



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACTUADOR LINEAL CON
ACOPLAMIENTO PARA EL SERVOMOTOR KINCO SMC60S**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: ADONIES LENIN MONTALVO SARZOSA

TUTOR: LUISA FERNANDA SOTOMAYOR REINOSO

Quito – Ecuador

2025

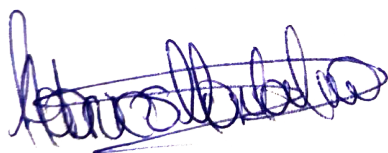
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Adonies Lenin Montalvo Sarzosa con documento de identificación N° 1718620774 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 27 de febrero del año 2025

Atentamente,



Adonies Lenin Montalvo Sarzosa

1718620774

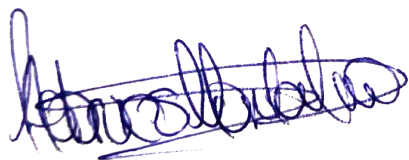
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Adonies Lenin Montalvo Sarzosa con documento de identificación No. 1718620774, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del Dispositivo tecnológico: “Diseño y construcción de un actuador lineal con acoplamiento para el servomotor Kinco SMC60S”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 27 de febrero del año 2025

Atentamente,



Adonies Lenin Montalvo Sarzosa

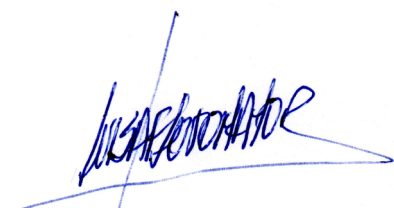
1718620774

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luisa Fernanda Sotomayor Reinoso con documento de identificación N° 1710953967, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACTUADOR LINEAL CON ACOPLAMIENTO PARA EL SERVOMOTOR KINCO SMC60S, realizado por Adonies Lenin Montalvo Sarzosa con documento de identificación N° 1718620774, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de un Dispositivo Tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 27 de febrero del año 2025

Atentamente,



Ing. Luisa Fernanda Sotomayor Reinoso MSc.

1710953967

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mi familia por su incondicional apoyo, confianza y motivación durante cada etapa de este proyecto que ha sido clave para mi desarrollo personal y profesional.

De igual manera, extendo mi gratitud a la Universidad Politécnica Salesiana y a todos mis docentes que con su paciencia, conocimiento y guía contribuyeron significativamente a mi formación como ingeniero mecatrónico. Su dedicación y compromiso han dejado una huella imborrable en mi trayectoria académica.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos de la comunidad, quienes con su apoyo y ánimo fueron fundamentales para mantenerme motivado a no rendirme en este proyecto y aquellas personas que, aunque no estuvieron durante este proceso ocupan un lugar muy importante en mi corazón y mi vida.

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico con mucho amor a mis padres, Fernando Montalvo y Ana Sarzosa, quienes han estado siempre para mí, aconsejándome y guiándome por el buen camino, a mis hermanos Andrés y Joselin, teniendo aún más razones por las cuales no debo rendirme en ningún aspecto de mi vida.

A mi tutora de proyecto de titulación, Ingeniera Luisa Sotomayor, cuya dedicación, guía y paciencia han sido fundamentales para acompañarme y orientarme a lo largo de este camino.

A mis compañeros de vida David López, Thomas Morales y Fernando Dávila que su apoyo incondicional y emocional fueron y son un gran soporte como ese acorde perfecto que da sentido a mi canción, marcando el compás de cada viaje.

A Skarlet Betancourt que es mi motivación más grande que tiene mi mente y corazón para alcanzar y lograr todo lo que quiero.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	5
MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO	5
1.1 Servomecanismo.....	5
1.2 Servo drive.....	6
1.3 Tipos de controladores.....	7
1.4 Servomotor	10
1.4.1. Servos Análogos y Digitales	11
1.4.2. Codificadores/Encoders	12
1.5 Acoples	17
1.5.1. Tipos de acoples	17
1.6 Transmisión	20
1.6.1. Mecanismos de engranajes.....	22
1.6.2. Mecanismos de correas dentadas	23
1.6.3. Mecanismo de tornillo de potencia	23
1.7 Unidades de sistema lineal	28
1.7.1. Unidad lineal con husillo de rosca trapezoidal.....	28
1.7.2. Unidad lineal sin tracción.....	29
1.7.3. Unidad lineal con correa dentada	29
1.7.4. Unidad con cremallera	30
1.7.5. Unidad lineal de rodamientos perfilados.....	30
1.8 Actuadores Lineales comerciales	31
1.8.1. Newmark systems, inc.....	31
1.8.2. Aris Stellantriebe.....	32
1.8.3. Pneumax.....	32
1.9 Conceptos eléctricos	34
1.9.1. Energía eléctrica y potencia	36
1.10 Conceptos mecánicos	37
CAPÍTULO II.....	42
ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	42
2.1 Selección de alternativas	42
2.2 Selección del material.....	43

2.3	Selección del método de transmisión de movimiento	49
2.4	Factores para determinar el tipo de acople	51
CAPÍTULO III		54
DISEÑO DEL ACTUADOR LINEAL		54
3.1	Diseño mecánico.....	54
3.1.1.	Características del tornillo sin fin.....	54
3.1.2.	Cálculos del tornillo sin fin y el control de posición.....	55
3.1.3.	Selección del acoplamiento	62
3.1.4.	Cálculo de corte y doblez	64
3.1.5.	Conexiones eléctricas del equipo	66
3.1.6.	Control de posición	69
3.1.7.	Diagrama de flujo.....	70
CAPÍTULO IV		73
ANÁLISIS Y RESULTADOS		73
4.1	Análisis estructural mediante el software SolidWorks.....	73
4.1.1.	Análisis operativo del tornillo sin carga.....	73
4.1.2.	Análisis estructural de los soportes	76
4.2	Implementación del Actuador Lineal	84
4.3	Pruebas de funcionamiento.....	86
4.3.1.	Análisis de errores	95
4.3.2.	Costos generales.....	98
4.3.3.	Costos específicos	99
4.3.4.	Resumen de costos	100
4.3.5.	Análisis de viabilidad del actuador lineal diseñado	101
CONCLUSIONES		103
RECOMENDACIONES		104
REFERENCIAS		105
ANEXOS		110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema fundamental de un servomecanismo [5].	6
Figura 2. Servo drive CD3/FD3 [7].	8
Figura 3. Modulación de ancho de pulso PWM [10].	10
Figura 4. Partes de un servomotor [8].	11
Figura 5. Encoder incremental [12].	13
Figura 6. Encoder absoluto [12].	14
Figura 7. Servomotor SMC60S – 0020 [13].	14
Figura 8. Acoplamientos rígidos. a) Acoplamiento de manguito. b) Acoplamiento de platillos. c) Acoplamiento por sujeción cónica [15].	17
Figura 9. Acoplamientos flexibles. a) Acoplamiento de rejilla de acero. b) Acoplamiento de manguitos de goma. c) Acoplamiento de disco flexible [15].	18
Figura 10. Mecanismo sinfín [18].	21
Figura 11. Motor lineal instalado en una mesa con guías [19].	22
Figura 12. Engranaje de dientes rectos [20].	23
Figura 13. Mecanismo de transmisión con correa [21].	23
Figura 14. Husillo roscado [22].	24
Figura 15. Unidad lineal con husillo de rosca trapezoidal [22].	29
Figura 16. Unidad lineal sin tracción [22].	29
Figura 17. Unidad lineal con correa dentada [22].	30
Figura 18. Unidad con cremallera [22].	30
Figura 19. Unidad lineal de rodamientos perfilados [22].	31
Figura 20. Actuadores lineales de la marca “Newmark systems, inc”. a) Estándar. b) De configuración XY [28].	31
Figura 21. Actuador lineal eléctrico de la marca “Aris Stellantriebe” [29].	32
Figura 22. Actuador lineal con transmisión de la marca “Pneumax” [30].	33
Figura 23. Relación entre las variantes de potencia y la ley de Ohm [32].	36
Figura 24. Especificación de la configuración del transformador.	37
Figura 25. Corte de chapas mediante cizallado [33].	38
Figura 26. Métodos de doblado de láminas. a) Doblado en V. b) Doblado de bordes [33].	39
Figura 27. Procedimiento para el laminado en frío [35].	44
Figura 28. Procedimiento para el laminado en caliente [35].	45
Figura 29. Proceso de Galvanizado [36].	45
Figura 30. Láminas de acero inoxidable 430 [37].	46
Figura 31. Láminas de acero inoxidable 304 [38].	46
Figura 32. Láminas de aluminio [39].	47
Figura 33. Tornillo sin fin [41].	54
Figura 34. Especificaciones del hilo trapezoidal interno y externo [43].	56
Figura 35. Medidas del acople de brida seleccionado [47].	63
Figura 36. Acople redimensionado en SolidWorks.	64
Figura 37. Medidas de la lámina a recortar para los laterales.	64
Figura 38. Medidas de la lámina a recortar para la base.	65

Figura 39. Lámina doblada para los laterales del actuador lineal.	65
Figura 40. Vista explosionada del actuador lineal.	66
Figura 41. Diagrama representativo de las conexiones eléctricas.	69
Figura 42. Sección del tornillo simulado.	73
Figura 43. Análisis de tensiones para el tornillo.	74
Figura 44. Análisis del desplazamiento para el tornillo.	74
Figura 45. Deformación unitaria del tornillo.	75
Figura 46. Factor seguridad del tornillo/husillo.	75
Figura 47. Soportes del actuador lineal. (a) FrontWall. (b) BackWall.	76
Figura 48. Vista explosionada de los elementos en el primer soporte.	77
Figura 49. Mallado del primer soporte.	78
Figura 50. Tensión en el soporte principal.	79
Figura 51. Desplazamiento en soporte principal.	79
Figura 52. Deformación en soporte principal.	80
Figura 53. Factor seguridad del soporte principal.	80
Figura 54. Vista explosionada del segundo soporte.	81
Figura 55. Mallado del segundo soporte.	81
Figura 56. Tensión en el soporte secundario.	82
Figura 57. Desplazamiento en soporte secundario.	82
Figura 58. Deformación en el soporte secundario.	83
Figura 59. Factor seguridad del soporte secundario.	83
Figura 60. Vista isométrica del actuador junto con los perfiles de aluminio 20x40.	84
Figura 61. Vista isométrica del actuador junto con los ejes y las piezas de carga.	84
Figura 62. Vista isométrica del actuador finalizado.	85
Figura 63. Actuador lineal. a) Sin carcasa. b) Con carcasa.	85
Figura 64. Conexión módulo – actuador lineal.	86
Figura 65. Comunicación software – servomecanismo.	87
Figura 66. Digital IO Functions configuración.	88
Figura 67. Basic Operation configuración.	88
Figura 68. DI DO & Operation Mode Setting configuración.	89
Figura 69. Position Table Mode configuración.	91
Figura 70. Posición inicial del actuador lineal.	92
Figura 71. Mitad del ciclo del actuador lineal.	93
Figura 72. Final del recorrido del actuador lineal.	93
Figura 73. Regreso a la mitad del ciclo del actuador lineal.	94
Figura 74. Final del programa del actuador lineal.	94
Figura 75. Posición inicial 0.	95
Figura 76. Primera posición de error.	96
Figura 77. Segunda posición de error.	96
Figura 78. Tercera posición de error.	97
Figura 79. Regreso a la posición cero.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Elementos de un servo drive [7].</i>	7
Tabla 2. <i>Especificaciones del servo drive Kinco CD3/FD3 [7].</i>	9
Tabla 3. <i>Características del servomotor SMC60S-0020-30MAK-3LSU [13].</i>	15
Tabla 4. <i>Selección del motor en cuanto al tipo de máquina [16].</i>	19
Tabla 5. <i>Momento en Kgm. Par Máximo [16].</i>	20
Tabla 6. <i>Valores para el cálculo de la velocidad crítica en función al factor de corrección de montaje [26].</i>	26
Tabla 7. <i>Características técnicas del transformador IP – 9T58K2811 GE [31].</i>	35
Tabla 8. <i>Parámetros de evaluación.</i>	42
Tabla 9. <i>Análisis porcentual de alternativas.</i>	43
Tabla 10. <i>Propiedades mecánicas de las alternativas según NTE INEN 115.</i>	47
Tabla 11. <i>Análisis porcentual frente a las propiedades mecánicas.</i>	48
Tabla 12. <i>Análisis porcentual de la selección del material.</i>	49
Tabla 13. <i>Criterio de evaluación para la transmisión de movimiento [40].</i>	50
Tabla 14. <i>Evaluación para la selección del tipo de transmisión.</i>	51
Tabla 15. <i>Criterios de evaluación para los acoplamientos [15].</i>	52
Tabla 16. <i>Evaluación de parámetros para los tipos de acoplamientos.</i>	53
Tabla 17. <i>Rosca trapezoidal según DIN 103 en mm [42].</i>	56
Tabla 18. <i>Descripción de los elementos numerados de la Figura 40.</i>	66
Tabla 19. <i>Evaluación de errores en el movimiento del actuador lineal.</i>	98
Tabla 20. <i>Costos de los materiales para el actuador lineal.</i>	98
Tabla 21. <i>Costos mecánicos del actuador lineal.</i>	100
Tabla 22. <i>Resumen de los costos realizados.</i>	100
Tabla 23. <i>Especificaciones y costos de actuadores lineales.</i>	101

RESUMEN

En este proyecto de titulación, desarrollado para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico, se diseñó y fabricó un actuador lineal acoplado al servomotor SMC60S, destinado al laboratorio de Mecatrónica. El diseño incluye una pieza principal que soporta el servomotor, equipada con un rodamiento de 55x90 mm y un acople de brida mecanizado para conectar el eje del servo (14 mm) al husillo TR8x2 (8 mm de diámetro y 600 mm de longitud). Esta pieza también alberga dos ejes acerados que se extienden hasta una pieza secundaria, donde se instaló un rodamiento 8x22 mm para estabilizar el husillo.

La estructura se reforzó con cinco perfiles de aluminio 20x40 mm para garantizar precisión en la distancia y estabilidad. Se diseñaron piezas adicionales que se acoplan a la tuerca del husillo, integrando rodamientos lineales para visualizar el desplazamiento del actuador. Además, una carcasa de aluminio con una regla de vinil permite medir el avance en milímetros.

El proyecto incluyó cálculos, modelado en SolidWorks, y estudios detallados de diseño mecánico y programación, asegurando una operación precisa. Esta herramienta innovadora combina teoría y práctica, aportando una solución funcional y educativa para los estudiantes.

Palabras clave:

Servomotor, actuador lineal, mecatrónica, aplicación práctica.

ABSTRACT

In this graduation project, developed to obtain the degree of Mechatronics Engineer, a linear actuator coupled to the SMC60S servomotor was designed and manufactured for the Mechatronics laboratory. The design features a primary piece supporting the servomotor, equipped with a 55x90 mm bearing and a flange coupling machined to connect the servo shaft (14 mm) to the TR8x2 lead screw (8 mm diameter, 600 mm length). This piece also houses two steel shafts extending to a secondary piece, which includes an 8x22 mm bearing to stabilize the lead screw.

The structure is reinforced with five 20x40 mm aluminum profiles to ensure precision and stability. Additional components were designed to attach to the lead screw's nut, integrating linear bearings to visualize the actuator's displacement. Moreover, an aluminum casing with a vinyl ruler allows the movement to be measured in millimeters.

The project included calculations, SolidWorks modeling, and detailed mechanical and programming analyses, ensuring precise operation. This innovative tool effectively combines theoretical knowledge with practical application, providing a functional and educational solution for students.

Keywords

Servomotor, linear drive, mechatronics, practical application.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en la industria los sistemas lineales son usados como herramientas de apoyo debido a su capacidad de modelar y controlar una gran variedad de procesos que van desde la producción de bienes hasta la optimización de recursos, mejorando la eficiencia y la calidad sobre la industria.

En cuanto a ejemplos y aplicaciones de estos sistemas lineales se encuentra la automatización de procesos como también el control de calidad, en donde se miden variables como velocidad, temperatura y presión, modelando la relación entre variables de entrada y variables de salida utilizando un controlador para mantener las variables de salida dentro de los límites deseados [1].

En el laboratorio de Mecatrónica se encuentran diversas herramientas para la realización de ejercicios prácticos de la carrera, sin embargo, existen dificultades en casos específicos al momento de ejecutar alguna actividad. Uno de los elementos que se acogen a estas dificultades son las simulaciones de puesta en marcha para los servomotores, si bien existen programas que ayudan a la verificación de estos, se requiere algún elemento físico para observar de mejor manera el tipo de control que se va a realizar, en este caso el control de posición.

JUSTIFICACIÓN

Este proyecto tiene como finalidad crear un sistema de movimiento lineal con acoplamiento para los servomotores del laboratorio de Mecatrónica, el cual permita convertir el movimiento rotatorio del servomotor a un movimiento lineal para el control de posición con el Servo Drive CD143-AA-000.

Los sistemas lineales residen en la matemática aplicada además de utilizarse en áreas como la física, economía y generalmente la ingeniería, se puede representar de forma común en las funciones de transferencia donde se describe el vínculo entre la entrada y la salida del sistema. Son muy útiles en aplicaciones prácticas ya que se pueden analizar y controlar de manera efectiva [2].

El control de posición es una técnica utilizada en control de sistemas para mantener una posición deseada de un objeto, ya sea en reposo o en movimiento. Esta técnica es esencial en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo robots industriales, sistemas de aviación, sistemas de automatización de fábricas y sistemas de posicionamiento.

El posicionamiento controlado se basa en el uso de sensores para medir la posición actual de un objeto y compararla con la posición deseada, sin embargo, existe una diferencia entre la posición deseada y la posición actual que se conoce como el error de posición, en donde el controlador utiliza esta información para calcular una señal de control que se emplea para mover el objeto hasta la posición deseada [3].

El control de posición se puede implementar utilizando diferentes técnicas de control, incluyendo el control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y el control por realimentación lineal estable, esta técnica se utiliza dependiendo de la complejidad del sistema y de los requisitos de control.

Una de las aplicaciones más comunes del control de posición es en la industria de robots industriales, estos usan controladores de posición que les permiten realizar tareas minuciosas y repetitivas con una gran precisión, esto es esencial en la producción en masa, donde es importante mantener un control nítido y constante para garantizar la calidad del producto final [4].

Debido a esto la enseñanza del control de posición se vuelve fundamental por la creciente aplicación de los sistemas lineales en la industria, es importante que los profesionales y

estudiantes estén familiarizados con las técnicas y conceptos de control de posición, lo que les permitirá aplicarlos de manera efectiva en diferentes contextos industriales demostrando la importancia de la enseñanza y el estudio del control de posición en el mundo actual, donde la automatización y la tecnología están cada vez más presentes en la industria.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y construir un actuador lineal con acoplamiento para el servomotor Kinco SMC60S.

Objetivos Específicos

- Analizar el estado del arte referente a actuadores lineales con acoplamiento a servomotores para el diseño del mecanismo.
- Diseñar el actuador lineal basado en los parámetros determinados para su acoplamiento con el servomotor Kinco SMC60S.
- Implementar el control de posición mediante el ServoDrive CD413-AA-000 para verificar el acoplamiento con el actuador lineal.
- Realizar pruebas del dispositivo acoplado al servomotor para validar su funcionamiento.

CAPÍTULO I

MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO

Para entender los servosistemas hay que analizar sus componentes y para ello se detallará en este capítulo cada uno de ellos.

1.1 Servomecanismo

La palabra servomecanismo difiere en dos sentidos, se puede considerar a un grupo de componentes que trabajan en conjunto para lograr un control preciso para un determinado fin, estos componentes forman un sistema de control que se utiliza en varias aplicaciones industriales dependiendo de su objetivo; los elementos conocidos para este concepto son: transformador, servo drive y servomotor.

También se habla de servomecanismo a un sistema de control que utiliza retroalimentación para mantener una salida específica, este sistema se comporta como la acción reguladora del funcionamiento, presenta una finalidad de comparación entre las condiciones ideales y reales. Las partes esenciales de este concepto son: comparador, amplificador y servomotor; el comparador se comporta como un dispositivo que mide el error del estado real e ideal; el amplificador es un componente electrónico que amplifica la corriente proporcional a la entrada; el servomotor es la salida por la que actúa el movimiento de corrección amplificada. En resumen, el concepto de servomecanismo se refiere a sistemas integrados que funcionan con un proceso de retroalimentación, como es el caso de los servomotores [5].

Existen varios tipos de servomecanismos con aplicaciones extensivas, en su mayoría de tipo industrial como:

- Neumáticos
- Hidráulicos
- Electromecánicos

Entre sus aplicaciones se observa en aeromodelismo comúnmente en alerones y timones, microbots que componen ruedas motrices y etapas de potencia [6].

Un servomecanismo puede entenderse como un sistema único en el que se integra un motor, sensores y un controlador interno para realizar movimientos controlados con precisión.

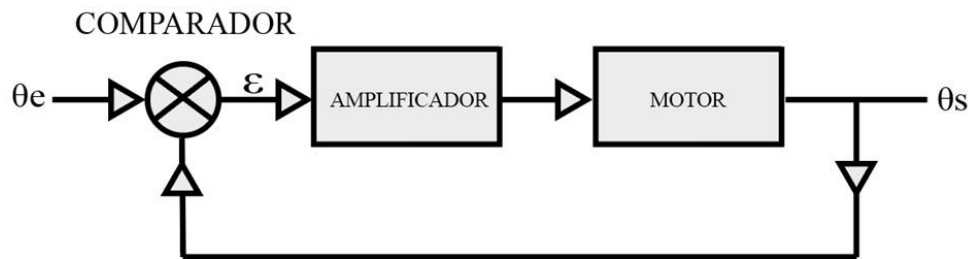


Figura 1. Esquema fundamental de un servomecanismo [5].

En la Figura 1 se observa sistema de lazo cerrado donde la señal de entrada se compara con la salida para determinar un error, este error es amplificado y utilizado para ajustar el movimiento del motor mientras la retroalimentación permite corregir continuamente el desempeño del sistema.

1.2 Servo drive

Un servo drive es un amplificador electrónico usado para alimentar a los servomecanismos eléctricos. Son esenciales en sistemas de control de movimiento que utilizan servomotores donde su principal función es proporcionar la energía necesaria además de controlar la velocidad, dirección y posición del servomotor con el fin de realizar movimientos precisos y controlados. En el laboratorio de Mecatrónica se utiliza estos elementos para lograr que un servomotor produzca movimiento amplificando la señal del sistema de control [7].

Para el control mediante usuario – servomotor, se requiere utilizar varios medios en hardware y software; como se mencionó anteriormente, consta de componentes que forman un sistema de control, el elemento que alimenta todo el servomecanismo es el transformador, el elemento que controla y por el cual se envían las señales es el servo drive, y por último esta la salida del sistema que genera el trabajo mecánico que es el servomotor.

En la Tabla 1 se identifica los componentes que caracterizan a un servo drive de manera general.

Tabla 1. Elementos de un servo drive [7].

Elemento	Característica
Display	Pantalla pequeña que informa cualquier anomalía.
Entrada de potencia	Aporta la energía necesaria al drive.
Salida de potencia	Es la que alimenta al motor y por donde la señal PWM es conducida al servomotor.
Comunicaciones serie	Esta sección consta de varias aplicaciones ya que se puede controlar al servo mediante pulsos o consignas analógicas.
Motion Bus	Algunos servo drivers tienen integrado este apartado por si se requiere control a varios ejes.
Seguridad integrada	Integrada en la electrónica del drive para protección además de reaccionar a menor tiempo con más eficacia.
Realimentación del encoder del motor	Necesaria para el control preciso del motor también para cerrar el lazo de posición.

1.3 Tipos de controladores

Los tipos de controladores o servo drivers se clasifican en tres categorías; analógico, digital e híbrido, esto depende del tipo de señal que use el detector de errores.

- **Servo drive analógico**

Este tipo de controladores se manejan a partir de señales continuas, sean voltajes o corrientes que permiten el control de la velocidad, posición y torque del servomotor. Estas señales son operadas mediante potenciómetros o fuentes externas [8].

- **Servo drive digital**

Los servos digitales utilizan microprocesadores para gestionar el control del motor. Operan con variables que están codificadas en forma discontinua y son comúnmente

empleados para resolver problemas relacionados con la optimización global de una planta industrial. La toma de decisiones es una funcionalidad inherente a los controladores digitales [8].

- **Servo drive análogo – digital**

Los controladores híbridos se refieren a aquellos que combinan características de control analógico y digital. Los controles de funcionamiento más avanzados suelen ser de este tipo, ya que es probable que necesiten procesar diversas señales tanto analógicas como digitales [8].

Las señales enviadas hacia el servomotor se lo realizan mediante un software específico dependiendo del tipo de controlador que se posea, en este caso para el laboratorio de Mecatrónica se dispone del Sistema Kinco CD3/FD3; Se lo puede observar en la Figura 2, para este controlador se requiere el software Kinco Servo + en donde se puede controlar la posición, velocidad, torque, ángulo de giro, entre otros.



Figura 2. Servo drive CD3/FD3 [7].

En la Tabla 2 se indica las especificaciones del servo drive que se dispone en el laboratorio de mecatrónica siendo este de la marca Kinco.

Tabla 2. Especificaciones del servo drive Kinco CD3/FD3 [7].

Característica	Descripción
Serie CD3	Control analógico, admite pulsos.
Serie FD3	Admite control MODBUS, CANopen, EtherCAT.
Fuente de alimentación	Monofásico, trifásico 200 ~ 240v AC, trifásico 380 ~ 415v AC.
Rango de potencia	50w ~ 2000w, 1000w ~ 3000w.
Ajuste	Admite la función EASY TUNE.
Frenado	Admite el frenado dinámico.
Codificador	Salida de división de frecuencia ajustable.
Frecuencia	Frecuencia de pulso máxima 4MHz.
Protección	Al sobrecalentamiento, sobre corriente, sobrepresión, entre otras.
Resistencia	Freno integrado que previene el sobrecalentamiento.
Compatibilidad	Con codificador magnetoeléctrico de una o varias vueltas, con 16/20 bits y temperatura de trabajo máxima de 120°.
Certificación	Cumple certificación ambiental ROHS.
Certificación UL	Cumple certificación UL.

El servo drive Kinco CD3/FD3 es un controlador de alta precisión para servomotores AC, compatibles con protocolos como Modbus (protocolo de comunicación industrial maestro – esclavo) y CANopen (protocolo de comunicación basada en la red Controller Area Network) ofreciendo un control de posición, velocidad y torque con funciones avanzadas como el autotuning, protección integrada y monitoreo en tiempo real [8].

1.4 Servomotor

Los servomotores industriales son dispositivos esenciales para lograr movimientos precisos en términos de posición, velocidad y aceleración mediante un sistema de retroalimentación en el cual, un encoder proporciona información sobre el eje permitiendo al controlador ajustar su rendimiento en tiempo real. Las principales ventajas incluyen precisión en el control, alta potencia y torque, rápida capacidad de respuesta, durabilidad y eficiencia energética utilizándose en industrias de impresión, embalaje, manufactura electrónica y control numérico computarizado (CNC) [9].

El control de los servos se basa en la recepción de una señal PWM (modulación por ancho de pulso) por parte del circuito electrónico ajustando el movimiento del motor, el eje está conectado a un potenciómetro que actúa como un divisor de voltaje y, a medida que el motor gira, el potenciómetro varía la señal de retroalimentación permitiendo al sistema ajustar con precisión la posición del eje como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 3 [10].

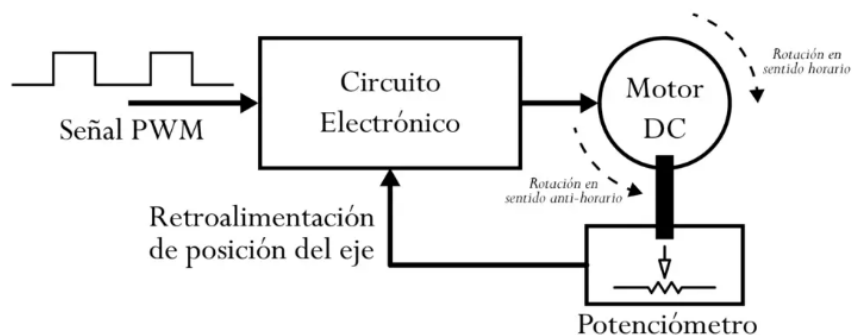


Figura 3. Modulación de ancho de pulso PWM [10].

