



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de un actuador para sistemas
de aceleración de motores de
combustión interna**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Ángel Moisés Valle Analco

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rubén Carlos Esquivel Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DESARROLLO DE UN ACTUADOR PARA SISTEMAS DE ACELERACION DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ANGEL MOISES VALLE ANALCO
Número de cuenta: 420055460

RESUMEN

Los dinamómetros de banco constituyen una herramienta que permite evaluar el rendimiento de un motor bajo diversas condiciones controladas. Para ello, es necesario regular la potencia del motor mediante la manipulación del sistema de aceleración. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema electromecánico capaz de actuar sobre dichos sistemas, permitiendo su control. El diseño se basa en la implementación de un sistema de control en lazo cerrado, con un motor a pasos como elemento actuador y un codificador de posición magnético como sistema de realimentación. Finalmente, el actuador desarrollado es capaz de regular el régimen de revoluciones por minuto con un nivel de exactitud adecuado dentro del rango de operación de los motores en los que se implementó.

ABSTRACT

Bench dynamometers are a tool that enables the performance of an engine to be assessed under various controlled conditions. To do this, it is necessary to regulate the engine's power by manipulating the throttle system. This paper presents the development of an electromechanical system capable of acting on such systems, thereby enabling their control. The design is based on the implementation of a closed-loop control system, with a stepper motor as the actuator and a magnetic position encoder as the feedback system. Finally, the developed actuator is capable of regulating the revolutions per minute with an adequate level of accuracy within the operating range of the engines in which it was implemented.

AGRADECIMIENTOS

Con profunda estima y reconocimiento, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, el M. I. Rubén Carlos Esquivel Hernández por su orientación, apoyo constante, paciencia y observaciones. Su dedicación y trabajo han sido fundamentales para la realización de este proyecto.

Expreso mi agradecimiento a los docentes que formaron parte de mi trayectoria académica, por los conocimientos compartidos y por contribuir a mi formación como ingeniero.

A mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso, siendo un pilar fundamental para la culminación de esta etapa. En especial, a mis padres José A. Valle Trujillo y Judith Analco Ramos, por apoyarme y amarme tanto. Reconozco especialmente a mi tía Eugenia Valle Baños, por brindarme la oportunidad de alcanzar este objetivo tan significativo para mí.

A mis amigos de la universidad, quienes siempre extendieron la mano cuando más lo necesité, en especial a la Ing. Jatziri Lopes Reyes, al Ing. Hugo Yosef Aguilar Bastida, al Ing. Luis Eduardo Rojas Pozos, al Ing. Daniel Fuentes Zacarias y al Ing. Néstor León Mendoza, así como a todos aquellos que formaron parte de este proceso, por su apoyo y compañerismo.

Finalmente, mi reconocimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por ser la mejor casa de estudios de México y por haber fomentado el desarrollo de un espíritu de análisis para los desafíos de la vida cotidiana, especialmente, en la ingeniería. Mi agradecimiento se extiende al proyecto PAPIIT IG 100 222 “Modificaciones estimadas del parque vehicular en la Ciudad de México hacia las décadas 30’s y 40’s, así como su impacto en las emisiones de contaminantes atmosféricos criterio y gases de efecto de invernadero”, así como al Instituto de Ingeniería por el proyecto GII “Intensificación de los procesos para la obtención de biocompuestos a partir de agua residual” por el apoyo en la adquisición de materiales y beca proporcionadas para la conclusión de este trabajo de tesis.

