diferentes grados de precisión para lograr el movimiento lineal requerido y los cuales han sido investigados con la finalidad de conocer sus características y principios de funcionamiento.

5.1.1. DISEÑO CONCEPTUAL

Las características principales que la máquina deben poseer se detallan a continuación:

- Instalación de un botón de emergencia para detener la máquina ante alguna emergencia
- Portador de cables para llevar una disposición exacta de cables, asegurando su posición durante el funcionamiento de la máquina
- Finales carrera para evitar que la máquina funcione fuera de la distancia definida
- La máquina dispone de su propio software de control
- Estructura robusta de la máquina
- Elementos mecánicos fácilmente intercambiables para el respectivo mantenimiento

5.1.2. REQUERIMIENTOS

Los materiales de la estructura mecánica deben seleccionarse de tal manera que el diseño sea confiable y preciso. La estructura debe ser capaz de evitar las vibraciones generadas por los elementos mecánicos presentes. Durante el diseño se debe considerar que los componentes sean rígidos para disminuir cargas vibratorias y fácilmente intercambiables.

Asimismo, se debe asegurar la calidad del proceso, mantener las tolerancias geométricas apropiadas.

Los elementos de precisión que conforman los mecanismos de movimiento deben garantizar las características para lograr la precisión adecuada.

El control de la máquina debe ser amigable con el usuario, compatible con los elementos de la máquina y el entorno gráfico de fácil entendimiento.

5.1.3. MÓDULOS DE DISEÑO

Para el diseño del sistema de posicionamiento cartesiano se considera cuatro módulos los cuales se presenta en la tabla 3

Tabla 3. Módulos considerados dentro del diseño

Módulo	Definición
1) Sistema de guiado	Módulo encargado de guiar el movimiento lineal de los ejes
2) Transmisión de movimiento	Módulo encargado de asegurar la transmisión de movimiento desde los motores a los carros de los diferentes ejes
3) Sistema motriz	Elección del actuador adecuado para el sistema
4) Control	Módulo encargado de controlar toda la acción que realiza la máquina para llegar a la posición deseada

5.2. ALTERNATIVAS DE DISEÑO PARA CADA MÓDULO

En esta sección se plantea y analiza las diferentes opciones de mecanismos utilizados en los sistemas de posicionamiento que se usan con mayor frecuencia, con relación a la función que al final la máquina deberá obtener y los parámetros de diseño requeridos para este sistema.

5.2.1. MÓDULO 1: SISTEMA DE GUIADO

Los elementos de guiado son ampliamente usados en las máquinas de control numérico computarizado ya que tienen el trabajo de permitir el movimiento de traslación relativa entre dos elementos con las mínimas pérdidas por fricción por lo que se aprovecha al máximo el torque del actuador. Las opciones para el guiado lineal son las siguientes:

5.2.1.1. Sistema de riel y guía deslizante

También llamadas guías lineales de perfil como se observa en la figura 15, permiten el movimiento lineal mediante el acople de rodamientos para mover una carga sobre un perfil de guía; poseen guías de bolas que se ajustan para llevar un suave desplazamiento, permitiendo llevar elementos de alta carga con rigidez y precisión, algunas de las ventajas y desventajas podremos observar en la tabla 4

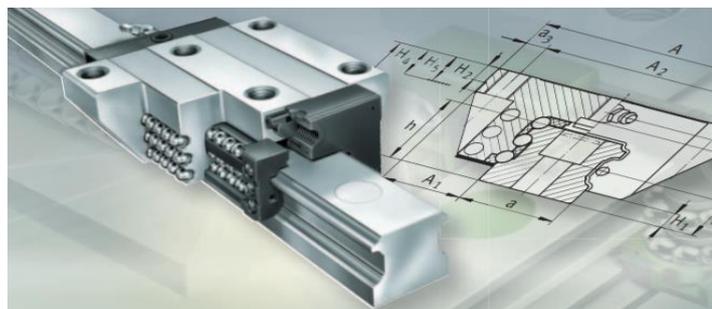


Figura 13. Guía de perfil [31]

Tabla 4. Ventajas y desventajas guía de perfil

Ventajas	Desventajas
Elevada precisión en el movimiento	Costo alto respecto a los otros sistemas
Fricción baja dada por los rodamientos de bolas recirculantes	Menor disponibilidad en el mercado local
Diferentes alternativas de montaje	
Larga vida útil	

5.2.1.2. Guía lineal con rodillos perfilados

Este tipo de guiado usa ruedas de acero que tienen un perfilado en C como se observa en la figura 16, las cuales ruedan sobre un riel con la forma complementaria en C. Dentro de esta categoría también podemos encontrar sistemas de guiado en V. Algunas de las ventajas y desventajas se pueden observar en la tabla 5



Figura 14. Guía por perfiles C [32]

Tabla 5. Ventajas y desventajas carros perfil C

Ventajas	Desventajas
Posee una amplia capacidad de carga	Se necesita de calibraciones más precisas
Trabajan a alta velocidad de desplazamiento	Mayor fricción respecto a los otros sistemas
Gran rigidez en el movimiento	Requiere un mayor espacio para el montaje

5.2.1.3. Guiado por rodamiento lineal

Este sistema consta de uno o varios rodamientos lineales de bolas o rodillos como se observa en la figura 17, los cuales se mueven sobre un eje riel, los rodamientos disminuyen la fricción entre los ejes. Algunas de las ventajas y desventajas se presentan en la tabla 6.



Figura 15. Guía por rodamiento lineal [33]

Tabla 6. Ventaja y desventaja del rodamiento lineal

Ventajas	Desventajas
Reducida fricción en el movimiento	Cuidado con la superficie deslizante
Diseño compacto para el buje	Mantenimiento constante
Soporta amplia capacidad de carga	

5.2.2. MÓDULO 2: SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO

Para un sistema de posicionamiento cartesiano, como lo es una máquina CNC, uno de los papeles más importantes del sistema mecánico es la precisión de los movimientos de la máquina, a continuación, se presentan las alternativas para lograr la transmisión del sistema motriz hacia un movimiento lineal, estas son:

5.2.2.1. Husillo de bolas y tuerca

Un tornillo de bolas como se observa en la figura 8 convierte el movimiento de rotación a un lineal con la ventaja de tener la menor fricción posible, el mecanismo consiste en intercalar una hilera de bolas entre el tornillo y la tuerca con el fin de reducir drásticamente el desgaste de estos elementos. Algunas de las ventajas y desventajas se presentan en la tabla 7. [34]



Figura 16. Husillos de bolas [34]

Tabla 7. Ventaja y desventaja del husillo de bolas

Ventajas	Desventajas
Alta precisión	Elevado costo
Perdidas por fricción mínimas, alta eficiencia mecánica	Menor disponibilidad en el mercado local
Larga vida útil del husillo	

5.2.2.2. Sistema piñón-cremallera

Este sistema está formado por una rueda dentada llamada piñón, el cual posee un movimiento de rotación alrededor de un eje y una cremallera que posee un movimiento lineal con sentido según la rotación del motor de manera que cuando el piñón engrana con la cremallera esta se desplaza longitudinalmente como se observa en la figura 19 a su vez la tabla 8 se observa ventajas y desventajas del sistema piñón-cremallera. [35]

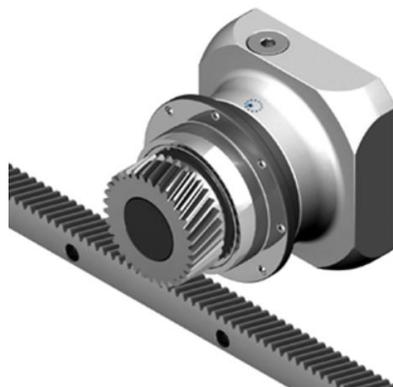


Figura 17. Piñón-cremallera[35]

Tabla 8. Ventajas y desventajas del piñon cremallera

Ventajas	Desventajas
Facilidad de diseño y construcción	Mantenimiento continuo
Buen desplazamiento en largas distancias	Alineación precisa
Transmisión de potencias elevadas	Problemas con el cableado del motor

5.2.2.3.TORNILLO Y TUERCA DE POTENCIA

Este mecanismo constituye en una tuerca alojada en un eje roscado como se ve en la figura 20 (tornillo). Si el tornillo esta fijo, la tuerca se desplaza a través del tornillo logrando el movimiento lineal. Alguna de las ventajas y desventajas se presenta en la tabla 9. [36]



Figura 18. Tornilo y tuerca convencional [36]

Tabla 9. Ventajas y desventajas del sistema tornillo tuerca

Ventajas	Desventajas
Fácil de fabricar	Rozamiento elevado entre tornillo y tuerca
Permite cargas altas en la transmisión	Alto desgaste de los elementos
Reducido número de elementos en el mecanismo	Menor precisión en largas distancias

5.2.3. MÓDULO 3: SISTEMA MOTRIZ

Es el elemento que genera el movimiento en los otros sistemas, se ha considerado los tipos de motores utilizados en sistemas de posicionamiento como lo es una máquina de control numérico computarizado, estos son:

5.2.3.1. Servomotor

Un servomotor visto en la figura 21 es un motor DC el cual está configurado para posicionarse de forma inmediata en la posición dada por el controlador dentro de su intervalo de operación. Por lo general se usan en los sistemas de posicionamiento ya que trabajan en un sistema de lazo cerrado lo que asegura que el motor llegue al ángulo definido por el controlador. En la tabla 10 se presenta alguna de las ventajas y desventajas que representa el servomotor. [37]

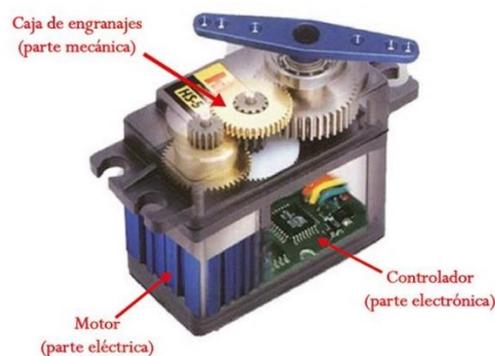


Figura 19. Arquitectura de un servomotor[37]

Tabla 10. Características del servomotor

Ventajas	Desventajas
Control a lazo cerrado	Costo elevado
Ruido y vibración generado es pequeño	Calibración precisa del controlador
Usado en operaciones de alta velocidad	Diseño complejo del driver

5.2.3.2. Motor a pasos

El motor de pasos consta de diferentes partes como se observa en la figura 22. Es un tipo especial de motor el cual posee la característica de moverse un paso a la vez por cada pulso de señal aplicada en la configuración de sus bobinas, el paso puede variar desde 90 hasta 1.8 grados por paso, lo que los hace precisos para un posicionamiento exacto. En la tabla 11 se puede ver las ventajas y desventajas sobre las características de motor pasos. [38]

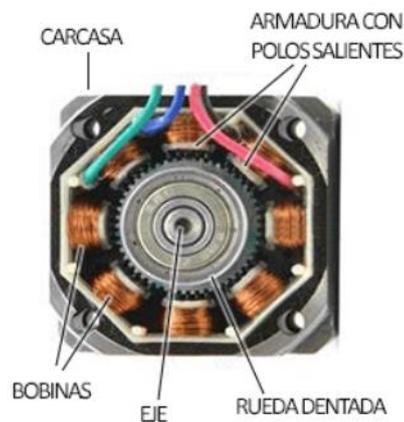


Figura 20. Motor paso a paso [38]

Tabla 11. Características motor paso a paso

Ventajas	Desventajas
Circuito de control simple	No se recomienda usar para aplicaciones de alta velocidad
Alto torque a bajas velocidades	Control a lazo abierto
Control preciso de velocidad y posición	

5.2.4. MATRIZ DE SELECCIÓN

A continuación, se establecen las diferentes alternativas planteadas para llevar a cabo la función de la máquina, se muestra un análisis de las combinaciones posibles.

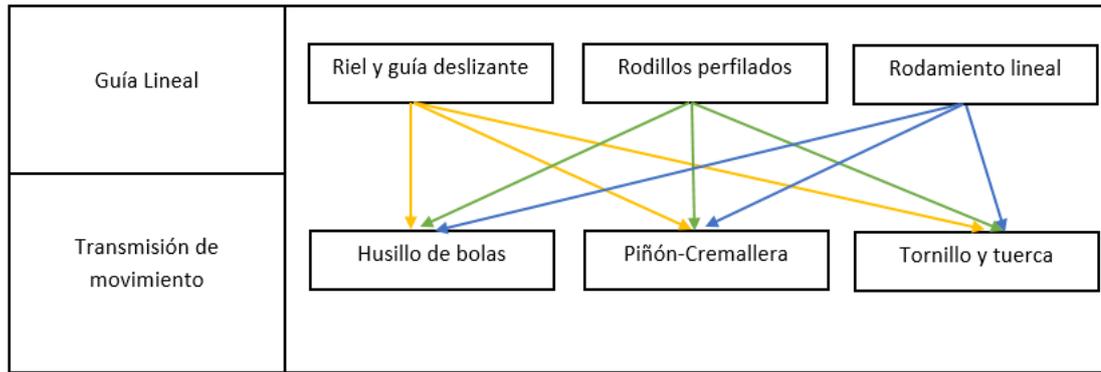


Figura 21. Combinaciones mecánicas posibles

Del anterior análisis se descartaron algunas combinaciones y se establecieron tres posibles soluciones para el movimiento de los ejes, las soluciones obtenidas se evalúan en una matriz de selección con base a los requerimientos del sistema.

Los criterios de evaluación más determinantes que se utilizó en la tabla 12 para la elección de los elementos a usarse son:

a) Precisión

El diseño requiere que la máquina y el sistema de posicionamiento tenga una tolerancia muy ajustada a la medida y eso depende en gran medida de los elementos y la precisión de cada uno de ellos.

b) Fiabilidad

Uno de los aspectos más importantes del producto es eliminar toda la posibilidad de fallar en funcionamiento y generar pérdidas

c) Calidad

Los elementos que conforman la máquina deben llevar los mejores estándares de calidad con el fin de reducir el mantenimiento de cada uno de ellos

d) Facilidad de montaje

Los elementos por usarse en la máquina deben tener una fácil instalación e intercambio de elementos garantizando su correcto funcionamiento

Con los criterios de evaluación más determinante se arma la matriz de selección. Las alternativas elegidas para usar en los movimientos de los ejes son:

- 1) Riel y guía deslizante y husillo de bolas
- 2) Rodillos perfilados más husillo de bolas
- 3) Tornillo y tuerca más rodamiento lineal

Tabla 12. Matriz de selección de alternativas

Matriz de selección			
Criterios	Alternativas		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Precisión	5	4	1
Fiabilidad	4	4	2
Calidad	5	3	2
Facilidad de montaje	5	1	3
Puntaje total	500	48	12
Alternativa elegida	X		

La mejor opción para el sistema de posicionamiento consiste en el uso de guías de perfil deslizante mediante una traslación de husillo de bolas, ya que cumplen con la mayoría de los requisitos determinantes. [40] [41].

5.3. DISEÑO MECÁNICO

5.3.1. REQUERIMIENTOS GENERALES

Para el sistema de posicionamiento cartesiano (X, Y) se considera las siguientes partes:

- a) Sistema de guiado
- b) Sistema de transmisión
- c) Tornillo motriz
- d) Sistema de sensado

5.3.1.1. Recorrido de los ejes

El recorrido de los ejes está basado en el largo del tornillo de bolas, basados en eso, los recorridos de los ejes son:

- Recorrido eje X: 500 mm
- Recorrido eje Y: 500 mm

5.3.1.2. Dimensiones de la máquina

El tamaño de la máquina está definido según el recorrido de los ejes y el espacio necesario para los controladores como se observa en la tabla 13. La representación del sistema mecatrónico se observa en la figura 24 realizado en el software SolidWorks.

Tabla 13. Dimensiones

Dimensión de la máquina	
Largo	1270mm
Ancho	720mm
Alto	1030mm

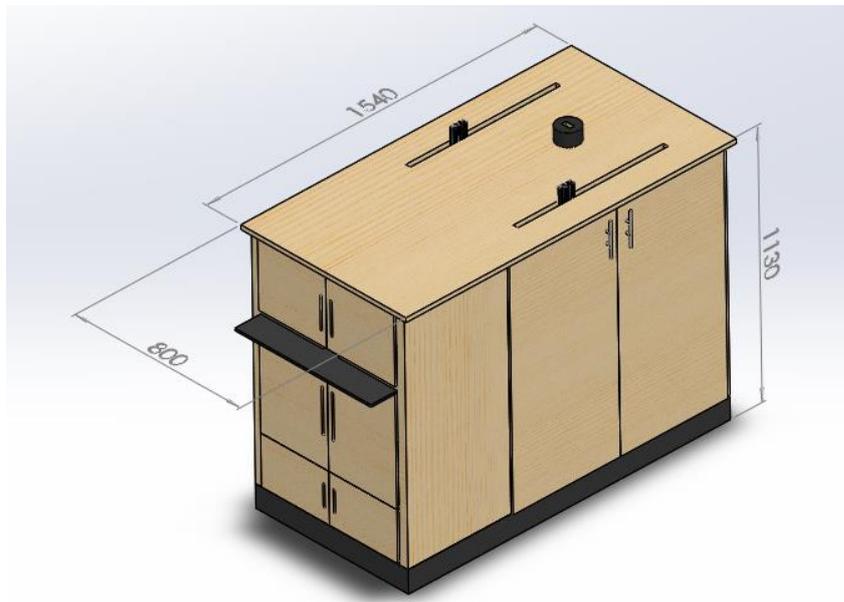


Figura 22. Dimensiones generales de la máquina

El sistema de posicionamiento consta de dos ejes con un recorrido de 500mm definido por el tornillo de bolas usado para la transmisión del movimiento. El eje X recorre de manera horizontal y el eje Y de manera vertical como se presenta en la figura 25.

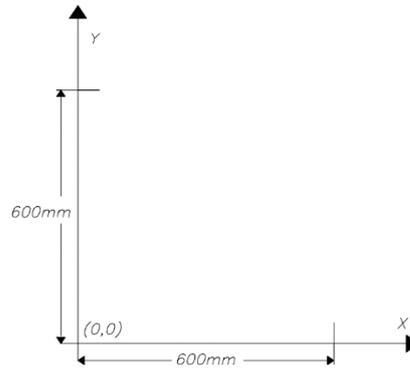


Figura 23. Disposición de ejes

El punto cero de la máquina lo define un sensor home el cual está ubicado en una posición específica enviando así la posición cero al software que cambiará la posición de la máquina a cero.

5.3.1.3. Condiciones críticas del sistema

Las siguientes condiciones imponen una serie de condiciones tanto cualitativas como cuantitativas determinadas por los parámetros del sistema, estas son:

- a) El sistema de guiado no debe fallar por fatiga en la vida útil prevista
- b) El tornillo no debe fallar dentro del ciclo de vida útil previsto
- c) Los rodamientos no deben fallar durante el ciclo de vida
- d) Las uniones deben garantizar solidez y la resistencia necesaria
- e) Las diferentes partes deben estar correctamente engrasadas
- f) El tornillo debe presentar el paso necesario para satisfacer las demandas de precisión
- g) El mecanizado debe tener las tolerancias indicadas

5.3.1.4. Diseño del sistema mecánico

El diseño de la máquina se realizó en el software SolidWorks (figura 26), con el fin de verificar las geometrías, ubicar los elementos de la manera adecuada para la construcción de la máquina y obtener las propiedades físicas de los elementos para poder realizar el cálculo respectivo. A continuación, se presenta el modelo final de la máquina con los sensores dispuestos en la misma. Los planos de cada uno de los elementos se encuentran en el anexo 2.