Un servomotor industrial consta de tres componentes principales que son: un motor, una caja reductora y un circuito de control, además tienen la capacidad de entregar una potencia proporcional para las cargas mecánicas resultando un menor gasto energético, por lo tanto, un servomotor industrial es un motor especial al cual se le ha añadido una tarjeta electrónica de control, un regulador de resistencia, y un sistema de engranajes. También se puede analizar

superficialmente el interior de este, compuesto de un encoder con un amplificador o driver que comandan en conjunto para la realimentación acorde al requerimiento del usuario. En el análisis detallado interiormente del servo, se encuentra un estator, bobinado, eje, imán y un freno mecánico [8].

El estator es la parte fija del motor que envuelve al rotor, este contiene a los imanes que generan el campo magnético necesario para que el rotor gire, el bobinado se refiere a las bobinas de alambre enrolladas que van conectadas a la fuente de alimentación eléctrica, su función es crear un campo magnético estacionario en el motor para interactuar con el además de ser esencial para la retroalimentación, el eje es la parte integral del motor que proporciona una interfaz mecánica para la transmisión de movimiento entre el motor y la carga mecánica, el encoder es el dispositivo que detecta la posición actual del rotor y proporciona la retroalimentación de la característica deseada, por último el freno mecánico que como su nombre lo indica detiene el movimiento en el funcionamiento o mantiene una posición fija cuando el motor esta apagado o no necesita movimiento, es relevante destacar que no todos los modelos de servos tienen este implemento, en la Figura 4 se puede apreciar los componentes descritos [8].

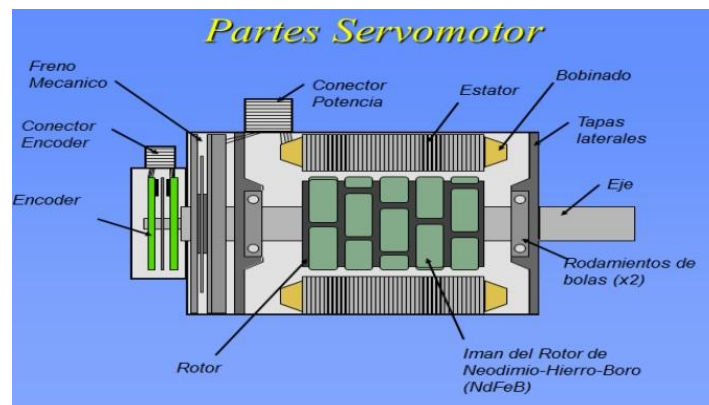


Figura 4. Partes de un servomotor [8].

1.4.1. Servos Análogos y Digitales

Desde la perspectiva del controlador, no existe una distinción entre ambos tipos, ya que ambos son controlados mediante las mismas señales de ancho de pulso modulado (PWM). La diferencia radica en el circuito interno, el cual se encarga de recibir las señales de control y suministrar la potencia necesaria al motor [11].

Cuando se suministran impulsos al servo analógico a través del controlador, estos se amplifican y se envían al motor para proporcionar la potencia necesaria, a medida que el rotor se aproxima a la posición deseada, la potencia suministrada al motor disminuye gradualmente hasta cero. Sin embargo, si la anchura de los pulsos entrantes es menor que la banda muerta del servo, este no experimentará movimientos significativos, ya que se considera que la señal recibida está dentro del rango muerto del servo [11].

Los servos digitales funcionan de manera similar a los servos analógicos, pero tienen la ventaja de contar con un microprocesador incorporado. Este microprocesador recibe los pulsos los cuales procesa y envía pulsos de salida al motor [11].

Las ventajas de tener un microprocesador en un servo digital son las siguientes:

- **Mayor sensibilidad:** El microprocesador es capaz de detectar y responder a impulsos de menor tamaño que los que un servo analógico puede percibir, lo que mejora precisión en el control de la posición y el movimiento [11].
- **Potencia de frecuencia más alta:** Los pulsos enviados por el microprocesador tienen una frecuencia más elevada que los pulsos transmitidos por el controlador a un servo analógico. Esto permite que los servos digitales respondan de manera más rápida y precisa a los cambios en las señales de control [11].
- **Programabilidad:** Con un servo digital, el usuario tiene la capacidad de configurar y ajustar las características de funcionamiento del microprocesador. Esto incluye opciones como la velocidad de respuesta, la curva de aceleración, la resolución y otras características personalizadas según las necesidades específicas de la aplicación [11].

1.4.2. Codificadores/Encoders

Los servomotores tienen un mecanismo que identifica el ángulo del eje, estos elementos tienen por nombre codificadores o encoders en inglés; se clasifican principalmente en dos tipos: incrementales y absolutos.

Los codificadores funcionan mediante un disco que se encuentra conectado al eje del motor, el disco tiene regiones transparentes y regiones opacas en su superficie, utiliza una fuente de luz y un par de fotodetectores para determinar la posición del motor. La luz emitida atraviesa las

regiones transparentes y es bloqueada por las regiones opacas del disco. Los fotodetectores miden los cambios en la intensidad de la luz recibida y generan pulsos eléctricos proporcionales al movimiento del motor. Estos pulsos se envían al microprocesador del servo, que los procesa y utiliza esta información para controlar y ajustar con precisión la posición y el movimiento del motor [12].

- **Encoder Incremental**

En el encoder incremental el disco tiene franjas alternas de regiones transparentes y opacas; conforme el eje gira, el sensor óptico mide el tiempo transcurrido entre los flashes de luz sucesivos, el procesador utiliza esta información para determinar la velocidad de rotación del eje del motor y debido a que solo proporciona información de velocidad y no de posición, este tipo de codificador se llama codificador incremental este tipo de encoder se lo aprecia en la Figura 5 [12].

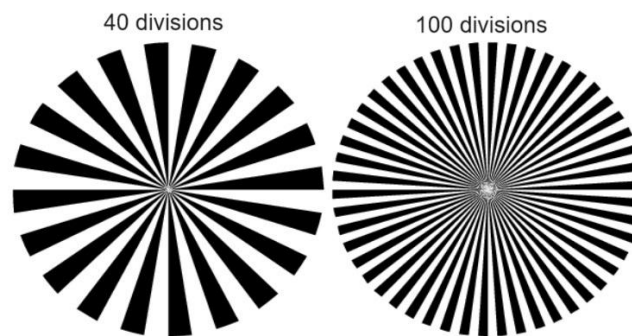


Figura 5. Encoder incremental [12].

- **Encoder Absoluto**

El encoder absoluto identifica tanto el ángulo del eje como su velocidad, en este caso, la luz brilla a lo largo de una franja axial que tiene regiones alternas de transparencias y opacidad; el sensor óptico detecta este patrón de luz y oscuridad y transmite varias lecturas al procesador donde el microprocesador convierte este patrón en un número para determinar aproximadamente el ángulo del eje como se observa en la Figura 6 [12].

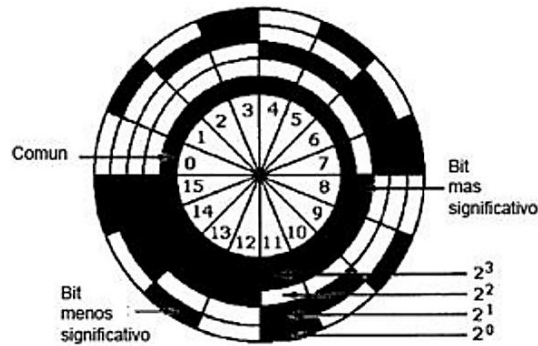


Figura 6. Encoder absoluto [12].

En el laboratorio de Mecatrónica se dispone de servomotores con el modelo Kinco SMC60S-0020, cuyo gráfico se puede observar en la Figura 7 y cuentan con un aislamiento tipo F, lo que significa que son capaces de soportar altas temperaturas y ofrecer un funcionamiento silencioso. Además, su alta confiabilidad y estabilidad los hacen ideales para entornos con temperaturas elevadas; su codificador magnético de una sola vuelta de 16 bits contribuye a una mayor capacidad de amortiguación, lo que resulta beneficioso para aplicaciones que requieran un control preciso tanto de posición como de velocidad.



Figura 7. Servomotor SMC60S – 0020 [13].

En la Tabla 3 se define el servomotor que se dispone en el laboratorio de mecatrónica de igual manera, este es de la marca Kinco.

Tabla 3. Características del servomotor SMC60S-0020-30MAK-3LSU [13].

Característica	Descripción
Brida (mm)	60
Diámetro del eje (mm)	14
Tensión de enlace de CC UDC	300
	Potencia nominal (W)
	200
	Par nominal (Nm)
	0,64
Rendimiento continuo	Velocidad nominal (RPM)
	3000
	Corriente nominal (A)
	1,4
Torque máximo (Nm)	1,92
Intensidad máxima (A)	4,2
Torque de frenado (Nm)	0,7
Intensidad de frenado (A)	1,5
Resistencia línea-línea (ohm)	11,2
Capacidad inductiva línea a línea (mH)	20,9
Constante de tiempo eléctrica (ms)	1,87
Constante de tiempo mecánica (ms)	1,8 1,85 (con freno)
Constante de tensión inversa (V/krpm)	29
Constante de torque (Nm/A)	0,48

Momento de inercia del rotor (Kg.cm ²)		0,214 0,218 (con freno)
Torque de tensión de rotura		1,5
Cantidad de par de polos		3
Incremento máximo de tensión du/dt (KV/us)		8
Categoría aislante		F
Fuerza radial máxima (N)		180
Fuerza axial máxima (N)		90
Sistema de refrigeración		Herméticamente sellado, sin ventilación.
Grado de protección		IP65 para cuerpo, estanqueidad del eje IP54.
	Temperatura	-20°C ~ 40 °C (sin congelación).
	Humedad	Inferior al 90% de HR (sin condensación).
Condiciones ambientales para el funcionamiento	Entorno ambiental	Apartado de gas activo, gas inflamable, gotas de aceite y partículas de polvo.
	Altitud	4000m máximo, potencia nominal a 4.

El servomotor Kinco SMC60S es un dispositivo diseñado para aplicaciones de alta precisión, caracterizado por su capacidad para controlar posición, velocidad y torque, este modelo ofrece un torque nominal de 0.64 Nm y un torque máximo de 1.92 Nm, operando a una velocidad nominal de 3000 RPM, siendo ideal para tareas que requieren movimientos rápidos y precisos. Su capacidad de manejar fuerzas radiales y axiales de 180 N y 90 N, respectivamente, junto con su diseño compacto, es perfecto para sistemas de automatización y maquinaria industrial [13].

1.5 Acoples

Los acoplamientos son dispositivos mecánicos que conectan ejes para la transmisión de potencia, velocidad y torque con precisión además de disminuir las desalineaciones [14].

Los acoplamientos desempeñan un papel esencial al extender las líneas de transmisión de ejes o al unir segmentos de ejes que pueden no estar perfectamente alineados entre sí. En situaciones ideales, donde dos ejes se alinearían perfectamente, podrían conectarse mediante cubos con bridas y pernos, garantizando así que ni las máquinas ni la cimentación se desplazarían. Sin embargo, en la práctica, es común que exista cierto grado de desalineación entre el eje motriz y el eje conducido [14].

1.5.1. Tipos de acoples

- **Acoplamientos rígidos**

Los acoplamientos rígidos están diseñados con la finalidad de conectar de manera sólida dos ejes, evitando cualquier desplazamiento relativo entre ellos. Estos acoples se emplean en aplicaciones donde se necesita y es posible mantener una alineación precisa de los ejes, tanto en el momento de la instalación como a lo largo de su operación continua, en la Figura 8 se aprecia los tipos de acoplamientos rígidos que se usan dependiendo el tipo de trabajo a realizar [14].

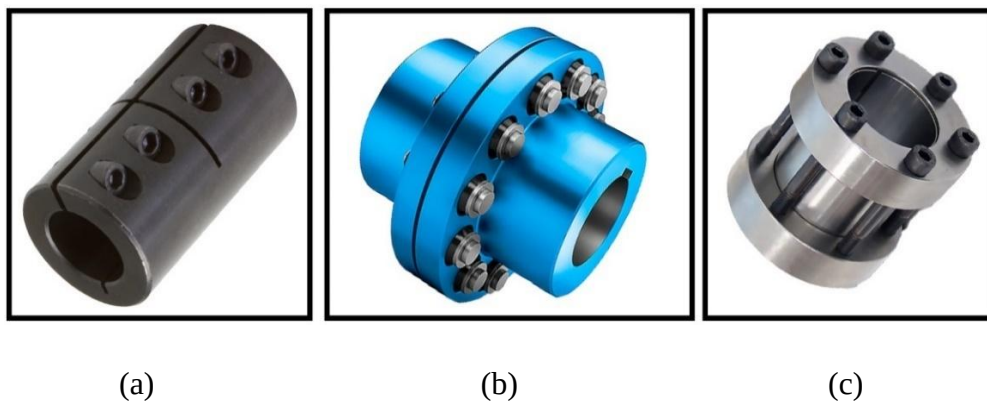


Figura 8. Acoplamientos rígidos. a) Acoplamiento de manguito. b) Acoplamiento de patillos. c) Acoplamiento por sujeción cónica [15].

- **Acoplamientos flexibles**

Este tipo de acoplamiento permite una transmisión uniforme del par torsional y, al mismo tiempo, es capaz de tolerar cierto grado de desalineación axial, radial y angular. La flexibilidad es suficiente para que, cuando ocurra desalineamiento, las piezas de acoplamiento se desplacen con mínima o nula resistencia, evitando así el desarrollo de esfuerzos axiales o de flexión significativos en el eje, de igual manera en la figura 10 se pueden observar los acoples flexibles de rejilla de acero, de manguitos de goma y de disco flexible. Se puede apreciar la clasificación en la Figura 9 [14].

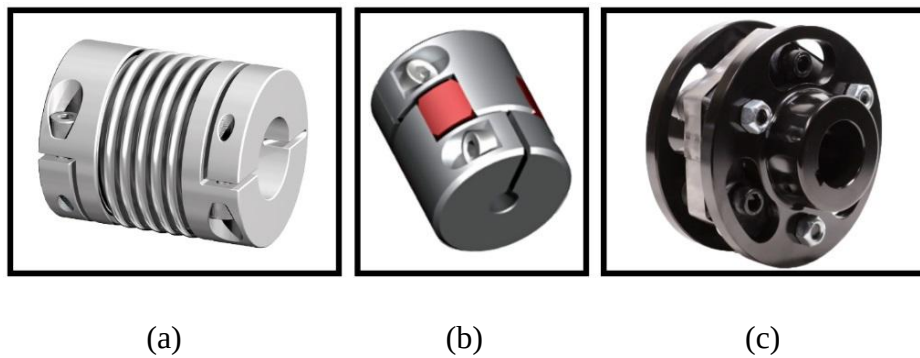


Figura 9. Acoplamientos flexibles. a) Acoplamiento de rejilla de acero. b) Acoplamiento de manguitos de goma. c) Acoplamiento de disco flexible [15].

Determinado el tipo de acople requerido para la aplicación, es indispensable recurrir a las formas de selección en cuanto a las propiedades mecánicas; se considera:

$$Mt = \frac{974 * N * S}{n} \quad (1)$$

Donde:

- Mt = Momento de torsión (kg).
- N = Potencia en Kw.
- n = Velocidad en RPM.
- S = Factor de servicio.

El valor del factor de servicio depende de tres variables con diferentes clasificaciones, dichos parámetros se muestran en la Tabla 4 que especifica los tipos de máquinas para el trabajo del motor acoplado, es importante destacar que para cada categoría los valores de este factor constan de tres subcategorías, para ello se debe considerar la estandarización en los siguientes datos [16].

- **S1: Motor eléctrico**

Este valor se aplica cuando el motor proporciona un torque constante y un arranque suave [16].

- **S2: Turbina**

El factor de servicio para este caso, considera las características de las turbinas que operan a velocidades constantes con mayor sensibilidad a desbalances o cambios repentinos de carga [16].

- **S3: Motor a nafta o a Diesel.**

Utilizado en acoples conectados a motores de combustión interna los cuales generan vibraciones significativas y fluctuaciones en el torque debido al ciclo de combustión, requiriendo un factor de servicio más alto para absorber estas variaciones [16].

Tabla 4. Selección del motor en cuanto al tipo de máquina [16].

Clase	Tipo de Máquina	Ejemplos de Aplicación	Factor de Servicio
A	Máquinas con consumo de fuerza uniforme	Cintas transportadoras, aspiradores	S1 = 1
		pequeños, bombas centrífugas pequeñas, servomotores, maquinaria textil,	S2 = 1,3
		transmisiones, livianas en general.	S3 = 1,5
B	Máquinas medianas y semipesadas	Embrague, elevador, montacargas, molinos a rodillo, convertidores de corriente.	S1 = 1,5
			S2 = 1,8
			S3 = 2
C	Máquinas pesadas con consumo de fuerza irregular	Excavadora, laminadora, trituradoras,	S1 = 2
		perforadores de pozos, bombas para prensas	S2 = 2,5
		hidráulicas, maquinarias de construcción.	S3 = 3

Una vez obtenido el resultante del momento de torsión, en la Tabla 5 se especifican datos por los que se pueden hacer la selección del acople en términos mecánicos intrínsecos los que se pueden comprobar en la Tabla 3 de las especificaciones del servomotor del laboratorio de Mecatrónica.

Tabla 5. Momento en Kgm. Par Máximo [16].

Categoría	Rango de Medida
M - 1	Hasta 3,20.
M - 2	Desde 3,20 hasta 9,54.
M - 3	Desde 9,54 hasta 21,50.
M - 4	Desde 21,50 hasta 54,20.
M - 5	Desde 54,20 hasta 95,40.
M - 6	Desde 95,40 hasta 242.
M - 7	Desde 242 hasta 730.
M - 8	Desde 730 hasta 1460.

1.6 Transmisión

La transferencia de energía desde un suministro, como un motor o dispositivo, a través de un equipo hasta un sistema de salida es una función fundamental en el diseño de maquinaria, el primer paso en este proceso es transferir la energía a la máquina. Un método eficiente para lograr esta transmisión es mediante el movimiento rotacional de un eje que está soportado por el sistema de salida.

Para transmitir potencia de manera efectiva, se emplea el movimiento giratorio de un eje que descansa en cojinetes. Este sistema puede incluir componentes como engranajes, correas, poleas y ruedas dentadas, que facilitan el cambio de velocidad y torque entre soportes. La mayoría de los ejes utilizados son cilíndricos, ya sean macizos o huecos, y están diseñados con

un diámetro adecuado para permitir el montaje y el soporte de elementos como rodamientos y engranajes [17].

Con respecto a los tornillos existe una determinada categoría en lo que se refiere al movimiento lineal, generalmente se encuentra los tornillos sin fin que se emplean para transferir tanto fuerza como movimiento entre dos ejes que se encuentran en ángulo recto o a 90 grados, es decir, permiten la transformación de movimiento rotativo en el eje x en movimiento rotativo en el eje y.

El tornillo sin fin opera como un componente motriz o de entrada que se caracteriza por su funcionamiento simple y su ventaja mecánica. Este engrana con una corona de manera que, por cada revolución completa del tornillo, el engranaje gira un diente como se observa en la Figura 10. En consecuencia, para lograr una rotación completa del engranaje, se requerirían tantas vueltas como dientes tenga el engranaje en cuestión [18].

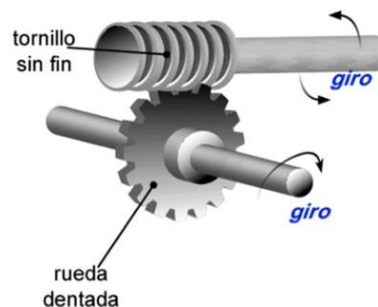


Figura 10. Mecanismo sin fin [18].

Considerando los motores lineales, se toma en cuenta la estructura de estos, ya que existen de tipo inductivo, magnético y de pasos; en la Figura 11 se puede apreciar un motor lineal, la función principal de estos motores es generar movimiento lineal directamente, es decir, convertir la energía suministrada en un desplazamiento rectilíneo. Suelen consistir en una bobina que es su parte móvil y una serie de imanes permanentes o bobinas fijas que es su parte estática.

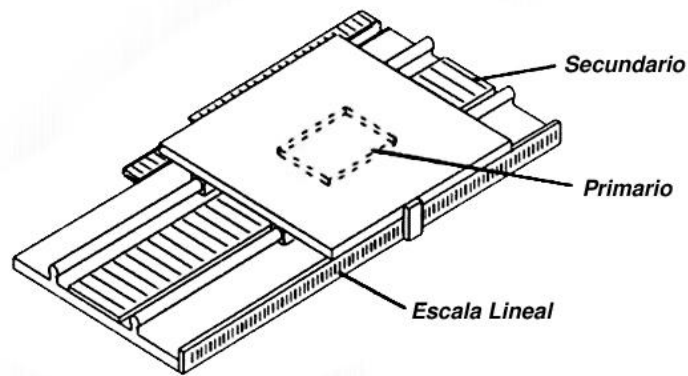


Figura 11. Motor lineal instalado en una mesa con guías [19].

Asimismo, las transmisiones se utilizan para convertir el movimiento circular en movimiento lineal o viceversa, lo cual es necesario en determinadas aplicaciones [19].

1.6.1. Mecanismos de engranajes

Los engranajes son elementos con forma de ruedas dentadas que desempeñan un papel crucial en la transmisión de movimiento rotativo o alternativo entre dos ejes separados. Su principal limitación se encuentra en la distancia entre estos ejes. Uno de los usos más destacados es la capacidad de reducir o multiplicar la velocidad en un eje determinado, lo cual se logra mediante la interconexión de varios engranajes, que también se conocen como reductores o amplificadores, respectivamente [20].

Cuando se combina un sistema de dos o más engranajes para transmitir el movimiento de un eje a otro, se conoce como tren de engranajes como se indica en la Figura 12. Aunque los engranajes se utilizan principalmente para la transmisión de movimiento rotativo, es importante destacar que, mediante el uso de engranajes apropiados y componentes dentados planas, es posible convertir el movimiento alternativo en movimiento rotativo y viceversa.



Figura 12. Engranaje de dientes rectos [20].

1.6.2. Mecanismos de correas dentadas

Dentro de los medios de transmisión convencionales, las correas representan un sistema de transmisión flexible y sencillo que resulta altamente recomendable y ventajoso en numerosas aplicaciones industriales, un ejemplo de este tipo de mecanismo se lo observa en la Figura 13. Su funcionamiento guarda similitudes con los mecanismos de cadenas, con la excepción del elemento utilizado para acoplar los ejes. En el caso de las correas, se emplea un material flexible como elemento de acople, y se recurre a poleas como componentes para el acople de las mismas. Este mecanismo posibilita que los ejes se enfrenten a distintos ángulos gracias a la flexibilidad inherente de la correa [20].

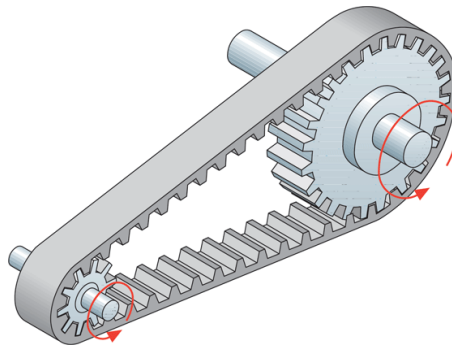


Figura 13. Mecanismo de transmisión con correa [21].

1.6.3. Mecanismo de tornillo de potencia

Este sistema de transmisión se utiliza típicamente con el propósito de transformar el movimiento rotativo en movimiento lineal, los mecanismos de transmisión que utilizan los tornillos se destacan por su capacidad para transmitir potencia eficazmente entre ejes paralelos, lo que resulta particularmente útil en espacios reducidos y aplicaciones donde se requieren altas

relaciones de velocidad. En la práctica, existen catálogos y normalizaciones en los que se puede encontrar además de diseñar el tornillo como su tuerca teniendo dos configuraciones, roscado de bolas y roscado helicoidal o trapezoidal [22].



Figura 14. Husillo roscado [22].

En la Figura 14 se puede observar el tipo de husillo de bolas, estos constan de una precisión alta teniendo una tolerancia de $\pm 0.05\text{mm}$ mientras que los de rosca trapezoidal disponen de una tolerancia menos precisa siendo de $\pm 0.1\text{mm}$ [23].

Es importante destacar que, como es un mecanismo de transformación circular a lineal, el avance dependerá de dos factores principales que son la velocidad de rotación del elemento impulsor y el paso de la rosca del tornillo [24]; las fórmulas a usar son:

$$A = p * e \quad (2)$$

$$Va = \frac{A * n}{60} \quad (3)$$

$$t = \frac{L}{Va} \quad (4)$$

Donde:

- A = Avance del tornillo (mm).
- p = Paso (mm).
- e = Entradas del tornillo.

- V_a = Velocidad de avance (mm/min).
- n = Velocidad de giro (RPM).
- t = Tiempo que tarda la tuerca en recorrer una distancia (s).
- L = Longitud del tornillo (mm).

La velocidad crítica se puede calcular considerando dos factores clave que ajustan las capacidades de carga según el tipo de montaje utilizado. Los diferentes tipos de montaje para husillos incluyen:

- **Fijo – fijo o de apoyos dobles.**

En esta configuración los extremos del tornillo/husillo están soportados de manera fija por cojinetes montados en carcasas fijas en el que su aplicación es rigidez y precisión [25].

- **Fijo – simple o de un apoyo doble y uno simple.**

Al igual que en el montaje de apoyos dobles, en este caso un extremo del husillo está sujeto o fijo a una carcasa mientras que el otro extremo esta soportado por un cojinete sin fijación que puede permitir algún grado de movimiento axial, son usados en donde se requiere un movimiento axial controlado [25].

- **Simple – simple o de apoyos simples.**

Este montaje se refiere a que ambos extremos del husillo están soportados en cojinetes que no tienen una sujeción fija por lo que está libre para moverse axialmente además de ser empleados en aplicaciones donde se necesite flexibilidad y compensaciones en las variaciones térmicas [25].

- **Fijo – libre o un apoyo doble y uno libre.**

Esta clasificación especifica que, un extremo del husillo se encuentra fijo como en la distribución de apoyos dobles, mientras que el otro no tiene sujeción o está libre lo que permite un movimiento axial donde el husillo experimenta expansión o contracción debido a las variaciones térmicas [25].

Se puede realizar el cálculo de la velocidad crítica considerando el factor de corrección de montaje especificado en el la Tabla 6.

Tabla 6. Valores para el cálculo de la velocidad crítica en función al factor de corrección de montaje [26].

Tipo de Montaje	fn	fk
Fijo – fijo	2,74	2
Fijo – simple	1,89	1,41
Simple - simple	1,21	1
Fijo – libre	0,43	0,5

En base a estos valores se selecciona de acuerdo al factor de corrección de montaje.

$$n_k = \frac{d^3}{L^2} * 1.1 \times 10^8 \quad (5)$$

$$n_{kper} = n_k * f_n * 0.8 \quad (6)$$

Estas ecuaciones permiten calcular la velocidad teórica máxima y la velocidad crítica ajustada considerando factores como el montaje y las dimensiones del husillo, para evitar vibraciones o daños durante la operación.

Estos cálculos son esenciales para determinar si el husillo seleccionado es adecuado para la aplicación, garantizando que opere de manera estable y sin exceder los límites críticos de velocidad.

Donde:

- n_k = Velocidad teórica máxima a la que debe girar el husillo (RPM).
- d^3 = Diámetro de la raíz del husillo (mm).
- L = Longitud entre soportes (mm).
- n_{kper} = Velocidad máxima real del husillo (RPM).
- f_n = Factor de corrección relacionado al tipo de montaje.

Generalizando la transformación del movimiento rotatorio en lineal, este tiene una eficiencia que depende netamente del factor de fricción entre las superficies y el ángulo de hélice de la rosca el cual se define como fricción rasante. Debido a esta fricción se determinan condiciones para el correcto funcionamiento del acoplamiento, uno de ellos es la limitación de la presión superficial lo que permite un deslizamiento suave, evitando la erosión temprana de los materiales. Esta limitación se relaciona directamente con la potencia buscando la disipación del calor por la fricción [27]; descrito mejor en las fórmulas:

$$p = \frac{F}{At} \quad (7)$$

$$At = \pi * dm * Z * H1 \quad (8)$$

$$Z = \frac{h \text{ tuerca (mm)}}{\frac{\text{paso efectivo (mm)}}{n^\circ \text{ de entradas}}} \quad (9)$$

Donde:

- p = Presión superficial del contacto.
- F = Fuerza axial (N).
- At = Área de contacto total entre los dientes del husillo la tuerca en el plano perpendicular al eje (mm^2).
- dm = Diámetro medio de la rosca (mm).
- Z = Número de dientes de sujeción.
- $H1$ = Medida radial de contacto entre el diente del husillo y el diente de la tuerca (mm).