CONTENIDO

Abstract	1
Agradecimientos	2
Índice de ilustraciones	4
Introducción	7
Problemática ambiental en la ZMVM	7
Unidad de Investigación y Control de Emisiones	8
Objetivos del proyecto.....	11
Capítulo 1: Motores de combustión interna, sistemas de aceleración y dinamómetros.	13
Motores de Combustión Interna alternativos.....	13
Sistemas de aceleración tradicionales	15
Dinamómetros automotrices	22
Celdas de pruebas.....	27
Control de aceleración desde la consola y actuadores comerciales.....	28
Capítulo 2: Diseño del actuador	34
Diseño mecánico	38
Diseño electrónico	44
Programación.....	59
Capítulo 3: Manufactura	64
Manufactura aditiva.....	64
Tarjetas de circuito impreso	66
Acoplamiento del servomotor con sistemas de aceleración.....	71
Capítulo 4: Experimentación y análisis.....	72
Prueba funcional	73
Sensibilidad.....	77
Repetibilidad y Exactitud.....	81
Tiempo de uso (mayor a 7 hrs)	85
Conclusión	88
Trabajo a futuro.....	89
Anexos.....	91

Captura de esquema electrónico de la tarjeta principal del actUador	91
Guía de uso	92
Referencias	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Balance de energía de la Zona metropolitana del valle de México por tipo y sector.	7
Ilustración 2. Mecanismo manivela-husillo-biela para controlar la aceleración de los motores en la UNICE.....	9
Ilustración 3. Ensayo de desempeño en la UNICE con referencia a los riesgos de proximidad a la celda de prueba.	10
Ilustración 4. Esquema básico de un MCIA, junto con el componente biela, que en conjunto con el cigüeñal integra el mecanismo biela–manivela.....	13
Ilustración 5. Aceleración en motores gasolina y Diesel.....	15
Ilustración 6: sistema de admisión de aire, donde se muestra el componente de interés: válvula mariposa.....	16
Ilustración 7. Representación de un cuerpo de aceleración mecánico y sus componentes principales.	17
Ilustración 8. Esquema operación de la válvula mariposa del acelerador. La imagen a representa la Válvula mariposa cerrada mientras que la imagen b muestra la Válvula mariposa completamente abierta.	18
Ilustración 9. Esquema de un carburador del efecto Venturi y ubicación de la válvula mariposa de aceleración.	19
Ilustración 10. Sistema de varillaje y pedal del acelerador con bombas de inyección y regulador.	21
Ilustración 11. Funcionamiento del émbolo de la bomba en distintas condiciones de entrega (sin entrega, entrega parcial y entrega máxima).	22
Ilustración 12. Pruebas dinámicas comunes en vehículos automotores; (A) dinamómetro de banco, (B) dinamómetro de chasis y (C) pruebas en pista.	23
Ilustración 13. Freno de Prony.....	24
Ilustración 14. Freno de cuerda.	25
Ilustración 15. Ejemplo de dinamómetros de absorción tradicionales; (A) dinamómetro de cuerda (B) dinamómetro hidráulico.....	26

Ilustración 16. Corrientes de Foucault inducidas sobre una placa de metal conductora de electricidad.	26
Ilustración 17. Unidad de absorción de potencia de corrientes parásitas.	27
Ilustración 18. Ejemplificación de celda de prueba con visibilidad a la unidad bajo prueba. ...	27
Ilustración 19. Cable de control tipo mancuerna tipo T utilizado en sistemas mecánicos de control.....	29
Ilustración 20. Actuadores comerciales para sistemas de aceleración; (A) actuador AVL COMPACT, (B) actuador AVL para pruebas de banco y (C) actuador Thompson de aceleradores.....	31
Ilustración 21. Configuraciones de actuadores para sistemas de aceleración: (A) conversión de movimiento rotacional a lineal para accionamiento por cable; (B) accionamiento angular directo sobre el eje del acelerador.	32
Ilustración 22. Mecanismo de acoplamiento como idea conceptual del diseño del actuador ..	34
Ilustración 23. Motor eléctrico como fuente de movimiento.....	35
Ilustración 24. Estructura conceptual del actuador.	36
Ilustración 25. Dinámica del actuador con ejemplificación de movimiento.	37
Ilustración 26. Explosivo de ensamble para componentes adquiridos.	38
Ilustración 27. Base del actuador	41
Ilustración 28. Deslizador o carro propuesto; (A) deslizador, (B) ensamble deslizador con tuerca T y rodamientos.....	42
Ilustración 29. Tapa del motor PaP que alberga el codificador as5600; (A) tapa del motor PaP, (B) ensamble con codificador As5600, motor PaP y tarjeta para interconexión.	43
Ilustración 30. Diagrama a bloques de los componentes electrónicos físicos del actuador. ...	44
Ilustración 31. Arduino uno rev3	46
Ilustración 32. Diagrama funcional de la tarjeta de desarrollo Arduino uno rev3.	46
Ilustración 33. Diagrama de conexiones del controlador A4988.....	48
Ilustración 34. Diagrama de la implementación del controlador A4988	50
Ilustración 35. Estados de la resistencia R5 de pull-up	51
Ilustración 36. Ejemplo de medición de voltaje para ajustar corriente del motor PaP.	52
Ilustración 37. Configuración de terminales y representación del módulo AS5600	53
Ilustración 38. Esquemático para el codificador AS5600: (A) apartado de la terminal de conexión del AS5600 en la tarjeta principal, (B) esquemático de la tarjeta dedicada al AS5600.	55
Ilustración 39. Ensamble concéntrico del sistema de retroalimentación.....	55