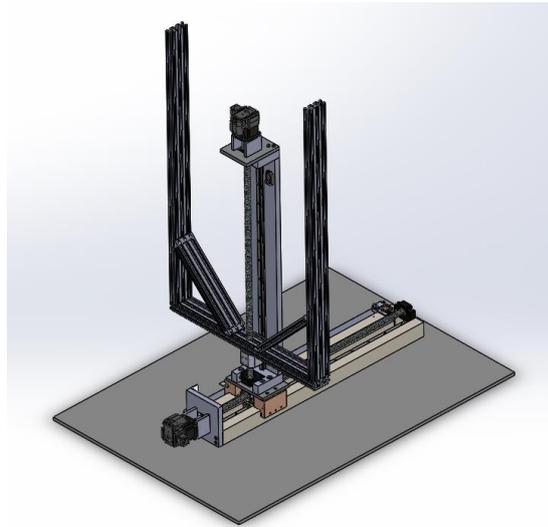


Figura 24. Diseño del sistema en SolidWorks

En la figura 27, se muestra el sistema mecánico para el movimiento del eje X, en el que se utiliza un sistema de guía lineal de contacto rodante y transmisión de movimiento por husillo de bolas de precisión C7

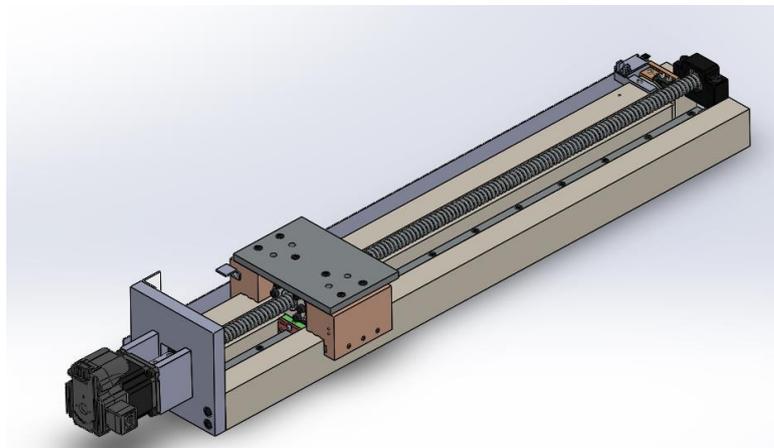


Figura 25. Sistema mecánico eje X

El eje Y de la máquina lleva el mismo principio para movimiento del eje X, constituido por una guía lineal de contacto rodante y una transmisión por husillo de bolas, dispuestos de manera vertical como se observa en la figura 28.

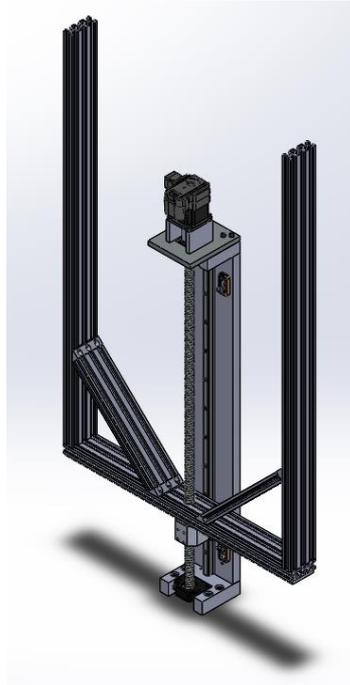


Figura 26. Sistema mecanico eje Y

Utilizando el software SolidWorks se estimó el peso de los diferentes componentes que conforman el eje los cuales se presentan en la tabla 14, se considera un factor de seguridad de 1.2 para el peso debido a que en algunos casos no se conoce el peso exacto del componente.

Tabla 14. Pesos de elementos para el eje Y

Componente		Material	Peso unitario	Peso total
HGH15CA	W1	Varios	0.18 Kg	0.18 Kg
Guía HGR	W2	Acero	1.45 kg/m	1.015 Kg
Pared inferior	W3	Aluminio	0.46 Kg	0.46 Kg
Pared guía	W4	Aluminio	3.13 Kg	3.13 Kg
Pared superior	W5	Aluminio	0.38 Kg	0.38 Kg
Placa motor	W6	Aluminio	0.28 Kg	0.28 Kg

Motor MDrive	W7	Varios	0.784 Kg	0.784 Kg
Soportes motor	W8	Aluminio	0.05 Kg	0.1 Kg
Buje motor	W9	Bronce	0.14 Kg	0.14 Kg
Tornillo de bola y tuerca	W10	Varios	1.2 Kg	1.2 Kg
Acople guía	W11	Aluminio	0.039 Kg	0.039 Kg
Acople tuerca	W12	Aluminio	0.15 Kg	0.15 Kg
Barra referencia	W13	ASTM A36	0.942 Kg	0.942Kg
Marco de aluminio	W14	Aluminio	1.784Kg	1.784 Kg
Soporte BK12	W15	Varios	0.45 Kg	0.45 Kg
Soporte BF12	W16	Varios	0.35 Kg	0.35 Kg
Tornillos		Varios	0.2 Kg	0.2 Kg
Total			$\sum w_i =$	11.58 Kg
			$(\Sigma*1.2)$	13.90 Kg

El peso total del eje Y es de 13.9 kg el cual será la carga que la guía lineal del eje X deberá soportar manteniendo un recorrido rígido en todo momento.

Cada uno de los elementos del eje Y están denominados por un literal W, la disposición de los elementos se muestra en la figura 27. Los elementos no numerados no están a la vista o tienen bastante cantidad para numerarlos.

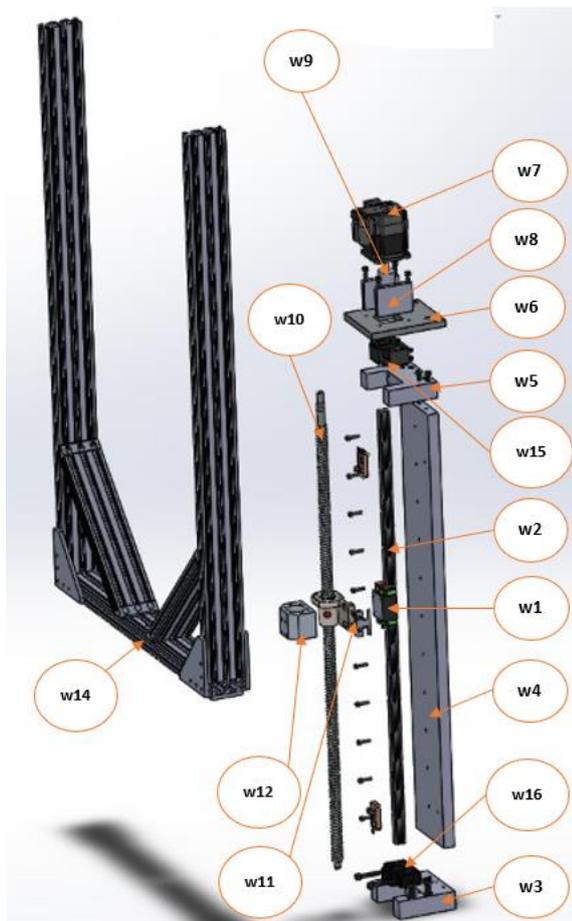


Figura 27 Elementos eje Y

5.3.2. SELECCIÓN DE GUÍAS LINEALES

Para seleccionar las guías lineales adecuadas para transportar los dos ejes que llevarán el sensor, se tiene en cuenta la masa que va a transportar cada uno de los ejes, tomando así la ficha de información técnica de guías lineales de la marca HIWIN. [39]

Los parámetros para la selección de estas guías son:

- Aplicación
- Espacio
- Precisión
- Magnitud y dirección de la carga
- Rigidez
- Recorrido
- Velocidad y aceleración.
- Vida útil

La marca HIWIN posee varias series según la aplicación deseada, entre las cuales se encuentra:

Series HG: máquinas herramientas

Series EG: automatismos, maquinaria para madera, equipos de medición. [39]

También se dispone de diferentes grados de precisión en las guías (C, H, P, SP, UP). Para determinar el tamaño y número de patines se considera los siguientes puntos:

- a) Condición de carga dinámica
- b) El tamaño de la guía debe ser similar al diámetro del husillo, en este caso el husillo de bolas posee un diámetro de 16 y el tamaño de la guía es de 15.
- c) El cálculo de la carga máxima se obtiene: Iniciar con un ejemplo de cálculo de cargas y encontrar la carga máxima y asegurarse que el factor de seguridad sea lo suficientemente alta. [39]

El parámetro principal de la selección de la guía lineal es la precisión, ya que el sistema requiere un alto grado de precisión, según la aplicación se usa la guía HG. La guía lineal seleccionada es la HIWIN HGH15CA el cual está constituido por 4 hilos de bolas permitiendo precargas ideales para sistemas de alta precisión manteniendo una alta rigidez, además ayuda a disminuir los errores de montaje gracias al contacto de 45 grados en dos puntos mejorando la precisión del movimiento lineal con una reducción de esfuerzos del motor a pasos, dichos contactos se pueden observar en la figura 29. [42][43][44]

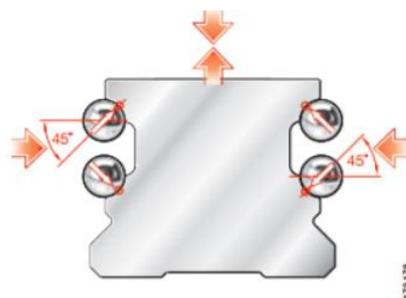


Figura 28. Ángulo de riel [39]

Las guías lineales están sometidas a una carga radial y una lateral, y momentos definidos en las 3 direcciones como lo muestra la figura 30 y cuyas características se presenta en la tabla 15.

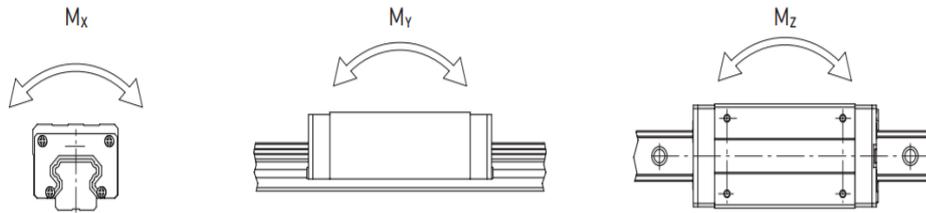


Figura 29. Guías lineales [40]

Tabla 15 Características mecánicas de las guías

Serie	Capacidad de carga dinámica [N]	Capacidad de carga estática [N]	Momento dinámico [Nm]			Momento estático [Nm]		
			Mx	My	Mz	Mox	Moy	Moz
HG_15C	11380	16970	76	67	67	120	100	100

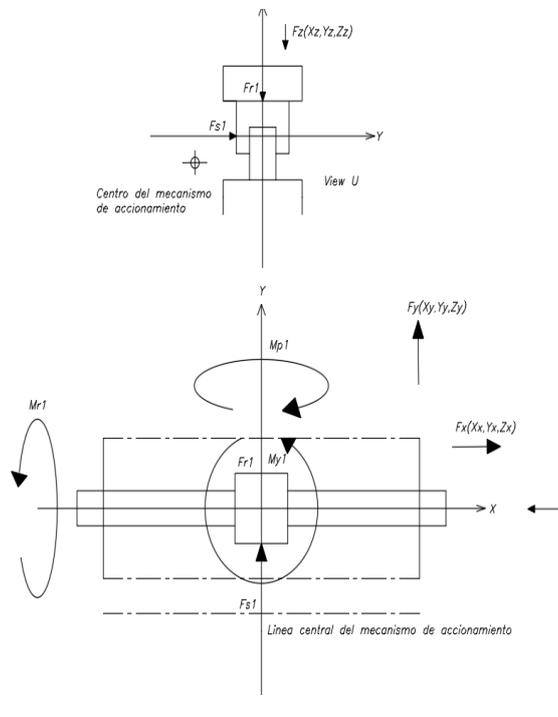
Para la elección de la guía se considera como fundamental la capacidad de carga estática del patín el cual tiene que ser mayor a la carga aplicada. Para el eje X, la carga estática es 16970 N y la carga aplicada es el peso del eje Y el cual es de 136.35 N.

El sistema de guiado al encontrarse en reposo puede estar sometido a fuerzas externas imprevistas como por ejemplo vibraciones en el arranque y parada del sistema por lo que se debe considerar el factor de seguridad en el diseño, en este caso para una carga muerta basado en la resistencia máxima y en el material se recomienda un factor de seguridad entre 3 y 4.

Con base al esquema de la tabla 16 se elaboró una hoja de cálculo para determinar las cargas generadas por el peso de cada elemento de eje las cuales generan momentos sobre la guía del eje X. los elementos del eje Y fueron dispuestos de tal manera que se obtenga un momento de valor cero en las 3 direcciones con el fin de tener un sistema rígido y que la guía no soporte un peso excéntrico debido a los elementos del eje Y.

El patrón de montaje de la guía con sus ecuaciones se presenta en la tabla 16

Tabla 16. Patrón de montaje de la guía [31]

Patrón de montaje	Ecuación
	$Fr_1 = \sum_{k=1}^n Fz_k$ $Fs_1 = \sum_{j=1}^n Fy_j$ $Mr_1 = \sum_{j=1}^n (Fy_j Zy_j) + \sum_{k=1}^n (Fz_k Yz_k)$ $Mp_1 = \sum_{i=1}^n \{Fx_i (Zx_i - Zb)\} + \sum_{k=1}^n (Fz_k Xz_k)$ $My_1 = -\sum_{i=1}^n \{Fx_i (Yx_i - Yb)\} + \sum_{j=1}^n (Fy_j Xy_j)$

La disposición de la guía del eje X está dispuesta para soportar los 13.9 kg de peso del eje Y. para el cálculo se aplica las ecuaciones indicadas para el patrón de montaje de los sistemas de guiado lineal que se observa en la tabla 16.

En la figura 30 se puede observar la línea de eje guía en la cual se dispondrán los elementos del eje Y de tal manera que se genere un momento mínimo en las 3 direcciones garantizando la estabilidad del sistema, la línea guía de color rojo indica el centro de gravedad del guiado. La distancia generada para el momento se toma desde el centro de masa de cada uno de los elementos hacia la línea guía de color rojo.

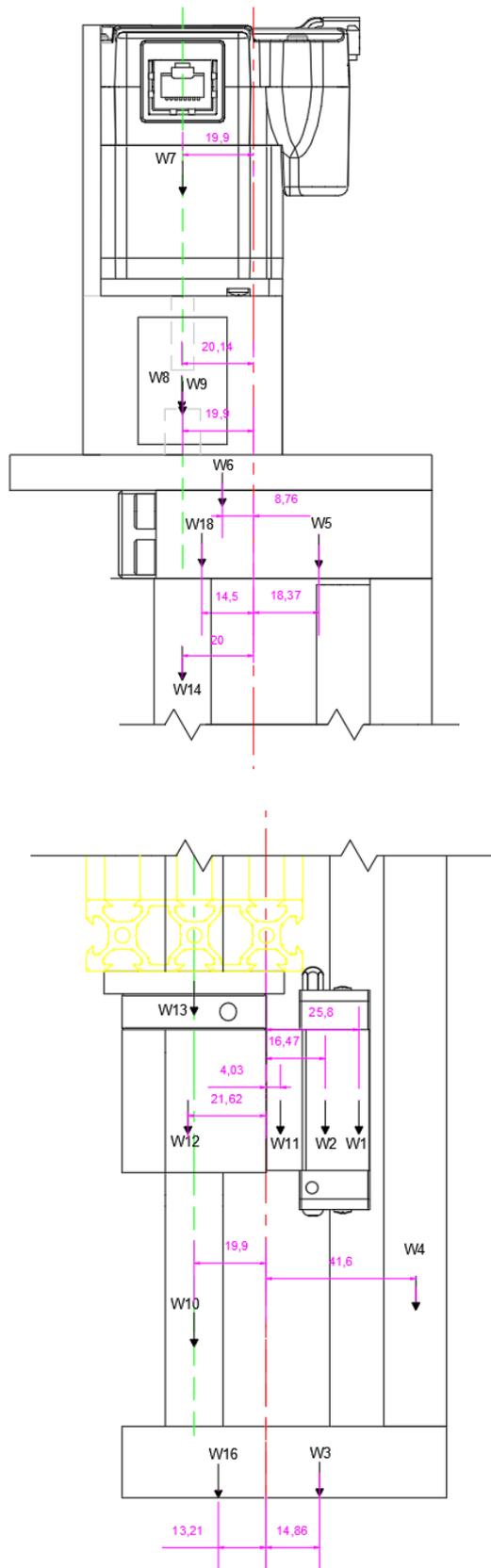


Figura 30. Elementos del eje Y con sus respectivos pesos y distancias

En la figura 30 se muestra las distancias desde el centro de masa hacia la línea eje y el peso definido para cada elemento de la tabla 14. El cálculo de los momentos se presenta a continuación:

Tabla 17. Cálculo del momento con respecto a eje Y (Mp) generado por los elementos

Mp	m (Kg)	F (N)	Dist X (mm)	M (N mm)	M(Nm)
W1	0.18	1.7658	25.83	45.61061	0.045611
W2	1.015	9.95715	16.47	163.9943	0.163994
W3	0.46	4.5126	14.86	67.05724	0.067057
W4	3.13	30.7053	41.6	1277.34	1.27734
W5	0.38	3.7278	18.37	68.47969	0.06848
W6	0.28	2.7468	-8.76	-24.062	-0.02406
W7	0.784	7.69104	-19.9	-153.052	-0.15305
W8	0.1	0.981	-20.14	-19.7573	-0.01976
W9	0.14	1.3734	-19.9	-27.3307	-0.02733
W10	1.2	11.772	-19.9	-234.263	-0.23426
W11	0.039	0.38259	4.03	1.541838	0.001542
W12	0.15	1.4715	-21.62	-31.8138	-0.03181
W13	0.942	9.24102	-19.9	-183.896	-0.1839
W14	1.784	17.50104	-19.9	-348.271	-0.34827
W15	0.45	4.4145	-14.5	-64.0103	-0.06401
W16	0.35	3.4335	-13.21	-45.3565	-0.04536
Total	11.384			492.212	0.492212

El momento Mp obtenido nos da un valor de 0.5 Nm que es un valor pequeño necesario para no generar una carga adicional a la del peso del eje Y y que nos garantiza la estabilidad del eje montado sobre esta guía.

El momento con respecto a eje X (Mr), se busca que tenga el menor valor posible para mantener el centro de gravedad en el sistema y que la guía soporte únicamente el peso del eje Y sin ningún tipo de carga adicional y tiene el valor presentado en la tabla 18.

En este cálculo se considera como fuerza los pesos de cada uno de los elementos debido a que estos generan el momento en el patín lineal, no existe una fuerza externa al sistema el cual debe entrar en análisis del momento.