De acuerdo con la limitación de la presión superficial, se puede calcular también la velocidad de deslizamiento con:

- Si se define el número de vueltas a la que el husillo debe girar, entonces:

$$Vst = \frac{n * P}{1000 * \text{sen}\alpha} \quad (10)$$

- Si se define la velocidad de traslación de la tuerca, entonces:

$$V_{st} = \frac{V_{tr}}{\text{sen}\alpha} \quad (11)$$

Recordando que, la cantidad de giros del husillo y la velocidad de desplazamiento están relacionados por:

$$n = \frac{1000 * V_{tr}}{P} \quad (12)$$

Donde:

- V_{st} = Velocidad de deslizamiento en el diámetro medido (m/min).
- n = Número de vueltas al minuto (vueltas/min).
- P = Paso de la rosca (mm).
- α = Ángulo de hélice de la rosca.
- V_{tr} = Velocidad de traslación (m/min).

1.7 Unidades de sistema lineal

Se distribuye varias configuraciones de posicionamiento lineal estableciendo diferencias en las tareas que se ejecuten. Dentro de las configuraciones más comunes se clasifican en:

1.7.1. Unidad lineal con husillo de rosca trapezoidal

El cuerpo de la unidad está conformado por un perfil de aluminio equipado con ranuras a través de las cuales se desplazan guías sin presentar ningún espacio libre con respecto al perfil un ejemplo de este tipo de unidad se encuentra en la Figura 15. La rotación del husillo se convierte en un desplazamiento lineal del carro. Esta estructura permite ajustar la posición del carro en relación con la tuerca, lo que resulta en una sincronización precisa, especialmente valiosa para sistemas compuestos [22].

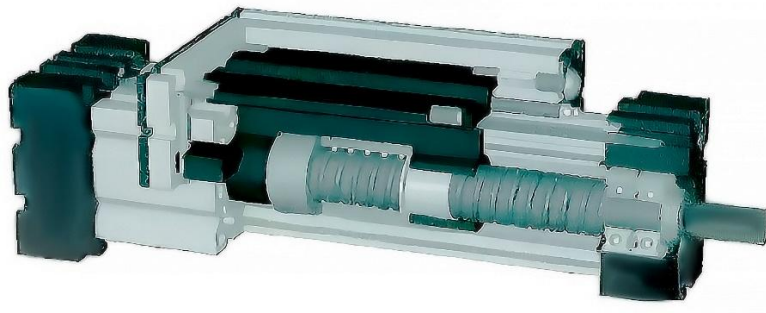


Figura 15. Unidad lineal con husillo de rosca trapezoidal [22].

1.7.2. Unidad lineal sin tracción

La estructura de la unidad está compuesta por un perfil de aluminio junto con barras calibradas de acero apreciados en la Figura 16. El carro cuenta con rodamientos perfilados que se encuentran preajustados y no presentan juego con respecto al perfil. De esta manera, se crea un conjunto que puede soportar y permitir el desplazamiento de diversas cargas mediante cualquier tipo de mecanismo de accionamiento [22].



Figura 16. Unidad lineal sin tracción [22].

1.7.3. Unidad lineal con correa dentada

La estructura de la unidad se compone de un perfil de aluminio junto con barras calibradas de acero. En la Figura 17 se aprecia que el carro incorpora rodamientos perfilados que se encuentran precargados y no muestran ninguna holgura en relación al perfil. La rotación de las poleas se convierte en el movimiento lineal del carro. Esta construcción permite ajustar la

posición del carro, lo que asegura una sincronización perfecta en sistemas compuestos y facilita un rápido ajuste de la correa [22].

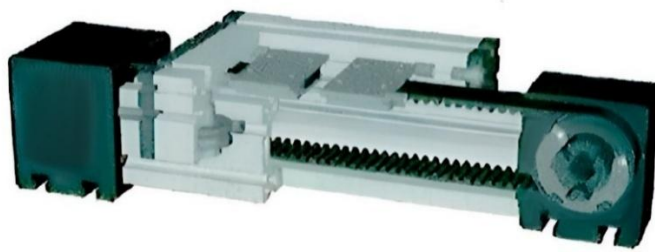


Figura 17. Unidad lineal con correa dentada [22].

1.7.4. Unidad con cremallera

La estructura de la unidad está conformada por un perfil de aluminio que cuenta con barras calibradas de acero expuesto en la Figura 18. El carro está equipado con rodamientos perfilados que están precargados y no presentan ningún juego con respecto al perfil. La rotación del piñón sobre la cremallera se transforma en el desplazamiento lineal del carro [22].

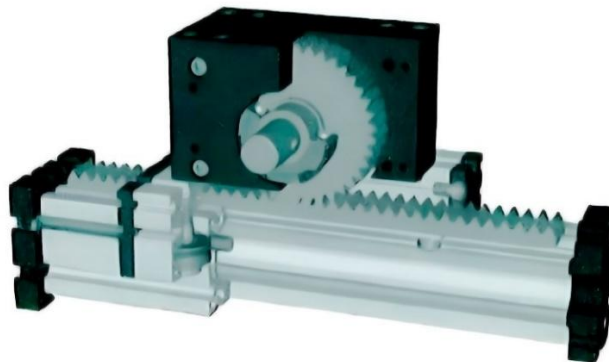


Figura 18. Unidad con cremallera [22].

1.7.5. Unidad lineal de rodamientos perfilados

Este tipo de unidad se basa en una placa con barras calibradas de acero. El carro está equipado con rodamientos perfilados que se encuentran precargados y se desplazan de

forma lineal a lo largo de toda la placa, guiados por las barras de acero representado en la Figura 19 [22].



Figura 19. Unidad lineal de rodamientos perfilados [22].

1.8 Actuadores Lineales comerciales

En este punto se describirá diferentes tipos de actuadores lineales comerciales que existen en el mercado que satisfacen las condiciones que se requiere en el laboratorio de Mecatrónica.

1.8.1. Newmark systems, inc

La marca “Newmark systems, inc”, ofrece sistemas lineales sencillos en su composición con un motor a pasos o servo motor junto con ejes y un tornillo sin fin, hasta conjuntos que pueden actuar como mesas rotatorias en los ejes X y Y para una gran variedad de aplicaciones como robots industriales, máquinas de herramientas, ensamblaje, manufactura electrónica, apreciados en la Figura 20. Estos actuadores necesitan de un software en específico que cuentan de una interfaz de control en fases lo cual lo hace realmente intuitiva; además estos sistemas tienen una longitud que va entre los 25 milímetros hasta los 1.5 metros [28].



Figura 20. Actuadores lineales de la marca “Newmark systems, inc”. a) Estándar. b) De configuración XY [28].

1.8.2. Aris Stellantriebe

Esta marca es una proveedora de actuadores eléctricos de movimiento lineal llamados también de compuerta, son usados en áreas industriales donde se requiere un alto requerimiento de torque o también sistemas completos de válvulas relacionadas al ajuste de la sensibilidad. Estos actuadores son comercializados especialmente en la industria de la construcción de automóviles debido al ajuste en los sistemas de válvulas, estos sistemas tienen una hélice de alto movimiento por lo que reduce la velocidad requerida del motor garantizando un funcionamiento más limpio y suave; además esta hélice permite un trabajo en seco por lo que no es requerido un mantenimiento regular y tolera un ambiente relativamente sucio. Una ventaja de este actuador, es que puede adaptarse a cambios que se requieran al pasar el tiempo simplemente cambiando de actuador, los tamaños de longitud de carrera se presentan entre 150 y 300 milímetros y también bajo pedido pudiéndose apreciar en la Figura 21 [29].

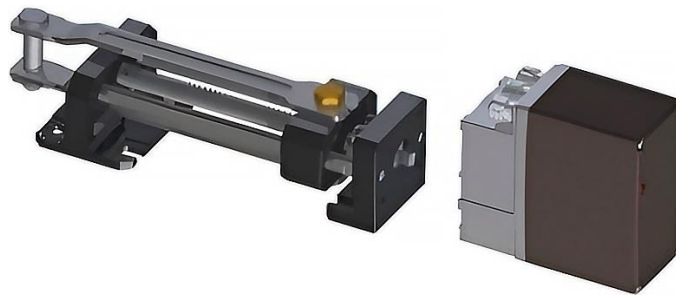


Figura 21. Actuador lineal eléctrico de la marca “Aris Stellantriebe” [29].

1.8.3. Pneumax

Esta marca ofrece actuadores lineales de correa dentada realizadas con poliuretano reforzada con hilos de acero y un sistema de tensado integrado. Tiene diferentes composiciones que permiten el soporte de diferentes cargas, adicional, según la aplicación se le puede implementar sensores de posición o la fijación del motor como se muestra en la Figura 22 [30].



Figura 22. Actuador lineal con transmisión de la marca “Pneumax” [30].

Para el cálculo completo del actuador lineal, se considera información de catálogos que indican varias configuraciones, para el caso del husillo – tuerca, el sistema se resume en un croquis donde el motor transmite su rotación mediante un acople al husillo, la tuerca se desplazará dependiendo el tipo de giro, si es horario o antihorario. La carga se debe determinar calculando la inercia, así como la longitud y el diámetro adecuados. Para asegurar rigidez, precisión y capacidad de carga, se consideran aspectos mecánicos clave, como los caminos de rodadura. Estos caminos están compuestos por carriles y patines de bolas u otros sistemas similares, diseñados para minimizar la fricción, es fundamental que estos carriles estén alineados de manera paralela al tornillo o husillo [23].

$$kg = d * \pi * r^2 * L \quad (13)$$

$$Jh = 0.5 * Kg * r^2 \quad (14)$$

$$JL = 0.5 * Kg(carga) * r^2 \quad (15)$$

Donde:

- kg = Masa del que se compone el material.
- d = Densidad del material (kg/m^3).
- r = Radio (m).
- L = Longitud del husillo (m).
- Jh = Inercia del husillo.
- JL = Inercia de la carga

Una vez conocido la aceleración y los valores de inercia se procede con el par acelerador:

$$\omega = \frac{vel \left(\frac{mm}{s} \right)}{p} * 2\pi \quad (16)$$

$$Macel = \omega * JT \quad (17)$$

$$JT = Jh + JL \quad (18)$$

Donde:

- ω = Velocidad angular (rad/s).
- vel = Velocidad dependiente del programador.
- p = Paso del husillo (mm).
- Macel = Par acelerador (Nm).
- JT = Inercia total (kg/m²).

Por último, se calcula el par para vencer la fuerza de rozamiento:

$$Froz = PesoTotal * 9.81 * CoefRoz \quad (19)$$

$$Mroz = \frac{p * Froz}{2000\pi} \quad (20)$$

Donde:

- Froz = Fuerza de rozamiento (N).
- CoefRoz = Coeficiente de rozamiento proporcionado por el material.
- Mroz = Par para vencer la fuerza de rozamiento (Nm).

1.9 Conceptos eléctricos

En un servomecanismo se hallan diversos componentes, como se indicó previamente, uno de ellos, y responsable de iniciar el proceso de alimentación es el transformador; en el laboratorio de Mecatrónica se utilizan los transformadores serie tipo IP – 9T58K2811 GE, cuyas características se detallan en la Tabla 7, son construidos para aplicaciones de propósito general

como control industrial además que su núcleo está soldado entregando así un rendimiento silencioso.

Tabla 7. Características técnicas del transformador IP – 9T58K2811 GE [31].

Parámetro		Valor
Fase		1
Voltaje	Primario	240 x 480 VAC
	Secundario	120 / 240 VAC
kVA		0,75 kVA
Material de bobina		Cobre
Temperatura	Ambiente	40 °C
	Ascenso	100 °C
	Máxima	180 °C
Protección eléctrica		N
Frecuencia		60 Hz
Peso neto		16 lb
Factor K		K1
Dimensiones	Ancho	5,3 in
	Alto	4,6 in
	Profundidad	5,8 in

1.9.1. Energía eléctrica y potencia

En circuitos eléctricos la potencia se define como la cantidad de energía transferida o convertida por unidad de tiempo, su unidad es el vatio (W), también representado por la letra P. La energía eléctrica es igual a la potencia por el tiempo de consumo, se mide en vatios-hora (Wh); esta relación es esencial para comprender el uso y la medición de la electricidad, donde la potencia expresa la tasa de trabajo eléctrico y la energía representa la cantidad total consumida o producida durante un período determinado [32].

Es importante considerar que, para comprender estos conceptos de circuitos y magnitudes eléctricas, es esencial tener conocimiento sobre la ley de Ohm, pues estos relacionan la corriente, voltaje y resistencia; que son base en el análisis y diseño de sistemas electrónicos [32].

Se puede observar las relaciones de estos criterios en la Figura 23.

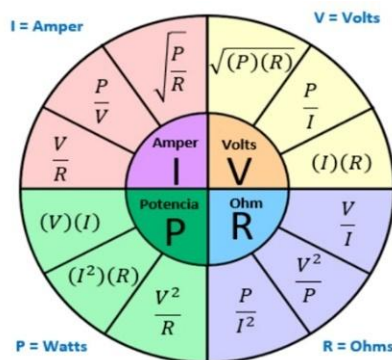


Figura 23. Relación entre las variantes de potencia y la ley de Ohm [32].

Como se indicó previamente, en el laboratorio de mecatrónica se dispone del transformador IP – 9T58K2811 GE además, complementando con los conceptos eléctricos anteriores se detalla a continuación la comunicación que se realiza desde el suministro de energía hasta el servo drive.

Tomando en cuenta la Figura 24, se especifica la configuración del transformador.

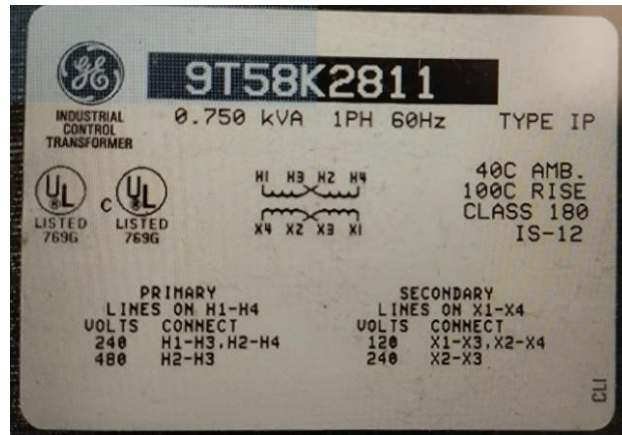


Figura 24. Especificación de la configuración del transformador.

Para las conexiones de este transformador se observa los bobinados de la sección primaria y secundaria, se tiene como primario a las variables H1 hasta H4 y como secundario a las variables X1 hasta X4. Se denota que este tipo de transformador puede trabajar conectado a 240v o 480v, entregando 120v o 240v respectivamente dependiendo las tareas que se necesite; en el laboratorio de mecatrónica se cuenta con tomas de corriente que operan a 220v ya que el control del servomecanismo actúa a este voltaje.

Para alimentar este transformador se conecta a la toma de 220v hacia H1 y H4 además de hacer puente las variables H1 con H3 y H2 con H4 para trabajar con los 240V, así mismo el bobinado secundario obtiene los 240V desde X1 y X4 haciendo puente X2 con X3. Es importante tener en cuenta que tanto la alimentación del transformador como la energía transformada serán de 220V. Esto se debe a que, el servo drive y el servomotor operan a este voltaje. Aunque la ilustración del transformador pueda mostrar que, debido a la configuración de conexión, tanto en el bobinado primario como en el secundario ingresa y sale 240V, es posible trabajar con un margen de porcentaje. Así, se alimenta con 220V de trabajo además que el transformador en este caso se utiliza para aumentar la potencia de la alimentación.

1.10 Conceptos mecánicos

En esta sección se presenta las definiciones esenciales relacionadas con el diseño del actuador lineal, específicamente en lo referente a cortes y dobleces para la cubierta. En el contexto de láminas metálicas se analiza el corte y doblado del material; los parámetros para el proceso de

corte dependen según el método empleado y el grosor del material; el doblado se determina por el tipo de operación, tolerancia del doblado y fuerza requerida.

- **Corte mediante cizallado**

Es una operación que corta una chapa a lo largo de una línea recta entre dos extremos, generalmente es usada para cortar láminas grandes en secciones más pequeñas para posteriores operaciones de doblado como se muestra en la Figura 25 [33].

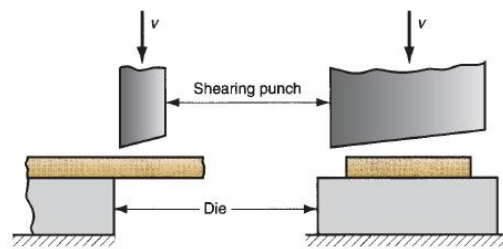


Figura 25. Corte de chapas mediante cizallado [33].

Para la realización del corte se determina la distancia entre el punzón y el troquel mediante la siguiente ecuación:

$$c = A_c t \quad (21)$$

Donde:

- c = holgura (mm).
- A_c = Asignación de holgura.
- t = grosor de la chapa.

El valor de A_c está determinado en tres grupos de chapas metálicas que son:

- Aleaciones de aluminio 1100S y 5052S en cualquier temple $A_c = 0.045$.
- Aleaciones de aluminio 2024ST y 6061ST, bronce en cualquier temple, acero inoxidable blando y acero blando laminado en frío $A_c = 0.060$.
- Acero endurecido laminado en frío, acero inoxidable duro y semiduro $A_c = 0.075$.

En lo que respecta a la fuerza de corte es más eficiente trabajar con la resistencia a la tracción del metal seleccionado, puesto que, sin este dato se debe considerar la resistencia al inciso determinado por unidad de área que el material puede soportar antes de cortar, entonces se calcula con:

$$F = 0.7(TS)tL \quad (22)$$

Donde:

- F = fuerza de corte (N).
- TS = resistencia del material a la tensión (MPa).
- t = grosor del material (mm).
- L = distancia de corte (mm).

Existen varios métodos para el doblado de láminas, los más comunes son el doblado en V y el doblado en U; para este proceso se emplean prensas las cuales dan la forma deseada. A continuación, se analiza a detalle el proceso que se adapta de mejor manera a la construcción de un armazón pensado para el actuador lineal [33].

- **Doblado en V y doblado de bordes**

Estos métodos emplean diversos tipos de punzones y dados, para el doblado en V se utiliza un troque de dicha forma y en el doblado de bordes se lo ejecuta con un dado deslizante.

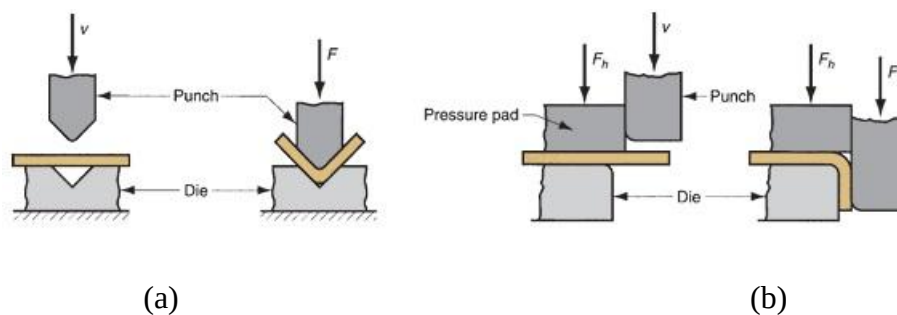


Figura 26. Métodos de doblado de láminas. a) Doblado en V. b) Doblado de bordes [33].

En la Figura 26, en el doblado en V se muestra como la placa de metal se deforma entre un punzón y un dado en con dicha forma, es usado generalmente en operaciones de baja producción ya que sus ángulos van desde los de gran apertura hasta los de apertura mínima. En cambio, en el doblado de bordes se observa una carga sobresaliente fuera de la lámina la que es usada a presión aplicando una fuerza de sujeción para que la lámina no se desestabilice o no tambalee; el ángulo recto es el que soporta este doblado o menores a 90 [33].

Para la tolerancia se debe determinar la dimensión de la lámina en cuanto a la deformación para que pueda coincidir con la parte final; para ello se lo calcula con la fórmula:

$$A_b = 2\pi \frac{\alpha}{360} (R + K_{ba}t) \quad (23)$$

Donde:

- A_b = margen de error en el doblado (mm).
- α = ángulo de flexión (en grados).
- R = radio del doblado (mm).
- t = grosor del material (mm).
- K_{ba} es un elemento para calcular el estiramiento.

Para el valor de K_{ba} se tiene establecido valores recomendados que predicen el alargamiento que ocurre si el radio del doblado es menor en comparación grosor de la lámina, estos son:

- Si $R < 2t$, $K_{ba} = 0.33$
- Si $R \geq 2t$, $K_{ba} = 0.50$

La fuerza del doblado en cambio depende netamente de la geometría del punzón y del dado como de las propiedades de la lámina como la resistencia, espesor y ancho. Para la fuerza máxima del doblado se analiza con la ecuación:

$$F = \frac{K_{bf}TSwt^2}{D} \quad (24)$$

Donde:

- F = fuerza de plegado (N).
- TS = resistencia a la tracción del metal placa (MPa).
- w = ancho de la sección en la dirección del eje de flexión (mm).
- t = grosor del material (mm).
- D = apertura del dado (mm).

La expresión K_{bf} depende del tipo de doblado, se tiene determinado valores que son:

- Para doblado en V, $K_{bf} = 1.33$
- Para doblado en bordes, $K_{bf} = 0.33$

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

La evaluación de distintas opciones mediante un análisis de alternativas permite identificar la solución apropiada, considerando aspectos como costos, beneficios y alineación con los objetivos específicos que se plantearon alrededor de las necesidades para el laboratorio de Mecatrónica.

2.1 Selección de alternativas

El análisis de alternativas se consideró un enfoque específico para el actuador lineal que es el control de posición. Este se relaciona directamente con el software de laboratorio que se emplea; centrado en estas características se planteó las siguientes alternativas:

- **Comprar:** Este tipo de sistemas están enfocados en la industria especialmente para el desplazamiento o traslado de objetos que varían en tamaño y peso, por lo que, sería una inversión excesiva además que se estaría desaprovechando el espacio del laboratorio ya que generalmente estas máquinas son de gran volumen. Como el fin de este proyecto es de orientación académica, comprar en cantidad estos sistemas no es una opción.
- **Construir:** En el laboratorio de Mecatrónica se dispone de los materiales necesarios para poner en práctica el funcionamiento de un servomecanismo, ciertamente se puede realizar el control de posición del servomotor, pero es necesario un modelo en el que se visualice de manera óptima el control de este dando por consiguiente la satisfacción del requerimiento académico.

En la Tabla 8 se evaluó los criterios de selección para la mejor alternativa.

Tabla 8. Parámetros de evaluación.

PARÁMETRO	EVALUACIÓN
Inadecuado	1
Deficiente	2
Regular	3
Adecuado	4
Excelente	5

Después de definir los valores de consideración para la selección de alternativas, se realiza un análisis porcentual relacionando la evaluación donde 1 es el más bajo y 5 es el más alto facilitando la selección de la mejor alternativa. Esto se refleja en la Tabla 9, donde también se presenta los criterios seleccionados, que incluyen el tamaño de la máquina, evaluado por su adecuación al espacio de trabajo; el costo económico, para garantizar la viabilidad financiera del proyecto; y la accesibilidad a la obtención, que asegura la facilidad de adquisición y disponibilidad en el mercado.

Tabla 9. Análisis porcentual de alternativas.

Alternativas	Tamaño de máquina	Costo económico	Accesibilidad a la obtención	Valor general	Valor porcentual
Comprar	2	3	4	9	60%
Construir	5	5	5	15	100%

Analizando la Tabla 9 se demuestra que la opción más adecuada es diseñar y fabricar el actuador lineal, con una evaluación en porcentaje por encima del 60% por lo que se ejecutará el procedimiento para llevar a cabo este modelo.

2.2 Selección del material

Se considerarán diversos aspectos para seleccionar el material más adecuado, incluyendo la carcasa, el tornillo sin fin con su terminal, así como sus ejes y placas de estabilidad.

Con la finalidad de realizar el proceso de selección del material de manera efectiva, se procedió a consultar diversas alternativas disponibles en el mercado. En este contexto, se estableció contacto con la empresa AceroCenter, reconocida por su experiencia en el suministro de materiales industriales. Esta empresa, con su amplia gama de productos, no solo brindó alternativas para la carcasa de este proyecto, sino que también valiosas sugerencias, considerando la disponibilidad y las características particulares requeridas.

Para la carcasa y las placas de estabilidad se considera distintos tipos de materiales empleados en general para la realización de recubrimientos de máquinas como son: el tol negro frío, tol negro caliente, tol galvanizado, acero inoxidable 430, acero inoxidable 304 y aluminio. En cuanto al tornillo sin fin y los ejes, se selecciona mediante las tablas preestablecidas de clasificación.

- **Tol negro frío**

El acero laminado en frío, comúnmente conocido como "tol negro frío", pasa por un proceso de modelado a temperatura ambiente, lo que facilita su regeneración cristalina. En este método, el acero se somete a un nuevo proceso de conformación mediante rodillos que reducen su espesor. Este método confiere al acero laminado en frío en donde sus propiedades específicas cambian, tales como un aumento en su resistencia y dureza, aunque con una disminución en su ductilidad, que es la capacidad del material para deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse. Así, el tol negro frío se destaca por sus propiedades mecánicas mejoradas, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones que requieren resistencia y rigidez en el material; apreciándose en la Figura 27 [34].

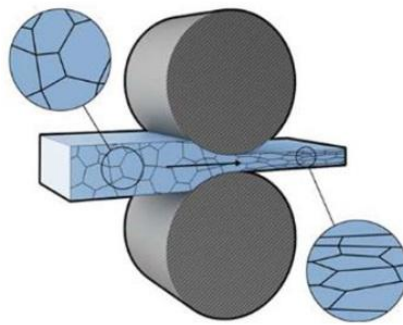


Figura 27. Procedimiento para el laminado en frío [35].

- **Tol negro caliente**

El acero laminado en caliente es un método de procesamiento que implica la conformación del material a altas temperaturas, típicamente alrededor de 926°C. En este procedimiento, el acero es sometido a la acción de rodillos industriales que aplican calor y presión para manipular el material. Este proceso de fresado, a diferencia del laminado en frío, facilita significativamente

la formación y modelado del acero. El calor aplicado durante el laminado en caliente permite que el acero alcance un estado más maleable, lo que resulta en una mayor facilidad para darle forma. Este método es particularmente adecuado para la fabricación de piezas de dimensiones más extensas, ofreciendo ventajas significativas en términos de manipulación y conformación de materiales a gran escala mostrado en la Figura 28 [34].

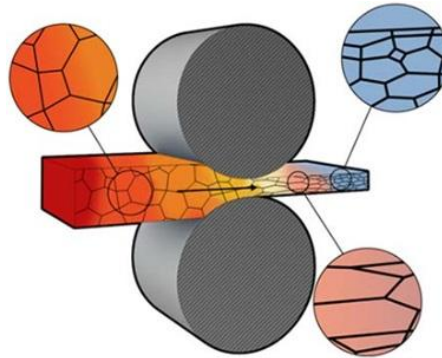


Figura 28. Procedimiento para el laminado en caliente [35].

- **Tol galvanizado**

La técnica del galvanizado se emplea para preservar el acero de la corrosión, sumergiendo las piezas de acero en zinc fundido con el propósito de resguardarlas contra la oxidación y fortalecer su resistencia mecánica ante impactos y desgaste. El procedimiento de galvanización, a través de inmersión o por exposición al fuego, implica sumergir los componentes de acero en zinc fundido, manteniendo una temperatura aproximada de 450°C. Esto resulta en un recubrimiento que varía entre 7-42 micras (siguiendo la norma UNE EN ISO 10346) para aplicaciones de recubrimiento bajo, y de 45-200 micras (de mayor duración, según la norma UNE EN ISO 1461), observándose en la Figura 29 [36].

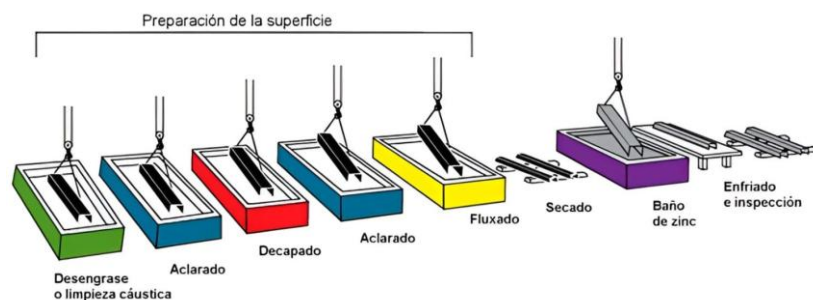


Figura 29. Proceso de Galvanizado [36].