Ilustración 40. Implementación de la instrumentación.	56
Ilustración 41. Esquema de conexiones eléctricas del actuador.	58
Ilustración 42. Diagrama de flujo de inicio del sistema.	59
Ilustración 43. Ejemplificación de activación de límite de carrera inferior.	60
Ilustración 44. Rutina de lectura multivuelta	61
Ilustración 45. Rutina de posición segura/inicial.	61
Ilustración 46. Diagrama de flujo del bucle principal.....	63
Ilustración 47. Proceso de manufactura aditiva con impresora 3D.	64
Ilustración 48. Orientación de deposición de capas en UltiMaker Cura: (A) deposición lateral para la base del actuador, (B) deposición horizontal para tapa del motor.	65
Ilustración 49. Captura esquemática para tarjeta electrónica.	67
Ilustración 50. Importación de componentes en el editor de la tarjeta electrónica.....	68
Ilustración 51. Organización, enrutado, relleno de áreas de cobre, definición de límite de la tarjeta.....	68
Ilustración 52. Enrutamiento mecánico con fresadora CNC.	69
Ilustración 53. Ejemplificación de restricciones mecánicas de la tarjeta principal.	70
Ilustración 54. Diseño de la tarjeta electrónica para codificador AS5600: (A) enrutamiento, (B) vista en tercera dimensión.....	71
Ilustración 55. Aplicación del actuador para sistemas de aceleración.....	71
Ilustración 56. Acople de cable tractor para prueba funcional: (A) acople de cable tractor a cuerpo de aceleración de un motor V6, (B) acople de cable tractor a actuador de sistemas de aceleración	74
Ilustración 57. Interfaz para verificación de prueba funcional: (A) interfaz de herramienta de diagnóstico OBDII, (B) interfaz de datos instrumentación UNICE.	75
Ilustración 58. Prueba funcional en ralentí.....	76
Ilustración 59. Configuración de la prueba de sensibilidad, repetibilidad, exactitud y tiempo de uso.....	80
Ilustración 60. Resultados de prueba de sensibilidad ascendente en el actuador.....	81
Ilustración 61. Resultados de prueba de sensibilidad descendente en el actuador.....	81
Ilustración 62. Secuencia ascendente para caracterización del actuador.	84
Ilustración 63. Secuencia descendente para caracterización del actuador.	84
Ilustración 64. Secuencia de un ciclo de conmutación.	86
Ilustración 65. Configuración de la prueba de tiempo de uso.	88

INTRODUCCIÓN

PROBLEMÁTICA AMBIENTAL EN LA ZMVM

El sector transporte constituye el principal contribuyente al consumo energético y a las emisiones atmosféricas en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, este sector representa aproximadamente el 45 % del consumo energético total en la región, como se muestra en la Ilustración 1. En comparación, la industria contribuye con un 33 % y el sector habitacional con un 15 %, lo que posiciona al transporte como la actividad de mayor impacto dentro del balance energético metropolitano [1].