Tabla 18. Momento Mr generado en el eje Y

Mr	m (Kg)	F (N)	Dist X (mm)	M (N mm)	M(Nm)
W1	0.18	1.7658	0	0	0
W2	1.015	9.95715	0	0	0
W3	0.46	4.5126	0	0	0
W4	3.13	30.7053	0	0	0
W5	0.38	3.7278	0	0	0
W6	0.28	2.7468	0	0	0
W7	0.784	7.69104	0	0	0
W8	0.1	0.981	0	0	0
W9	0.14	1.3734	0	0	0
W10	1.2	11.772	0	0	0
W11	0.039	0.38259	0.18	0.068866	6.89E-05
W12	0.15	1.4715	0	0	0
W13	0.942	9.24102	0	0	0
W14	1.784	17.50104	0	0	0
W15	0.45	4.4145	0	0	0
W16	0.35	3.4335	0	0	0
Total				0.068866	6.89E-05

El momento Mr como condición debe ser lo más cercano a cero garantizando la estabilidad del eje Y montado en dicha guía. El factor de seguridad obtenido para estos momentos se ve en la ecuación 2.

$$fs = \frac{Mo}{M} = \frac{Co}{P} \quad (2)$$

Donde:

fs: factor de seguridad

Co: valor de carga estática

Mo: momentos admisibles

M: momento de diseño

P: Carga de diseño

El factor de seguridad para la guía del eje X es:

$$fs = \frac{16970}{(12.74)(9.81)} = 124.45$$

Se propone como carga el peso del eje Y que debe soportar la guía sin carga adicional dada por el diseño de este. [30][31]

El momento con respecto a eje Z (M_y), no se considera en este eje debido a que no se aplica ninguna carga en tal dirección. Los resultados se representan en la tabla 19

Tabla 19. Factor de seguridad eje X

Momento admisible estático	M_p	M_y	M_r
HGH15CA	16.97 kN	16.97 kN	16.97 kN
Factor de seguridad	124.45	-	-

5.3.2.1. Selección de la guía lineal para el eje Y

Para el eje Y se usará una guía que requiera una carga moderada y una alta precisión, seleccionando la guía HGH15CA, la guía está sometida a dos valores de carga definidos por ISO 14728-1 y 14728-2 que tratan sobre la carga estática y dinámica sobre las guías. Utilizaremos el valor de la carga dinámica para encontrar la vida útil y el factor de seguridad del sistema.

En el eje Y se considera el centro de gravedad de la estructura de aluminio, la cual se mantiene en constante movimiento y posee un centro de gravedad en la mitad del eje, por lo que no genera un momento adicional en la guía. Los soportes a 45 grados como se muestra en la figura 31, permiten la rigidez de la estructura y mantener los ángulos rectos en las esquinas de dicho marco.

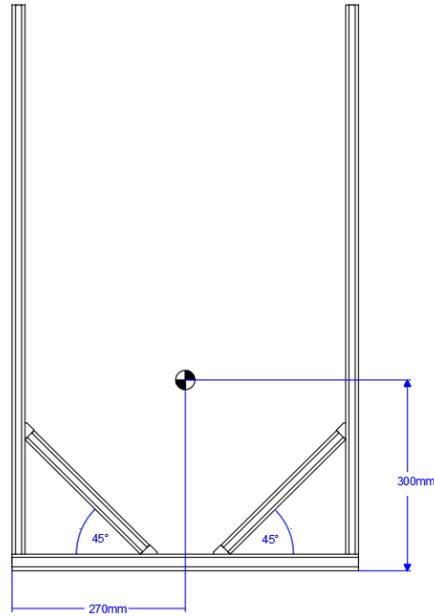


Figura 31. Marco de aluminio con su centro de gravedad

La barra inferior tiene una longitud de 540mm por lo que el centro de gravedad del elemento queda a la mitad de la barra, lo que no genera ningún momento en la dirección de Mr. El valor de las cargas es dado por el peso de cada uno de los elementos del eje y las ecuaciones sobre el criterio de montaje fueron presentadas en la tabla 16.

Teniendo el esquema para el eje Y obtenemos los momentos pertenecientes como se observa en la figura 32.

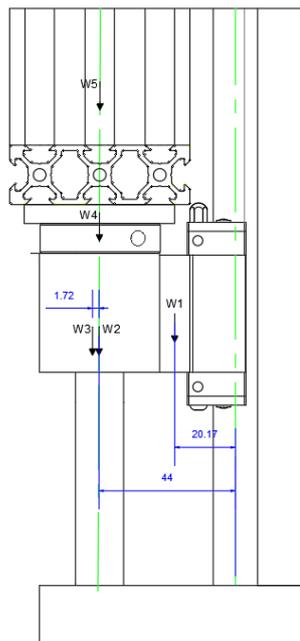


Figura 32. Momentos generados en el eje Y

En coordenadas de la máquina en diseño, tomando como positivo el sentido contrario a las manecillas del reloj.

$$Mp = \sum_{k=1}^n (Fz_k Xz_k) + \sum_{i=1}^n (Fx_i Zx_i) \quad (3)$$

$$Mp = (9.81 * 0.039 * 3 * 20.17) + (9.81 * 0.15 * 3 * 45.72) \\ + (9.81 * 1.2 * 3 * 44) + (9.81 * 0.942 * 3 * 44) + (9.81 * 1.784 \\ * 3 * 44)$$

$$Mp = 5.308 \text{ N m}$$

$$My = - \sum_{j=1}^n (Fy_j Zy_j) + \sum_{k=1}^n (Fz_k Yz_k) \quad (4)$$

$$My = 0 \text{ N m}$$

Las barras laterales por estar a la misma distancia del eje de rotación generan cargas contrarias que se cancelan, el marco de aluminio al tener el centro de gravedad a lo largo del eje del patín no existe distancia por lo que el momento My tiene un valor 0 garantizando la estabilidad del marco durante el movimiento, cómo se puede observar en la figura 33.

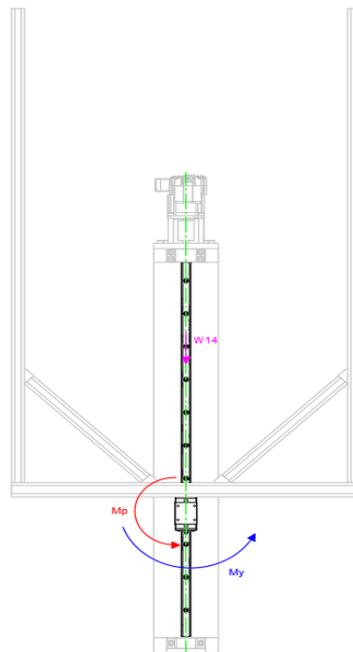


Figura 33. Momento generado por el marco de aluminio sobre el patín

El momento M_r que se observa en la figura 34 también posee un valor cero ya que las cargas, las cuales es el peso del marco en este caso, están en la misma línea de acción que el centro de gravedad del patín por lo que no existe la distancia que genera el momento, teniendo un valor cero.

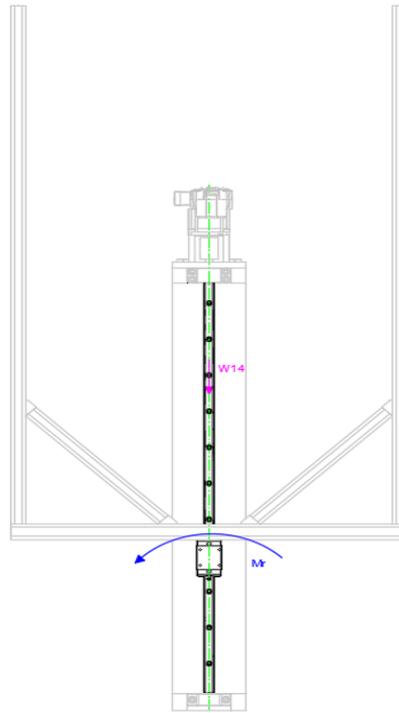


Figura 34. Momento generado por las barras

El factor de seguridad para la guía del eje Y para el momento M_p se calcula mediante la ecuación 2:

$$f_s = \frac{67}{5.308} = 12.62$$

Los otros momentos al tener valor 0 se tiene un factor de seguridad infinito, el cual no se toma en cuenta, para lo cual el resultado se representará en la tabla 20.

Tabla 20. Factor de seguridad eje Y

Momento admisible estático	M_p	M_y	M_r
HGH15CA	16.97 kN	16.97 kN	16.97 kN
Factor de seguridad	12.62	-	-

5.3.3. ELECCIÓN DEL TORNILLO DE BOLAS

Se eligieron tornillos de bolas recirculante debido a que este tipo de elementos son capaces de soportar grandes cargas repartiendo el esfuerzo generado en todas las esferas, ofreciendo una alta precisión y la menor pérdida por fricción, lo cual permite que el motor realice el menor esfuerzo posible. [34][42]

Para la selección del tornillo se recurre al fabricante, en este caso AluFlex Group es un fabricante que lleva años en el mercado y cuya tecnología se puede encontrar en el país, por medio del catálogo se realiza la selección del tornillo y su característica según la carga a soportar. El fabricante presenta cuatro tipos de opciones de tornillo los cuales son:

- SFS Tornillo de bolas estándar para aplicaciones de automatización
- SFV Tornillo de bolas de alta carga para aplicaciones de prensado
- SFU Tornillo de bolas para aplicaciones estándar zurdo
- SFK Tornillo de bolas miniatura

Se escogió la opción SFU debido a la disponibilidad en el mercado local de la misma. En la tabla 21 se presentan los diferentes modelos. [34][42]

Tabla 21. Modelos tornillos de bolas [41]

Model No.	Dimension																
	d	l	Da	D	A	B	L	W	H	X	Q	n	Ca	Coa	K	Max. Length	Max Rec. Load
SFU1605-4	16	5	3.175	28	48	10	50	38	40	5.5	M6	1x4	13800	30520	320	3000	1526
SFU2005-4	20	5	3.175	36	58	10	51	47	44	6.6	M6	1x4	15510	38750	390	3000	1938
SFU3205-4	32	5	3.175	50	80	12	52	65	62	9	M6	1x4	19220	63430	540	6000	8880

Eligiendo por medio de la tabla 21 el modelo SFU1605-4 siendo de menor diámetro disponible y soportando las cargas a la que estará sometido, observando que los rangos de carga son altos en comparación a los exigidos, se establece el mismo tornillo para todos los ejes. Las dimensiones de la tuerca se presentan a continuación en la figura 35.

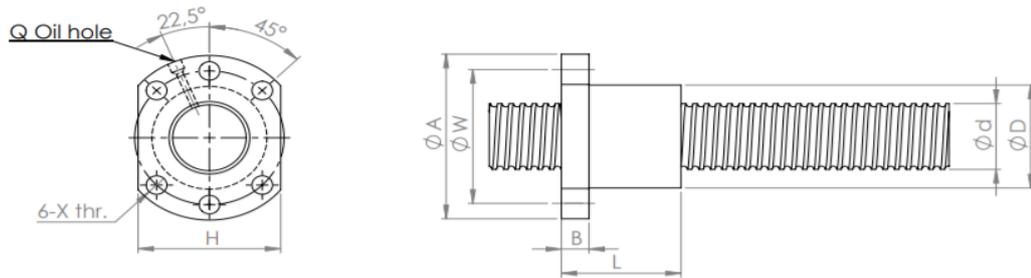


Figura 35. Tuerca SFU1605 [41]

Se tiene en cuenta que la unión entre la tuerca y tornillo es directa sin ningún elemento intermedio reduciendo así las fallas posibles en el mismo lo que reduce también el riesgo de obtener vibraciones y precisión deseado.

El tornillo elegido presenta una precisión de grado C7 que representa un error de distancia de recorrido de $\pm 50 \mu\text{m}/300\text{mm}$. El tornillo tiene una longitud de 750 mm que se encuentra a la mitad de la máxima distancia dada por el nivel de precisión.

El tornillo de bolas seleccionado se acompaña de sus respectivos soportes (ver figura 36). El soporte Bk12 es el respectivo para el tornillo elegido, tiene un rodamiento radial axial fijo en el interior con una tuerca de bloqueo y espaciador para un montaje completo del tornillo. [34][42]



Figura 36. Soporte fijo BK12 [50]

Por el otro lado tenemos el soporte BF12 definido para el tamaño del tornillo elegido, con un rodamiento radial en el interior y se debe usar solo en el lado de soporte del tornillo como se ve en la figura 37.



Figura 37. Soporte BF12 [51]

5.4.DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO CARTESIANO

El sistema de posicionamiento cartesiano tendrá como aplicación un movimiento continuo de los ejes, para coordinar el funcionamiento exitoso del mismo se selecciona los componentes de control que permitan garantizar la fiabilidad del sistema. En esta sección se describirá cada uno de los elementos que permiten el posicionamiento preciso del sistema en un punto y las secuencias necesarias para el trabajo exitoso del sistema.

5.4.1. SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES

Los actuadores de la máquina fueron seleccionados de tal manera que se cumplan las condiciones de trabajo, el tamaño y el tipo de este define la precisión y velocidad de la máquina. Según estas condiciones se eligieron dos alternativas presentadas anteriormente, las cuales son:

- Servomotor
- Motor paso a paso

Las características de cada motor se presentan en la tabla 22

Tabla 22. Diferencias entre actuadores

Servomotor	Motor paso a paso
Altos costos, complejidad de driver	Bajo costo, drivers simples
Sistema de lazo cerrado	Alta precisión en la posición
Tiempos de respuesta rápidos	Retroalimentación opcional con encoder
Mayor reducción mecánica	Operan a bajas temperaturas

Requiere de ensayos y pruebas de error	No requiere de ensayos
----------------------------------------	------------------------

De acuerdo con las características presentadas anteriormente se decidió usar motores paso a paso ya que el sistema requiere una posición precisa del actuador, para determinar el modelo del motor paso a paso a usarse, así como el modelo y controlador se repasan conceptos sobre este tipo de motor.

5.4.2. CARACTERÍSTICAS MOTOR PASO A PASO

Par dinámico de trabajo: es el momento máximo que el motor desarrolla sin perder la excitación del estator dependiendo de la carga aplicada, el valor es ofrecido por el fabricante. En la figura 29 se observa la relación par-voltaje del motor paso a paso.

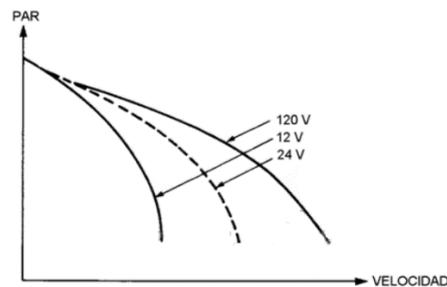


Figura 38. Par vs Velocidad según el voltaje [44]

Par de mantenimiento: es el momento que actúa como freno para mantener el rotor en una posición deseada.

Par de detención: es un momento característico de los motores de imán permanente debida a la acción del rotor cuando las bobinas del estator se encuentran desactivadas

Angulo de paso: es el avance angular que genera el motor por cada impulso, se mide en grados y los más frecuentes se presentan en la tabla 23.

El número de pasos por vuelta se define como la cantidad de pasos que efectúa el motor para realizar una vuelta completa

$$\#Pasos = \frac{360}{\alpha} \quad (5)$$

Donde α es el ángulo de paso.

Tabla 23. Ángulos de paso

Grados por impulso	# Pasos por vuelta
15°	24
7.5°	48
3.75°	96
1.8°	200
0.72°	500

Frecuencia de paso máxima: es el máximo número de pasos por segundo que el motor puede recibir para su correcto funcionamiento.

Momento de inercia del rotor: es el momento de inercia del rotor especificado en gramos por centímetro cuadrado [44]

Modos de funcionamiento

Funcionamiento a paso completo

El funcionamiento se puede observar en la figura 40, el motor gira en un ángulo resultante según su construcción. Por ejemplo, si el motor es de 1.8 grados se requiere 200 pasos para una revolución, se activa una sola bobina por vez, por lo que el eje del motor gira hacia la bobina activa. [60]

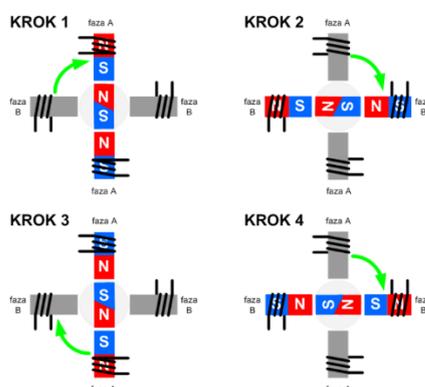


Figura 39. Funcionamiento motor a pasos secuencia normal [59]

Funcionamiento a medio paso

En este funcionamiento las bobinas del motor se activan de tal manera que se combinan las secuencias anteriores, es decir se obtiene un paso más corto, activándose primero dos bobinas, luego una y así sucesivamente (ver figura 41). Con una sola carrera para un motor de 1.8 grados ahora será de 0.9 grados necesitando 400 pasos para una revolución, para este modo se requiere una fuente alterna para las bobinas obteniendo un aumento del par.

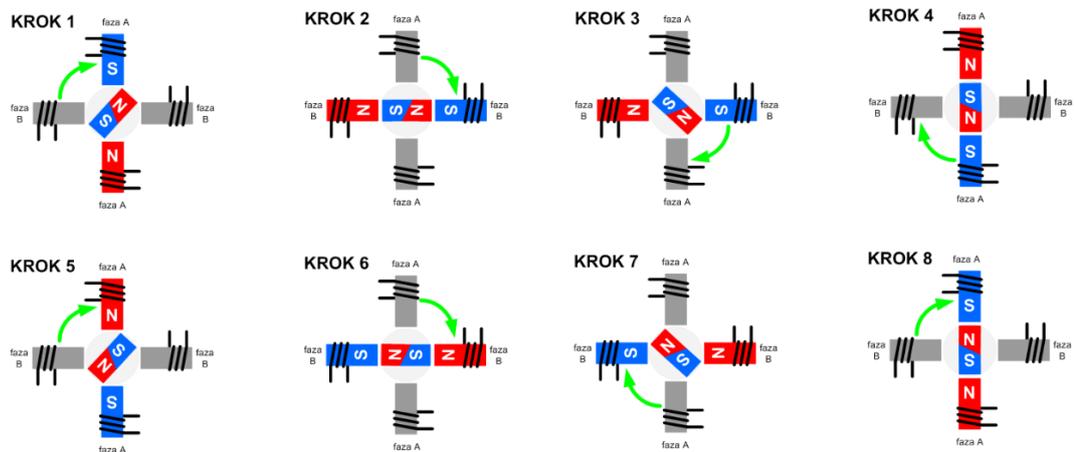


Figura 40. Funcionamiento motor a pasos secuencia normal [59]

Funcionamiento en modo micropaso

En este modo, el paso nominal del motor se divide en secciones más cortas aún que las del medio paso, la relación de división máxima es de 256, es decir para un motor de 200 pasos por vuelta podremos obtener un valor de 256×200 por vuelta, es decir 51200 micropasos por vuelta, esto se logra mediante el flujo magnético resultante de las bobinas alimentadas por la onda escalonada, se usa este modo de operación donde se requiere un funcionamiento suave del motor y una alta precisión en el posicionamiento, se debe tener en cuenta cuando se utilice en ese modo los requisitos de velocidad de la aplicación [59]

De acuerdo con el análisis realizado se ha optado por la selección de un motor a pasos NEMA 23 debido a sus dimensiones las cuales se adecuan al sistema.

Se seleccionó la marca Schneider la cual posee motores MDrive que presentan varios modelos y series que cumplen con las características deseadas. El motor MDrive

ofrece una solución rentable con un controlador de micro pasos con alimentación de 12 a 75VDC con un ángulo de paso de 1.8 grados.