- **Acero inoxidable 430**

El acero tipo 430 pertenece a la categoría de aceros inoxidables ferríticos y exhibe una resistencia moderada a la corrosión y al calor. A diferencia de algunos aceros inoxidables, el tipo 430 no experimenta endurecimiento mediante tratamientos térmicos, manteniéndose magnético y poseyendo una buena ductilidad apreciándose en la Figura 30. Su capacidad para ser conformado fácilmente lo hace adecuado para diversas aplicaciones donde se requiere maleabilidad [37].



Figura 30. Láminas de acero inoxidable 430 [37].

- **Acero inoxidable 304**

El tipo 304 destaca como el acero inoxidable austenítico más ampliamente utilizado. En su estado recocido, es no magnético, pero adquiere propiedades magnéticas al ser sometido a trabajos en frío. Este tipo de acero se emplea comúnmente en la condición de recocido debido a su óptima combinación de resistencia a la corrosión y facilidad de conformado. Se sugiere la transición al tipo 301 en situaciones que demanden endurecimiento, ya que el tipo 304 no experimenta endurecimiento de manera sencilla; exhibiéndose en la Figura 31 [38].



Figura 31. Láminas de acero inoxidable 304 [38].

- **Aluminio**

El aluminio es un metal plateado de notable ligereza, con una masa atómica de 26,9815. Posee un punto de fusión de 660°C, un punto de ebullición de 2.467°C y una densidad relativa de 2,7. Este metal exhibe una marcada electro positividad y muestra una extrema reactividad. Cuando entra en contacto con el aire, se cubre rápidamente con una capa resistiva y transparente de óxido de aluminio, la cual le brinda protección contra la corrosión; evidenciándose en la Figura 32 [39].



Figura 32. Láminas de aluminio [39].

Considerando las alternativas del material a escoger, se realizó un análisis comparativo de las atribuciones mecánicas para la selección más acertada. Estas comparaciones se evidencian en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades mecánicas de las alternativas según NTE INEN 115.

Propiedad	Tol frío	Tol caliente	Galvanizado	Acero 430	Acero 304	Aluminio
Módulo de elasticidad (GPa)	200	200	200	200	193 a 200	69 a 70
Resistencia a la tracción (MPa)	350 a 700	400 a 700	350 a 550	480 a 690	520 a 750	70 a 700
Límite de elasticidad (MPa)	250 a 500	250 a 500	200 a 350	220 a 350	210 a 290	30 a 550

Dureza Brinell (HB)	120 a 180	150 a 200	120 a 160	150 a 200	150 a 190	15 a 150
Densidad (g/cm ³)	7.85	7.85	7.85	7.75	8	2.7

Tomando en cuenta la Tabla 10, se vuelve a evaluar los metales analizados para escoger la mejor opción en cuanto al recubrimiento del actuador lineal.

Tabla 11. Análisis porcentual frente a las propiedades mecánicas.

Propiedad	Tol frío	Tol caliente	Galvanizado	Acero 430	Acero 304	Aluminio
Módulo de elasticidad	3	3	3	3	3	5
Resistencia a la tracción	4	4	4	3	4	3
Límite de elasticidad	3	3	3	2	4	3
Dureza Brinell	3	3	3	2	3	2
Densidad	3	3	3	2	2	5
Valor general	16	16	16	12	16	18
Valor porcentual	64%	64%	64%	48%	64%	72%

La Tabla 11 está en función de los parámetros de la Tabla 8 determinando que, el material con mejor valor porcentual para la aplicación es el aluminio.

Tabla 12. Análisis porcentual de la selección del material.

Alternativas	Propiedades mecánicas	Accesibilidad	Costo económico	Valor global	Valor Porcentual
Tol caliente	3	4	2	9	60%
Tol frío	3	4	1	8	53.34%
Galvanizado	3	5	2	10	66.67%
Acero 304	2	4	5	11	73.34%
Acero 430	3	4	4	11	73.34%
Aluminio	4	5	3	12	80%

La Tabla 12, relacionada con los parámetros de la Tabla 8 determina que, el material con el valor porcentual elevado es la opción a escoger, en este caso el aluminio.

Considerando los resultados sobre el valor porcentual en las tablas, se concluyó que el material adecuado para el recubrimiento del actuador lineal es el aluminio.

2.3 Selección del método de transmisión de movimiento

La transmisión de movimiento se basó en las necesidades específicas del sistema y en criterios técnicos como la precisión, eficiencia y simplicidad mecánica. Evaluando las opciones como transmisión por correas, engranajes y transmisión directa, se optó por esta última debido a su capacidad de proporcionar un movimiento sin pérdidas significativas de energía [40].

- **Precisión requerida**

La transmisión directa garantiza una mayor exactitud en el movimiento, ya que elimina elementos intermedios como correas o engranajes que pueden introducir juegos mecánicos o errores acumulativos [40].

- **Simplicidad del diseño**

El diseño se optimiza al eliminar componentes mecánicos adicionales, lo que reduce la complejidad del sistema, facilita su construcción e implementación, y minimiza los posibles puntos de fallo, mejorando así su fiabilidad operativa [40].

- **Mantenimiento reducido**

Al minimizar el número de componentes mecánicos, la transmisión directa disminuye las necesidades de mantenimiento, lo que a su vez reduce costos operativos y prolonga la vida útil del sistema [40].

- **Compatibilidad con el entorno de trabajo**

La transmisión de movimiento directa es adecuada para operar en ambientes industriales donde pueda haber exposición a polvo, humedad y cambios bruscos de temperatura; esta característica garantiza que el sistema mantenga su rendimiento sin comprometer la fiabilidad [40].

En la Tabla 13 se observa el análisis de la selección sobre el método de transmisión de movimiento.

Tabla 13. Criterio de evaluación para la transmisión de movimiento [40].

Criterio de Evaluación	Transmisión de movimiento		
	Acoplamientos	Correas dentadas	Engranajes
Precisión	Alta	Media	Media - Alta
Eficiencia energética	Alta	Media	Media
Complejidad del diseño	Baja	Media	Alta
Mantenimiento requerido	Mínimo	Regular	Regular - Alto
Durabilidad	Alta	Media	Alta

Para determinar la mejor transmisión de movimiento se evaluó la Tabla 13 con respecto a la Tabla 8.

Tabla 14. Evaluación para la selección del tipo de transmisión.

Criterio de Evaluación	Transmisión de movimiento		
	Acoplamientos	Correas dentadas	Engranajes
Precisión	5	3	4
Eficiencia energética	5	3	3
Complejidad del diseño	5	3	2
Mantenimiento requerido	5	3	2
Durabilidad	5	3	5
Valor global	25	15	16
Valor Porcentual	100%	60%	64%

La Tabla 14 muestra que la mejor opción es la transmisión directa con acoplamientos con un porcentaje del 100%.

2.4 Factores para determinar el tipo de acople

En esta sección se analizan los factores clave que influyen en la elección del acople, considerando aspectos como la precisión, alineación, transmisión y torque.

- **Alta precisión en la transmisión de movimiento**

Debido a que el sistema está diseñado para operar en función del control de posición, es necesario garantizar una alta precisión en la transmisión de movimiento, esto implica que el mecanismo no debe experimentar variaciones significativas ni pérdidas de exactitud durante la operación. La selección de un acople rígido resulta ideal en este contexto ya que este tipo de acoplamiento asegura una transmisión directa y sin juego del movimiento rotacional entre los componentes conectados, además, su diseño minimiza la elasticidad y evita deslizamientos contribuyendo a mantener la exactitud requerida para el control de posición o trayectoria [15].

- **Alineación exacta de los ejes**

Los acoples rígidos son ideales para sistemas en los que los ejes de entrada y salida están perfectamente alineados como lo es el actuador lineal, este alineamiento garantiza que no se producirán desalineaciones durante las condiciones normales de operación. La elección del acople rígido es la más adecuada, ya que, su diseño no admite flexibilidad entre los ejes conectados asegurando una conexión directa y sin juego. Esto no solo permite mantener una transmisión de potencia altamente eficiente, sino que también minimiza las pérdidas de energía y asegura la estabilidad operativa [15].

- **Alta capacidad de transmisión de torque**

Los acoples rígidos son generalmente muy eficaces para transmitir altos torques debido a su construcción sólida dado que no permiten ningún tipo de flexibilidad, toda la fuerza se transfiere directamente desde un eje al otro, lo cual es útil en aplicaciones de alta carga como la de un motor con un tornillo sin fin. La resistencia estructural del acople rígido asegura que pueda soportar fuerzas de torque sin riesgo de deformación o fallo bajo condiciones normales de operación [15].

En la Tabla 15 se muestra los criterios para evaluar los acoples rígidos y flexibles.

Tabla 15. Criterios de evaluación para los acoplamientos [15].

Criterio de Evaluación	Acoplamiento Rígido	Acoplamiento Flexible
Alineación	Alta	Alta
Absorción de vibraciones	Baja	Alta
Fuerzas máximas soportadas	Alta	Media
Compatibilidad	Alta	Baja
Tolerancia al desgaste	Alta	Media

Para determinar el mejor acople, se realizó la evaluación de la Tabla 15 con respecto a la Tabla 8.

Tabla 16. Evaluación de parámetros para los tipos de acoplamientos.

Criterio de Evaluación	Acoplamiento Rígido	Acoplamiento Flexible
Alineación	5	5
Absorción de vibraciones	2	5
Fuerzas máximas soportadas	5	3
Compatibilidad	5	2
Tolerancia al desgaste	5	3
Valor global	22	18
Valor Porcentual	88%	72%

La Tabla 16 indica que la mejor opción para la transmisión de movimiento es el acoplamiento rígido con un 88%.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL ACTUADOR LINEAL

En este capítulo se realizará el diseño con las especificaciones mecánicas y eléctricas, además de indicar el proceso que implementa la conexión física como el control de posición mediante el software de programación.

3.1 Diseño mecánico

El diseño mecánico del sistema abarca todos los aspectos relacionados con la configuración estructural y funcional del actuador lineal, se describen los componentes principales, los materiales seleccionados y las consideraciones técnicas del equipo.

3.1.1. Características del tornillo sin fin

En la selección del tornillo sin fin se enfrentaron diversas complejidades puesto que, es difícil encontrar un diseño adecuado que se ajuste a las necesidades del proyecto; al evaluar los aspectos en conjunto con sus ventajas y limitaciones, se optó por seleccionar los tornillos sin fin que se encuentran comúnmente en el mercado, los cuales son principalmente utilizados en impresoras 3D y máquinas CNC. Estos disponen una gran variedad de medidas que resumen a la comodidad y flexibilidad del diseño destacándose por su versatilidad además de permitir aplicaciones relacionadas directamente con la ingeniería, y en este caso el laboratorio de Mecatrónica.

El tornillo sin fin seleccionado se muestra en la Figura 33.



Figura 33. Tornillo sin fin [41].

Las especificaciones generales de este producto son:

- Diámetro: 8mm.
- Longitud: disponible desde 150mm hasta 1000mm.
- Entradas: 4.
- Paso: 2mm.
- Material: acero inoxidable 304.

Para el proyecto se utiliza un tornillo de 600mm de longitud, seleccionado estratégicamente para que el actuador lineal alcance un tamaño considerable y adecuado, tanto para el rango de desplazamiento requerido como para demostrar la funcionalidad del sistema de manera clara y representativa. Este tamaño permite optimizar el espacio en el laboratorio de Mecatrónica, garantizando que el dispositivo se integre de manera eficiente.

La longitud del tornillo también asegura que el diseño del actuador pueda soportar aplicaciones que requieren movimientos lineales más amplios, manteniendo la estabilidad mecánica y la precisión de posicionamiento necesarias. Asimismo, esta medida proporciona flexibilidad para ajustes futuros o posibles ampliaciones del sistema, adaptándose a diferentes configuraciones sin necesidad de modificar componentes clave.

3.1.2. Cálculos del tornillo sin fin y el control de posición

En esta sección se presenta los cálculos esenciales relacionados con el diseño y funcionamiento del tornillo sin fin, así como los parámetros de control de posición mediante la transmisión de movimiento rotacional.

Para la modelación del proyecto se debe disponer de todas las piezas y medidas específicas para una simulación acercada a la realidad, por esta razón, el primer aspecto a tomar en cuenta es el tornillo sin fin; dado que la selección del mismo no se encuentra disponible en los catálogos de husillos por su medida y paso detallado en las especificaciones del distribuidor, se realizó cálculos por los que se pueden obtener todos los datos además de ser importantes para algunas fórmulas que requieren de estos.

Debido a que se trata de un roscado trapezoidal, externo para el tornillo e interno para la tuerca, tiene relación con las normas ISO 2904 o también las normas DIN 103 para hilos métricos

trapezoidales, por lo tanto, las dimensiones adicionales están disponibles en las tablas estandarizadas por estas normativas. La Tabla 17 muestra la estandarización por la empresa Bornemann Gewindetechnik acorde a las dimensiones nominales para perfiles de rosca DIN 103 [42].

Tabla 17. Rosca trapezoidal según DIN 103 en mm [42].

P	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
a_c	0,15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$h_3 - H_4$	0,9	1,25	1,75	2,25	2,75	3,5	4	4,5	5	5,5	6,5
H_1	0,75	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6
R1 max.	0,075	0,125	0,125	0,125	0,125	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
R2 max.	0,15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Continuando con el diseño del tornillo para la simulación, se procede a especificar las ecuaciones en relación al dimensionamiento, detallándose en la Figura 34.

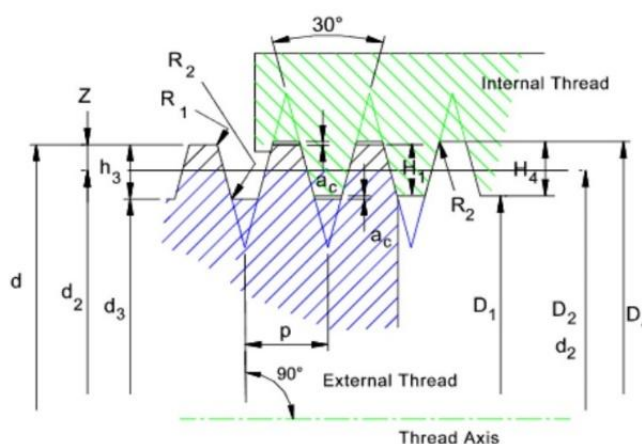


Figura 34. Especificaciones del hilo trapezoidal interno y externo [43].

Fórmulas según estándares ISO para roscas métricas trapezoidales [44]:

$$H1 = 0.5P \quad (25)$$

$$h3 = H4 = H1 + a_c \quad (26)$$

$$z = \frac{H1}{2} \quad (27)$$

$$d3 = d - 2h3 \quad (28)$$

$$d2 = D2 = d - 2z \quad (29)$$

$$D1 = d - P \quad (30)$$

$$D4 = d + 2a_c \quad (31)$$

$$f = 0.366P \quad (32)$$

Donde:

- H1= Altura del perfil básico.
- P = Paso.
- H4 = h3 = Altura del filete de la tuerca/tornillo.
- a_c = Holgura ente crestas.
- z = Altura media del perfil básico.
- d3 = Diámetro menor.
- d = Diámetro mayor.
- D2 = d2 = Diámetro de paso del filete externo/interno.
- D1 = Diámetro menor del roscado interno.
- D4 = Diámetro mayor del roscado externo.
- f = Ancho de la cresta del perfil.

Con los datos proporcionados del tornillo y considerando el valor de a_c de la Tabla 17 se obtiene:

$$H1 = 1mm \quad (25)$$

$$h3 = H4 = 1.25mm \quad (26)$$

$$z = 0.5mm \quad (27)$$

$$d3 = 5.5mm \quad (28)$$

$$d2 = D2 = 7mm \quad (29)$$

$$D1 = 6mm \quad (30)$$

$$D4 = 8.5mm \quad (31)$$

$$f = 0.732mm \quad (32)$$

Una vez determinado estos datos se puede realizar la simulación en SolidWorks para la resolución de las características mecánicas admisibles dentro de las necesidades del actuador lineal.

En relación al tornillo y la tuerca se realizó los cálculos:

$$A = p * e \quad (2)$$

$$A = 8 \text{ mm}$$

$$Va = \frac{A * n}{60} \quad (3)$$

$$Va = 400 \text{ mm/min}$$

$$Va = 6.67 \text{ mm/s}$$

$$t = \frac{L}{Va} \quad (4)$$

$$t = 1.5 \text{ min}$$

$$t = 90 \text{ s}$$

En este caso para la velocidad de avance (3) se tomó los RPM nominales del servomotor especificado en la Tabla 3, este valor puede cambiar debido a los valores en RPM que pueda configurar el usuario en el software para el control de posición.

Acorde a la velocidad crítica se calculó:

$$n_k = \frac{d^3}{L^2} * 1.1 \times 10^8 \quad (5)$$

$$n_k \approx 2537 \text{ RPM}$$

$$n_{kper} = n_k * f_n * 0.8 \quad (6)$$

$$n_{kper} \approx 5562 \text{ RPM}$$

Con respecto al desgaste mecánico de la tuerca se realizó:

$$Z = \frac{h \text{ tuerca (mm)}}{\frac{\text{paso efectivo (mm)}}{n^\circ \text{ de entradas}}} \quad (9)$$

$$Z = 4$$

$$At = \pi * dm * Z * H1 \quad (8)$$

$$At = 87.96 \text{ mm}^2$$

At representa la superficie efectiva que soporta la carga entre la tuerca y el husillo a través de los hilos de la rosca en contacto, este valor afecta directamente a la resistencia al desgaste, capacidad de carga y eficiencia en la transmisión de movimiento del sistema. Este valor indica un área de contacto relativamente amplia, es decir que, proporciona una buena distribución de carga y resistencia al desgaste debido a que la aplicación es de control de posición.

Para determinar la carga se debe considerar la masa de las piezas por lo que teóricamente los valores obtenidos en SolidWorks son:

- MovingPiece1 = 117.66g
- MovingPiece2 = 26.76g

- Rodamientos lineales = 16g x2
- NutofWG (Tuerca del tornillo/husillo) = 10.87g

La suma de estos componentes igual a 187.29g que es la carga a mover axialmente, sin embargo, en la parte práctica estos valores cambian puesto que las piezas se imprimiran en 3D con un relleno del 30%, por lo tanto, físicamente la carga total es igual a 112.5g (1.10N), considerando esto se prosigue con:

$$p = \frac{F}{At} \quad (7)$$

$$p = 0.0125 \frac{N}{mm^2}$$

$$p = 12.5kPa$$

El valor calculado es óptimo para los materiales de la tuerca como del tornillo/husillo, ya que se encuentra dentro de los límites operativos recomendados para estos. Esta presión no representa un riesgo para la durabilidad de los componentes, garantizando un funcionamiento eficiente y estable, asegurando la fiabilidad del sistema a largo plazo.

El deslizamiento en relación a la velocidad de traslación de la tuerca se obtiene mediante:

$$V_{st} = \frac{V_{tr}}{\text{sen}\alpha} \quad (11)$$

En este caso V_{tr} es la velocidad de avance, por lo que se toma el resultado de la ecuación (3):

$$V_{st} = 0.8 \frac{m}{min}$$

Este resultado es completamente adecuado además de estar dentro de los límites operativos normales para una rosca trapezoidal con ángulo de 30°, el valor obtenido indica que la fricción y el desgaste entre la tuerca y el husillo tendrán un funcionamiento estable, no genera calor excesivo ni desgaste prematuro a lo largo del tiempo.

Para la culminación en cuanto a los cálculos que relacionan un actuador lineal completo se realiza la evaluación de las inercias; primero del husillo:

$$kg = d * \pi * r^2 * L \quad (13)$$

$$kg = 0.241$$

$$Jh = 0.5 * kg * r^2 \quad (14)$$

$$Jh = 1.928 \times 10^{-6} \text{ kg} * m^2$$

Segundo, se obtiene la inercia de la carga (112.5g):

$$JL = 9 \times 10^{-7} \text{ kg} * m^2 \quad (15)$$

La inercia total:

$$JT = 2.828 \times 10^{-6} \text{ kg} * m^2 \quad (18)$$

Este valor permite evaluar la respuesta dinámica del actuador lineal garantizando que el servomotor pueda mover el sistema con precisión sin que se presenten problemas de rendimiento o control, ya que, afecta directamente a la aceleración y desaceleración junto con el cambio de dirección.

El resultado obtenido es adecuado y preciso, garantizando que el servomotor tiene la capacidad para mover el sistema sin comprometer el rendimiento en condiciones de operación.

Se continúa con los cálculos restantes:

$$\omega = \frac{vel\left(\frac{mm}{s}\right)}{p} * 2\pi \quad (16)$$

$$\omega = 39.26 \frac{rad}{s}$$

En este caso se le dio un valor práctico de 50 mm/s para la velocidad puesto que, de la misma manera que en la ecuación (3) los valores pueden variar por la configuración en la programación.

Finalizando con:

$$Macel = \omega * Jt \quad (17)$$

$$Macel = 1.11 \times 10^{-4} Nm$$

$$Froz = PesoTotal * 9.81 * CoefRoz \quad (19)$$

$$Froz = 0.3973 N$$

$$Mroz = \frac{p * Froz}{2000\pi} \quad (20)$$

$$Mroz = 5.058 \times 10^{-7} Nm$$

El coeficiente de rozamiento esta proporcionado por las superficies en contacto del acero del tornillo y bronce de la tuerca, en este caso es 0.36 [45], [46].

3.1.3. Selección del acoplamiento

Para la selección del acoplamiento se considera que, en el control de posición se requiere una precisión con un bajo margen de error. Las características que se adaptan a esta necesidad son los acoples rígidos ya que tienen una alta precisión y pueden trabajar a par de potencias altas además de no absorber desalineaciones ni vibraciones.

Refiriéndose al acople rígido se optó por dos alternativas, el acople de manguito y el acople de brida ya que son comunes en este tipo de aplicaciones. El acople de manguito consta de un solo diámetro interno, es decir, para adquirir este dispositivo es preciso que el tornillo sin fin tenga su diámetro de 14mm debido a que el eje del servo motor tiene esta medida, así, el acople al ser ajustado trabajará en las mejores condiciones, sin embargo, es complejo encontrar en el mercado tornillos sin fin de esta dimensión por lo que se tendría que mecanizar. La opción del acople de brida o de plato consta de dos partes y al tener este diseño se puede mecanizar los diámetros tanto de la primera sección como de la segunda sección; para determinar el momento requerido al seleccionar el acople se utiliza la ecuación (1) cuyo valor obtenido es 0.065 kgm.

Es importante resaltar que los datos reemplazados en la ecuación (1) tanto de potencia como velocidad son los valores nominales en los que trabaja el servomotor; como se trata de un control de posición, la velocidad irá cambiando en la parte de programación.

La adquisición del acople representó un desafío debido a las normas estandarizadas según los fabricantes y la cantidad limitada de distribuidoras especializadas en el país. Se realizó una búsqueda exhaustiva del acoplamiento, encontrándolo en plataformas de comercio electrónico como tiendas en línea de diferentes países, por lo que, se optó por replicar su medida y realizarlo mediante un proceso de torneado.

Se puede apreciar las medidas del acople en la Figura 35.

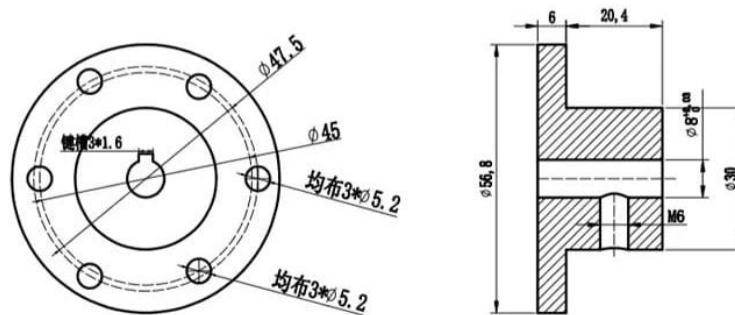


Figura 35. Medidas del acople de brida seleccionado [47].

El diseño del proyecto usa rodamientos para un mejor funcionamiento y reducir la fricción, por esta razón se redimensionó el acople con un factor de 0.968 debido a que el diámetro interno del rodamiento a usar en el acople es de 55mm, también se redimensionó los agujeros internos donde se insertarán los ejes, tanto del servomotor (14mm) y del tornillo (8mm) como se muestra en la Figura 36.

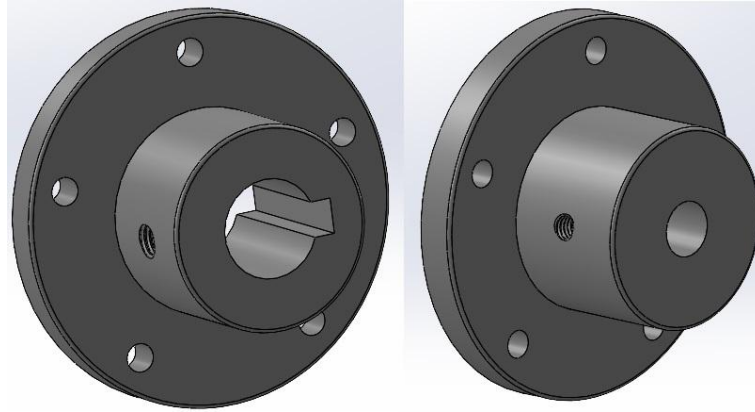


Figura 36. Acople redimensionado en SolidWorks.

3.1.4. Cálculo de corte y doblez

De acuerdo con lo mencionado en el capítulo 2 el material seleccionado fue el aluminio, por lo que, se adquirió una plancha de dimensiones 1.22 x 2.44 m de 2mm en la empresa AceroCenter; de acuerdo al diseño del actuador las medidas se especificaron mediante la simulación de chapas metálicas en SolidWorks y el área de las bases que soportan los ejes junto con el tornillo. La Figura 37 demuestra las medidas de la plancha a cortar para los laterales.

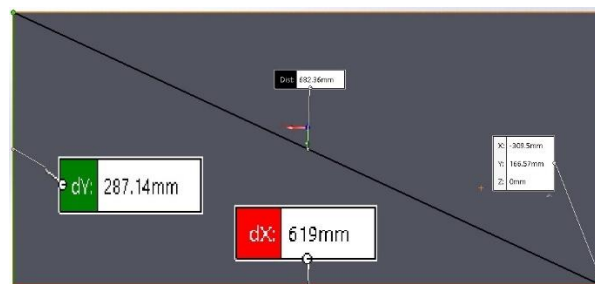


Figura 37. Medidas de la lámina a recortar para los laterales.

Aplicando las ecuaciones para el corte de la chapa se obtiene:

$$c = A_c t \quad (21)$$

$$c = 0.12 \text{ mm}$$

$$F = 0.7(TS)tL \quad (22)$$

$$F = 177603.44 \text{ N}$$

Para la base y la estabilidad de los laterales se realizó un corte para que se ajuste con las medidas establecidas por los soportes, apreciándose en la Figura 38.

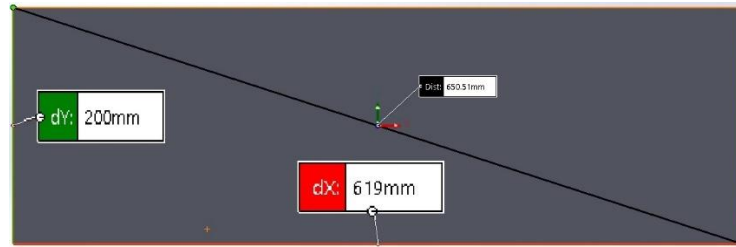


Figura 38. Medidas de la lámina a recortar para la base.

El cálculo para el corte de la base cambia únicamente en la fuerza por un valor mínimo que es:

$$F = 0.7(TS)tL \quad (22)$$

$$F = 160524 \text{ N}$$

Una vez determinada las medidas junto con el corte, se procede a realizar los dobleces para la finalización de la cubierta como se muestra en la Figura 39.

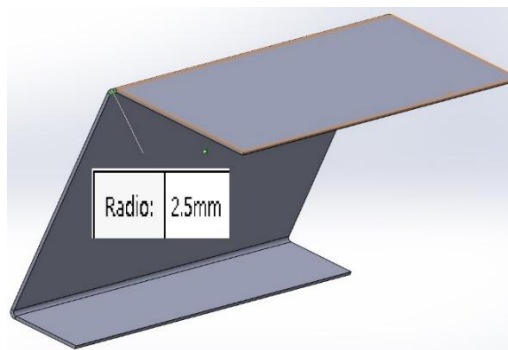


Figura 39. Lámina doblada para los laterales del actuador lineal.