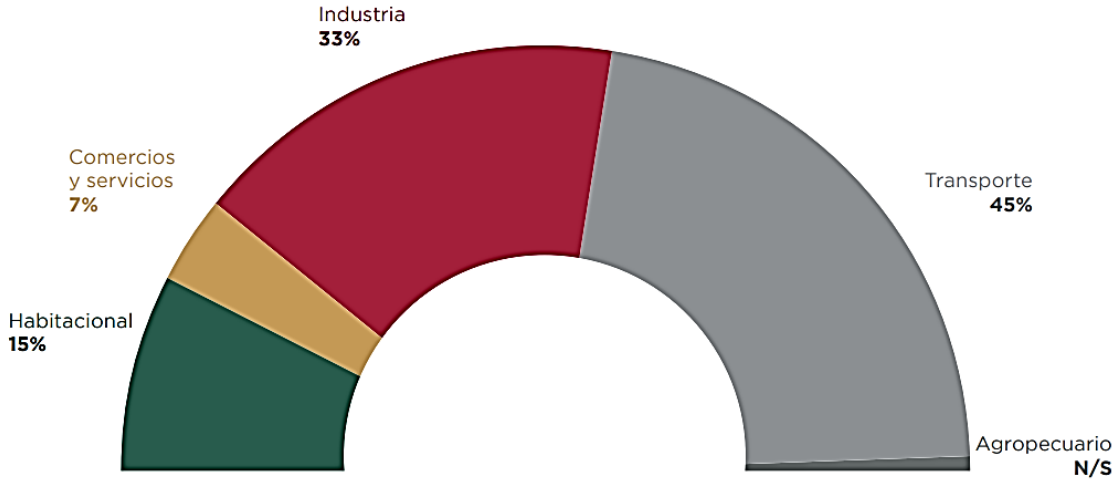


Ilustración 1. Balance de energía de la Zona metropolitana del valle de México por tipo y sector.

Imagen tomada de Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México. 2023.

Asimismo, el sector transporte es responsable de una fracción significativa de contaminantes derivados de procesos de combustión. Entre los contaminantes criterio se encuentran las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}, el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). Adicionalmente, su contribución incluye gases de efecto invernadero expresados en términos de dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}), parámetro que integra las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e hidrofluorocarbonos (HFC). De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2023), las fuentes móviles son responsables del 95.3 % de las emisiones de CO, del 83.8 % de NO_x y de más del

40 % de las partículas finas en la ZMVM, lo que evidencia el impacto directo de los motores de combustión interna en la calidad del aire regional [1].

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES

Ante este contexto, resulta indispensable contar con infraestructura especializada que permita estudiar el desempeño y las emisiones de los motores de combustión interna alternativos (MCIA) bajo condiciones controladas. La Unidad de Investigación y Control de Emisiones (UNICE) de la Universidad Nacional Autónoma de México surge con este propósito, como evolución del antiguo Laboratorio de Control de Emisiones y consolidándose formalmente en 2014 tras la construcción del Centro de Ingeniería Avanzada [2].

La labor de los integrantes de la UNICE se divide en equipos de manufactura, instrumentación e investigación. El equipo de manufactura se encarga de elaborar la infraestructura necesaria para la experimentación de los MCIA presentes en el laboratorio o la instalación de equipos comerciales, así como la seguridad y mantenimiento de los equipos de medición y las fuentes móviles.

El equipo de instrumentación tiene como función principal la medición de variables físicas, la adquisición y conversión de datos, así como el control y automatización de procesos asociados a las pruebas experimentales. Asimismo, es responsable de garantizar la operatividad y confiabilidad de los sistemas de medición utilizados en la UNICE. En este contexto, dicho equipo desarrolló el “Sistema de Instrumentación y Control para Dinamómetros Automotrices”, el cual en el presente documento se denominará simplemente como sistema de instrumentación [2].