Este motor incluye el controlador incluido con un conjunto completo de instrucciones fáciles de programar con control de lazo cerrado opcional dado por un encoder magnético

Los protocolos de comunicación incluyen RS-422/485, CANOpen y Ethernet, este último con soporte a MODBUS/TCP y MCode/TCP

Para la selección del modelo del motor se usó la tabla 49:

Tabla 24. Selección del motor [49]

	Part Numbers											
Quick start kit	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
K= kit option												
MDrive plus version	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
MDI= Motion Control												
Input	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
1=Plus, standard features												
3=Plus2, extended features												
4=Plus2, expanded feaures, industrial connector												
P1 connector	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
F=ying leads												
P=pluggable												
C=wire crimp												
M=M23 industrial connector												
Communication	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
R= RS422/485												
E= Ethernet												
P2 Connector	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
D=IDC												
L=wire crimp												
R=RJ45												
Q=M12 Industrial connector												
Motor Size	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
23=NEMA 23 (57mm)												
Motor Length	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
A=Single Stack												
B=Double Stack												
C=Triple stack												
D=Quad stack												
Drive voltage	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
7= +12 to +75 VDC												
6= +12 to +60 VDC												
Encoder	M	D	I	3	C	E	R	2	3	B	7	
EQ= encoder option												EQ

El código generado de la elección del motor es: MDI3CER23B7 el cual posee las siguientes características que se representara en la tabla 25. Las dimensiones y estructura del motor a pasos se observan en la figura 41.

Características mecánicas

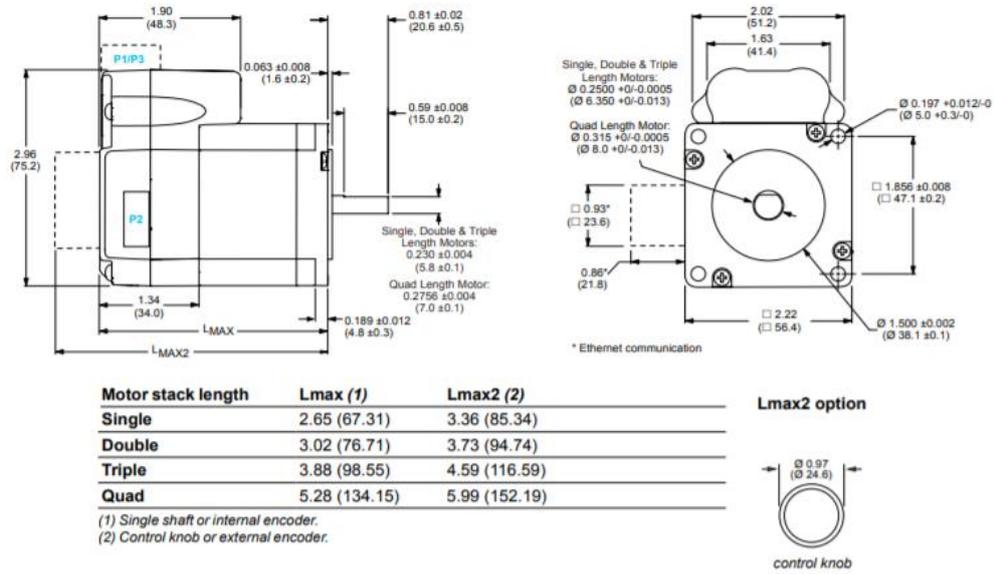


Figura 41. Dimensiones del motor [49]

Ahora se presenta las especificaciones de movimiento y de torque

Tabla 25. Características movimiento MDrive [49]

Microstep Resolution - Open Loop									
Number of microstep resolutions	20								
Available microsteps per revolution									
200	400	800	1000	1600	2000	3200	5000	6400	10000
12800	20000	25000	25600	40000	50000	51200	36000 ¹	21600 ²	25400 ³
1=0.01 deg/μstep 2=1 arc minute/μstep *3=0.001 mm/μstep									
* 1" per revolution lead screw									
Microstep resolution (closed loop configuration - optional)									
Steps Per Revolution (Fixed)	51200								
Position Resolution	2048								
Optional differential encoder (internally mounted)									
Type	Internal, Magnetic								
Resolution (Lines)	512								
Resolution (Edges)	2048								
Counters									
Counter 1 (C1) Type	Position								
Counter 2 (C2) Type	Encoder								
Resolution	32 bit								
Maximum Edge Rate	5 MHz								
Velocity									
Range	±5,000,000 Steps/Sec.								
Resolution	0.5961 Steps/Sec.								
Acceleration/Deceleration									
Range	1.5 x 10 ⁹ Steps/Sec. ²								
Resolution	90.9 Steps/Sec. ²								

Las características se toman del motor double length que se ve en la tabla 26.

Tabla 26. Torques motor MDrive [49]

Specification	Single length	Double length	Triple length	Quad length
Holding torque oz-in (N-cm)	90.0 (64)	144 (102)	239 (169)	283 (200)
Detent torque oz-in (N-cm)	3.9 (2.7)	5.6 (3.92)	9.7 (6.86)	14.2 (10.0)
Rotor inertia oz-in-sec ² (kg-cm ²)	0.0025 (0.18)	0.0037 (0.26)	0.0065 (0.46)	0.0108 (0.76)
Weight motor and driver oz (g)	21.6 (612.3)	26.4 (784.4)	39.2 (1111.3)	61.6 (1746.3)

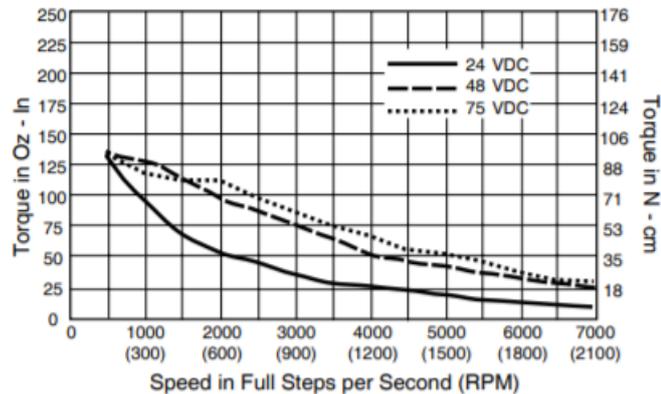


Figura 42. Dimensiones del motor [49]

5.4.2.1. Control del motor MDrive

Como se especificó al inicio, MDrive lleva una serie de comandos específicos para el control de movimiento del motor, teniendo 125 comandos para el control total del actuador que incluye la lectura y escritura de datos del motor como velocidad, aceleración, etc y los cuáles pueden ser usados como un código para el control de este. Los comandos del motor se disponen en la tabla 27 [49]

Tabla 27. Comandos MDrive

Comando	Función
A	Aceleración
AL	Recuperar todos los parámetros
AF	Banderas híbridas
AS	Modo híbrido
AT	Reservado
BD	Tasa de baudios

BP	Punto de rotura
BR	Rama de programa
BY	Programa ejecutando
C1	Contador 1
C2	Contador 2
CA	Modo de calibración
CB	Límites de control
CC	Calibración actual
CE	Reinicio de software habilitado
CF	Borrar falla del rotor bloqueado
CK	Comprobar suma habilitada
CL	Llamar a subrutina
CM	Activar modo de reloj
CP	Borrar programa
CR	Tasa de reloj
CT	Tiempo de calibración
CW	Ancho del reloj
D	Desaceleración
D1-D4	Interruptor de entrada anti-rebote filtro
D5	Entrada analógica
D9-D12	Interruptor de entrada anti-rebote
DB	Banda muerta del encoder

DC	Variable de decremento
DE	Activar controlador
DG	Desactivar respuesta global
DN	Nombre del dispositivo
E	Finalizar programa
EE	Activar encoder
EF	Bandera de error
EL	Recuento de línea del codificador remoto
EM	Modo eco
ER	Nombre del dispositivo
ES	Escape
EX	Ejecutar programa
FC	Filtro de captura
FD	Restaurar configuración de fabrica
FM	Filtro de movimiento
FT	Uso único interno
H	Mantener ejecución del programa
HC	Mantener la corriente del motor
HI	Inicio a la marca de índice
HM	Interruptor de inicio a inicio
HT	Mantener el tiempo de retraso actual

I1, I2, I3 e I4	Leer entradas 1-4
I5	Leer entrada analógica
I6	Leer marca del encoder
I7, I8	Reservado
I9, I10, I11, I12	Leer entradas 9 a 12
I13	Reservado
IC	Incrementar variable
IF	Variable de entrada pendiente
IL	Leer entradas 1 a 4 como un grupo
IH	Leer entradas 9 a 12 como un grupo
IN	Leer entradas 1 a 4 y 9 a 12 como un grupo
IP	Inicializar parámetros
IT	Leer temperatura interna
IV	Variable de entrada
JE	Activar jog
L	Espacio en lista de programa
LB	Subrutina
LD	Límites de adelanto
LG	Límites de retraso
LL	Posición de adelanto y retraso
LK	Bloquear usuario de programa

LM	Modelos de límites de paro
LR	Rotor bloqueado
LT	Tiempo fuera del rotor bloqueado
MA	Mover a una posición absoluta
MD	Modo de movimiento
MF	Make up frequency
MP	Moviendo a una posición
MR	Mover a una posición relativa
MS	Seleccionar resolución de micropaso
MT	Tiempo de retardo de estabilización del motor
MU	Make up mode
MV	Moviendo
NE	Activar numérico
O1, O2, O3, O4	Set salidas 1 a 4
O9, O10, O11, O12	Set salidas 9 a 12
OE	Controlador de errores
OL	Set salidas 1 a 4 como grupo
OH	Set salidas 9 a 12 como grupo
OT	Set salidas 1 a 4 y 9 a 12 como grupo
P	Contador de posición
PC	Posición capturada en el movimiento

PG	Modo de programa
PM	Activar posición estable
PN	Numero de parte
PR	Imprimir dato o texto
PS	Pausar ejecución del programa
PW	Configuración PWM
PY	Activar modo fiesta
QD	Puesto en cola
R1, R2, R3, R4	Registros de usuario
RC	Corriente de funcionamiento del motor
RS	Resumir ejecución de programa
RT	Regresar desde subrutina
S	Guardar a NVM
S1-S10	Iniciar entradas/salidas 1-4 y 9-12
S5	Set entrada analógica
S7, S8	Set reloj
S13	Set captura de entrada y salida
SC	Iniciar calibración
SF	Puesta de bandera
SL	Eje de giro
SM	Modo de detección de bloqueo
SN	Numero serial

SS	Velocidad del sistema
ST	Bandera de puesto
SU	Ejecutar programa al encender
TA	Disparo en modo hibrido
TC	Captura de viaje
TD	Dirección del par
TE	Activación de viaje
TI	Disparo de entrada
TP	Disparo en posición
TQ	Par de ajuste
TR	Disparo en posición relativa
TS	Ajustar velocidad del par
TT	Disparo en posición
UG	Actualización de firmware
UV	Leer variables de usuario
V	Velocidad de lectura
VA	Crear variable de usuario
VC	Cambio de velocidad
VI	Velocidad inicial
VM	Velocidad máxima
VR	Versión de firmware
WT	Temperatura de advertencia

La descripción de cada uno de los comandos y su uso se puede encontrar en el anexo 1 de referencia.

5.4.3. COMPONENTES DEL CONTROLADOR DEL SISTEMA

El controlador consta de varios componentes los cuales están encargados de enviar y recibir señales desde los diferentes dispositivos instalados en la máquina. La figura 44 muestra el sistema de control del sistema de posicionamiento cartesiano.

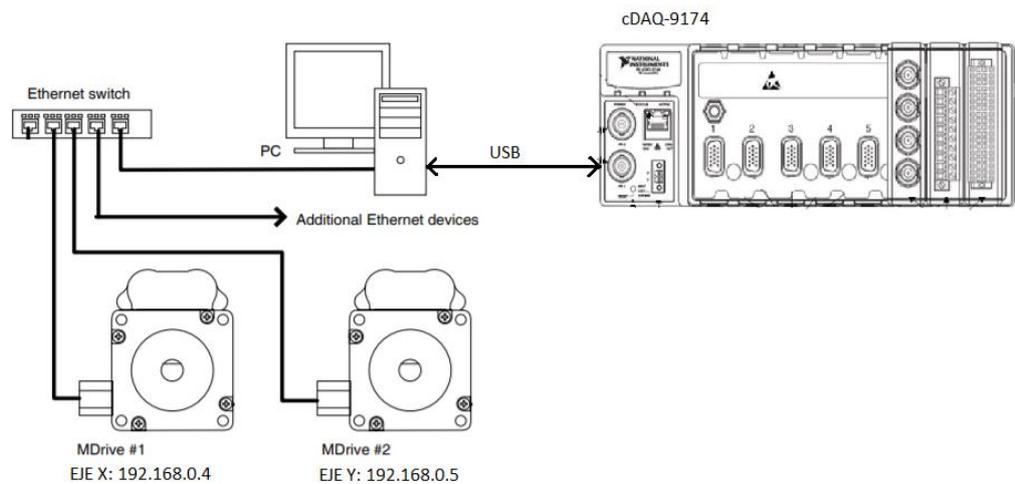


Figura 43. Arquitectura del sistema de control [49]

El sistema está constituido por un computador con un software de control, el cual está conectado media vía USB a un chasis cDAQ-9178 con 8 puertos para módulos. La alimentación del chasis viene incluida con el cable de alimentación.

Las especificaciones del chasis se especifican en la tabla 28

Tabla 28. Especificaciones del chasis cDAQ

Especificaciones técnicas	
Característica	Descripción
Especificación USB	USB 2.0 High Speed
Peso	878 g
Dimensiones	254 mm x 88.1mm x 58.9mm

Temperatura de operación	-20 °C a 55°C
Vibración en operación	5 a 500 Hz
Digital Trigger	2
Frecuencia de entrada de trigger máxima	1 MHz
Rango de voltaje de entrada	9 a 30V
Potencia máxima requerida de entrada	15 W
Consumo de potencia	500 uA máximo
Tasa de muestreo	Definido por el modulo

5.4.3.1. Selección de la fuente de poder

Para una correcta operación de los dispositivos se debe seleccionar una fuente apropiada de voltaje que entregue la corriente necesaria. La fuente de voltaje por lo general determina el desarrollo de altas velocidades del motor y la corriente el torque de salida. El suministro de un alto voltaje en el motor permite mayor velocidad, pero a la vez una mayor perdida por calor por lo que se eligió un nivel de voltaje adecuado para el mismo y su aplicación con el fin de mejorar la fiabilidad de este

Los factores para elegir la fuente de voltaje son:

1. Voltaje de alimentación
2. Corriente de salida

En la tabla 29 se resume los parámetros de voltaje y amperaje requeridos por los actuadores

Tabla 29. Especificaciones fuentes DC

	Motor eje X	Motor eje Y
Voltaje de alimentación	24	24
Tipo	NEMA 23	NEMA 23
Cantidad	1	1
Corriente por fase	1.2 A	1.2 A

Se seleccionó la fuente de poder Cctv 24V/10A 240W (figura 45) con caja metálica de la marca ALITOVE, la cual posee protección para alto voltaje y contra cortocircuito y es típicamente usada en estas aplicaciones.



Figura 44. Fuente 24VDC [53]

5.4.3.2. Módulos para el chasis cDAQ-9178

Los módulos usados en el chasis nos permitirán definir los puntos cero de la máquina y nos ayudaran a conectar los diferentes sensores distribuidos en la máquina, los datos son enviados al computador a través de vía USB, estos módulos son:

1. NI 9403

Es un módulo de entradas y salidas digitales bidireccionales de 32 canales donde el conexionado se ve en la figura 36. Los canales pueden ser configurados como entradas o salidas según sea la conveniencia. Los canales son compatibles con señales TTL de 5V. la transferencia de datos es de manera serial por lo que no puede ser usada como señales de timing o trigger. Las especificaciones se muestran en la tabla 30.

Tabla 30. Características modulo 9403

Características entrada/salida	
Número de canales	32
Tipo de entrada/salida	TTL, single-ended
Dirección de línea default	Entrada
Corriente de entrada	±250 uA máximo
Corriente de salida	64 mA máximo
Capacitancia de entrada	30 pF

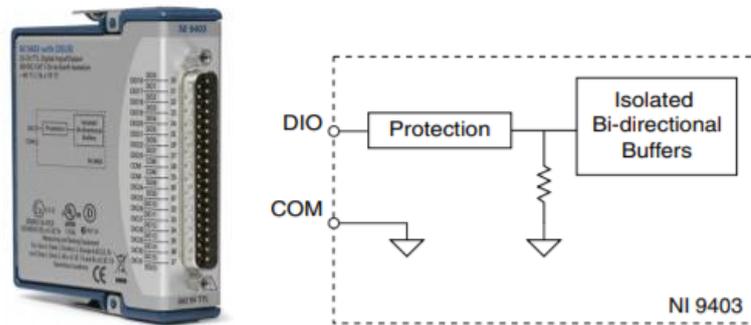


Figura 45. Conexión canal módulo 9403 [54]

Este módulo posee un bloque de conector de 37 pines a terminal de tornillo con el fin de poder conectar el módulo desde el conector DB37 a una bornera como se observa en la figura 47. El módulo se lo conoce como NI 9923

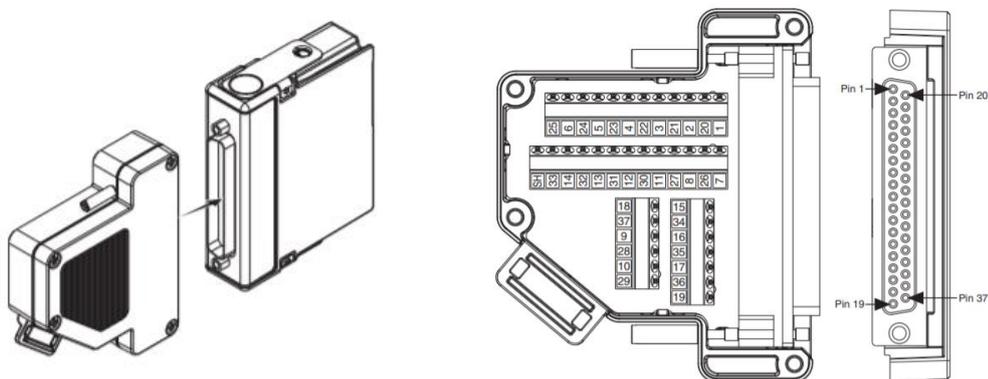


Figura 46. Conector NI 9923 pinout 48 [55]

2. NI 9223

El módulo NI 9223 nos permite tener 4 entradas analógicas diferenciales con una frecuencia de muestreo de hasta 1MS/s por canal y una resolución de 16 bits, dicho modulo será usado para la toma de datos en su aplicación. Las características del módulo NI 9223 se presenta en la tabla 31

Tabla 31. Características modulo 9223

Características entrada/salida	
Número de canales	4 canales de entrada analógicos
Resolución ADC	16 bits
Voltaje de entrada	$\pm 10.7V$ máximo
Tasa de muestreo	1MS/s por canal

5.4.3.3. Selección de los sensores

Para poder definir la posición cero o home de la máquina se necesita de sensores que sean fiables y que permitan desconectar el sistema en presencia de una emergencia, los sensores dispuestos en la máquina son:

Sensor Home: El sensor home LM393 nos permite definir el cero de la máquina a través de una ranura la cual atraviesa una placa localizada en el tornillo de bolas, definiendo así el punto cero de la máquina y además es usado para definir el final de recorrido de cada eje, es un sensor TTL que proporciona un pulso en alto al sensar a través de su ranura.