Se efectúa los cálculos:

$$A_b = 2\pi \frac{\alpha}{360} (R + K_{ba}t) \quad (23)$$

$$A_b = 4.96 \text{ mm}$$

$$F = \frac{K_{bf} T S w t^2}{D} \quad (24)$$

$$F = 2881.445 \text{ N}$$

3.1.5. Conexiones eléctricas del equipo

Para el desarrollo del esquema eléctrico es necesario contar con el diseño completo del actuador lineal, el cual se muestra de forma explosionada en la Figura 40.

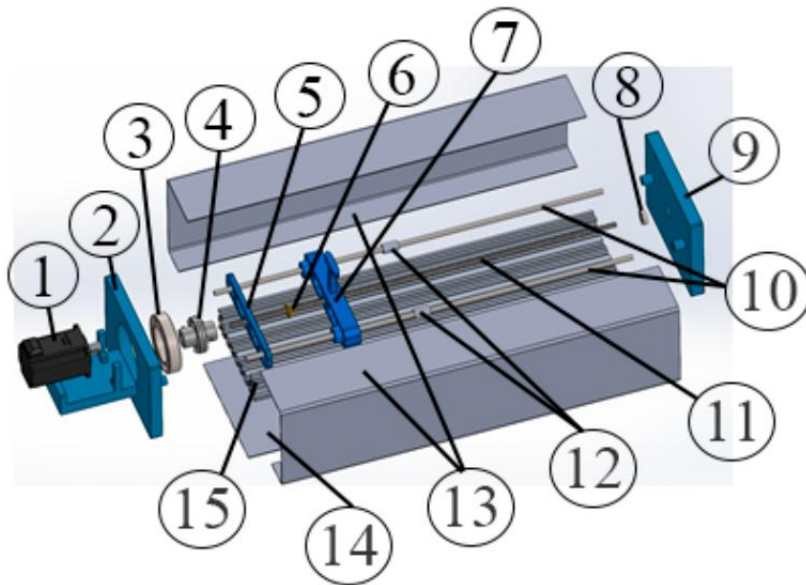


Figura 40. Vista explosionada del actuador lineal.

En la Tabla 18 se especifican los elementos del actuador lineal numerados en la Figura 40.

Tabla 18. Descripción de los elementos numerados de la Figura 40.

N°	Nombre del elemento	Descripción
1	Servomotor	Principal componente para accionar el sistema.
2	Soporte principal	Pieza donde encajan las piezas principales de transmisión de movimiento.

3	Rodamiento 90x55	Elemento reductor de fricción en el soporte principal.
4	Acople de brida	Componente que conecta el servomotor con el tornillo/husillo para la transmisión de movimiento.
5	MovingPiece2	Pieza que encaja la parte frontal de la tuerca.
6	Tuerca del tornillo	Elemento que recorre al tornillo/husillo.
7	MovingPiece1	Pieza que encaja en la parte posterior de la tuerca.
8	Rodamiento 22x8	Elemento reductor de fricción en el soporte secundario.
9	Soporte secundario	Pieza donde encajan los elementos que estabilizan del sistema.
10	Ejes acerados	Elementos que ayudan al soporte y estabilidad del sistema.
11	Tornillo/husillo	Principal elemento el cual realiza el movimiento rotacional.
12	Rodamientos lineales	Componentes que reducen la fricción del movimiento lineal.
13	Cubierta	Carcasa del actuador lineal.
14	Base	Soporte para que la cubierta cubra todo el sistema.
15	Perfil de aluminio 20x40	Elementos de soporte para mantener estabilidad con respecto al peso.

Entre las características del actuador lineal se encuentran los siguientes detalles:

- **Peso**

El peso total del actuador lineal es de 7.01475 Kg, este valor incluye el servomotor, la estructura principal, el tornillo sin fin, los soportes y demás componentes integrados en el diseño.

- **Medidas**

Las dimensiones generales son 737.8mm de longitud, 166.5mm de altura máxima y 204mm de ancho total.

- **Distancia de recorrido**

Tras el ensamblaje completo del dispositivo, el desplazamiento máximo permitido por el tornillo de avance y la tuerca alcanza los 547.88mm, sin embargo, al integrar las piezas que se acoplan a la tuerca que a su vez conforman el señalador visual del movimiento, el recorrido útil se redujo a 511.73mm. Considerando un margen de seguridad para compensar posibles variaciones o errores en el desplazamiento se colocó visualmente un vinilo que marca el movimiento lineal hasta 510mm.

- **Pasos**

El avance lineal por vuelta completa del tornillo es de 8mm que equivale a una rotación de 360°; en el sistema de control, la programación utiliza una resolución de 16 bits, donde 0° corresponde a al valor 0 y una vuelta completa equivale a 65535. Con un recorrido total de 510mm, el dispositivo realiza un máximo de 63 vueltas completas, representando un valor programable de hasta 4128705 unidades en el sistema.

El sistema está compuesto por dos máquinas principales: el módulo de control y el actuador lineal; el módulo de control incluye el transformador y el servo drive, los cuales se encargan de suministrar la energía y controlar el funcionamiento del servomotor. El servo drive, a su vez, está conectado a un PC mediante un cable de comunicación, permitiendo la programación y ajuste de parámetros.

El esquema que detalla la conexión eléctrica se lo observa en la Figura 41.

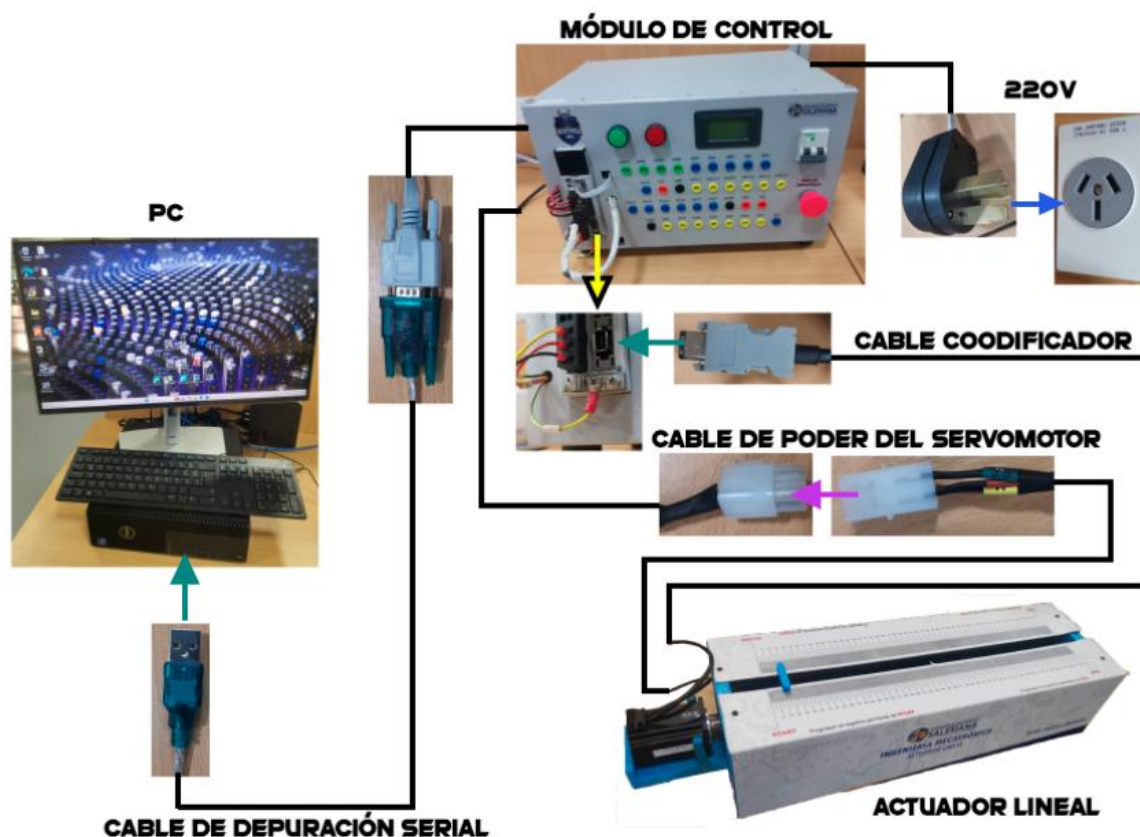


Figura 41. Diagrama representativo de las conexiones eléctricas.

Describiendo la Figura 41, el módulo de control se lo alimenta con una conexión a 220V, el cable de depuración serial está conectado al PC mediante un convertidor de señal de USB a DB9, por último, el actuador lineal que contiene al servomotor se conecta al módulo de control por su cable de poder y al servo drive con el cable de encoder.

3.1.6. Control de posición

Una vez realizada la conexión completa de los elementos, el control de posición se lleva a cabo utilizando el software Kinco Servo +, esta herramienta permite la transmisión de señales al servomotor que, a través del diseño del actuador se puede transformar el movimiento rotacional en lineal. Como se mencionó previamente en la descripción de los pasos, el sistema opera con una programación de 16 bits, además de gestionar la posición de dos maneras distintas:

- **Posiciones designadas**

El usuario puede definir puntos específicos a los que debe moverse el actuador, cada posición se configura asignándole un valor correspondiente al ángulo del servomotor mediante la entrada digital de posición (DIN POS INDEX). Este método tiene limitaciones en la entrada de valores debido a que únicamente muestra 8 espacios para el control de posición.

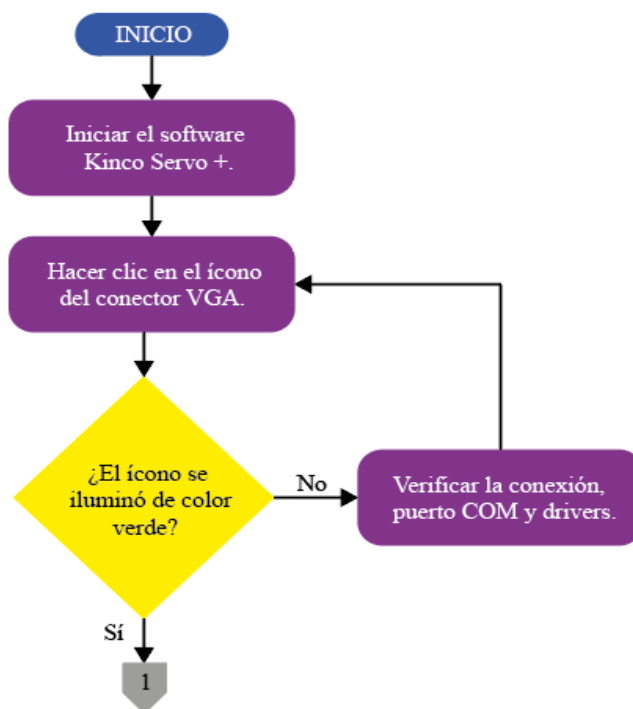
- **Tabla de secuencias**

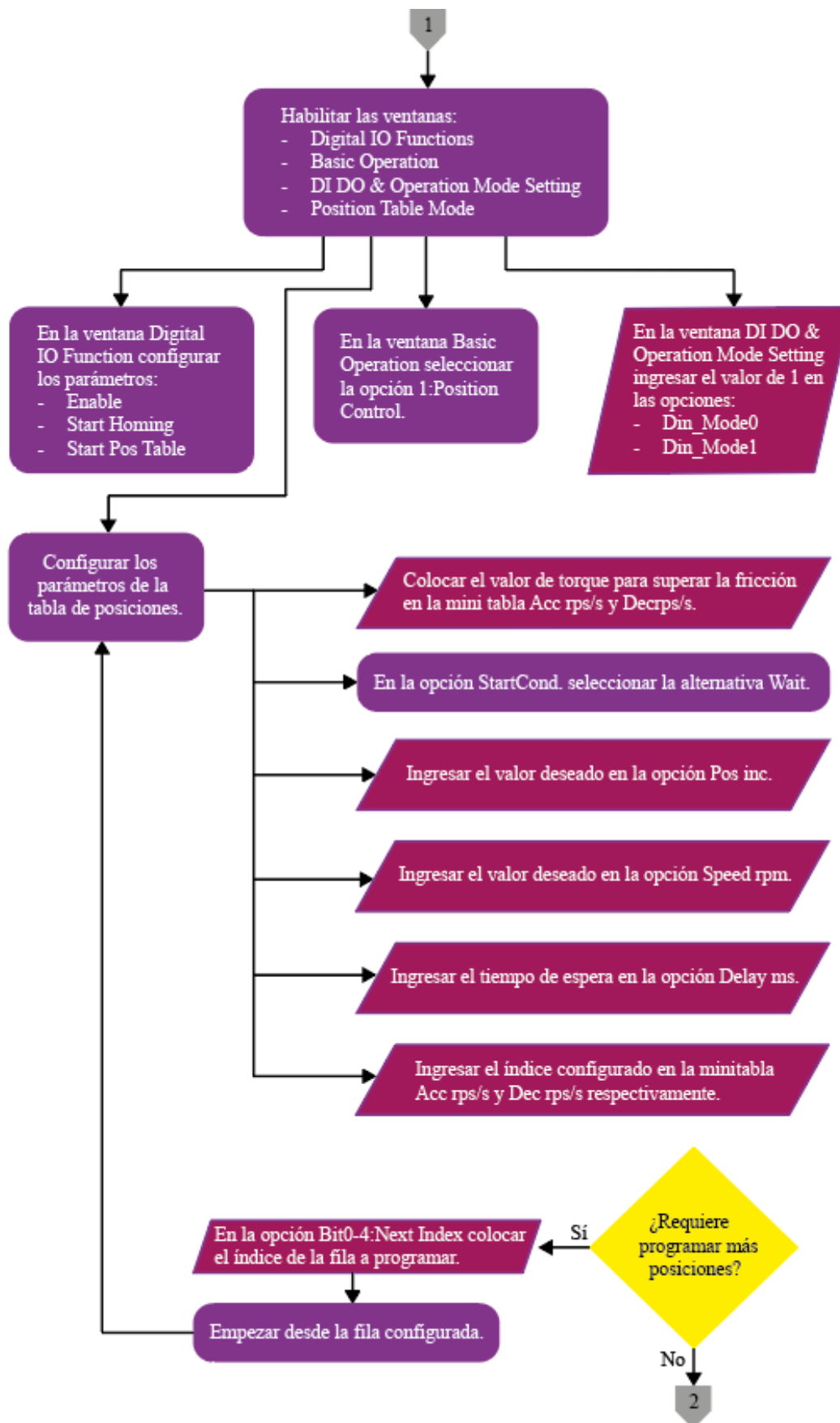
Este método permite programar una serie de movimientos consecutivos o cíclicos, aprovechando 32 espacios disponibles para el control, además, ofrece una mayor flexibilidad y personalización en los parámetros como el tipo de encoder a usar, el torque, los tiempos de espera, entre otros ajustes.

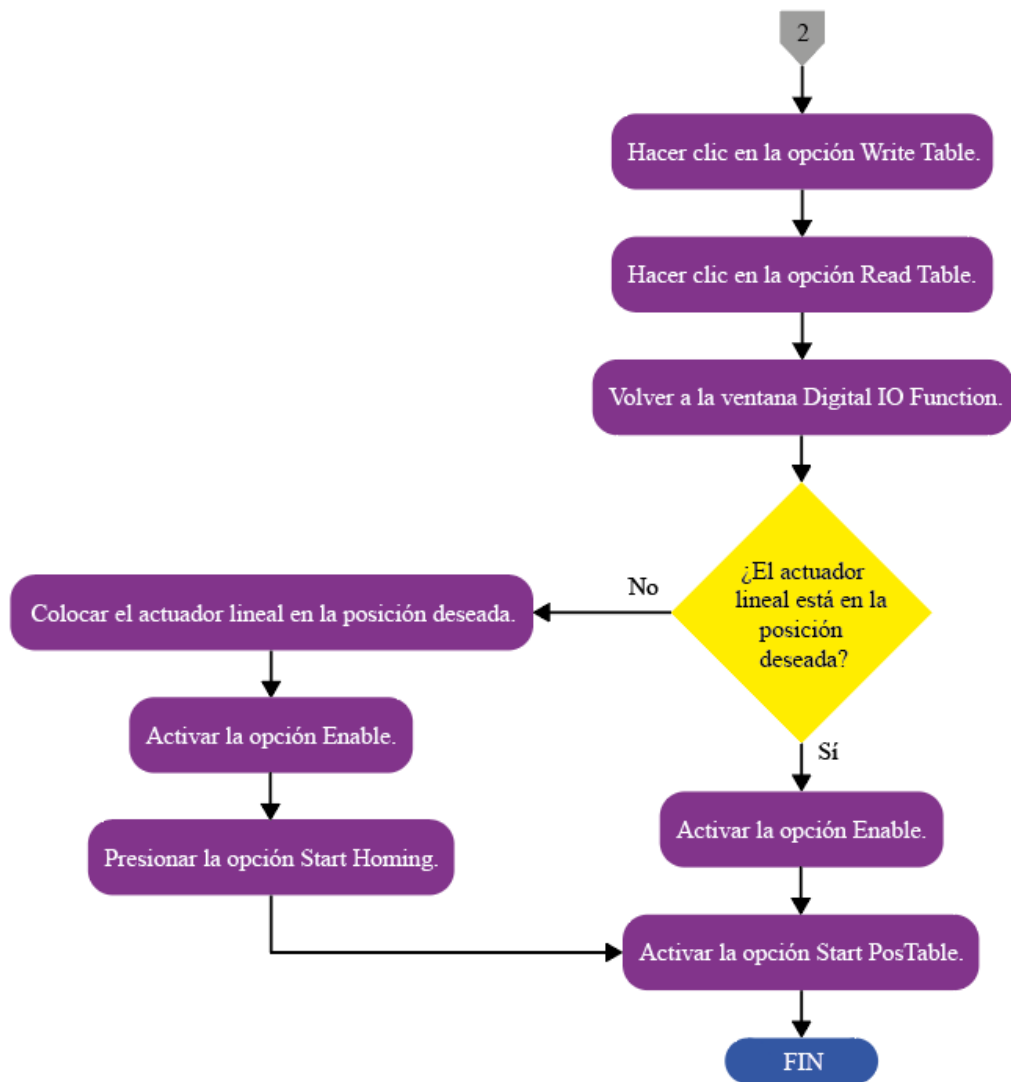
En el CAPÍTULO IV se detalla la programación de esta secuencia para la implementación del control de posición.

3.1.7. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo presenta la programación del actuador lineal utilizando el software Kinco Servo+, ilustrando la secuencia de pasos necesarios para configurar y ejecutar el control de posición mediante una tabla de movimientos.







CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis y los resultados de la evaluación del actuador lineal explicado en este proyecto, se desarrollará pruebas experimentales para verificar el desempeño del actuador en donde incluya su precisión, capacidad de carga, y estabilidad operativa además de ponderar el costo real de fabricación y ensamblaje.

4.1 Análisis estructural mediante el software SolidWorks

El software SolidWorks dispone la posibilidad de realizar simulaciones en donde se puede incluir las cargas que se requiere de manera práctica; el primer análisis se lo realizó al tornillo, principal componente del actuador lineal que se aprecia en la Figura 42.

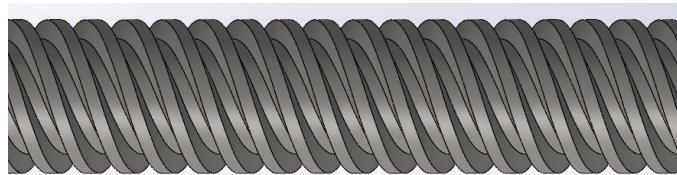


Figura 42. Sección del tornillo simulado.

4.1.1. Análisis operativo del tornillo sin carga

Tras la selección y diseño del tornillo sin fin, se realizó un análisis simplificado para verificar los esfuerzos y deformaciones asegurando que el tornillo funcione de manera estable; más adelante se realizará la respectiva evaluación acorde a la carga montada.

- **Análisis de tensiones de Von Mises**

En la Figura 43 se puede observar el resultado acorde una restricción de sujeción que permite únicamente el movimiento circunferencial y el par nominal que le aplica el servomotor especificado en la Tabla 3.

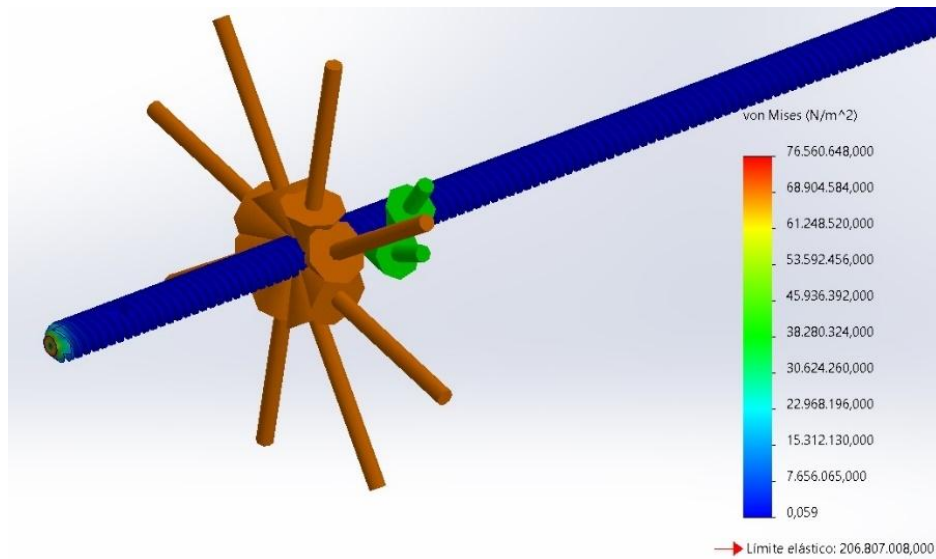


Figura 43. Análisis de tensiones para el tornillo.

De acuerdo a los valores de estrés máximo, mínimo y el límite elástico, se determina que el tornillo operará de manera estable ya que, a comparación con los valores del material del tornillo, trabaja dentro de los límites seguros del elemento.

- **Análisis de desplazamiento**

En la Figura 44 se aprecia el análisis de desplazamiento del tornillo indicando que no hay variación significativa en la magnitud del desplazamiento.

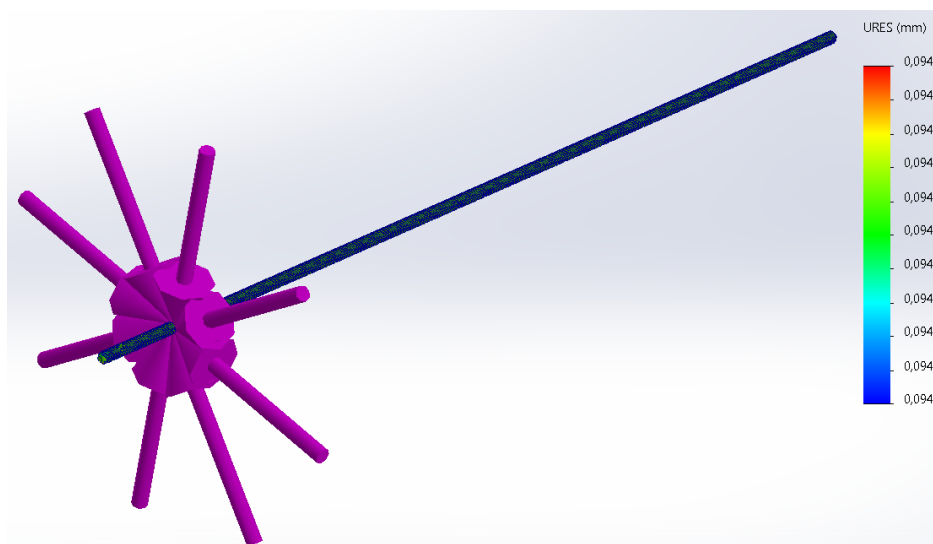


Figura 44. Análisis del desplazamiento para el tornillo.

- **Análisis de deformación**

Como se puede observar en la Figura 45 no se dispone de deformación alguna.

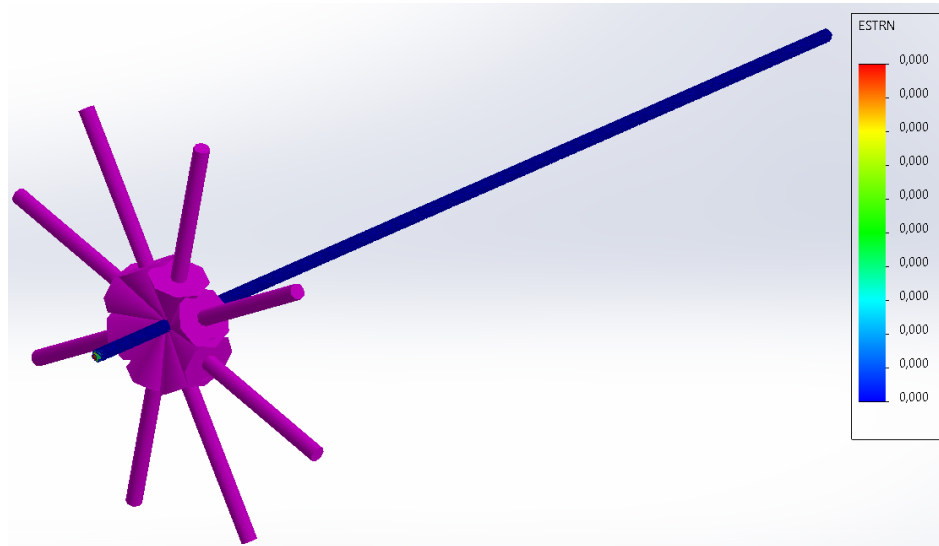


Figura 45. Deformación unitaria del tornillo.

- **Análisis factor de seguridad**

El factor seguridad del tornillo/husillo calculado es confiable con un margen adicional significativo como detalla la Figura 46.

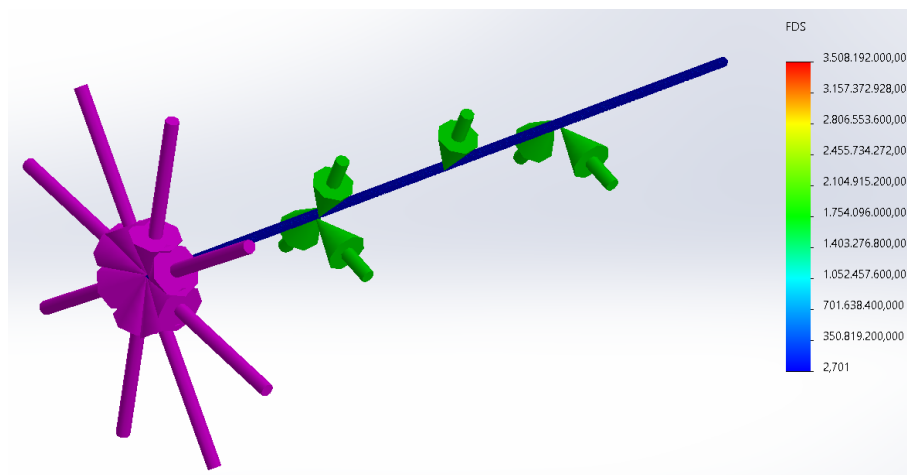


Figura 46. Factor seguridad del tornillo/husillo.

4.1.2. Análisis estructural de los soportes

Para el actuador lineal se propuso soportes los cuales fueron diseñados como se muestra en la Figura 47.

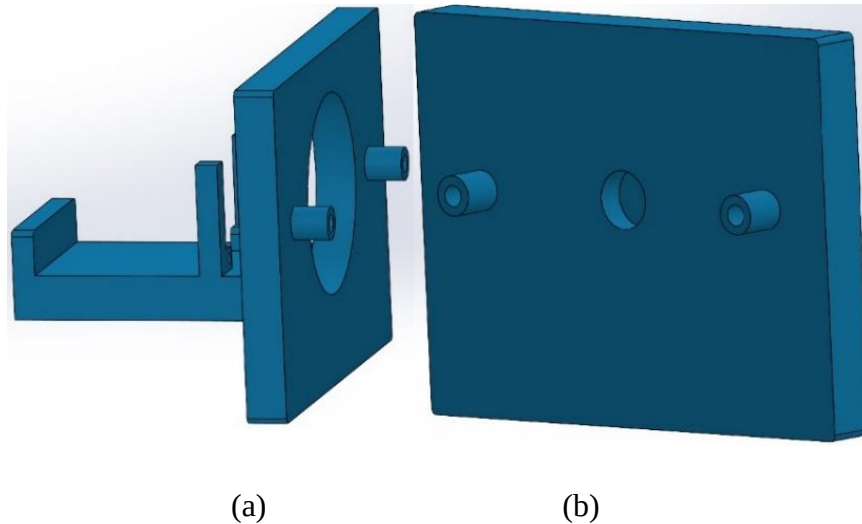


Figura 47. Soportes del actuador lineal. (a) FrontWall. (b) BackWall.