Por su parte, el equipo de investigación se encarga de analizar y proponer soluciones orientadas a la reducción de gases contaminantes y gases de efecto invernadero provenientes de motores de combustión interna. La validación de dichas propuestas requiere la evaluación experimental del desempeño de los MCIA en condiciones controladas, lo cual se lleva a cabo en celdas de prueba.

Una celda de prueba es una instalación especializada diseñada para realizar ensayos en motores de combustión interna, compuesta por sistemas de entrada y salida como el acondicionamiento ambiental y equipos de medición necesarios para la ejecución de las pruebas [3]. Entre sus elementos principales se encuentra el dinamómetro, el cuál es un dispositivo utilizado para medir variables fundamentales como el par motor, la fuerza y la potencia desarrollada por motores y otros sistemas mecánicos [4].

Actualmente en la UNICE se cuenta con diversas celdas de prueba, de las cuáles se mencionan algunos ejemplos a continuación.

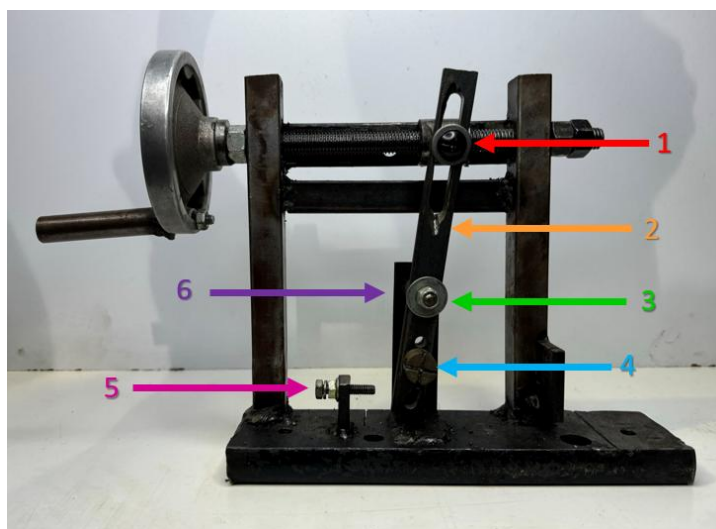
1. Dinamómetro de chasis para vehículos ligeros, ubicado en el edificio “O” del anexo de la facultad de ingeniería el cuál se basa en un dinamómetro de la Clayton que cuenta

con una capacidad de hasta 6000 [lb] y con una potencia máxima de 150 [HP] o 111.86 [kW], velocidad máxima de 85 [mi/h] o 136 [km/h] [2].

2. Banco dinamométrico para motor V6, este dinamómetro está diseñado para MCIA de 6 cilindros en disposición V, con una potencia máxima de 160 [HP] a 5200 [RPM] y un par máximo de 185 [lb*ft] a 4000 [RPM] [2].
3. Banco dinamométrico para motores Diesel monocilíndricos, este cuenta con una potencia máxima de 120 [HP] a 5000 [RPM].

Con base en lo anterior, las soluciones desarrolladas por el equipo de investigación se validan mediante pruebas de desempeño realizadas en celdas de prueba, de acuerdo con el caso de estudio correspondiente. Una prueba de desempeño consiste en operar el motor a un régimen de giro previamente definido y mantenerlo estable durante un intervalo de tiempo establecido por punto de operación. Durante este periodo se registran variables de interés tales como emisiones contaminantes, consumo de combustible, potencia, par de motor y eficiencia. Para garantizar la consistencia de estas mediciones, resulta indispensable controlar con precisión la posición del mecanismo de aceleración.

En la Ilustración 2 se muestra el mecanismo de control de aceleración de los motores de combustión interna en la UNICE que consiste en un mecanismo tipo manivela-husillo-biela, el cual acciona un cable tractor conectado al sistema de aceleración del motor. El cable tractor pertenece a la familia de cables de control unidireccionales, y permite controlar la aceleración de un MCIA. Si bien esta configuración ofrece simplicidad y facilidad de instalación en comparación con sistemas bidireccionales de empuje-tracción, resulta ser más barato y de fácil acceso.