El módulo consta de un circuito integrado LM393 diseñado para ser utilizado como un comparador de voltaje como se ve en la figura 48, generalmente se la compara con una tensión de referencia. La señal del transistor fotográfico se transmite al comparador y en función de la presencia o ausencia de un objeto entre el led infrarrojo y el transistor fotográfico, la salida del integrado será alta o baja.

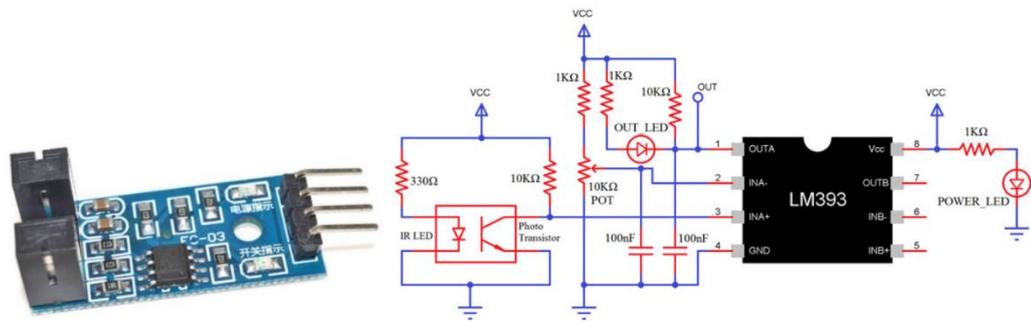


Figura 47. Módulo LM 393 [56]

Limit switch

Los fines carrera son dispositivos electromecánicos (figura 49) que se sitúan al final del recorrido de un elemento móvil con el objetivo de modificar el estado actual de un circuito. El funcionamiento consta en que al pasar el elemento móvil sobre la palanca del elemento el fin carrera abre o cierra un contacto eléctrico dentro del interruptor



Figura 48. Fin carrera mecánico [57]

Estos sensores mecánicos son usados en el sistema para desconectar la alimentación del sistema en caso de que los sensores home no lo hagan. Los fines carrera son usados para detener el sistema ante una emergencia de este y principalmente evitar la colisión de los elementos mecánicos. El funcionamiento se ve en la figura 50.

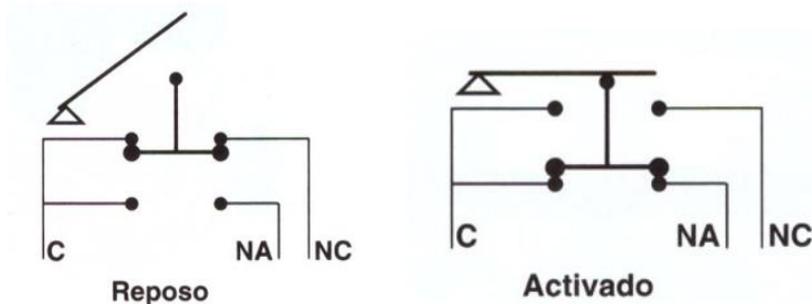


Figura 49. Funcionamiento fin carrera [58]

5.4.4. DISEÑO ELECTRÓNICO

El primer paso en el diseño del sistema es la arquitectura, tomando en cuenta la conexión de los diferentes elementos y el cableado de los diferentes sensores repartidos en la máquina.



Figura 50. Esquema de control

La revisión bibliográfica de la parte electromecánica constara de actuadores electrónicos y eléctricos los cuales son:

En la figura 51 se muestra la arquitectura del sistema utilizado en el cual se muestra el flujo de información entre los elementos sensores, actuadores y el computador.

En la tabla 32 se resume todos los componentes utilizados para el control de la máquina

Se requiere dos motores paso a paso NEMA 23 Mdrive para cada uno de los ejes de traslación, el driver viene incluido con el motor. Por razones de seguridad cada eje cuenta con dos *limit switch* para evitar accidentes y los sensores home que definen la posición de la máquina, finalmente los motores son alimentados por la fuente de alimentación de 24V, los otros elementos se conectan directamente a la red.

Tabla 32. Elementos sistema de control

Componentes del sistema de control.		
Ítem	Descripción	Cantidad
1	Motor MDrive Schneider NEMA 23 eje X	1
2	Motor MDrive Schneider NEMA 23 eje Y	1
3	Chasis cDAQ 9178 con módulos	1
4	Switch ethernet 6 puertos	1
5	Conector RJ45	3
6	Fuente de alimentación 24V	1
7	Conectores para la alimentación de los motores	2
8	Sensor home LM393	4
9	Limit switch	4
10	Cable de conexión	10 m

El software de control se lo va a realizar en LabVIEW por lo que todos los componentes deben conectarse al computador. El chasis cDAQ se conecta vía USB y los motores a través del switch en el puerto Ethernet del computador.

5.4.5. SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL

Para la selección del software que permitirá el control de la posición de cada uno de los ejes, el software debe ser compatible con la comunicación de los motores, así como de la tarjeta de control de datos y además ser compatible con el sistema operativo del ordenador.

Se selecciona el software de control LabVIEW debido a que la tarjeta de adquisición de datos pertenece al mismo fabricante y al utilizar un entorno grafico de programación podremos resumir el programa en varios para hacerlo más fiable. Este software

también permite diversos protocolos de comunicación tales como TCP/IP el cual nos servirá de ayuda para levantar la red local con los actuadores

La secuencia de las operaciones de control se describe en la tabla 33.

Tabla 33. Secuencia de operaciones del sistema

Secuencia	Operación	Elementos accionados		Estado
		Entrada	Salida	
1	Encendido general	Pulsador	Motores Fuente DC	Energizar elementos de la máquina
2	Posición home	Pulsador inicio	Motores Led indicador	Posición cero definida en los motores
3	Posicionamiento de ejes	Encoders	Motores	Velocidad definida, presentar valores de posición en pantalla

5.4.5.1 Diseño de la lógica de control

Para el sistema de posicionamiento cartesiano se usa un modelo de máquina de estados finitos, cuyo diagrama con sus respectivos estados y transiciones se presenta en la figura 51.

Los diferentes estados y transiciones definen la secuencia de puntos sobre el plano cartesiano que definen una trayectoria que sigue un algoritmo definido en el software

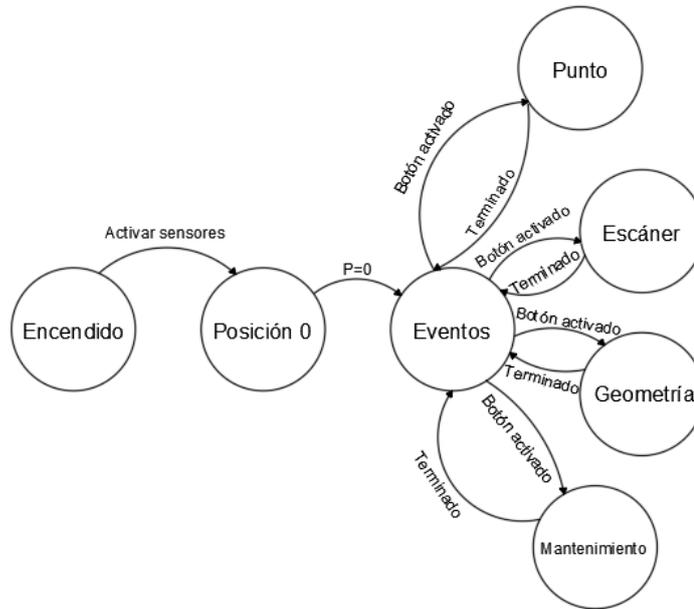


Figura 51 Máquina de estados finitos

El software sigue una determinada secuencia la cual inicia con el encendido del programa, al iniciar el VI realizado en LabVIEW se activa los sensores distribuidos en la máquina y a la vez se activa los motores si estos se encuentran en una posición diferente a (0,0).

El cambio de estado se da cuando el sensor se activa y obliga a la máquina a detenerse, definiendo esa posición como (0,0) para la máquina. Se envía el comando $P = 0$ a los motores con lo cual definimos su posición 0. Al cumplir esto, el cambio de estado lleva a un estado de eventos, en el cual se espera la acción de uno de los botones definidos en los 4 modos de operación del programa, los cuales son:

- **Estado posicionamiento en un punto:** En este modo, se ingresa los parámetros de recorrido y el sistema se posiciona en un punto (X, Y) ingresado, al activar el botón se ejecuta todo un algoritmo que lleva al sistema llegar a la posición ingresada y al final se regresa al estado de evento para continuar la operación.
- **Estado escáner:** En este modo, se ingresa los parámetros de recorrido y se define la trayectoria de barrido para el sistema, en este caso se ingresa la distancia a recorrer en X y un paso de barrido en el eje Y.

- **Estado geometría:** En este modo, se ingresa los parámetros y además una serie de coordenadas (X, Y) para que la máquina se posicione en cada uno de los puntos de manera secuencial logrando trayectorias geométricas definidas con interpolación lineal.
- **Estado mantenimiento:** En este modo se tiene una interfaz en la cual podremos probar y modificar varios parámetros del motor para el respectivo mantenimiento

Para llegar a la posición deseada, el algoritmo transforma las coordenadas cartesianas a micropasos que serán enviadas al motor a través del comando MA, a la vez que enviaremos los parámetros de velocidad y aceleración con sus respectivas unidades, con los comandos VM y A respectivamente. Al final obtendremos la posición convertida en coordenadas cartesianas, en el modo escáner y geometría se repite el proceso con la adición de la interpolación lineal. La figura 52 ilustra este procedimiento.

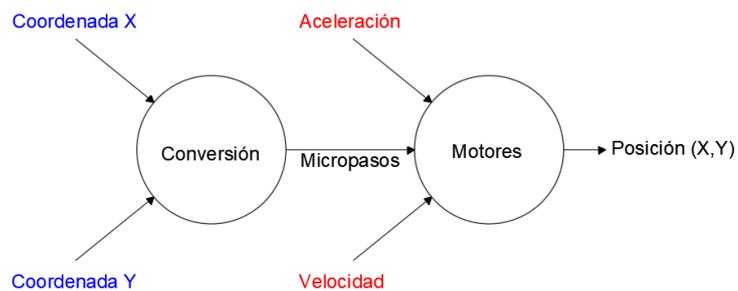


Figura 52 Algoritmo de posicionamiento

Cálculo del movimiento lineal del husillo

Dentro de la lógica de control, el algoritmo de conversión se encarga de definir una cantidad de micropasos que el motor debe realizar para llegar a la posición definida, este algoritmo de conversión se detalla a continuación con un ejemplo de aplicación.

El tornillo de bolas permite el desplazamiento lineal del eje, este tornillo genera un desplazamiento lineal de 5mm por cada revolución del tornillo. Se requiere mover una distancia definida la cual será de 100mm para el ejemplo.

100mm dividido para 5mm = 20 revoluciones del motor

Asumiendo un MS de 256 (51200 Microsteps), para el movimiento se requiere una cantidad de 51200 Microsteps por 20 revoluciones del motor:

$$51200 \text{ microsteps} \times 20 \text{ rev} = 1024000 \text{ microsteps}$$

Teniendo el conocimiento de las variables involucradas, se puede calcular el tiempo real que lleva mover el eje la distancia definida, usaremos un perfil trapezoidal como se observa en la figura 52.

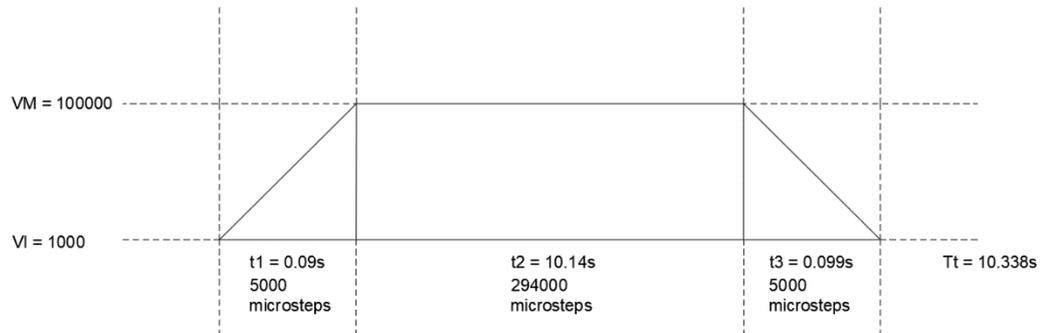


Figura 53. Perfil para el cálculo de tiempos.

Los parámetros definidos en el perfil trapezoidal son:

$t1$ (tiempo de aceleración): es el tiempo que el motor toma para llegar a la velocidad máxima definida.

$t2$ (tiempo de recorrido): es el intervalo de tiempo que el motor tarda en moverse los pasos deseados a la velocidad y aceleración definidos en los parámetros.

$t3$ (tiempo de desaceleración): es el intervalo de tiempo desde el cual inicia la desaceleración hasta alcanzar la velocidad inicial.

$d1$ (distancia $t1$): es la distancia en pasos viajada en el tiempo $t1$

$d2$ (distancia $t2$): es la distancia en pasos viajada en el tiempo $t2$

$d3$ (distancia $t3$): es la distancia en pasos viajada en el tiempo $t3$

Primero obtenemos la velocidad real del eje, siguiendo el perfil trapezoidal, conociendo los parámetros y sus valores como se ve en la tabla 34.

Tabla 34. Parámetros de movimiento

VM (Velocidad máxima)	100000 steps/s
VI (Velocidad inicial)	1000 steps/s
A (Aceleración)	1000000 steps/s ²
D (Desaceleración)	1000000 steps/s ²
d (Distancia en micropasos recorrida)	1024000 microsteps

Se calcula el t1 y t3 con la siguiente formula:

$$t_1, t_3 = \frac{VM - VI}{A} \quad (6)$$

$$t_1, t_3 = \frac{100000 - 1000}{1000000} = 0.099s$$

La distancia en pasos viajada en t1 o t3 es:

$$d_1, d_3 = \frac{VM + VI}{2} \times t_1 \quad (7)$$

$$d_1, d_3 = \frac{100000 + 1000}{2} \times 0.099s = 5000 \text{ microsteps}$$

Ahora determinamos el t2, éste es calculado dividiendo el resultado de d_2 por el VM

El resultado en micropasos se encuentra de la siguiente manera:

$$d_2 = d - (d_1 \text{microsteps} + d_3 \text{microsteps}) \quad (8)$$

$$d_2 = 1024000 - 2(5000) = 1014000$$

Ahora calculamos el t2

$$t_2 = \frac{d_2}{VM} \quad (9)$$

$$t_2 = \frac{1014000}{100000} = 10.14s$$

Una vez calculado t_2 , obtenemos el tiempo total T_t dado por la suma de los 3 tiempos

$$T_t = t_1 + t_2 + t_3 = 0.099 + 10.14 + 0.099 = 10.338s$$

El eje lineal toma un tiempo de 10.338 segundos para recorrer la distancia de 100mm a una velocidad de 100000microsteps/s.

El software calculará de manera automática los tiempos según los parámetros ingresados y nos dará el tiempo total de escáner al usar dicho modo.

Interpolación lineal de los ejes

Al realizar un movimiento de posicionamiento cartesiano sin la utilización de código G se necesita calcular un estimado para lograr una compensación de velocidad en el otro eje. Por ejemplo, el sistema necesita moverse desde el origen (0, 0) hacia el punto (100, 50). Si definimos ambos ejes con la misma velocidad se tiene el siguiente resultado visto en la figura 54.

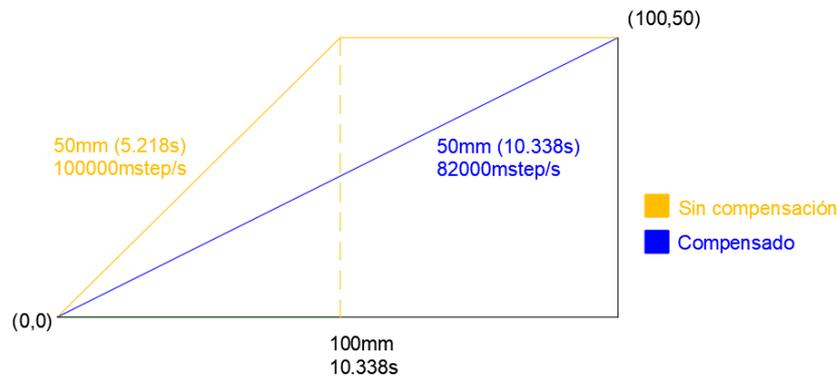


Figura 54. Interpolación lineal de ejes

Este resultado se da debido a que el sistema no está compensado en velocidad, es decir uno de los ejes debe ajustar su velocidad para llegar al punto dado en el mismo tiempo que se demora el otro motor, por lo que se necesita obtener primero el tiempo mayor definido por una velocidad y ajustar la velocidad del otro eje para obtener el mismo tiempo y la interpolación lineal deseada

Para el ejemplo se calculó los dos tiempos necesarios para llegar a la coordenada (100,50) como se ve en la tabla 35.

Tabla 35. Tiempos de movimiento

Coordenada	Tt
x = 100mm	10.338s
y = 50mm	5.218s

Como se puede apreciar en la tabla 35, los tiempos para llegar a la coordenada son diferentes, por lo que la coordenada menor debe ajustar su velocidad para llegar en el mismo tiempo que la otra coordenada y así lograr una interpolación lineal correcta. Para realizar esta compensación hacemos uso de las ecuaciones usadas para calcular el tiempo de recorrido, definiendo:

$$T_t = t_1 + t_2 + t_3 = 2t_1 + t_2$$

$$t_1, t_3 = \frac{VM - VI}{A} \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{d_2}{VM} \quad (11)$$

Resolviendo el sistema presentado anteriormente llegamos a la siguiente ecuación:

$$VM^2 + VM(-2VI - 2T_t A) + 10240 * d * A + VI^2 = 0 \quad (12)$$

Al ser una ecuación de segundo grado tomaremos el valor positivo como respuesta y cambiaremos la velocidad para compensar la interpolación lineal, para el ejemplo de la coordenada (100,50), se define la velocidad en X con un valor de 100000 y el motor del eje Y toma un valor de 82000microsteps/s logrando llegar en el mismo tiempo los dos ejes logrando la interpolación lineal mostrada en la figura 54

5.5. DESARROLLO DEL SISTEMA MECÁNICO

Con el diseño planteado en el programa SolidWorks y obteniendo los parámetros adecuado indicado en puntos anteriores procedemos a lo que es con su construcción e implementación de la máquina.

Para la fabricación de los diferentes elementos de la máquina se necesita un taller el cual posea los siguientes implementos entre máquinas, herramientas e instrumentos de metrología:

- Fresadora vertical y horizontal
- Torno Paralelo
- Rectificadora plana
- Rectificadora cilíndrica
- Taladro de pedestal
- Esmeril
- Herramientas manuales: llaves hexagonales, martillo, escuadra, rayador, granete, bandeador, machuelos, etc.
- Instrumentos de metrología: calibrador, reloj comparador, micrómetro de interiores y de profundidad
- Herramientas de ajuste: limas planas, redondas y de agujas.
- Mesa de trabajo
- Elementos varios: lijas, pintura, engrasador, alcohol, etc.