Debido a que el diseño de los soportes es original y personalizado, se decidió optar por la impresión 3D para la fabricación de estas piezas.

El primer soporte (a) mostrado en la Figura 47 tiene dos funciones, la primera es fijar al servomotor y la segunda es para alinear el tornillo sin fin como sus ejes; se agregó también un rodamiento para reducir la fricción entre soporte y acople que garantizará la precisión en el movimiento además de tolerar de igual manera las cargas axiales y radiales.

Se seleccionó el acero 1018 para la realización del acople ya que este material es usado comúnmente para transmisión teniendo propiedades adecuadas en aplicaciones de acoplamientos y fácil maquinado además de su sencilla accesibilidad.

Se demuestran los elementos mencionados en la Figura 48.

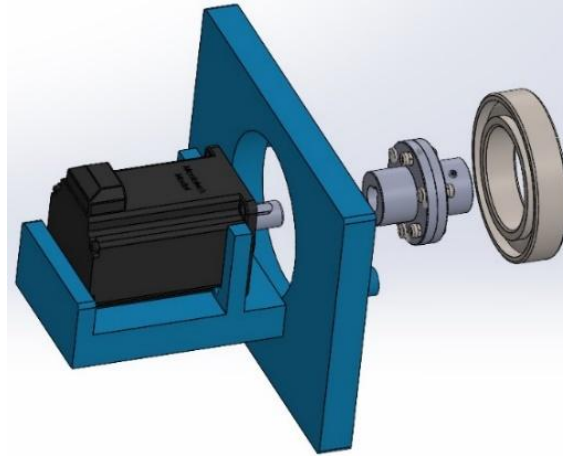


Figura 48. Vista explosionada de los elementos en el primer soporte.

En el primer soporte que tiene como función sostener las piezas mencionadas, se realiza en análisis estructural para mantener el peso de estos componentes; los pesos se detallan en:

- Servomotor 1.2kg = 11.768 N
- Rodamiento 0.5kg = 4.91 N.
- Acople = 0.373kg = 3.66 N.

Conociendo los datos se procede a realizar la evaluación de carga; el mallado es el análisis previo apreciándose en la Figura 49.

El material utilizado para imprimir la pieza en 3D es PLA de la marca SUNLU, específicamente es PLA+, los valores a configurar para agregar el material y realizar la simulación en SOLIDWORKS son [48]:

- Módulo de elasticidad = 3300 N/mm²
- Coeficiente de Poisson = 0.36
- Módulo cortante = 1200 N/mm²
- Densidad de la masa = 1240 kg/m³
- Límite de resistencia a la tracción = 57.8 N/mm²
- Límite de resistencia a la compresión = 57.8 N/mm²

- Límite de elasticidad = 50 N/mm²
- Coeficiente de expansión térmica = 7e-05 K
- Capacidad de conducción térmica = 0.15 W/(m*K)
- Capacidad calorífica específica = 1300 J/(kg*K)

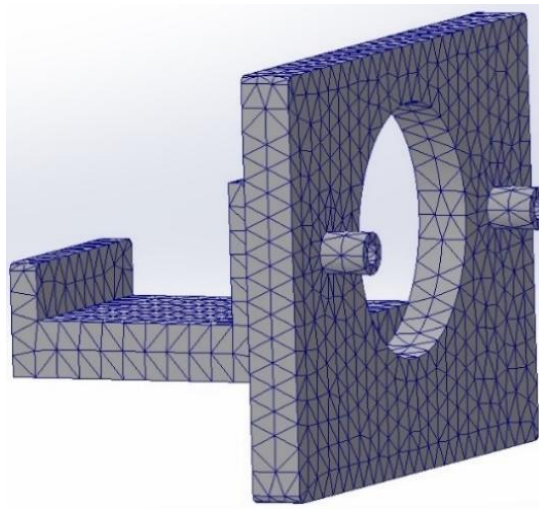


Figura 49. Mallado del primer soporte.

- **Análisis de tensiones de Von Mises**

Como se muestra en la Figura 50 de acuerdo al ensamble se colocó las debidas cargas para la obtención de los resultados, permitiendo evaluar el comportamiento del material. El valor más alto es de 2840,289 N/m² que está dentro del límite elástico.

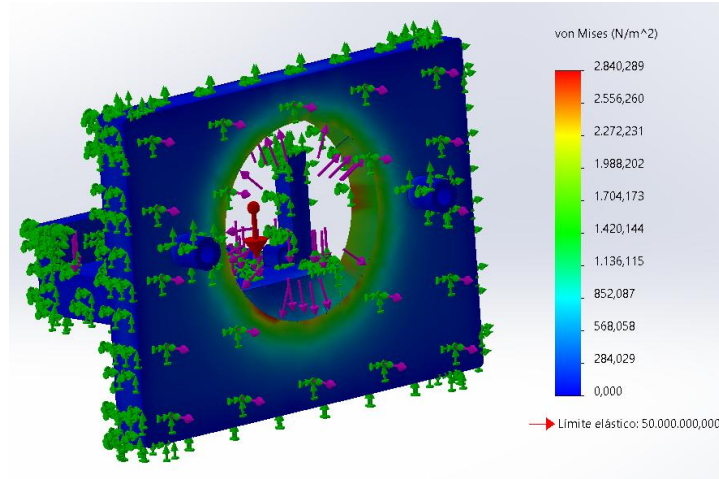


Figura 50. Tensión en el soporte principal.

- **Análisis de desplazamiento**

El análisis de desplazamientos es nulo como se muestra en la Figura 51.

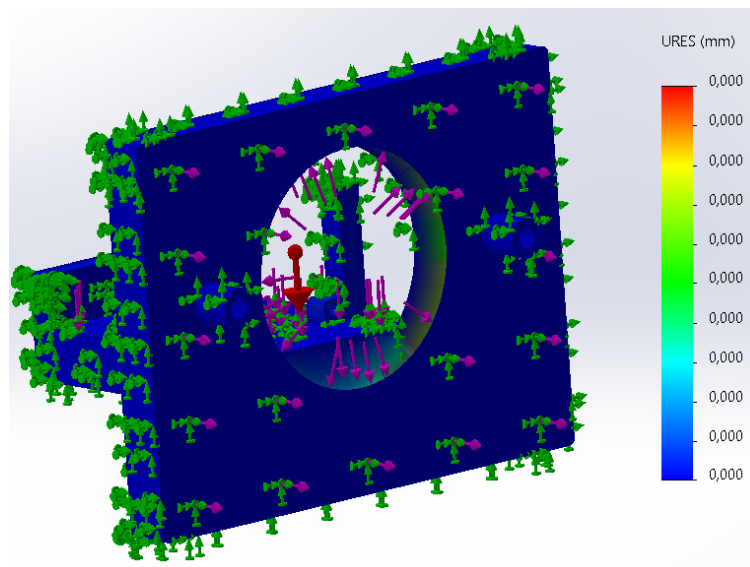


Figura 51. Desplazamiento en soporte principal.

- **Análisis de deformaciones**

En este análisis no se observan deformaciones en la pieza como se muestra en la Figura 52.

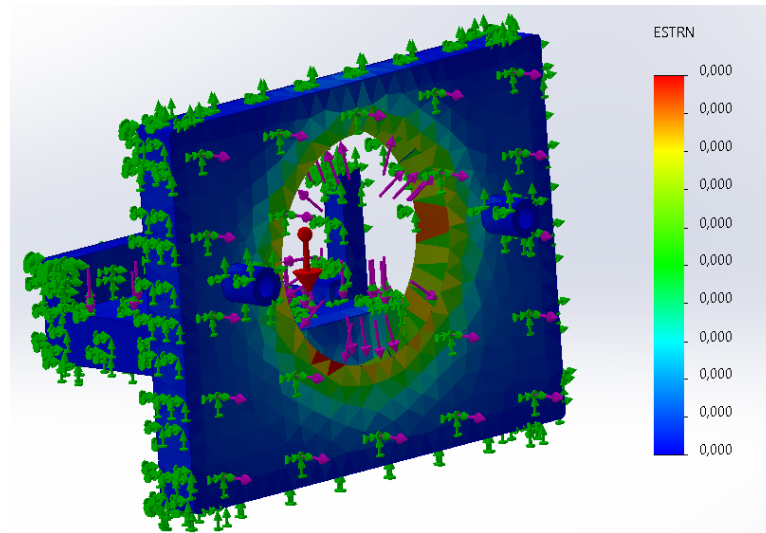


Figura 52. Deformación en soporte principal.

- **Análisis factor seguridad**

Como se puede observar en la Figura 53 el factor seguridad es muy alto, lo que indica que, tiene un margen muy grande antes de fallar.

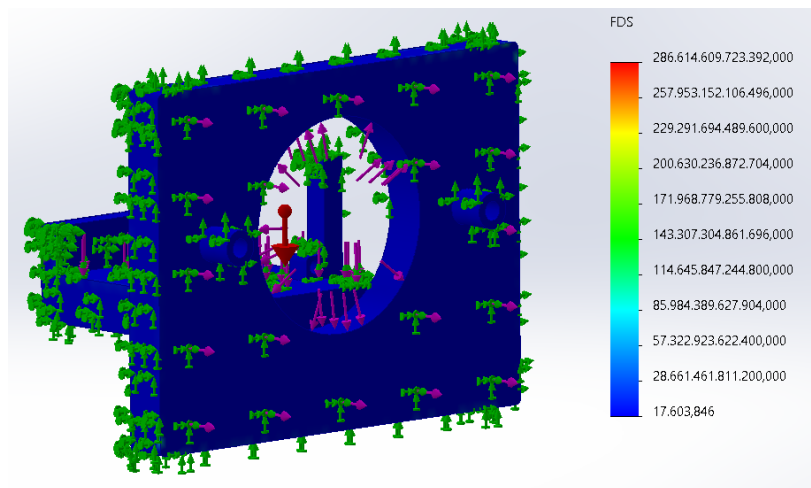


Figura 53. Factor seguridad del soporte principal.

En cuanto al segundo soporte se realizó los mismos análisis, este soporte únicamente sostiene un rodamiento de 1.89 g, para que el husillo tenga un mejor apoyo y un óptimo movimiento rotacional; mostrado en la Figura 54.

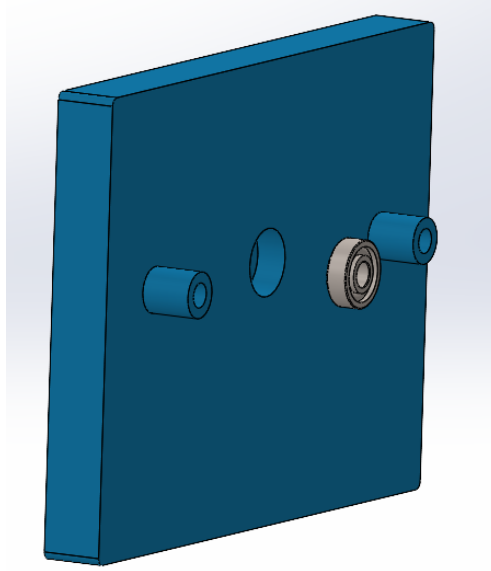


Figura 54. Vista explosionada del segundo soporte.

La Figura 55 muestra el mallado previo al análisis del soporte secundario.

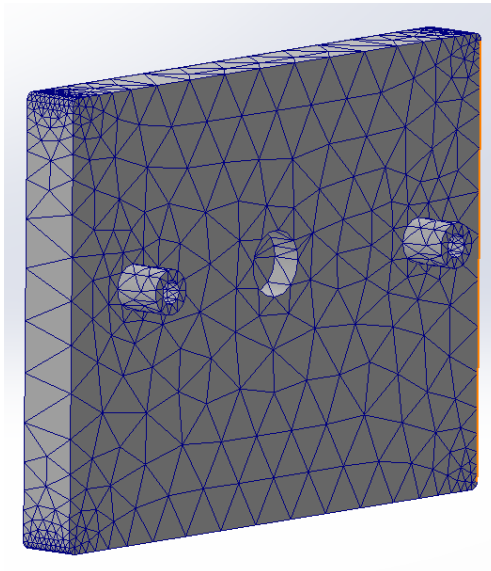


Figura 55. Mallado del segundo soporte.

- **Análisis de tensiones de Von Mises**

Como se muestra en la Figura 56 colocando las cargas para esta pieza se obtuvo un valor por debajo del límite elástico.

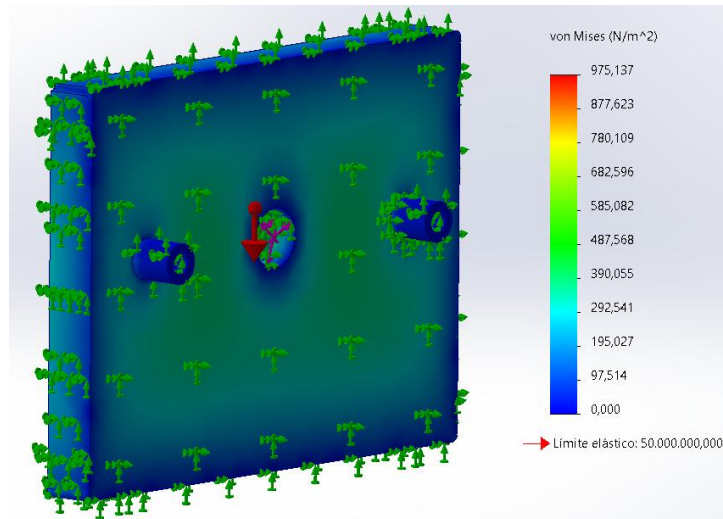


Figura 56. Tensión en el soporte secundario.

- **Análisis de desplazamiento**

El análisis de desplazamientos es nulo como se muestra en la Figura 57.

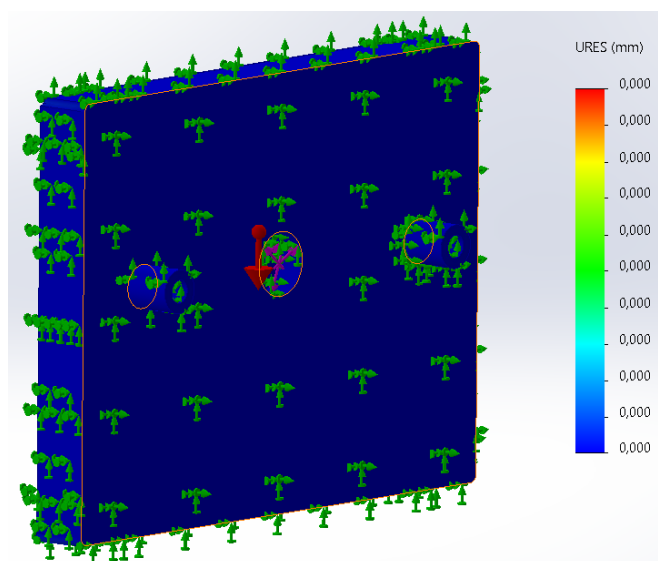


Figura 57. Desplazamiento en soporte secundario.

- **Análisis de deformaciones**

En este análisis no se observan deformaciones en la pieza como se muestra en la Figura 58.

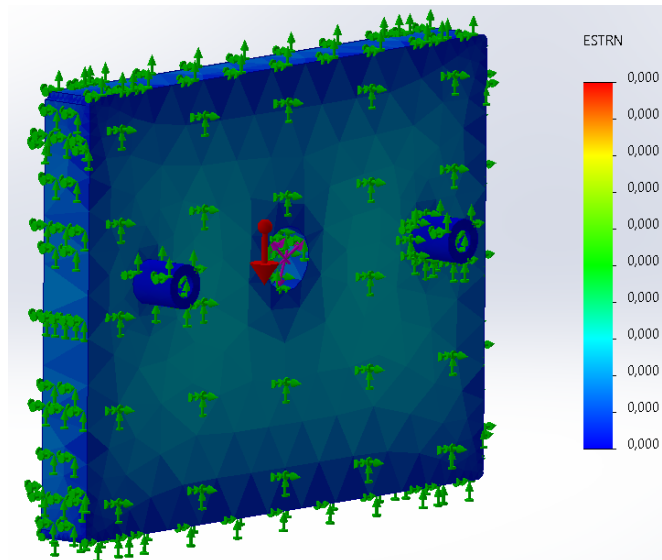


Figura 58. Deformación en el soporte secundario.

- **Análisis factor seguridad**

Como se puede observar en la Figura 59 el factor seguridad es muy alto, lo que indica que, tiene un margen muy grande antes de fallar.

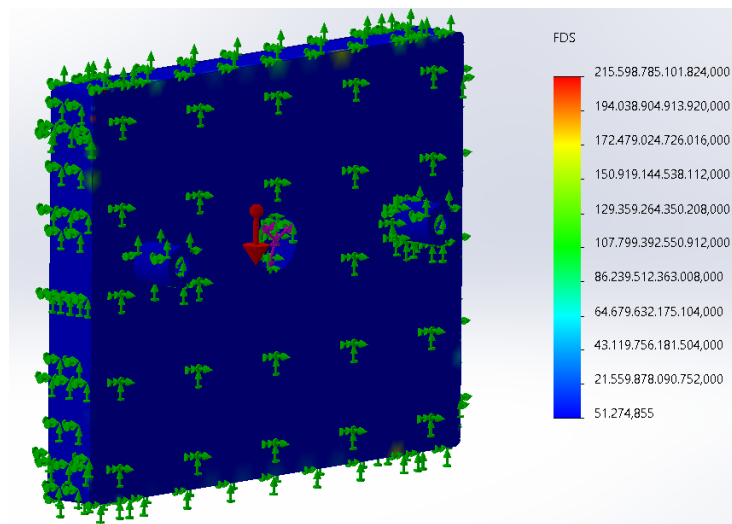


Figura 59. Factor seguridad del soporte secundario.

4.2 Implementación del Actuador Lineal

Los análisis realizados previamente aseguraron que el diseño esté estructuralmente adecuado y funcional, en cuanto a la implementación, se procedió a la compra, fabricación y montaje de todos los componentes restantes.

Especificado en el ítem anterior, se diseñó dos piezas que sirven de soporte para el tornillo/husillo, estos soportes tienen una separación de 581mm, espacio en el cual se colocó perfiles de aluminio usados generalmente en actuadores lineales con correderas, en este caso se lo requirió para juntar los soportes además de aportar como base estructural del mismo mostrándose en la Figura 60.

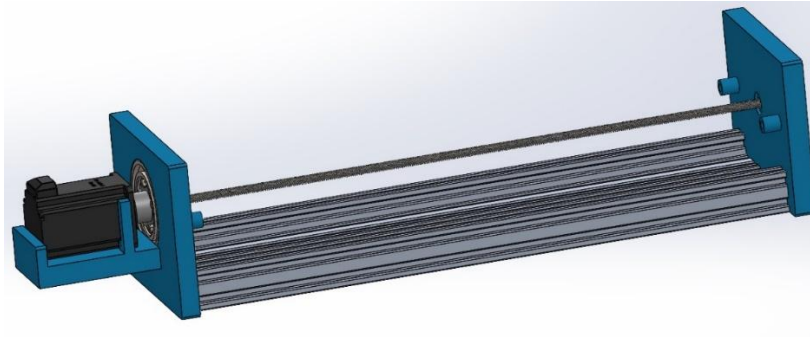


Figura 60. Vista isométrica del actuador junto con los perfiles de aluminio 20x40.

En cuanto a la carga, se añadió dos ejes acerados para proporcionar estabilidad junto con rodamientos lineales LM8UU como se puede observar en la Figura 61.

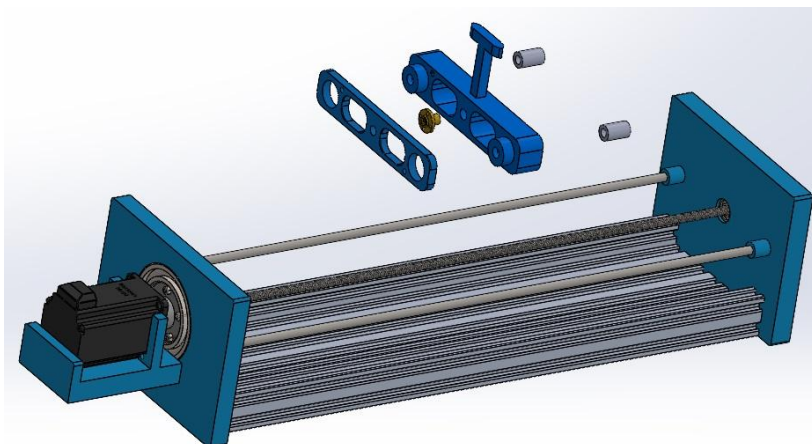


Figura 61. Vista isométrica del actuador junto con los ejes y las piezas de carga.

Se colocó una lámina de aluminio detallado anteriormente con el fin de usarse como carcasa, mostrado en la Figura 62.

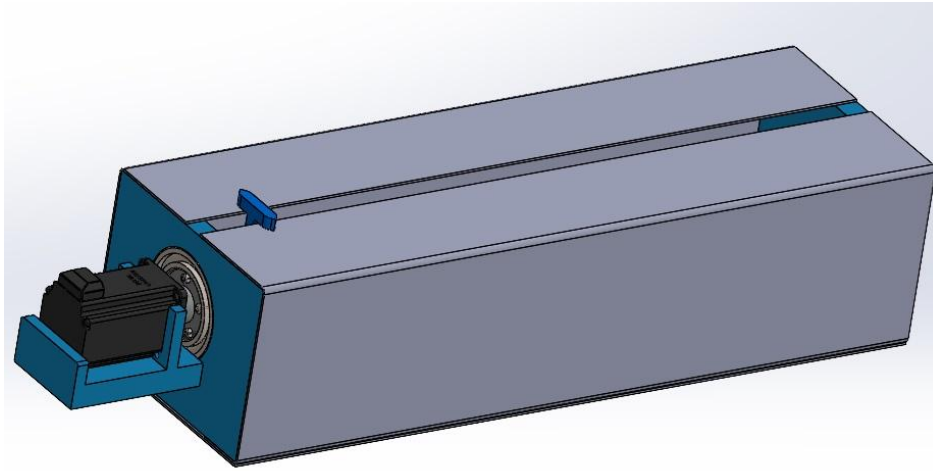


Figura 62. Vista isométrica del actuador finalizado.

Por último, se realizó un diseño para la carcasa en donde se muestra una regla que indicará la distancia recorrida en milímetros observándose en la Figura 63.



(a)

(b)

Figura 63. Actuador lineal. a) Sin carcasa. b) Con carcasa.

4.3 Pruebas de funcionamiento

Para comprobar el funcionamiento del actuador lineal, se realizaron varias pruebas de rendimiento con la práctica de control de posición por tabla que se desarrolló en el laboratorio de Mecatrónica y el módulo de entrenamiento existente.

- **Inicialización del módulo con el software Kinco Servo +**

El primer paso consiste en iniciar el software Kinco Servo +, seguidamente se conecta el servomotor implementado en el actuador lineal al módulo de entrenamiento. Posteriormente, se procede a conectar el módulo a un tomacorriente de 220V y encenderlo, mostrado en la Figura 64.



Figura 64. Conexión módulo – actuador lineal.

El segundo paso consiste en configurar el software para que el servomotor esté en línea y listo para su ejecución. En el panel de menú se encuentran varias opciones e íconos, se debe hacer clic en el ícono que muestra un conector VGA para verificar que el puerto COM seleccionado sea el correcto. Si la conexión es exitosa, el indicador se iluminará en color verde, confirmando que el servomotor está en línea y listo para su uso como se indica en la Figura 65.

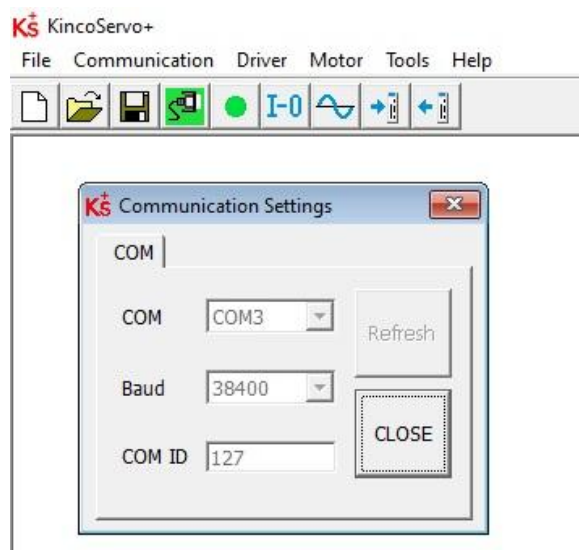


Figura 65. Comunicación software – servomecanismo.

En el tercer paso, se deben habilitar varias ventanas en la interfaz del software que permitirán programar el servomotor. Para ello, en el panel de íconos, se hace clic en el que muestra una I-O, lo que abrirá una ventana llamada Digital IO Functions. En esta ventana se eliminan las configuraciones existentes y se establecen las opciones necesarias que son las siguientes:

- Enable

Activa el servomotor permitiendo su funcionamiento.

- Start Homing

Restablece la posición inicial del servomotor, es decir, la posición actual del servo será registrada como su punto de partida.

- Start Pos Table

Inicia el movimiento del servomotor basado en la tabla de posiciones configurada previamente.

Esta ventana es mostrada en la Figura 66.

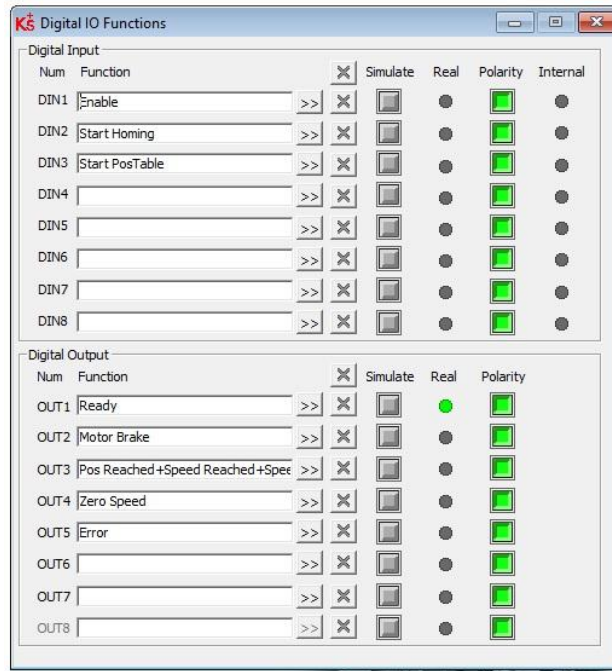


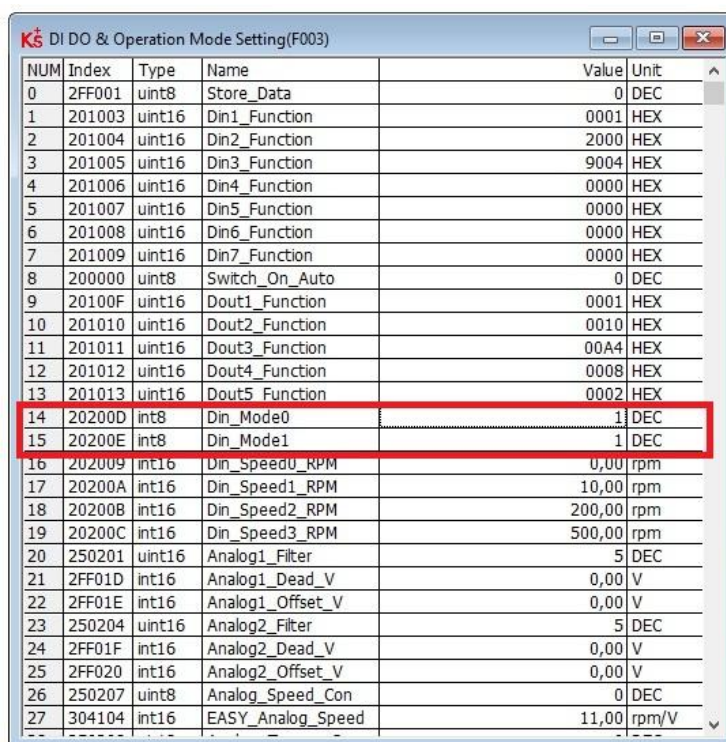
Figura 66. Digital IO Functions configuración.

En el cuarto paso, en el menú se selecciona la opción de Driver, seguida de Basic Operation. Se abrirá una ventana donde es necesario cambiar el modo de operación. En la columna identificada con el número 6, correspondiente a Operation_Mode, se desplegarán varias opciones como el control de velocidad, control de torque, entre otras. Se debe seleccionar la opción que indica el número 1, que corresponde a Position Control, como muestra la Figura 67.