1. Collarín
2. Brazo de palanca mayor
3. Punto de apoyo
4. Punto de sujeción para el chicote
5. Tope de carrera
6. Brazo de palanca menor

Ilustración 2. Mecanismo manivela-husillo-biela para controlar la aceleración de los motores en la UNICE.

Imagen tomada de Congreso del artículo de “Instrumentación de un banco dinamométrico portátil para motocicletas” publicado en las memorias del Congreso de Instrumentación SOMI XXXVI.

Estas restricciones implican que el operador deba situarse en proximidad al motor durante la ejecución de los ensayos, lo que lo expone a condiciones potencialmente adversas tales como exposición térmica, vibraciones estructurales, niveles elevados de presión sonora y presencia de gases de combustión. En la Ilustración 3 se muestra un ejemplo de esta situación, donde los operadores permanecen cerca de la celda de prueba sin una barrera física que proporcione aislamiento frente a eventos de riesgo.

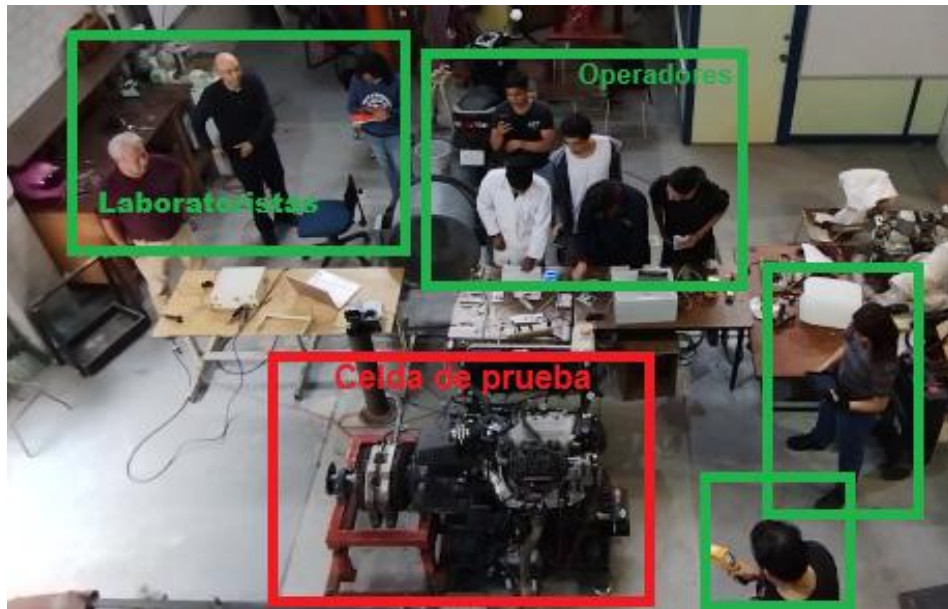


Ilustración 3. Ensayo de desempeño en la UNICE con referencia a los riesgos de proximidad a la celda de prueba.

Para corregir esta problemática, en la presente tesis se propone un sistema electromecánico que transformará la manera en la que se establece la referencia de aceleración. El sistema de actuador propuesto en este trabajo consta de un sistema de eje lineal basado en un husillo con tuerca que se controla en lazo cerrado. En el esquema tradicional, el régimen del motor depende directamente del desplazamiento manual del cable de tracción, lo que dificulta asociar una posición mecánica específica con un valor cuantificable de aceleración. Esta condición introduce variabilidad entre ensayos y limita la posibilidad de reproducir con precisión una condición previamente evaluada.