Considerando que los elementos se van a fabricar por primera vez el número de horas aproximadas para la fabricación en las diferentes máquinas herramientas es:

- 7 horas de trazado y graneteado
- 14 horas de fresadora horizontal
- 56 horas de fresadora vertical
- 20 horas de rectificadora planta
- 3 horas de rectificadora cilíndrica
- 22 horas de taladrado
- 12 horas de roscado

Para la elaboración del plan de construcción se ha dividido a la máquina en tres partes principales:

1. Estructura eje X
2. Estructura eje Y
3. Mueble

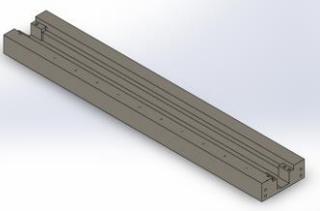
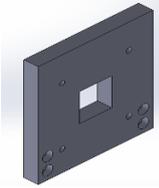
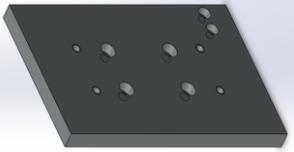
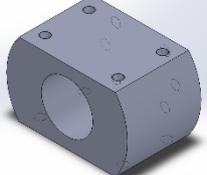
La materia prima seleccionada para el eje Y es en su mayoría de aluminio con la finalidad de reducir peso en la estructura de dicho eje y la tolerancia general de mecanizado la situamos en $\pm 0.005\text{mm}$.

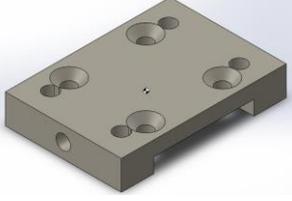
5.5.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LOS EJES

5.5.1.1. Estructura eje X

Para iniciar con el proceso de construcción se adquiere la materia prima y componentes mecánicos respectivos para lo cual se necesita de los siguientes materiales visto en la tabla 36.

Tabla 36. Características de materia prima eje X

Diseño	Material	Dim. Bruto	Aplicación
	ASTM A-36	729x120x45	Soporte para elementos de transmisión
	ASTM A-36	125x120x15	Placa soporte para la unión motor - tornillo
	Aluminio	86x47x16	Soportes de unión para el motor
	ASTM A-36	140x80x8	Base para el montaje del eje Y
	AISI 1018	D = 66x40	Acople de la tuerca del husillo de bolas

	ASTM A-36	56x39.5x10	Pieza de unión guía -tuerca husillo de bolas
	Bronce	D=36x50	Buje motor

Una vez contruidos lo elementos mediante el proceso de trabajo, se procede al montaje de los elementos.

Montaje de guías lineales

Para obtener una buena precisión HIWIN recomienda cuatro opciones de montaje de la cual se seleccionó el montaje con tornillos de sujeción como se ve en la figura 55.

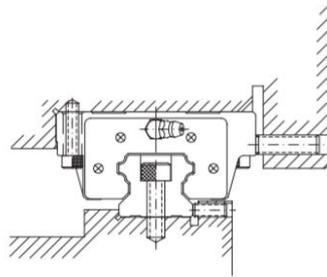


Figura 55. Montaje con tornillos de sujeción

Para la instalación de cada una de las guías se sigue los siguientes pasos:

1. Eliminar toda la suciedad de la superficie de la máquina (ver figura 56)

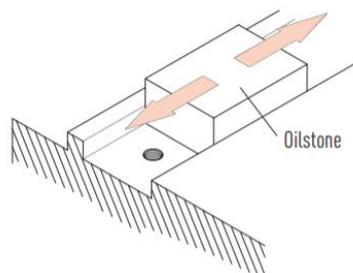


Figura 56. Limpieza de la superficie

2. Colocar con cuidado el riel sobre la bancada, presionar contra la superficie de referencia (ver figura 57)

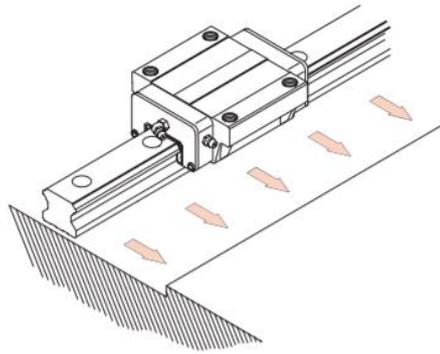


Figura 57. Montaje del riel.

3. Al alinear contra la superficie de referencia, verificar que los tornillos a usar encajen suavemente en los agujeros (ver figura 58)

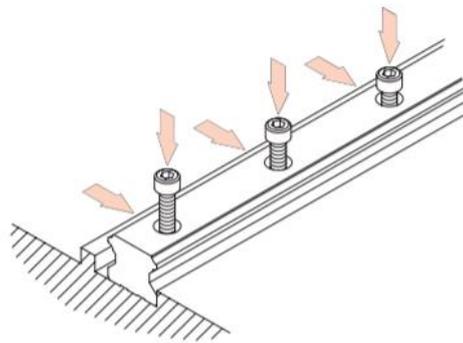


Figura 58. Ingreso de tornillos

4. Apretar los tornillos uno tras otro asegurando un buen contacto entre el riel y el borde de referencia (ver figura 59)

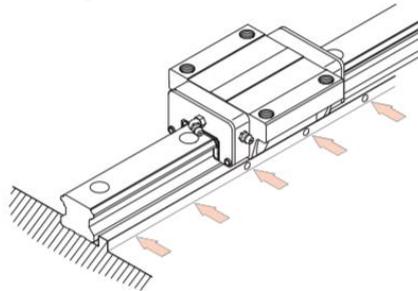


Figura 59. Ajuste de tornillos

5. Apriete los pernos de montaje con una llave dinamométrica hasta alcanzar el par especificado (ver figura 60)

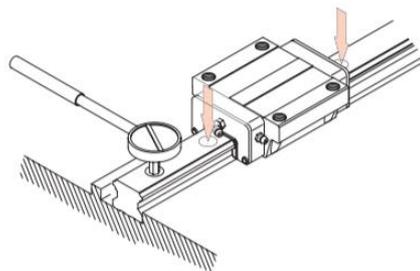


Figura 60. Apriete de tornillos de la guía. [39]

Procedimiento de instalación de los patines

Para la instalación de los patines una vez instalada la guía, se sigue los siguientes pasos:

1. Situar el tablero sobre los patines, ajustar un poco los tornillos
2. Presionar los patines en el lado principal de la guía mediante tornillos de fijación contra el lado de referencia logrando una alineación con la mesa
3. Ajustar los tornillos sobre el lado de la guía principal y luego en la secundaria en orden entrecruzado [39]

Ensamble del sistema de transmisión del eje X

Una vez construidos los elementos del eje X, el ensamble del sistema de transmisión se realiza de la siguiente manera:

1. Se monta el soporte BK12 en la primera pieza de la tabla 37, mediante tornillos M6x45, apretando un poco los tornillos
2. Se monta el tornillo de bolas en el soporte BK12 y de la misma forma en el soporte BF12, el soporte BF12 se ajusta con tornillos M6x45
3. Una vez apretado los tornillos de ambos soportes, se fija el tornillo mediante la tuerca de apriete en el soporte BK12 y mediante un segger en el soporte BF12
4. Se realiza una ranura plana en el extremo del tornillo restante y se acopla el buje de transmisión mediante tornillos prisioneros.
5. Se acopla el eje del motor al otro extremo del buje y se aprieta, el motor se ajusta a la placa soporte mediante las dos placas de aluminio con tornillos M5x50

El resultado que se obtiene se presenta en la figura 61.



Figura 61. Sistema de transmisión

Una vez obtenida la materia prima se efectúa al mecanizado de cada de los materiales para obtener el producto final.

Las máquinas utilizadas para la elaboración del eje X son:

- Fresadora
- Torno
- Taladro de mesa
- Rectificadora



Figura 62. Maquinaria de la Universidad

Los procedimientos que se lleva a cabo en la fresadora son:

1. Fresado frontal
2. Ranurado
3. Fresado por penetración
4. Contorneado
5. Agujeros con mandril para fresadora

En la figura 63 se observa el ranurado donde se va a sentar el guiado para la traslación del rodamiento lineal escogido.



Figura 63. Ranurado en la base del eje X

En el torno se mecanizó el acople de la tuerca del husillo de bolas, los procedimientos que se lleva a cabo son:

1. Refrentado
2. Cilindrado
3. Tronzado
4. Chaflanado
5. Taladrado

En algunas de las piezas se consiguió el rectificado para tener una tolerancia dimensional de 0.02 centésimas y un acabado superficial N4 que garantiza el ajuste de las piezas y el posterior ensamble de las mismas en el componente mecánico completo. El montaje final del eje X se presenta en la figura 64.

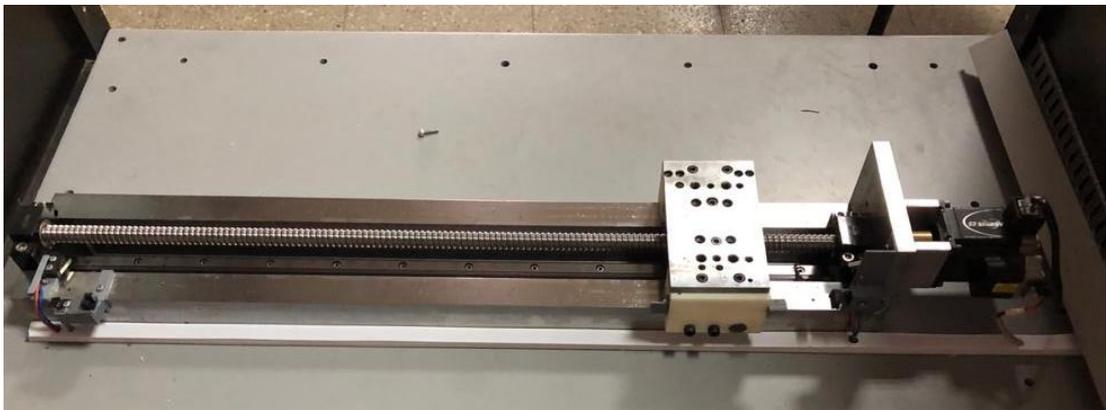
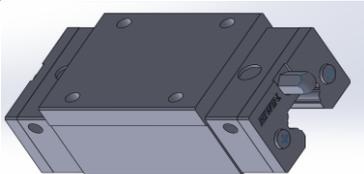


Figura 64. Montaje de la estructura del eje X

Los componentes adquiridos se presentan en la tabla 37

Tabla 37. Componentes mecánicos adquiridos

Diseño	Componente mecánico
	Husillo de bolas SFU 1605
	Guía para rodamiento lineal

	Apoyos fijos para el husillo de bolas
	Guía lineal

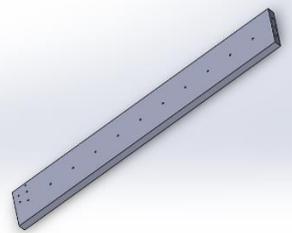
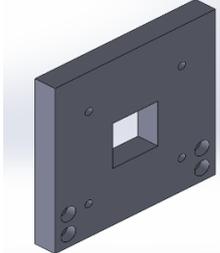
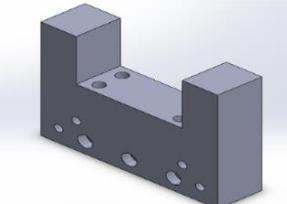
5.5.1.2. Estructura eje Y

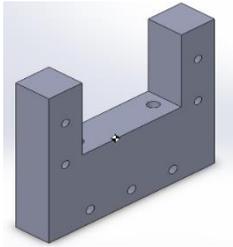
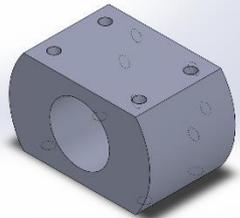
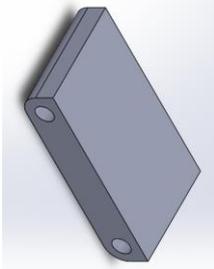
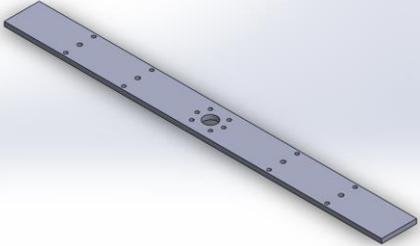
Para el eje Y se adquirió la materia prima de aluminio por sus diferentes propiedades mecánicas así mismo las diferentes máquinas que se utilizaron fueron

1. Fresadora
2. Torno
3. Taladro de mesa

La materia prima escogida se observa en la tabla 38

Tabla 38. Características de materia prima eje Y

Diseño	Tipo de material	Medidas (mm)	Aplicación
	Aluminio	684x100x17 mm	Soporte para la guía lineal
	Aluminio	100x118.5x15mm	Soporte para apoyo del motor
	Aluminio	77.5x100x25mm	Acople para el soporte fijo del husillo

	Aluminio	90x100x20mm	Acople para el soporte inferior del husillo de bolas
	Aluminio	D=66x40mm	Acople de la tuerca del husillo de bolas
	Aluminio	87x46x16mm	Apoyos para el motor
	Bronce	D=36x50mm	Buje de acople para el eje del motor y del tornillo
	ASTM A-36	L=600x40x6mm	Platina de apoyo para el marco

	<p>Aluminio perfilado</p>	<p>L=883x600x60mm</p>	<p>Marco de soporte para los puntos del eje Y</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------	-----------------------	---------------------------------------------------------------

La implementación del eje Y se muestra en la figura 65, en el cual se observa el eje Y desde una perspectiva lateral, con el eje X ya implementado con anterioridad, garantizando la estabilidad de la estructura.



Figura 65. Montaje de la estructura del eje Y

5.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Para el montaje de los componentes eléctricos y electrónicos de la máquina, es necesario la utilización de las siguientes herramientas e instrumentos

- Multímetro digital
- Cautín
- Juego de destornilladores
- Termoencogible
- Cinta aislante
- Cable plano 26 hilos
- Cable #16 AWG
- Guantes de goma

Para el armado eléctrico se han considerado dos etapas, la primera de la conexión de los motores y sensores en la máquina y la segunda del tablero de control en el cual se encuentran los elementos de control, con tiempos estimados de:

- 8 horas para la primera parte del ensamble de sensores
- 6 horas para el ensamble de las partes del tablero de control

Los diagramas de conexión de cada una de las partes se presentan en la figura 66.

Diagrama de conexión eje X: en este diagrama se presenta la conexión perteneciente al eje X, los sensores fin carrera cortan la alimentación del motor ejerciendo la tarea de un pulsador de emergencia.

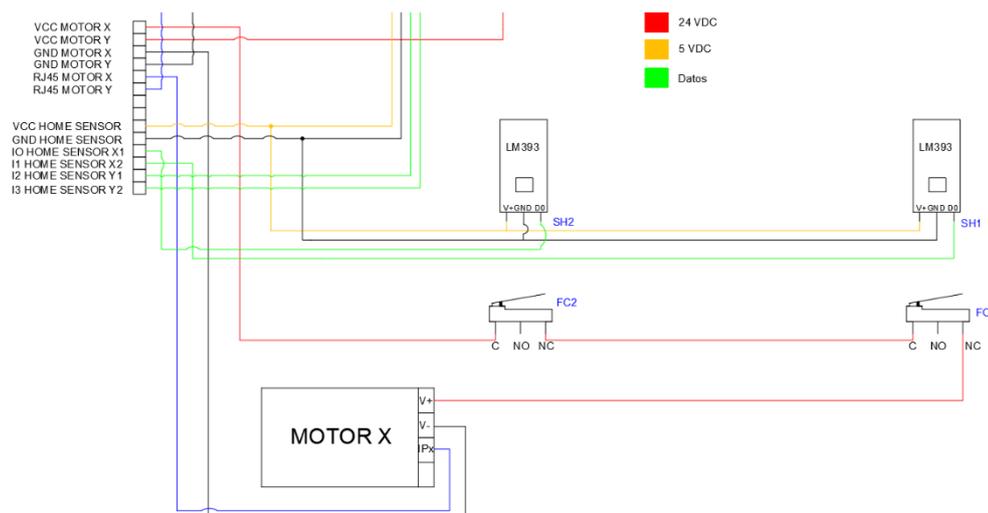


Figura 66. Diagrama de conexiones eje X.

Diagrama de conexión eje Y: en este diagrama se representa la conexión de los elementos electrónicos y eléctricos del eje Y, en disposición vertical.

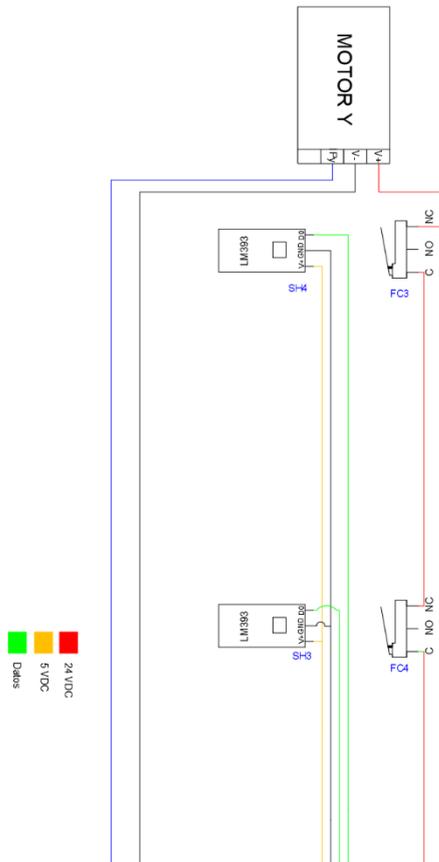


Figura 67. Diagrama de conexiones eje Y.

Diagrama de conexiones del tablero: una vez conectados los motores y sensores de los dos ejes, todos los cables llegan al tablero, cuyo diagrama está representado en la figura 68.

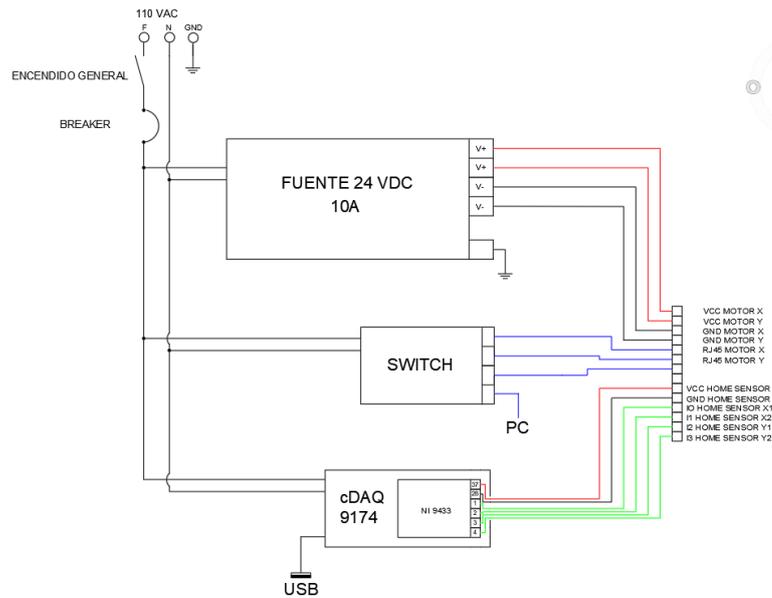


Figura 68. Diagrama de conexiones del tablero

Como se aprecia en el diagrama del tablero se tiene una conexión abierta en el switch Ethernet lo que significa que en un futuro se implementará otro eje lo cual da paso a un tercer motor. El tablero posee un switch de encendido general que encenderá todos los elementos de la máquina

5.7.DISEÑO DEL SOFTWARE

En el capítulo anterior se eligió el software LabView para el diseño del programa de control, el cual se dividirá en 3 fases:

- Posicionamiento de un punto: en este modo se ingresará los parámetros de recorrido y el punto deseado, en la cual el sistema se desplazará hacia ese punto.