NUM	Index	Type	Name	Value	Unit
0	606100	int8	Operation_Mode_Buff	0	DEC
1	604100	uint16	Statusword	4031	HEX
2	606300	int32	Pos_Actual	15	inc
3	606C00	int32	Speed_Real	-0,01	rpm
4	607800	int16	I_q	0,00	Ap
5	268000	uint16	Warning_Word	0000	HEX
6	606000	int8	Operation_Mode	1	DEC
7	604000	uint16	Controlword	0006	HEX
8	607A00	int32	Target_Position	0	inc
9	608100	uint32	Profile_Speed	0,00	rpm
10	608300	uint32	Profile_Acc	100,00	rps/s
11	608400	uint32	Profile_Dec	100,00	rps/s
12	60FF00	int32	Target_Speed	0,00	rpm
13	607100	int16	Target_Torque%	0,00	%
14	607300	uint16	CMD_q_Max	5,90	Ap
15	20200D	int8	Din_Mode0	1	DEC
16	20200E	int8	Din_Mode1	1	DEC
17	269000	uint8	Encoder_Data_Reset	0	DEC

Figura 67. Basic Operation configuración.

En el quinto paso se debe abrir la ventana DI DO & Operation Mode Setting desde el menú principal, navegando a Driver – Panel Menu – (f003) DI DO & Operation Mode Setting. En esta ventana es necesario modificar los valores de Din_Mode0 y Din_Mode1 a 1, lo cual define el modo de operación y configura las señales de entrada del servomotor; mostrado en la Figura 68.



NUM	Index	Type	Name	Value	Unit
0	2FF001	uint8	Store_Data	0	DEC
1	201003	uint16	Din1_Function	0001	HEX
2	201004	uint16	Din2_Function	2000	HEX
3	201005	uint16	Din3_Function	9004	HEX
4	201006	uint16	Din4_Function	0000	HEX
5	201007	uint16	Din5_Function	0000	HEX
6	201008	uint16	Din6_Function	0000	HEX
7	201009	uint16	Din7_Function	0000	HEX
8	200000	uint8	Switch_On_Auto	0	DEC
9	20100F	uint16	Dout1_Function	0001	HEX
10	201010	uint16	Dout2_Function	0010	HEX
11	201011	uint16	Dout3_Function	00A4	HEX
12	201012	uint16	Dout4_Function	0008	HEX
13	201013	uint16	Dout5_Function	0002	HEX
14	20200D	int8	Din_Mode0	1	DEC
15	20200E	int8	Din_Mode1	1	DEC
16	202009	int16	Din_Speed0_RPM	0,00	rpm
17	20200A	int16	Din_Speed1_RPM	10,00	rpm
18	20200B	int16	Din_Speed2_RPM	200,00	rpm
19	20200C	int16	Din_Speed3_RPM	500,00	rpm
20	250201	uint16	Analog1_Filter	5	DEC
21	2FF01D	int16	Analog1_Dead_V	0,00	V
22	2FF01E	int16	Analog1_Offset_V	0,00	V
23	250204	uint16	Analog2_Filter	5	DEC
24	2FF01F	int16	Analog2_Dead_V	0,00	V
25	2FF020	int16	Analog2_Offset_V	0,00	V
26	250207	uint8	Analog_Speed_Con	0	DEC
27	304104	int16	EASY_Analog_Speed	11,00	rpm/V

Figura 68. DI DO & Operation Mode Setting configuración.

En el sexto paso se debe abrir la ventana Position Table Mode en la que se realizará la programación del servomotor y el control de posición. Para acceder a esta ventana se debe hacer clic en el menú Driver, luego en Control Modes, y finalmente en Position Table Mode.

En esta ventana se configura diversos parámetros fundamentales:

- **Bit0-4: Next Index**

Este parámetro define el índice al que se moverá el servomotor dentro de la tabla de posiciones, por ejemplo, si se comienza programando en la fila Idx 0 y se desea avanzar a la fila Idx2, se debe colocar el número 2 en la fila actual; este proceso se repite según la secuencia programada en la tabla.

- **Bit8: Next/Stop**

Este parámetro permite controlar la continuidad del movimiento, 0 detiene el movimiento en la fila actual y 1 avanza a la siguiente fila definida en Bit0-4: Next Index.

- **Idx**

Esta columna presenta 32 espacios en los que se puede programar la tabla, este indica los índices que deben colocarse en Bit0-4: Next Index para definir la secuencia de movimiento.

- **MODE**

Este parámetro selecciona el modo de operación del servomotor; A es para el modo absoluto, RN es para el modo relativo normal, y RA es para el modo relativo acumulativo. Para la práctica se configuró en modo A.

- **Start.Cond.**

Este parámetro define la condición de inicio del movimiento; Wait espera a que se cumpla una condición específica antes de continuar, Ignore, como su nombre lo indica, ignora cualquier condición externa y ejecuta los movimientos de la tabla sin esperar confirmaciones, e Interrupt permite interrumpir el movimiento actual mediante una señal o condición externa.

- **Pos inc**

Este parámetro define la posición a la que se desea mover el servomotor, para configurarlo correctamente es importante considerar dos aspectos: el servomotor opera en un rango de 16 bits, donde 0 representa 0° y 65535 equivale a 360°. La ubicación del movimiento depende de la condición inicial del puntero, si se inicia de izquierda a derecha se utiliza valores negativos, de derecha a izquierda se utiliza valores positivos. El actuador lineal especifica claramente que lado corresponde a valores positivos o negativos.

- **Speed rpm**

Define la velocidad a la que se moverá el servomotor en revoluciones por minuto.

- **Delay ms**

Configura el tiempo de espera en milisegundos antes de continuar con la siguiente secuencia.

- **Acc idx**

Selecciona el valor configurado para la aceleración en la tabla Acc rps/s.

- **Dec idx**

Selecciona el valor configurado para la desaceleración en la tabla Dec rps/s.

En la derecha de la tabla principal se encuentra una sección destinada a los parámetros Acc rps/s y Dec rps/s, estos valores definen la aceleración y desaceleración del servomotor, lo que permite ajustar el esfuerzo necesario para iniciar y detener el movimiento dependiendo de la carga que este trasladando. Este ajuste es crucial para superar la inercia al comienzo y final de cada ciclo de movimiento. Para la práctica se asignó un valor de 150 que es el mínimo especificado en las características técnicas del servomotor.

Una vez completada la programación de la tabla, se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Elegir la opción Write Table para que el software cargue la programación al servomotor.
2. Esperar a que finalice la escritura de la tabla.
3. Verificar que la programación se ha transferido correctamente con la opción Read Table.

Tras completar estos pasos, el servomotor estará configurado y listo para ejecutar el programa.

En la Figura 69 se muestra la programación utilizada para la prueba del actuador lineal.

Idx	MODE	StartCond.	Pos inc	Speed rpm	Delay ms	Acc idx	Dec idx	CTL Reg	Loops	Rest	Acc rps/s	Dec rps/s
0	A	Wait	0	50,00	3000	0	0	4102	0	0	0	150,00
1	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0	1	0,00
2	A	Wait	-2064352	40,00	3000	0	0	4104	0	0	2	0,00
3	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0	3	0,00
4	A	Wait	-4128705	60,00	3000	0	0	4106	0	0	4	0,00
5	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0	5	0,00
6	A	Wait	-2064352	70,00	3000	0	0	4108	0	0	6	0,00
7	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0	7	0,00
8	A	Wait	0	80,00	3000	0	0	4000	0	0		
9	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
10	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
11	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
12	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
13	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
14	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
15	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
16	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
17	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
18	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
19	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
20	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
21	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
22	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		
23	A	Ignore	0	0,00	0	0	0	0	0	0		

Figura 69. Position Table Mode configuración.

El séptimo y último paso consiste en ejecutar el programa, lo cual se realiza desde la ventana Digital IO Functions. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Activar el servomotor con la opción Enable, lo que encenderá y habilitará el servo.
2. Seleccionar la opción Start Homing para establecer el punto de inicio del servomotor. Una vez determinado el punto de referencia, esta opción puede desactivarse.
3. Activar la opción Start PosTable, lo que iniciará los movimientos programados previamente en la tabla de posiciones.

Mientras el servo ejecuta los movimientos especificados en la Figura 69, el actuador lineal indica de manera precisa cuantos milímetros ha avanzado en cada recorrido.

En esta práctica se programaron cinco parámetros con la misma configuración en todas las líneas; el modo de operación en absoluto, la condición inicial en Wait, un tiempo de espera de 3000 milisegundos, y los valores de aceleración y desaceleración establecidos en 0, ya que en la tabla correspondiente a estos parámetros se ingresó el valor en el espacio 0.

La línea Idx 0 se programó para que su posición incremental sea 0 con una velocidad de 50 rpm como se muestra en la Figura 70.

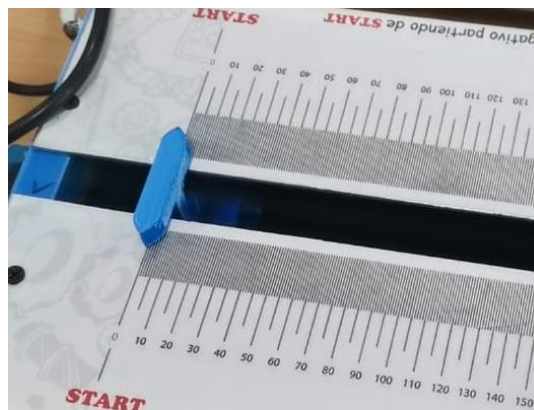


Figura 70. Posición inicial del actuador lineal.

La línea Idx 2 se configuró para avanzar a la mitad del recorrido total del actuador lineal, correspondiente a 31.5 vueltas, representadas en el sistema 16 bits como 2064352.5 a una velocidad de 40 rpm, marcando un desplazamiento lineal de 255mm según se observa en la Figura 71.

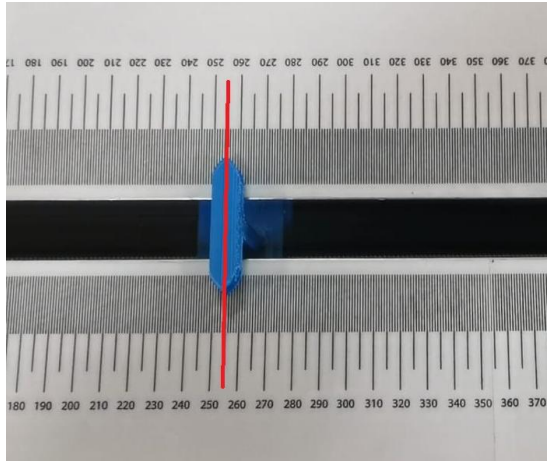


Figura 71. Mitad del ciclo del actuador lineal.

La línea Idx 4 se estableció para alcanzar el límite máximo del recorrido del actuador lineal, correspondiente a 63 vueltas, lo que equivale a un valor ingresado de 4128705 en 16 bits. La velocidad definida fue de 60 rpm, logrando un desplazamiento de 510mm con un margen de error de 1mm con según lo representado en la Figura 72.

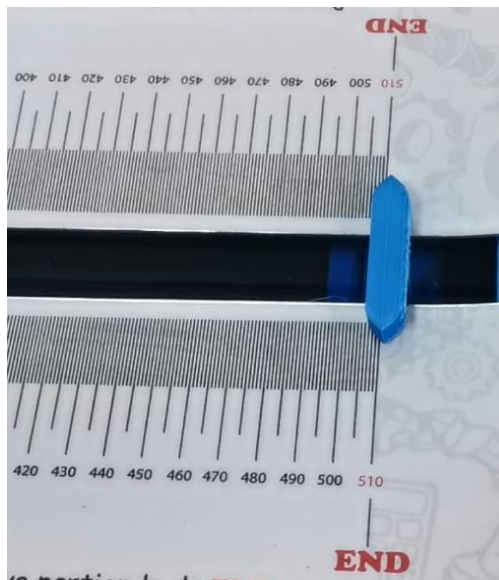


Figura 72. Final del recorrido del actuador lineal.

La línea Idx 6 ejecuta el retorno a la posición intermedia del recorrido, replicando el desplazamiento definido en la línea Idx 2, con una velocidad de 70 rpm conforme a la figura Figura 73.

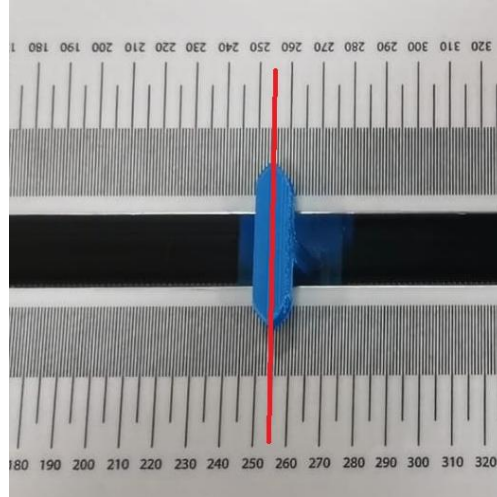


Figura 73. Regreso a la mitad del ciclo del actuador lineal.

La línea final, Idx 8, retorna el indicador a la posición inicial cero, operando a una velocidad de 80 rpm, en esta línea se colocó un valor de 0 en Bit8 para detener el ciclo, expuesto en la Figura 74.



Figura 74. Final del programa del actuador lineal.

4.3.1. Análisis de errores

Para realizar la verificación de errores del actuador lineal se llevaron a cabo pruebas en cuatro posiciones del recorrido, comenzando desde la posición cero y tomando en cuenta que el recorrido total es de 510mm. Durante las pruebas se observó que el software no manejaba correctamente los valores decimales al programar las posiciones, lo que afectó la precisión del desplazamiento; a continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas.

La Figura 75 muestra el inicio en 0 junto con la posición del actuador lineal.

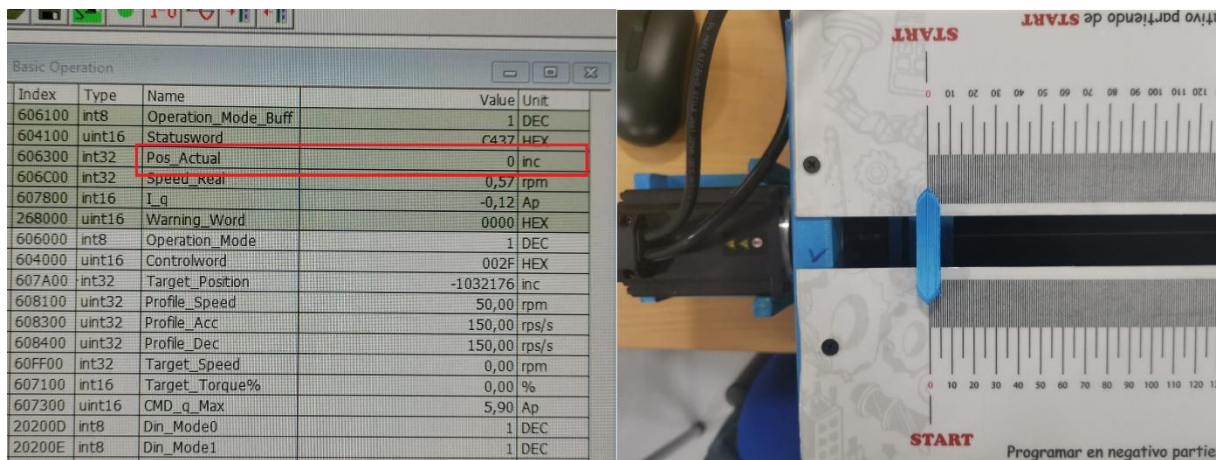


Figura 75. Posición inicial 0.

- **Primera posición: 127.5mm (programada como 1032176.25)**

Este número es la cuarta parte del recorrido y como el software no procesa los valores en decimales, resultó en 128mm con un error de 0.5mm como se observa en la Figura 76.

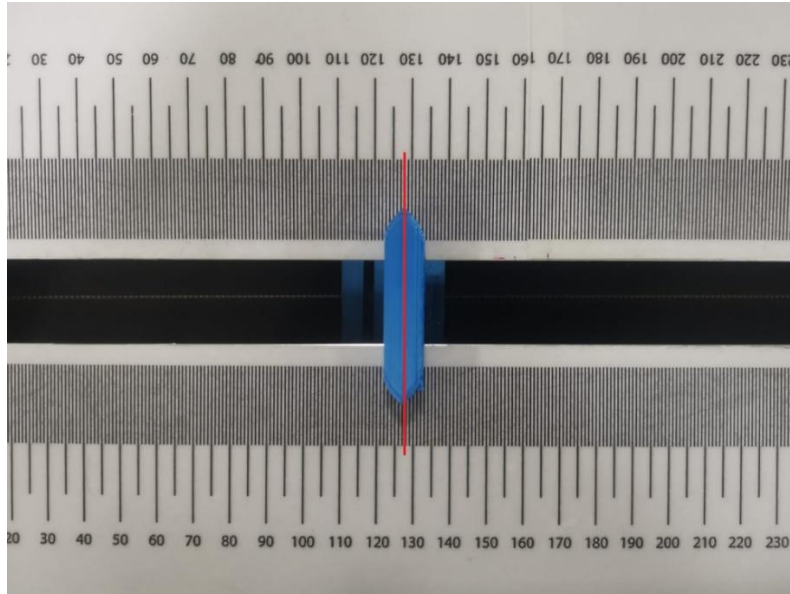


Figura 76. Primera posición de error.

- **Segunda posición: 225mm (programada como 2064352.5)**

Este valor indica la mitad del recorrido del actuador, de igual manera, el software ingresó el valor sin el decimal por lo que en la señalización del movimiento se obtuvo 256mm, obteniendo un error de 1mm mostrado en la Figura 77.

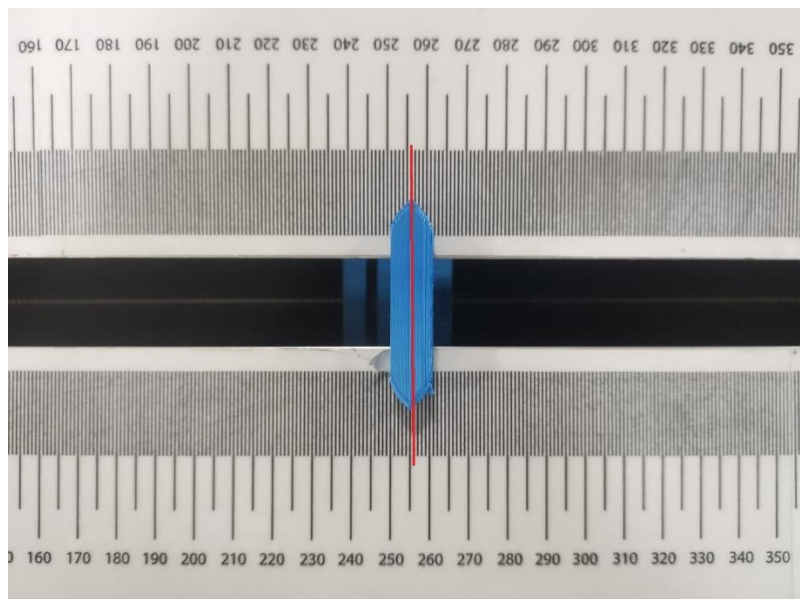


Figura 77. Segunda posición de error.

- **Tercera posición: 510mm (programada como 4128705)**

Al alcanzar el final del recorrido se registró un desplazamiento que excedió el límite establecido para el actuador lineal, se verificó un valor excedente de 2.05mm con un calibrador, observado en la Figura 78.

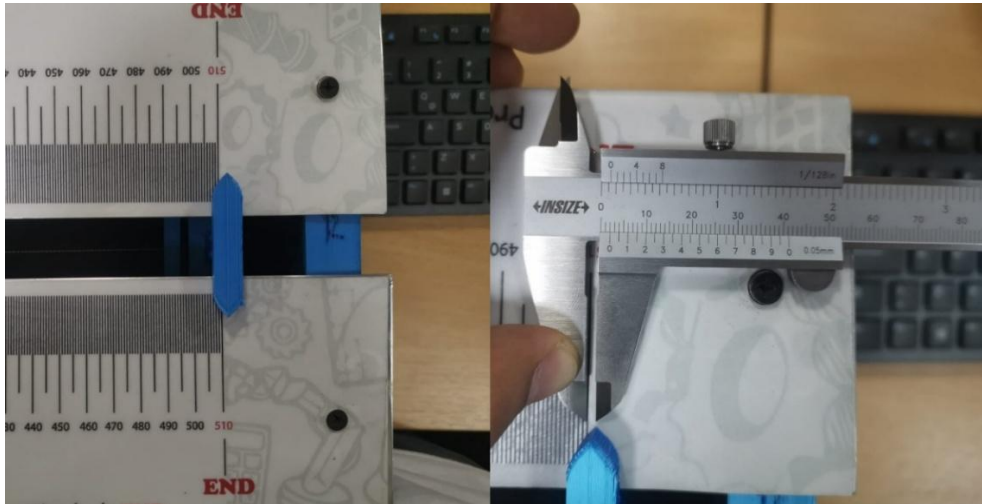


Figura 78. Tercera posición de error.

- **Prueba de regreso a la posición 0**

Al retornar a la posición de inicio (0mm) se observó un desplazamiento residual de 2.05mm que es el valor excedente del final de carrera medido con el calibrador; en el software se aprecia que el valor inicial es 3mm, evidenciando la incapacidad para procesar valores con decimales como se muestra en la Figura 79.

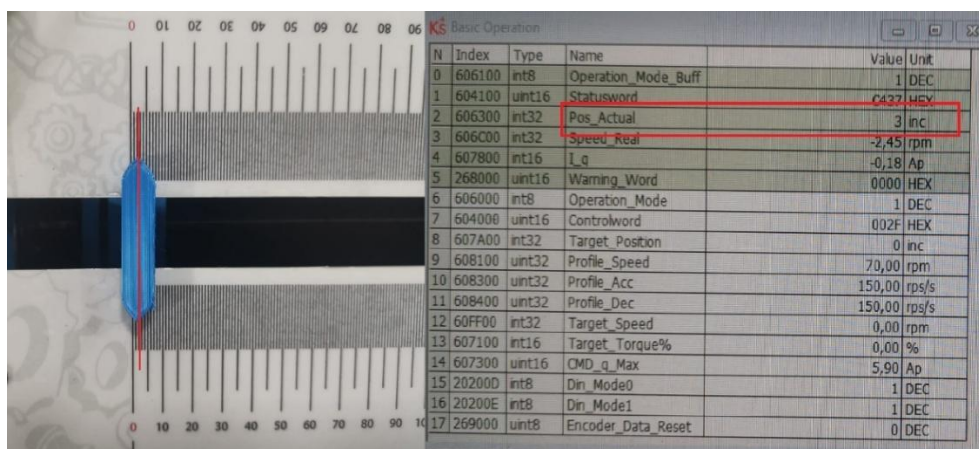


Figura 79. Regreso a la posición cero.

Con respecto al análisis de los errores registrados se realizó un cálculo del promedio y del porcentaje correspondiente para cada posición ensayada, estos valores reflejan la diferencia entre el desplazamiento programado y el alcanzado permitiendo evaluar la precisión del actuador lineal que se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Evaluación de errores en el movimiento del actuador lineal.

Posición	Valor Programado (mm)	Valor alcanzado (mm)	Desviación (mm)	Porcentaje de error (%)
1	127,5	128	0,5	0,39%
2	255	256	1	0,39%
3	510	512,05	2,05	0,40%
4	0	2,05	2,05	0,40%
		PROMEDIO	1,4	0,40%

En general, el promedio de error se mantuvo en un rango aceptable del 0.40%, lo cual indica un buen desempeño del sistema pese a los valores acumulativos de desviación.

4.3.2. Costos generales

La Tabla 20 muestra los valores de los materiales que conforman los principales elementos del actuador lineal.

Tabla 20. Costos de los materiales para el actuador lineal.

Costos Materiales				
N.-	Descripción	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor general (USD)
1	PLA+ SUNLU	1	21,74	21,74
2	Eje de acero 1018	1	14,3	14,3
3	Tornillos M4 X 15	5	0,7	3,5

4	Tuercas M4	5	0,35	1,75
5	Prisionero	2	0,4	0,8
6	Rodamiento 55x90	1	51	51
7	Tornillo/husillo	1	20,75	20,75
8	Tuerca tornillo/husillo	1	3	3
9	Eje acerado	2	9,5	19
10	Rodamiento lineal	2	2,35	4,7
11	Perfil de aluminio 20x40	5	15,22	76,09
12	Ángulos	10	0,1	1
13	Rodamiento 8x22	1	8	8
14	Plancha de aluminio 2mm	1	80	80
15	Tornillo cabeza hexagonal	2	0,15	0,3
16	Remaches	4	0,7	2,8
17	Tornillo negro	4	0,4	1,6
18	Pata de goma	4	1,3	5,2
19	Vinil adhesivo súper A3	3	2,75	8,25
			Costo total	\$323,81

4.3.3. Costos específicos

En la Tabla 21 se detalla los costos para la materialización de los componentes, es decir, cortes, dobleces y mecanizado.

Tabla 21. Costos mecánicos del actuador lineal.

Costos mecánicos		
N.-	Descripción	Valor (USD)
1	Mecanizado del eje de acero para convertirse en el acople de brida	60
2	Cortes del perfil de aluminio a la medida del diseño	5
3	Cortes y dobleces en la plancha de aluminio para la creación de la carcasa	10
Costo total		\$75

4.3.4. Resumen de costos

En la Tabla 22 se presenta un resumen de los costos totales obtenidos a partir de las tablas previas, consolidando los gastos en materiales, componentes, y procesos necesarios para la construcción completa del actuador lineal.

Tabla 22. Resumen de los costos realizados.

Resumen de costos		
N.-	Descripción	Valor
1	Costos de los materiales	323,81
2	Costos mecánicos	75
Costo total de la máquina		\$398,81

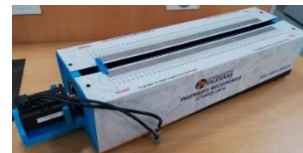
4.3.5. Análisis de viabilidad del actuador lineal diseñado

Para la comparación de viabilidad y costos del actuador lineal diseñado, se seleccionaron actuadores similares, los cuales emplean tornillo/husillo para su movimiento, descritos en la Tabla 23 La información y precios fueron obtenidos de la página web igus S.L.U. [49].

Tabla 23. Especificaciones y costos de actuadores lineales.