La implementación del actuador electromecánico conserva el mismo medio de transmisión mecánica, pero sustituye el accionamiento manual por un posicionamiento controlado mediante una referencia porcentual integrada al sistema de instrumentación. De esta forma, el operador puede definir un porcentaje de aceleración deseado, y el sistema se encarga de alcanzar dicha posición de manera consistente. Aunque la validación final del régimen continúa dependiendo de la observación del operador, la incorporación de una referencia medible y repetible reduce

la dispersión asociada al accionamiento directo y mejora la estandarización del procedimiento experimental. Asimismo, la nueva configuración disminuye la exposición directa del operador a las condiciones propias de la celda de prueba, fortaleciendo la seguridad operativa sin modificar la arquitectura mecánica existente.

Desde el punto de vista dinámico, el sistema de aceleración presenta no linealidades asociadas a fricción, holguras y variaciones en la tensión del cable tractor, además de estar sujeto a perturbaciones externas generadas por la vibración y la dinámica asociada al MCIA. Ante este escenario, un esquema de control en lazo abierto no garantiza un seguimiento consistente de la referencia, ya que no existe un mecanismo que corrija desviaciones provocadas por perturbaciones o variaciones del sistema. Adicionalmente, la integración con la instrumentación de la celda de prueba requiere conocer la posición real de aceleración para su adecuada sincronización con los sistemas de adquisición de datos, lo que implica necesariamente la incorporación de una variable de realimentación. Por esta razón, la adopción de un esquema de control en lazo cerrado se establece como una solución técnicamente adecuada para garantizar estabilidad, precisión y consistencia en los ensayos dinamométricos.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

Con base en la problemática descrita, el objetivo del presente trabajo es desarrollar e implementar un sistema electromecánico de control en lazo cerrado, denominado actuador, que permita regular con precisión la posición de los mecanismos de aceleración de diversos MCIA's empleados en la UNICE, garantizando seguridad operativa y repetibilidad experimental durante pruebas dinamométricas.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Diseñar un actuador capaz de cubrir el rango completo de aceleración permitido por los sistemas de aceleración existentes en la UNICE.
- Desarrollar una solución robusta que soporte condiciones prolongadas de operación y posibles manipulaciones inadecuadas durante ensayos en celdas de prueba.
- Implementar un sistema con capacidad de repetibilidad y facilidad de mantenimiento correctivo.
- Diseñar una interfaz de control que permita regular la posición del sistema de aceleración mediante una señal de control analógica de voltaje.

El desarrollo del sistema se llevó a cabo mediante una metodología que incluyó el diseño y construcción del actuador, el desarrollo de tarjetas de circuito impreso, para la integración de los componentes electrónicos de control y potencia, la implementación del algoritmo de control en un microcontrolador y la validación experimental del sistema mediante pruebas en condiciones reales de operación dentro de la celda de prueba.

Con la finalidad de presentar de manera estructurada el desarrollo del sistema propuesto, el contenido de este documento se organiza de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se expone el marco teórico necesario para comprender los principios de funcionamiento de los MCIAAs haciendo énfasis en los sistemas de aceleración y los elementos electromecánicos involucrados en el diseño del sistema de actuación, así como los ensayos en celdas de pruebas.

En el Capítulo 2 se presenta el diseño electromecánico del sistema, abarcando la propuesta de la estructura mecánica del actuador, diseño de tarjetas de circuito impreso, la integración eléctrico-mecánica, consideraciones de uso y solución a posibles fallas.

El Capítulo 3 describe el proceso de manufactura aditiva para las piezas mecánicas y la manufactura sustractiva para el diseño electrónico.

Finalmente, en el Capítulo 4 se exponen las pruebas experimentales realizadas, el análisis de resultados y la validación del desempeño del sistema en condiciones reales de operación dentro de la celda de prueba.

CAPÍTULO 1: MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA, SISTEMAS DE ACELERACIÓN Y DINAMÓMETROS.

MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

En esta sección se hace énfasis en los motores de combustión interna alternativos, debido a que son el principal tema de estudio de la UNICE. Un motor de combustión interna puede definirse como un sistema constituido por diversos elementos mecánicos cuya función es transformar la energía térmica generada por la combustión de un fluido en su interior en energía mecánica útil [5].