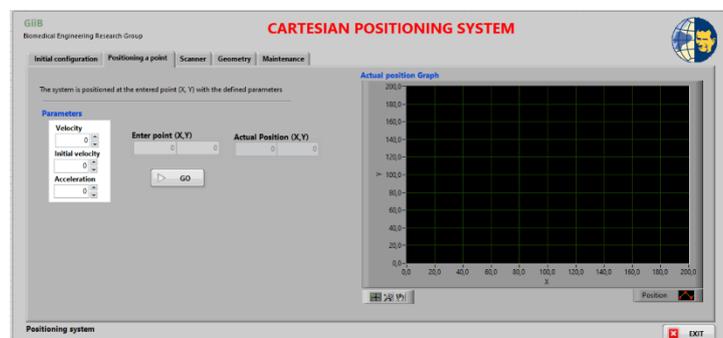


Figura 69 Programa modo posicionamiento

- Modo escáner: en este modo el sistema realizara un movimiento similar a un escáner, se define la distancia de movimiento de cada eje, primero se realiza un movimiento en el eje X, al finalizar se realiza un paso en el eje Y y se regresa el recorrido en el eje Y.

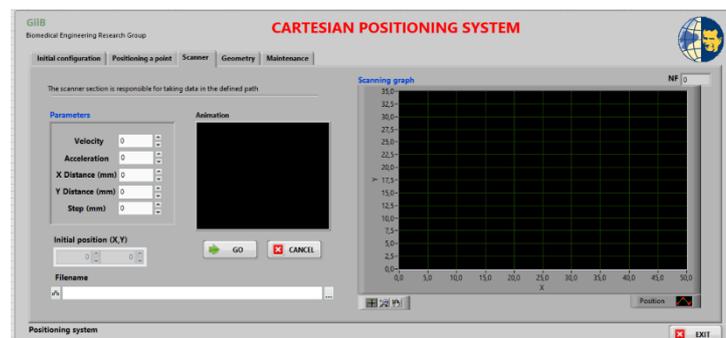


Figura 70 Programa modo escáner

- Posicionamiento de geometría: en este modo el sistema tomará una serie de puntos para formar una geometría definida.

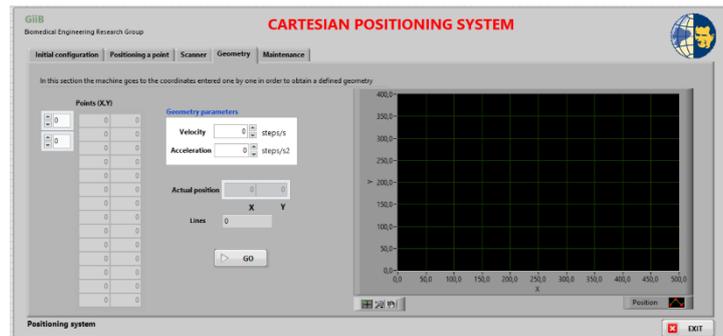


Figura 71 Programa modo geometría

La interfaz final debe tener además una sección para configuración ya sea de los motores como de los sensores, la interfaz del programa se presenta en la siguiente figura.

6. RESULTADOS

En la figura 72 se observa la implementación mecánica donde se obtuvo un desplazamiento óptimo para el barrido de la toma de datos y que no presenta juego entre las piezas mecánicas del sistema de posicionamiento cartesiano. En la parte eléctrica se procede con la conexión del sistema donde se obtendrá el conexionado de sensor Home hacia la CompactDAQ, el fin carrera que ira conectado a la fuente de alimentación de los motores y el cable ethernet para su protocolo de comunicación. Se añadió un encendido general más un breaker para cualquier desperfecto que se produzca a la hora del accionamiento de la máquina.



Figura 72 Implementación mecánica/eléctrica

Al finalizar el montaje como se observa en la figura 72 de los diferentes elementos que componen el sistema se procede a realizar las diferentes pruebas de posicionamiento y corroborar con los parámetros de diseño obtenidos

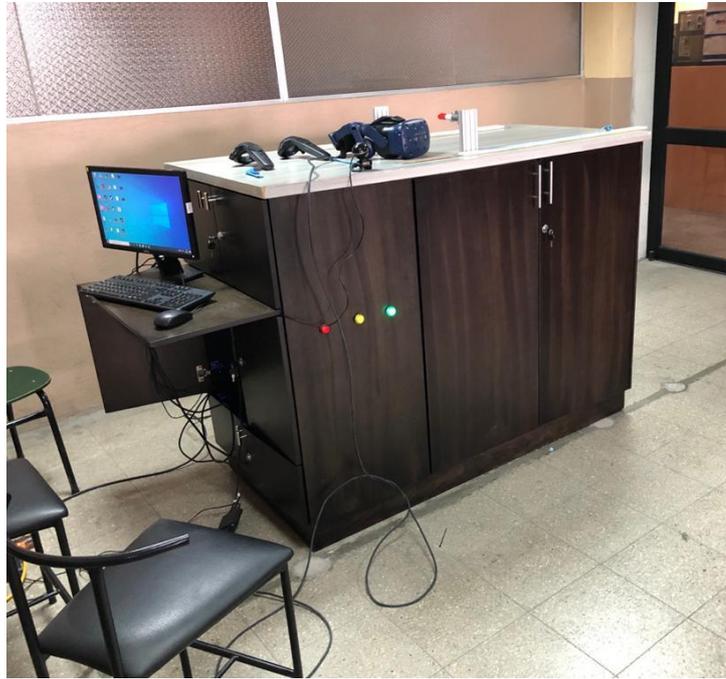


Figura 73. Máquina final

6.1. PRUEBAS DE POSICIONAMIENTO

En esta sección se presenta las diferentes pruebas que se realizaron en la máquina para garantizar su funcionamiento, con un área de hasta 500x500 mm como se aprecia en la figura 74.



Figura 74. Espacio de posicionamiento

Como la primera prueba, se toma la lectura del sensor de posición y se realiza una comparación con la posición deseada como se ve en la tabla 39.

Tabla 39. Mediciones de posicionamiento

Valor x	Valor y	Medición x	Medición y	Medida física X	Medida física Y	Error x	Error y
10	10	10	10	10.05	10.08	0.5	0.8
50	50	50	50	50.1	49.9	0.2	0.2
200	200	200	200	200.1	199.9	0.05	0.05
350	350	350	350	350.05	350.1	0.01	0.02
2	2	2	2	2.1	2.05	5	2.5
67	42	67	42	66.95	42.1	0.07	0.23
75	82	75	82	75.1	82.2	0.13	0.24

El sensor de posición en este caso es el encoder que se encuentra en el motor, y del cual se tomó los datos, como se puede ver nos ubica en la posición precisa, varios de estos puntos se presentan en la gráfica del programa a continuación:

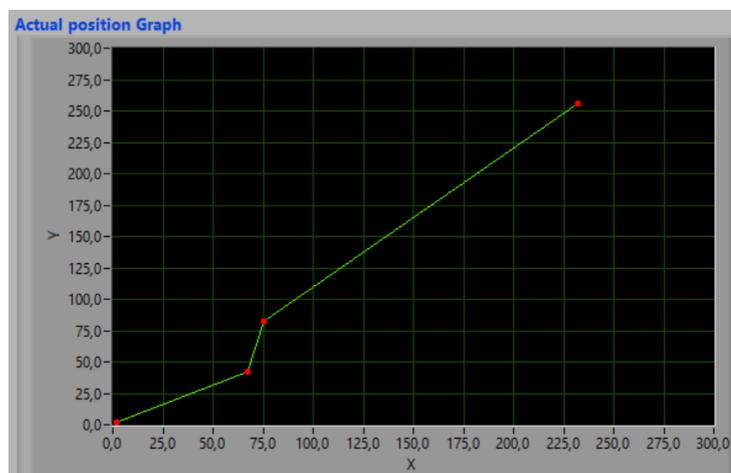


Figura 75. Diferentes coordenadas ubicadas

Como se puede ver en la imagen de la figura 75, el posicionamiento de la máquina en un punto dado tiene un óptimo resultado, se logra obtener la posición ingresada, con los parámetros ingresados

Al realizar pruebas a diferentes alturas con el fin de identificar fallas en la altura del posicionamiento, se realizó pruebas a diferentes alturas, como se presenta en la figura 76.

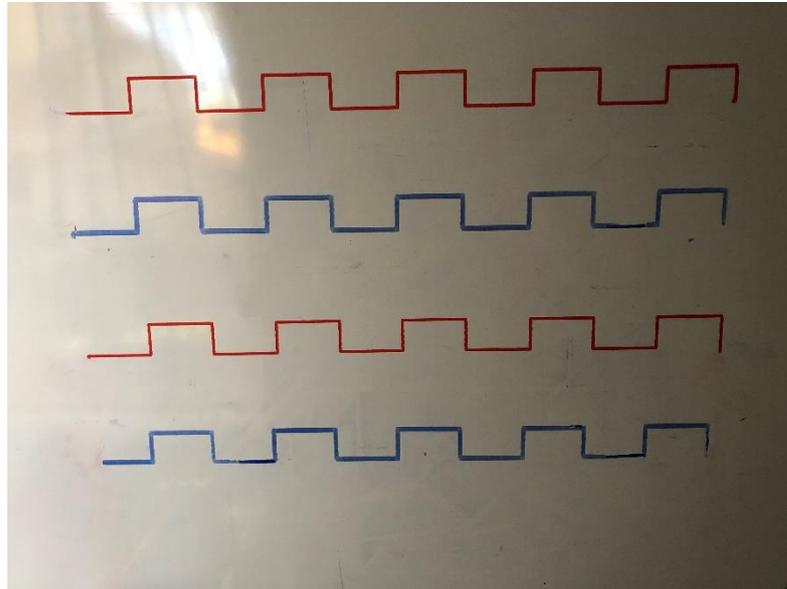


Figura 76. Patrón a diferentes alturas

Prueba del modo escáner

Para esta prueba vamos a trabajar con los siguientes datos de la tabla 40

Tabla 40. Parámetros de prueba

Parámetro	Unidad	Valor
Velocidad	msteps/s	200000
Aceleración	msteps/s ²	300000
Distancia x	mm	50
Distancia y	mm	50
Paso	mm	5

Al ejecutar esta prueba se obtiene los resultados de los siguientes gráficos como se puede apreciar en la figura 77.

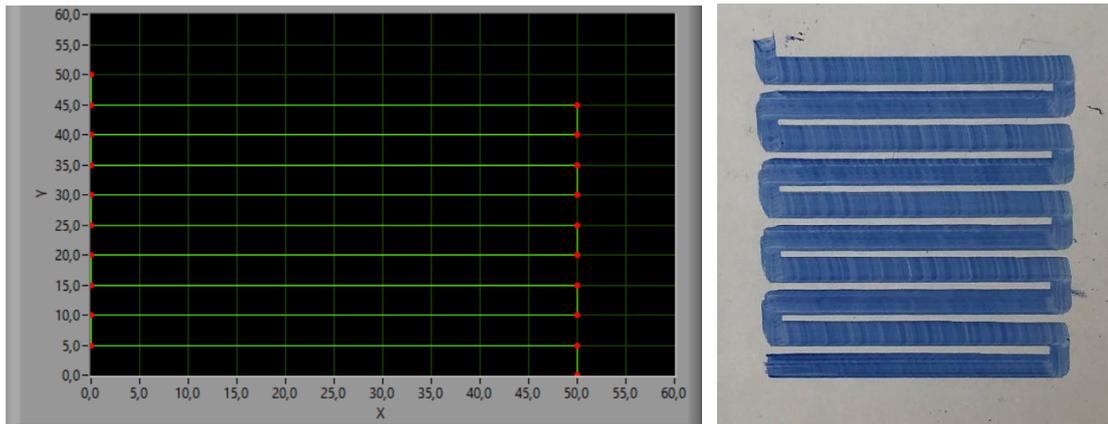


Figura 77. Pruebas modo escaner

El funcionamiento en este modo es el optimo ya que se logra hacer el barrido en el eje X y subir el eje Y según el paso definido, al ser 5 tenemos que el eje Y se mueve 10 veces para lograr llegar a la altura indicada que es 50, en el valor de 50 el barrido no se logra ya que ya llega a la altura indicada, al tener un valor no fijo en el paso el programa tomará el valor menor para realizar el escaneo.

Prueba del modo geometría

En este modo la máquina toma una lista de coordenadas para ubicarse en los diferentes valores usando la compensacion de velocidad para llegar al mismo tiempo al punto indicado, algunas pruebas se muestran en la figura 78.

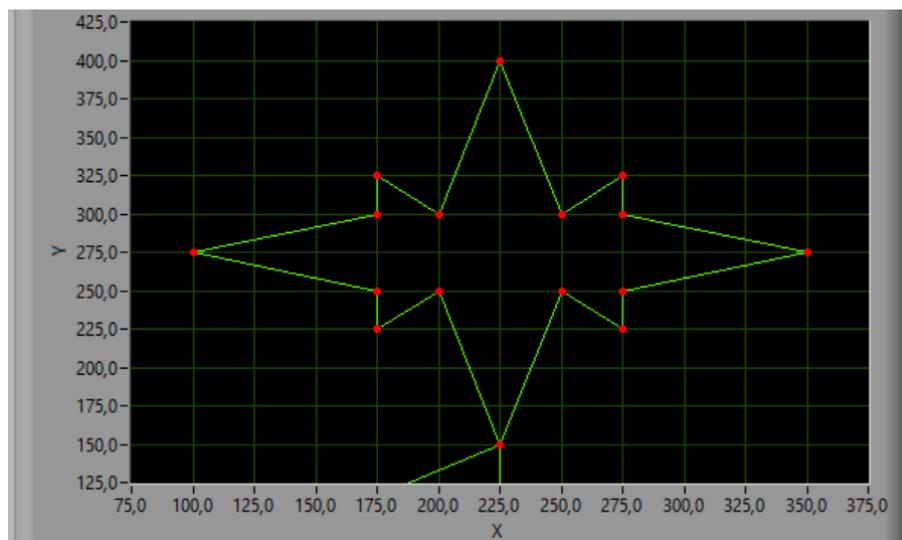


Figura 78. Pruebas modo geometria, software



Figura 79. Geometria definida

Como se puede ver en la figura 78, la máquina se posiciona en los valores definidos obteniendo la geometria sin ningun tipo de error y en los tiempos definidos de trayectoria.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En función a los requerimientos establecidos como vibración, distancia de barrido para la toma de datos y precisión en el desplazamiento se escogió distintos mecanismos aptos para el desarrollo de sistema mecatrónico como el sistema de guiado, la transmisión de movimiento, etc. Otros parámetros que se tuvo en cuenta es el fácil montaje del sistema ya que este puede ser desarmable para que se traslade de un punto a otro para realizar diversos experimentos y la fiabilidad de todos los mecanismos adquiridos para que posteriormente no presenten fallos.

El diseño del sistema de posicionamiento inicia definiendo la distancia de trayectoria de los ejes las cuales tienen una carrera de 500mm, con este dato se buscó las mejores alternativas para obtener la mejor transmisión y guiado lineal que son los componentes más críticos del sistema.

El diseño del eje X se dispuso del uso de una guía lineal de perfil y un tornillo de bolas debido a su alta precisión y carga de trabajo, el diseño del eje Y conlleva el mismo principio pero algunos cambios ya que el diseño debe permitir que el peso de este no influya en la trayectoria del eje Y, por lo que está enfocado en mantener el peso de este en el centro de gravedad del eje Y permitiendo así que todo el peso se distribuya en el centro de masa y no se genere ningún momento adicional que el eje X debería soportar. Otro cambio en el eje Y fue el material, se eligió un material con menos densidad y con el que se pueda realizar mecanizado por arranque de viruta para su construcción, eligiendo el aluminio, obteniendo con un peso de 3 a 4 veces menor al eje X.

El sistema de control se lo definió respecto a la vanguardia de los actuadores actuales, se eligió motores que tengan el torque adecuado para mover el peso de los ejes y que posean un protocolo de comunicación TCP/IP con la finalidad de enviar y recibir datos rápidamente, el software de control se lo realizó en el programa LabView, el cual permite la comunicación con el protocolo elegido y nos da la apertura a futuras conexiones de actuadores al sistema. El punto cero del sistema está definido por sensores ópticos que marcan el punto (0,0) y además fin carrera de emergencia los cuales desconectaran la alimentación del sistema en caso de accidente.

Se recomienda elegir las herramientas adecuadas al momento de la construcción, ya que, al ser un sistema de alta precisión, las herramientas deben tener la calidad

adecuada para lograr los acabados y tolerancias definidas en el sistema, además de generar un plan de mantenimiento para evitar desgaste por fricción o falta de aceite en dichos elementos y generar un mantenimiento mínimo de 2 veces por año para evitar daños en los elementos

Las pruebas realizadas en el sistema nos demuestran la validez del diseño y su desplazamiento en los dos ejes coordenadas a diferentes velocidades las cuales podrán ser definidas por el usuario, el sistema está enfocado a trabajar en el modo escáner, es decir generar un barrido en el eje X y desplazarse un paso en el eje Y con el fin de obtener un volumen de barrido definido por el movimiento de los dos ejes cartesianos y la distancia definida en el eje Z anteriormente. En este modo el sistema debe evitar cualquier tipo de error por software ya que está destinado a trabajar por largas jornadas sin ningún tipo de interferencia humana.