Actuadores lineales				
N.-	Modelo	Descripción	Precio (USD)	Ilustración
1	SWL-1040	- Husillo TR10X2 - Acero inoxidable 304 - Velocidad 30 RPM - Longitud 510mm	287,61	
2	STL-0415	- Husillo TR12X3 - Acero inoxidable 304 - Velocidad 20 RPM - Longitud 510mm	322,62	
3	SAW-1080	- Husillo TR12X3 - Acero inoxidable 304 - Velocidad 20 RPM - Longitud 510mm	501,79	
4	SHT-20	- Husillo TR18x4 - Acero inoxidable 304 - Velocidad 15	600,87	

		RPM	
		- Longitud 510mm	
		- Husillo TR8X2	
		- Acero inoxidable	
5	Actuador Diseñado	304	398,81
		- Velocidad 80	
		RPM	
		- Longitud 510mm	



CONCLUSIONES

- El actuador lineal diseñado y construido se integró exitosamente con el servomotor Kinco SMC60S mediante un acople de brida fabricado en acero 1018, permitiendo una transmisión de movimiento con un margen de error casi nulo, además, el sistema se apoyó en rodamientos que garantizaron el deslizamiento óptimo de sus componentes, logrando un desempeño eficiente y confiable como herramienta didáctica en el laboratorio de mecatrónica.
- Analizando el estado del arte de los actuadores lineales disponibles en el mercado, diseñados principalmente para acoplarse a motores paso a paso, se determinó que la opción más adecuada para el servomotor Kinco SMC60S fue el diseño personalizado que considera parámetros clave de compatibilidad y funcionalidad con el sistema.
- Se construyó un actuador lineal utilizando un husillo de paso 2mm que, en su estructura incorpora perfiles y una carcasa de aluminio seleccionados por sus propiedades mecánicas adecuadas para soportar al sistema, estos elementos están montados sobre los soportes primario y secundario proporcionando estabilidad al conjunto donde el factor seguridad mínimo analizado es de 17603,846, confirmando que el actuador es altamente resistente y no sufrirá deformaciones significativas durante su funcionamiento.
- Se verificó el correcto funcionamiento del actuador lineal mediante el ServoDrive CD413-AA-000, estableciendo diversas posiciones y velocidades de operación como se observa en la Figura 69, el sistema respondió adecuadamente sin presentar desfases ni dificultades en el movimiento cumpliendo los parámetros establecidos.
- Al comparar los precios de los actuadores lineales en la Tabla 23, el sistema diseñado, con un costo de 398,81 USD, se encuentra en un rango intermedio entre los modelos comerciales, aunque existen opciones más económicas, el conjunto elaborado ofrece ventajas significativas en términos de compatibilidad y personalización.
- El sistema diseñado permite un desplazamiento lineal de hasta 510mm, lo que cubre las necesidades específicas del proyecto, además, la velocidad máxima alcanzada es de 80 RPM ofreciendo un equilibrio adecuado entre rendimiento y precisión durante el recorrido completo del actuador.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir los procedimientos detallados en este proyecto para asegurar el correcto funcionamiento del servomecanismo y del actuador lineal, con el fin de evitar obstrucciones o problemas de programación que puedan afectar la eficiencia y precisión del sistema.
- Para un control preciso del movimiento es fundamental definir el origen o punto de partida del actuador, si el puntero se mueve inicialmente hacia la derecha, la programación debe asignar valores negativos a las vueltas en bits, si el movimiento es hacia la izquierda, se utilizarán valores positivos, asegurando así una correcta referencia de posición en ambos sentidos.
- Se recomienda implementar sensores de fin de carrera con el fin de limitar el desplazamiento del puntero, evitando daños por sobrepasar los límites operativos además de proporcionar mayor seguridad en el control de movimiento a largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Perez, A. Perez Hidalgo y E. Perez Berenguer, Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo, Universidad Nacional de San Juan , 2008.
- [2] T. Kailath, Linear Systems, Prentice-Hall, 1980.
- [3] E. E. Alveal, A. A. Hossian, R. Carbajal y H. Merlino, «Análisis del control de posición de un manipulador robótico con compensación de gravedad,» Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, 2022.
- [4] S. P. Bhattacharyya y H. L. Keel, Linear Multivariable Control Systems, Cambridge University Press, 2022.
- [5] A. López, «Teoría de los servomecanismos,» de *II Congreso Nacional de Ingeniería Tomo X y XI*, Madrid, Fundación Juanelo Turriano, 1950.
- [6] V. G. Gaitan García, «Licenciatura en Ingeniería Industrial Mecatrónica - Servomecanismos,» Instituto de Educación Superior José Vasconcelos.
- [7] Shenzhen kinco AutomationCo.Ltd, User Manual Kinco CD3/FD3 servo system, 2021.
- [8] Velásquez Orozco, D. Arboleda, A. G. Arboleda, D. A. Zuluaga Jiménez y J. Aguirre Palacio, Módulo de servomotor 2, Medellín: Institución Universitaria Pascual Bravo, 2014.
- [9] IDAS, «Reparación de servosistemas y electrónica industrial,» 2023. [En línea]. Available: <https://idasolutions.es/servomotores-industriales-maxima-precision/>. [Último acceso: 31 1 2025].
- [10] A. García, «PANAMAHITEK,» 6 12 2016. [En línea]. Available: <https://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>. [Último acceso: 1 2 2025].
- [11] Polaridad.NET, «Servo digital vs analógico: comparativa para elegir el adecuado,» [En línea]. Available: <https://polaridad.net/servo-digital-vs-analogico-comparativa-para-elegir-el-adecuado/>. [Último acceso: 28 07 2024].
- [12] F. Castillejos de Paz, SENSOR DE POSICIÓN ANGULAR, Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2014.
- [13] Shenzhen kinco AutomationCo.Ltd, «SMC60S-0020 Servo Motor Kinco,» [En línea]. Available: <https://www.kincoautomation.com/manuals/servo/L011818%20-%20Kinco%20SMC60S-0020%20Servo%20Motor.pdf>. [Último acceso: 29 07 2024].

- [14] V. Quilodrán Jopia, R. Pérez Moreno y C. Lizana Marchant , Acoplamientos Mecánicos, Universidad Tecnológica de Chile INACAP, 2014.
- [15] HVH Industrial, «Acoplamientos de Eje,» [En línea]. Available: <https://hvhindustrial.com/es/category/acoplamientos-de-eje>. [Último acceso: 29 07 2024].
- [16] Tupac Acoplamientos S.A., «Como seleccionar un acoplamiento,» [En línea]. Available: <https://tupacacoplamientos.com.ar/como-seleccionar-un-acoplamiento/>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [17] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, McGraw-Hill Education, 2020.
- [18] J. Puca, «ENGRANAJES DE TORNILLO SIN FIN,» [En línea]. Available: <https://pdfcoffee.com/diseo-tornillo-sinfin-5-pdf-free.html>. [Último acceso: 09 07 2024].
- [19] H. Vásquez Céspedes, «MOTORES LINEALES,» *Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 7, nº 2, 1997.
- [20] Bolton Engineering Products Ltd, «Engranajes rectos: aspectos importantes que necesita saber sobre ellos,» [En línea]. Available: <https://bepltd.com/es/blogs/news/spur-gears-important-aspects-you-need-to-know-about-them>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [21] El Rincón del Mecanismo, «Cadena y Correa Dentada,» [En línea]. Available: <https://elrincondelmecanismo.wordpress.com/mecanismos-de-transmision-del-movimiento/mec-trans-circular/transmisores-indirectos/cadena-y-correa-dentada/>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [22] E. Y. Grimaldos Jaimes y J. C. León Salom, MODELAMIENTO, SIMULACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE SERVOMECANISMO PARA POSICIONAMIENTO LINEAL DE PLATAFORMA BASE DE UN ROBOT SERIAL, Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2006.
- [23] P. Garriaga Isart, «Motion Control Tip: Cálculo de un accionamiento mediante husillo de bolas,» 05 10 2023. [En línea]. Available: <https://www.infoplc.net/blogs-automatizacion/item/113211-motion-control-tip-calculo-accionamiento-mediante-husillo-bolas>. [Último acceso: 07 30 2024].
- [24] N. Almendros, «Departamento de Tecnología e Informática,» [En línea]. Available: https://www.iesnestoralmendros.es/departam/tecnologia/1bach_ti1/librodigital/U4%20Elementos%20de%20M%C3%A1quinas/Tema%202/12_tornillotuerca.html. [Último acceso: 30 07 2024].

- [25] Thomson Industries, Inc., «Husillos de bolas - Cojinetes de apoyo,» [En línea]. Available: <https://www.thomsonlinear.com/es/training/husillos-de-bolas/cojinetes-de-apoyo>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [26] Baiz, S.L., «Ejemplo dimensionando conjunto husillo - tuerca,» Webnet, [En línea]. Available: [http://www.baiz.net/es/productos-producto-estandar/ejemplo-dimensionado-conjunto-husillo-tuerca#:~:text=nk%3D%20\(d3%20%2F,1%20x%20108%20\(r.p.m.\)&text=nk%20%3D%20es%20la%20m%C3%A1xima,es%20la%20longitud%20entre%20soportes..](http://www.baiz.net/es/productos-producto-estandar/ejemplo-dimensionado-conjunto-husillo-tuerca#:~:text=nk%3D%20(d3%20%2F,1%20x%20108%20(r.p.m.)&text=nk%20%3D%20es%20la%20m%C3%A1xima,es%20la%20longitud%20entre%20soportes..) [Último acceso: 07 30 2024].
- [27] Sistemas Mecánicos GAES, «Husillos y tuercas trapezoidales,» [En línea]. Available: <https://grupogaes.com/tienda/movimiento-lineal/husillos/husillos-y-tuercas-trapezoidales/>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [28] Newmark Systems Incorporated, «Linear Positioners,» [En línea]. Available: <https://www.newmarksystems.com/linear-positioners/d-slide-linear-slide/>. [Último acceso: 29 07 2024].
- [29] ARIS Stellantriebe GmbH, «Electrical linear motion drives as damper actuators,» [En línea]. Available: <https://www.stellantriebe.de/electrical-actuators/elektrische-linearantriebe-als-klappenversteller/?lang=en>. [Último acceso: 29 07 2024].
- [30] PNEUMAX S.A., «ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO VELOCIDAD, PRECISIÓN Y FIABILIDAD,» [En línea]. Available: <https://pneumaxspa.com/pneumax-fr/wp-content/uploads/DPL39-ES.pdf>. [Último acceso: 07 29 2024].
- [31] Wesco International, «GENERAL ELECTRIC #9T58K2811,» [En línea]. Available: <https://buy.wesco.com/Electrical-and-Power-Distribution/Transformers/Distribution-Dry-Type-Transformers/General-Purpose-Transformers/GENERAL-ELECTRIC/General-Purpose-Transformer-0-75-kVA-1-PH-Copper/9T58K2811/p/78317315117-1>. [Último acceso: 29 07 2024].
- [32] UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA, «Ley de OHM - Potenci y Energía Eléctrica,» [En línea]. Available: <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/31/33731/c303158542c0a3b2668c10c564d1ded7.pdf>. [Último acceso: 29 07 2024].
- [33] M. P. Groover, PRINCIPLES OF MODERN MANUFACTURING, Wiley India, 2014.
- [34] Ferros Texar, S.L., «Acero laminado en caliente y en frío: diferencias y ventajas,» [En línea]. Available: <https://ferrostexar.com/acero-laminado-caliente-frio/#:~:text=El%20acero%20laminado%20en%20caliente,como%20objetivo%20manipular%20el%20acero..> [Último acceso: 30 07 2024].
- [35] Puertas Market LLC., «¿Cuál es la diferencia entre chapa laminada en caliente y laminada en frío?,» [En línea]. Available: <https://www.dvery.ru/poleznye-stati/v-chem>

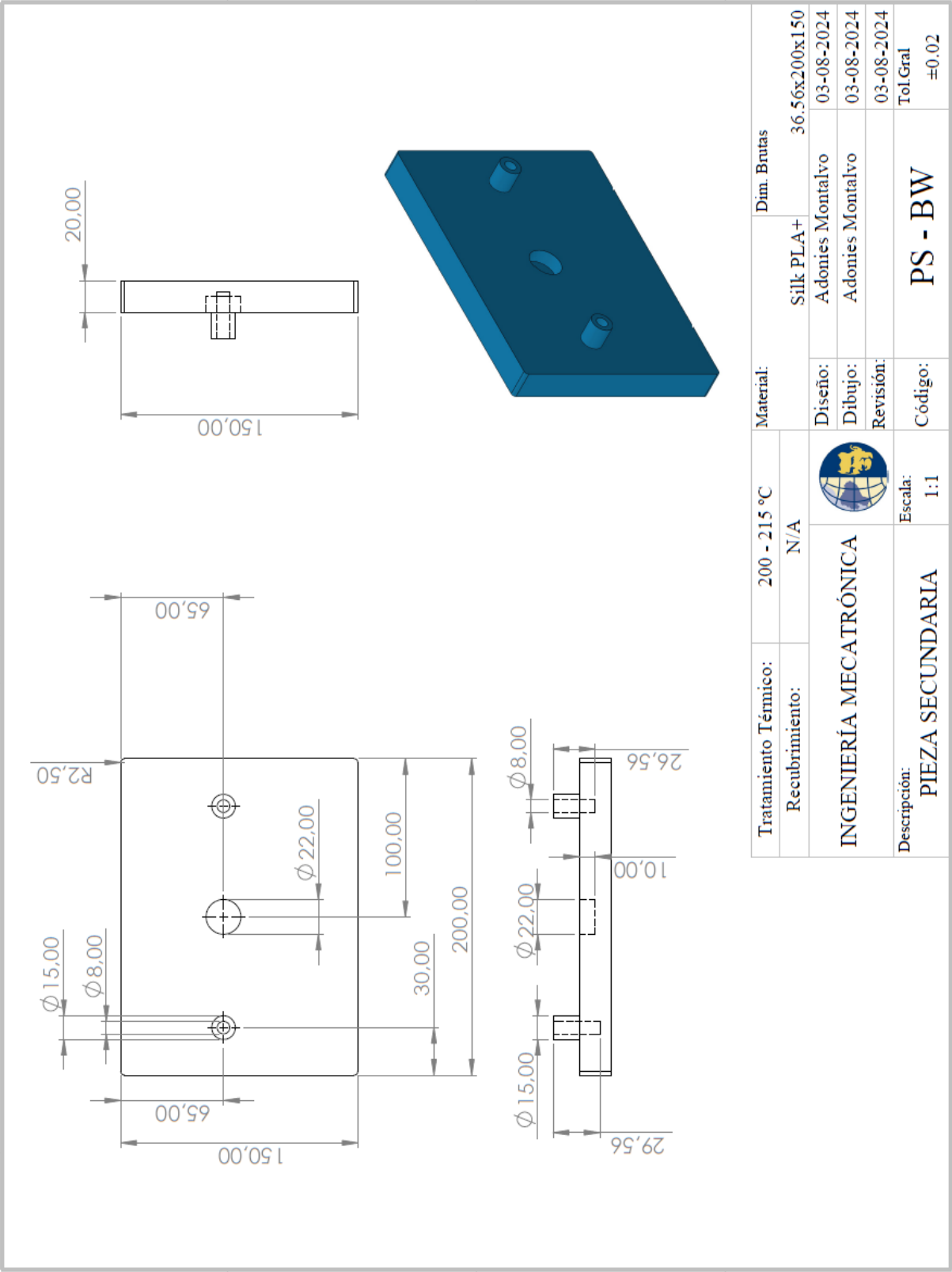
- otlichie-goryachekatanogo-i-holodnokatanogo-lista-metalla/. [Último acceso: 30 07 2024].
- [36] Ferros Planes, «Proceso de galvanizado: ¿qué es y qué ventajas tiene?,» [En línea]. Available: <https://ferrosplanes.com/proceso-galvanizado-ventajas/>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [37] Import Aceros, «Acero inoxidable 430,» [En línea]. Available: <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/acero-inoxidable-430/>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [38] Import Aceros, «Acero inoxidable 304,» [En línea]. Available: <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/acero-inoxidable-304/>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [39] Import Aceros, «Planchas Aluminio Liso,» [En línea]. Available: <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/planchas-aluminio-liso/>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [40] R. G. Budynas y K. Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, Nueva York: McGraw-Hill Education, 2020.
- [41] UNIT ELECTRONICS, «Tornillo Acme 8mm con Tuerca T8 15/25/30/50/60cm,» [En línea]. Available: <https://uelectronics.com/producto/tornillo-acme-8mm-con-tuerca-t8-30cm-50cm-60cm/#product-zoom>. [Último acceso: 30 07 2024].
- [42] Bornemann Gewindetechnik GmbH & Co. KG, «Husillo Trapezoidal según plano,» [En línea]. Available: <https://www.bornemann-gewindetechnik.de/es/productos/roscas-trapezoidales/>. [Último acceso: 31 07 2024].
- [43] Roymech.org, «Trapezoidal Screw Threads,» [En línea]. Available: https://roymech.org/Useful_Tables/Screws/Trapezoidal.html. [Último acceso: 31 07 2024].
- [44] Engineers Edge, LLC, «External ISO Metric Trapezoidal Screw Threads Table Chart Sizes TR320 - TR1120,» [En línea]. Available: <https://www.engineersedge.com/hardware/iso-metric-trapezoidal-threads2.htm>. [Último acceso: 31 07 2024].
- [45] Á. F. García, «El rozamiento por deslizamiento,» [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/rozamiento/general/rozamiento.htm>. [Último acceso: 02 08 2024].
- [46] R. A. Serway, Física, McGraw-Hill, 1992.
- [47] AliExpress.com, «Acoplamiento de brida de rueda Omni,» [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/i/1005001451293476.html>. [Último acceso: 30 07 2024].

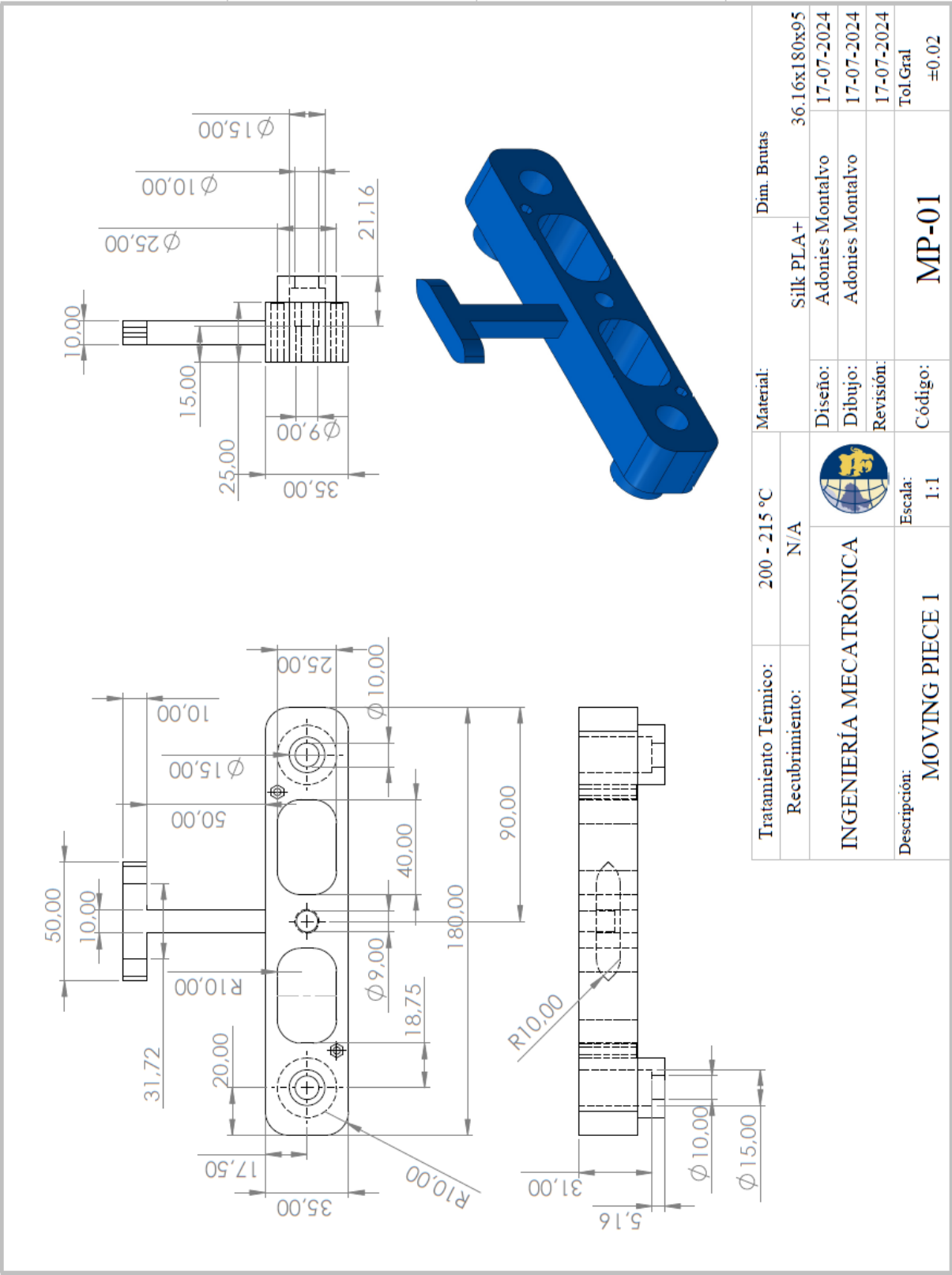
- [48] Smart Motor Devices, «3D Laboratorio,» 2020. [En línea]. Available: <https://3dlaboratorio.es/plastic-pla.htm>. [Último acceso: 02 08 2024].
- [49] igus S.L.U., «igus motion plastics,» 15 Octubre 1964. [En línea]. Available: <https://drylin-drive-technology-configurator.igus.tools/selection>. [Último acceso: 11 Diciembre 2024].

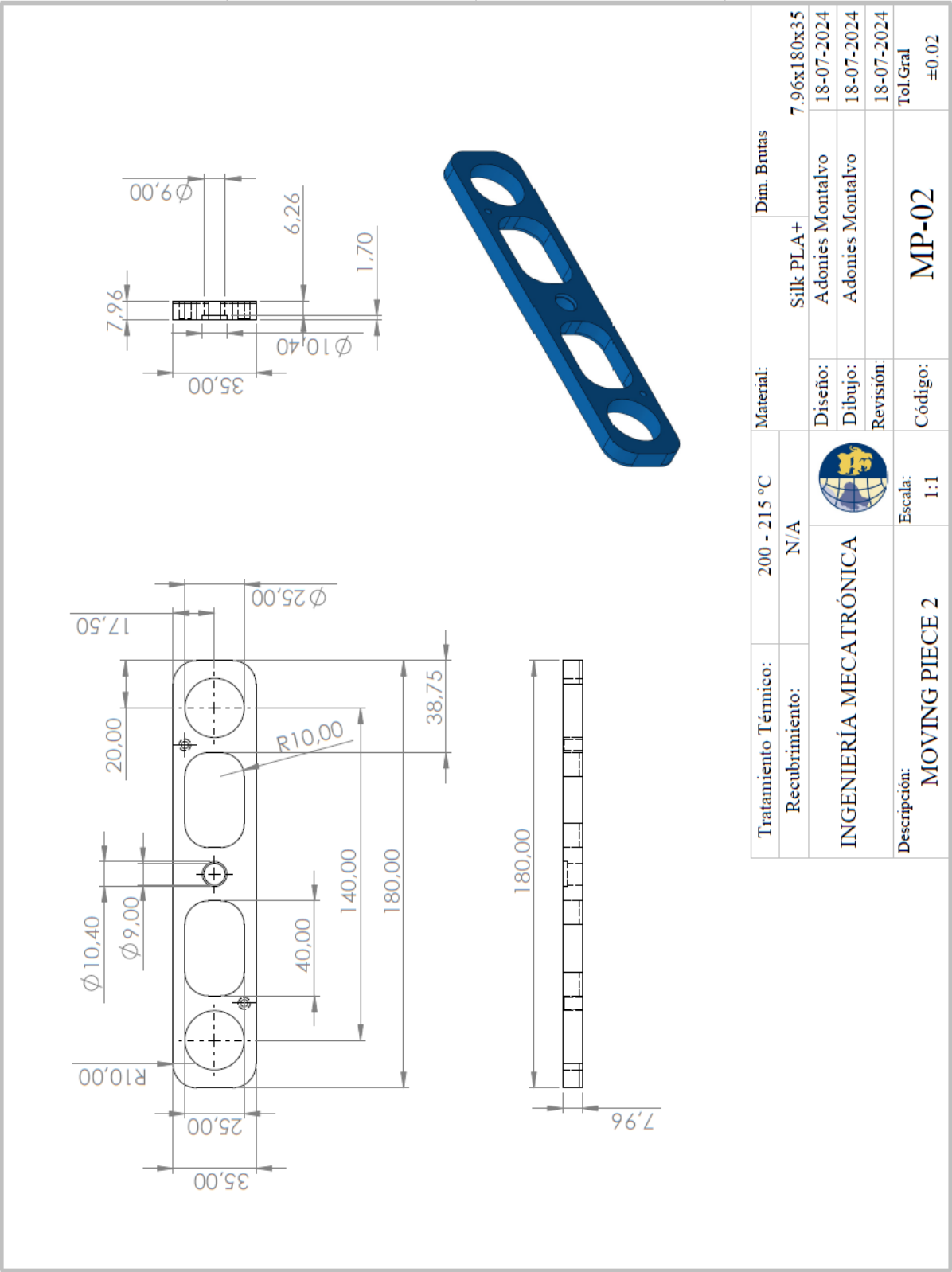
ANEXOS

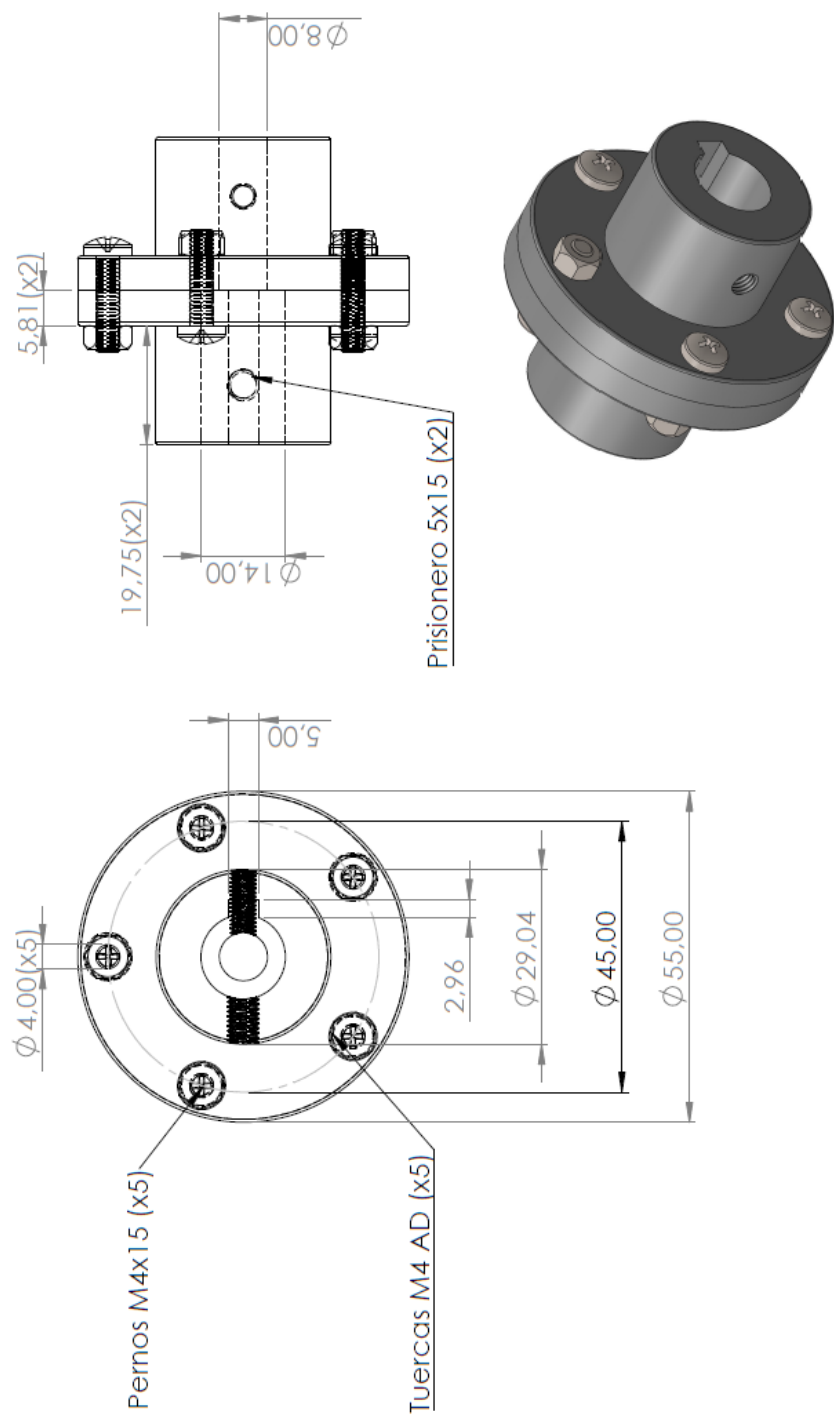
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	ServoBase		1
2	ServoShaft		1
3	ServoKey		1
4	FrontWallF		1
5	FinalCouplingAssembly		1
6	AFBMA 20.1 - 10-55 - 18,SI,NC,18_68		1
7	stud5x15		1
8	stud4x15		1
9	WormGear		1
10	SteelAxles1(B)		1
11	SteelAxles2(N)		1
12	BackWall		1
13	AluminumProfile20x40		5
14	AFBMA 12.1 4.1 - 0080-22 - 8,SI,NC,8_68		1
15	MovingPiece1		1
16	MovingPiece2		1
17	NutofWG		1
18	LinearBearingModel		2
19	L&R_Cover		2
20	BaseCover		1

Tratamiento Térmico:	N/A	Material:	Dim. Brutas
Recubrimiento:	N/A		737.8x166.5x204
INGENIERÍA MECATRÓNICA		Diseño:	Adoniés Montalvo
		Dibujo:	Adoniés Montalvo
		Revisión:	13-11-2024
Descripción: ACTUADOR LINEAL		Código:	LA-AM
		Escala:	Tol.Gral ±0.1









Tratamiento Térmico:	N/A		Material:	Dim. Brutas
Recubrimiento:	N/A		Acero 1018	63x140
INGENIERÍA MECATRÓNICA			Diseño:	Adonies Montalvo
			Dibujo:	Adonies Montalvo
			Revisión:	
Descripción:	ACOPLAMIENTO DE BRIDA	Escala: 1:1	BRIDA-01 Tol.Gral ± 0.05	