El conexionado eléctrico debe realizarse tomando en cuenta todos los seguros para cortocircuito y se colocará un interruptor general de encendido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wikipedia. (2012). Husillo de bolas. 23 de marzo del 2020, de Wikipedia Sitio web: https://es.wikipedia.org/wiki/Husillo_de_bolas
- [2] Ingemecánica. (2010). Caracterización experimental del comportamiento de uniones atornilladas sometidas a tracción. 22 de marzo del 2020, de Inge Mecánica Sitio web: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut30/doc2tut30.pdf>
- [3] Ewellis. (2019). Tornillo de rodillos y de bolas. 20 de marzo del 2020, de Ewellis makers in motion Sitio web: <https://www.ewellix.com/es/ec/productos/tornillos-de-rodillos-y-de-bolas?reload=true>
- [4] Fundamentos de máquinas (tomas Gonzales bautista, Gonzalo del rio)
- [5] Heinrich Gerling. (1984). Procedimientos diversos. En Alrededor de máquinas herramientas (285). Espana: Reverté.
- [6] R. Couoh, «Laminas y Aceros,» 31 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/qu%C3%A9-es-una-fresadora>. [Último acceso: 07 Diciembre 2020]
- [7] Dpto. Ingeniería Mecánica. (2012). Rectificado. 21 de Marzo del 2020, de Escuela técnica superior de Ingeniería Bilbao Sitio web: http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/1017_ca.pdf
- [8] Thomson Linear Motion. (2019). Guías lineales de rieles redondos o cuadrados. 20 de Marzo del 2020, de Thomson Linear Sitio web: <https://www.thomsonlinear.com/es/productos/rodamientos-lineales/acerca-de-guias-lineales>
- [9] Antonio Pérez González. (2016). Guía lineal. 20 de Marzo del 2020, de Universidad de Castellón, España Sitio web: http://www.mecapedia.uji.es/guia_lineal.htm
- [10] Peng Jing-hui, Wanf Quin, Zhan Ying-dong (2018). Vibration Problems and Application of Vibration Reduction System in Engineering International Conference

on Mechanical, Control and Computer Engineering, 3er d, 26-31. Noviembre 27, 2018, de Control and Computer Engineering

[11] INVAR. (2019). Análisis de Vibraciones. Abril 16,2020, de INVAR Sitio web: <http://www.invaringenieria.com/servicios/estructuras-2/analisis-de-vibraciones>

[12] Serway, F. (2015). Teoría de las vibraciones mecánicas. Abril 16,2020, de Universidad del Viasco Sitio web: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/fisica-aplicada-a-la-ingenieria/contenidos/tema-4/VIBRACIONESMECANICAS.pdf>

[13] EUMUS. (2015). Física del sonido . Abril 16,2020, de EUMUS Sitio web: http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza//acustica/apuntes/material-viejo/fisica_r

[14] I.E.S. (2015). Vibraciones y ondas. Abril 16,2020, de I.E.S Sitio web: http://www.iesalandalus.com/joomla3/images/stories/FisicayQuimica/Fis2B/t5_ondas.pdf

[15] Garcia, J. (2016). Sistemas de transmisión mecánica . Abril 16,2020, de Universidad Mayor San Andres Sitio web: <http://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/15454/EG-1080-%20Flores%20Garc%C3%ADa%20Juan%20Carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[16] Rodrigo, J. (2014). Transmisiones y rodamientos. Abril 16,2020, de Mecánica y electricidad Sitio web: http://www.centrozaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R8_A6.pdf

[17] Departamento de Energía Mecánica. (2009). Elemento de máquinas y vibraciones. Abril 16,2020, de Departamento de Energía Mecánica Sitio web: http://www.imem.unavarra.es/EMyV/pdfdoc/vib/vib_control.pdf

[18] Eduardo J. Carletti. (2019). Motores a paso. 19 de Marzo del 2020, de Robots Argentina Sitio web: http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm

[19] Webstarsnet. (2019). Fundamentos del motor a paso. 20 de Marzo del 2020, de Webstarnet Sitio web: <https://webstarsnet.com/es/46-basics-of-stepper-motor.html>

- [20] Jose Bertomeu. (2016). Motor paso a paso. 21 de Marzo del 2020, de Facultad Regional Mendoza Sitio web: http://www1.frm.utn.edu.ar/mielectricas/docs2/PaP/MOTOR_PaP_FINAL.pdf
- [21] Frank . (2017). Motor paso a paso. 20 de Marzo del 2020, de Ingeniería Mecafenix Sitio web: <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>
- [22] Orientalmotor. (2017). Comparación de motores paso a paso de 2 fases y 5 fases. 16-04-2020, de Orientalmotor Sitio web: https://www.orientalmotor.com.mx/tecnica/2-fase_vs_5-fase.html
- [23] Electro Industrias . (2018). ¿Que son los sistemas DAQ?. 16-04-2020, de Electro Industrias Sitio web: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3286&edi=164&xit=que-son-los-sistemas-daq>
- [24] National Instruments. (2019). Que es Adquisición de Datos. 16-04-2020, de National Instruments Sitio web: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- [25] Ernesto, B.. (2015). Domotica y DAQ. Abril 04,2020, de Palimpalem Sitio web: <https://www.palimpalem.com/4/BONATEC/index.html?body13.html>
- [26] James,M. (2018). What Is CompactDAQ. Abril 16,2020, de Wiresmith Technology Sitio web: <https://www.wiresmithtech.com/articles/what-is-compactdaq/>
- [27] National Instruments. (2019). Que es CompactDAQ. Abril 16,2020, de National Instruments Sitio web: <https://www.ni.com/es-cr/shop/compactdaq.html>
- [28] Gabriel, V. (2015). Protocolos de comunicación TCP/IP. Abril 04,2020, de Computer Science Departament Sitio web: <https://www.cs.upc.edu/~gabriel/files/DEA-es-1LosprotocolosTCPIP.pdf>
- [29] Simon, A. (2019). Protocolos TCP/IP. Abril 16,2020, de McGraw-Hill Sitio web: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448199766.pdf>
- [30] Juan,M. (2017). Los protocolos TCP/IP. Abril 16,2020, de Junta de andalucía Sitio web: http://www.juntadeandalucia.es/empleo/recursos/material_didactico/especialidades/

materialdidactico_administrador_servidores/Content/2-redes_tcp/3

LosProtocolosTCP-IP.pdf

[31] Schaeffler, “Sistemas de guiado lineal, sistemas con recirculación de rodillos, sistemas con recirculación a bolas, guías lineales con patines con recirculación a bolas”, 2008.

[32]Schaeffler, “Guías lineales con rodillos-guia, pernos, accesorios”, 2008.

[33] Schaeffler, “Rodamientos lineales a bolas autoalineables”, 2008.

[34] AluFLexGroup, “Catálogo Ball Screws”, 2019.

[35] Tecnopower. (2019). Reductores planetarios. 21 de Marzo del 2020, de TecnoPower Sitio web: <https://www.tecnopower.es/not%C3%ADcias/la-soluci%C3%B3n-los-plazos-de-entrega-en-reductores-planetarios-y-cremallera-de-precisi%C3%B3n>

[36]Mercado Libre (2018). Tornillo Acme 8mm 8x400, 22 de Marzo del 2020, de Mercado Libre Sitio web: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-566586218-tornillo-acme-8mm-8x400-proyectos-cnc-husillo-8mm-router-cnc-impresora-3d-reprap-_JM

[37] Antony Garcia. (2016). Qué es y cómo funciona un servomotor. 21 de Marzo del 2020, de Panama Hitek Sitio web: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>

[38] Adrian. (2014). Control motor paso a paso. 20 de Marzo del 2020, de Blascarr Sitio web: <http://blascarr.com/control-motor-paso-a-paso/>.

[39] HIWIN,” Catálogo de guías lineales”, 2019

[40] Jimenez Cordova Darwin Raul, Diseño de mecanismos y simulación del control automático del sistema de posicionamiento y desplazamiento en 3 dimensiones de la herramienta en una maquina CNC. Escuela Politécnica Nacional, 2018.

[41]Moreno Zapata Eduardo Patricio, Diseño y simulación de un router CNC para corte por plasma a partir de archivos DXF 2D. Escuela Politécnica Nacional, 2016.

[42] THK, “Catálogo husillo de bolas”, 2017.

- [43] Morales Rios Hugo Andrés, Diseño mecánico de la estructura para un router CNC. Universidad Nacional Autónoma de Mexico, 2012.
- [44] Salazar Sanchez Juan Carlos, Gortaire Hidalgo Alonso Vladimir, Diseño y simulación de una mini fresadora didáctica controlada por PC. Universidad de las fuerzas Armadas ESPE, 2010.
- [45] Rodriguez Lombana Johans Manuel, Diseño de una máquina de corte CNC de 3 ejes. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2016.
- [46] Galarza Bravo Juan Bernardo, Reinoso Hidalgo Lincoln Israel, Diseño y construcción de un sistema robótico cartesiano para corte de madera con un espesor de hasta 8mm mediante una herramienta laser para la empresa edimca. Universidad de las fuerzas armadas, 2016.
- [47] Oviedo Duque Miguel Ernesto, Construcción de un módulo demostrativo de un robot cartesiano para identificación y clasificación de elementos por colores, para la empresa Ecuainsetec Cia. Ltda. Universidad de las fuerzas armadas, 2017.
- [48] Bustillos Escola Diego Israel, Coque Larcos Klever Raúl, Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el laboratorio CNC de la ESPE extensión Latacunga. Universidad de las fuerzas armadas extensión Latacunga, 2014.
- [49] Schneider Electric, “MDrive Motion Control, MDrive and Linear Actuator Products”, 2019.
- [50] Machifit (2019). Soporte de extremo de tornillo de bola para tornillo de bola SFU1605 Parte de CNC, 21 de Marzo de 2020, de Banggood Sitio web: https://es.banggood.com/BK12-Ball-Screw-End-Support-for-Ball-Screw-SFU1605-CNC-Part-p-1088711.html?cur_warehouse=CN
- [51] CNC4YOU (2019). Ballscrew support BF12, 22 de Marzo del 2020, de CNC4YOU Sitio web: [https://www.cnc4you.co.uk/Ballscrew-Support-BF12-TMT-\(SYK\)](https://www.cnc4you.co.uk/Ballscrew-Support-BF12-TMT-(SYK))

[52]rfaranda (2019). Motores paso a paso de 8 hilos, 21 de Marzo del 2020, de Alciro Sitio web: http://www.alciro.org/alciro/Plotter-Router-Fresadora-CNC_1/notores-paso-a-paso-8-hilos_433.htm

[53]Mercado Libre (2017). Transformador-fuente de alimentación de 220-12v 20A, 21 de Marzo del 2020, de Mercado Libre Sitio web: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-428676414-transformador-fuente-de-alimentacion-de-220-12v-20-amperios-_JM#redirectedFromParent

[54]Datasheet NI 9403 (2019)

[55]Datasheet NI 9923 (2019)

[56] Electronics Hub (2018). LM393 Speed sensor module, 22 de Marzo del 2020, de Pinterest Sitio web: <https://www.pinterest.com/pin/697987642225294324/>

[57] Jorge Electrónica (2015). Interruptores Fin de Carrera, 22 de Marzo del 2020, de Paletos de la electrónica Sitio web: <https://paletosdelaelectronica.wordpress.com/2015/01/25/interruptores-fin-de-carrera-i/>

[58] Anónimo (2019). Microrruptor o final de carrera, 23 de Marzo del 2020, de Blogspot Sitio web: <https://elblogdelprofesordetecnologia.blogspot.com/2016/02/microrruptor-o-final-de-carrera.html>

[59] Electronic components (2019). Motor paso a paso – Tipos y ejemplos del uso de motores paso a paso, 25 de Marzo del 2020, de Electronic Components Sitio web: <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/41861/Motor-paso-a-paso-tipos-y-ejemplos-del-uso-de-motores-paso-a-paso/>

[60] Mecafenix (2017). Motor paso a paso ¿Qué es y cómo funciona?, 25 de Marzo del 2020, de Ingeniería Mecafenix Sitio web: <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

ANEXOS

Anexo 1: Motor MDrive

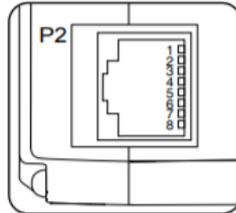
Motion instructions, variables and flags

Mnemonic	Function	Unit	Range	Syntax Example
(-)	Do Previously Set Mode to/at This Value	per mode		-<number>
A	Set Acceleration	Steps/Sec ²	1000000000	A=<accel>
D	Set Deceleration	Steps/Sec ²	1000000000	D=<decel>
HC	Set Hold Current	% (Percent)	0 to 100	HC=<percent>
HT	Set Hold Current Delay Time	milliseconds	0–65000	HT=<msec>
JE	Jog Enable Flag	–	0/1	JE<0/1>
LM	Limit Stop Mode	–	1–6	LM=<number>
MA	Set Mode and Move to Abs. Position	±Position	Signed 32 bit	MA <±pos>
MD	Motion Mode Setting	–	–	–
MR	Set Mode and Move to Relative Position	±Distance	Signed 32 bit	MR <±dist>
MS	Set Microstep Resolution	Microsteps/step	MSEL Table	MS=<param>
MT	Motor Settling Delay Time	milliseconds	0–65000	MT=<msec>
MV	Moving Flag	–	–	PR MV
NE	Numeric Enable	–	0/1	NE<0/1>
RC	Set Run Current	% (Percent)	1 to 100	RC=<percent>
SL	Set Mode and Slew Axis	Steps/sec	±5000000	SL <velocity>
V	Read Current Velocity	Steps/sec	±5000000	PR V
VC	Velocity Changing Flag	–	–	BR<addr>, VC
VI	Set Initial Velocity	Steps/sec	1–5000000	VI=<velocity>
VM	Set Maximum Velocity	Steps/sec	1–5000000	VM=<velocity>

Program instructions, variables and flags

Mnemonic	Function	Unit	Range	Syntax Example
BP	Break Point	-	-	BP <addr>, <mode>
BR	Branch (Conditional/Unconditional)	-	-	BR <addr>, <cond>
BY	Program Executing	-	-	PR BY
CL	Call Subroutine (Conditional/Unconditional)	-	-	CL <addr>, <cond>
CP	Clear Program	Address	1-767	CP <addr>
DC	Decrement Variable	-	-	DC <var/ureg>
E	End Program Execution	-	-	E
ES	Set Escape Mode	-	0 - 3	ES=<0-3>
EX	Execute Program at Address Using Selected Trace Mode	1 to 767		EX <addr>, <mode>
H	Hold Prog. Execution Blank/0=Motion stops	milliseconds	Blank(0) 1-65000	H=<msec>
IC	Increment Variable	-	-	IC <var>
L	List Program	Address	1-767	L <addr>
LB	Create a Program Address Label Name			
LK	Lock User Program		0/1	LK=<0/1>
OE	On Error Handler 0=Disabled	Address	0/1-767	OE <addr>
PG	Start Program Entry at Specified Address	-	Blank/1-767	PG <addr>
PS	Pause Program Execution	-	-	PS
RT	Return from Subroutine	-	-	RT
RS	Resume Paused Program	-	-	RS
S	Save to NVM	-	-	S
SU	Start Program on Power On	-	-	LB SU
VA	Create A User Variable Name Mnemonic			

RJ45 (Ethernet versions only)

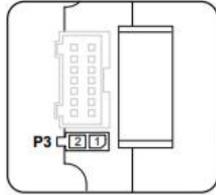


Pin #	Function	Description
1	TX +	Transmit plus
2	TX -	Transmit minus
3	RX +	Receive plus
4	N/C	Not connected
5	N/C	Not connected
6	RX -	Receive minus
7	N/C	Not connected
8	N/C	Not connected

Table 2.14 P2 communications, RJ45 (ethernet versions only)

DC motor power

2-pin friction lock wire crimp



Connectivity Options
Prototype development
cable PD-02-2300-FL3

Mating connector kit:
CK-04

Mfg P/N:
Shell
Tyco 794617-2

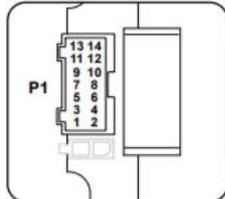
Pins
Tyco 794610-1

Pin #	Function	Description
1	+V	+12 to +60 VDC motor power
2	Ground	Power supply return (ground)

Table 2.17 P3 DC power, 2-pin locking wire crimp

I/O - expanded I/O (Plus²)

14-pin locking wire crimp



Connectivity Options
Prototype development
cable::
PD14-2334-FL3

Mating connector kit:
CK-09

Mfg P/N:
Shell
JST PADP-14V-1-S

Pins
JST SPH-001T0.5L

Pin #	Function	Description
1	I/O power	I/O Power, used with sourcing inputs or outputs
2	I/O GND	Non-isolated I/O Ground. Common with Power Ground
3	I/O 1	0 to +24 VDC Programmable I/O Point 1
4	I/O 2	0 to +24 VDC Programmable I/O Point 2
5	I/O 3	0 to +24 VDC Programmable I/O Point 3
6	I/O 4	0 to +24 VDC Programmable I/O Point 4
7	I/O 9 ¹	0 to +24 VDC Programmable I/O Point 9
8	I/O 10 ¹	0 to +24 VDC Programmable I/O Point 10
9	I/O 11 ¹	0 to +24 VDC Programmable I/O Point 11
10	I/O 12 ¹	0 to +24 VDC Programmable I/O Point 12
11	Capture/trip I/O	High Speed Capture Input or Trip Output. +5 VDC Logic Level
12	Analog in	0 to 10 V / 4 to 20 mA / 0 to 20 mA Analog Input
13	Step/clock I/O	Step clock I/O. Can also be configured as quadrature or clock up/down. +5 VDC logic level.
14	Direction/clock I/O	Direction I/O. Can also be configured as quadrature or clock up/down. +5 VDC logic level.

Table 2.18 P1 Expanded I/O, 14-pin locking wire crimp

Network Setup MDrive

Ip default MDrive

<https://motion.schneider-electric.com/application-note/setting-ethernet-adapter-mdrive-ethernet-tcp-ip-products/>

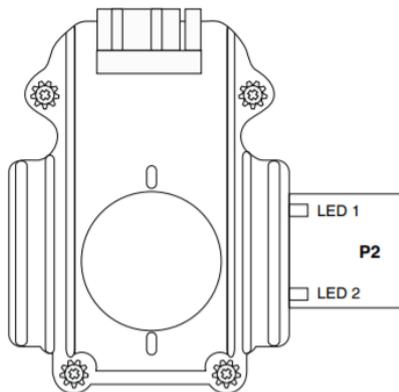
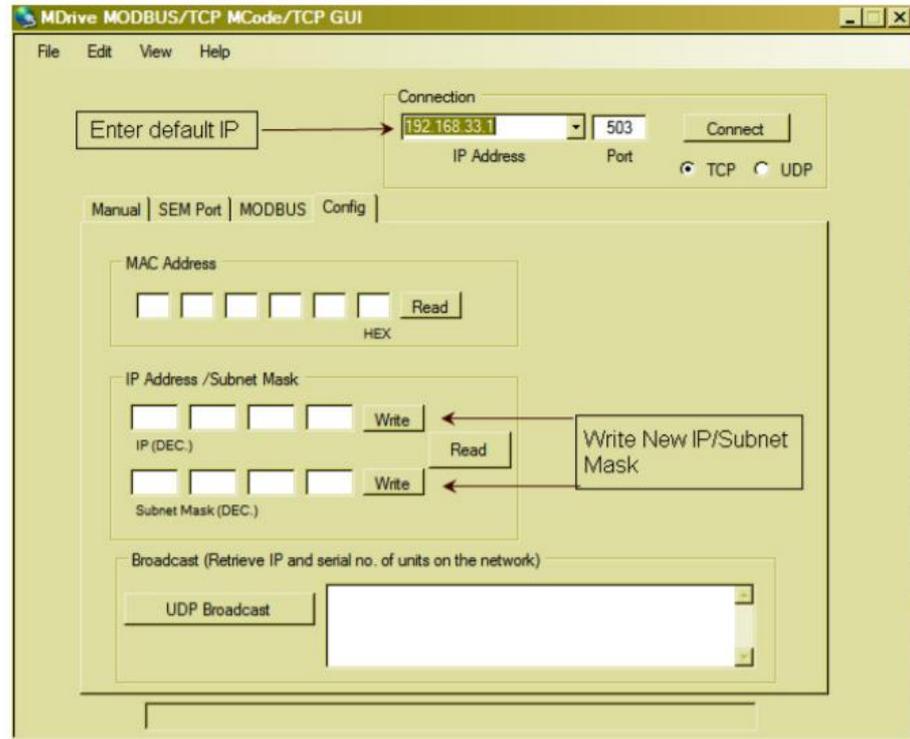


Figure 7.3 Ethernet status indicator LEDs

LED 1	LED 2	Description
Boot-up/Initialization faults		
Off	Off	Boot-up / TCP-IP stack ok. (Waiting for connection)
Green	Off	Drive initialization error, if persistent, contact applications support
MODBUS/TCP connection (Port 502)		
Off	Red (flashing)	MODBUS/TCP port 502 connected
Off	Green	Set socket option failure
Off	Red+Green	Socket receive error or Port 502 disconnect
Red+Green	Red+Green (1 sec. interval)	UART overrun, retry in progress
MCode/TCP connection (Port 503)		
Red (flashing)	Off	MCode/TCP port 503 connected
Green	Off	Set socket option failure
Red+Green	Off	Socket receive error or Port 503 disconnect