Además, los motores que se mencionan en este trabajo de tesis son de tipo alternativo (MCIA), es decir, aquellos en los que el trabajo mecánico se realiza por el desplazamiento de un mecanismo de biela-manivela [5].

En la Ilustración 4, se hace referencia al esquema básico de un MCIA junto con el componente “biela” que, en conjunto con el cigüeñal, generan el mecanismo biela-manivela. Dicho mecanismo permite convertir el movimiento lineal del pistón en movimiento rotativo del cigüeñal.

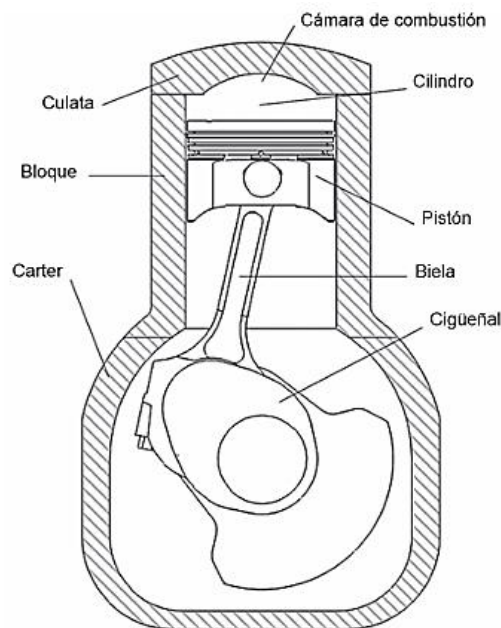


Ilustración 4. Esquema básico de un MCIA, junto con el componente biela, que en conjunto con el cigüeñal integra el mecanismo biela-manivela.

Tomado de Motores de combustión interna (p. 27), por A. Rovira de Antonio y M. Muñoz Domínguez, 2015, Editorial UNED. © Editorial UNED 2015.

En términos simples, los MCIA son dispositivos capaces de convertir la energía química presente en el fluido de trabajo en energía mecánica. Este proceso inicia cuando, durante el

ciclo de admisión, la mezcla aire–combustible ingresa a la cámara de combustión a través de la válvula de admisión, impulsada por la succión que genera el pistón al llegar a su punto muerto inferior (PMI). Posteriormente, las válvulas permanecen cerradas mientras el pistón asciende, comprimiendo la mezcla en el ciclo de compresión. Al aproximarse al punto muerto superior (PMS), la mezcla se enciende, lo que provoca el desplazamiento descendente del pistón en el ciclo de trabajo o combustión. Finalmente, en la carrera ascendente, el pistón expulsa los gases de la combustión a través de la válvula de escape abierta, completando así el ciclo de escape [6].

Por su parte, Rovira de Antonio et al. [5] resumen los procesos que realiza un MCI en 5 procesos básicos que constituyen el ciclo termodinámico del motor, estos son:

- Proceso de admisión, da lugar a la entrada del fluido de trabajo este puede ser aire o aire-combustible dependiendo del tipo de motor.
- Compresión, este proceso influye en el rendimiento térmico del motor.
- Combustión, da lugar al estado térmico del fluido de trabajo mediante una reacción química se obtiene alta presión y temperatura.
- Expansión, es el proceso encargado de la producción de trabajo mediante variación de volumen en el cilindro.
- El proceso de escape proporciona la evacuación de los gases producidos por la combustión para dar cabida a un nuevo ciclo de admisión.

Rovira de Antonio et al. [5] clasifican los motores como:

Según el proceso de combustión:

- Motores de encendido provocado (MEP)
- Motores de encendido por compresión (MEC)
- Otros (GDI, ACT o HCCI)

Según el número de procesos para realizar el ciclo

- Motores de cuatro tiempos
- Motores de dos tiempos

Según el tipo de refrigeración

- Motores refrigerados por aire
- Motores refrigerados por líquido

Según la presión de admisión

- Motores de aspiración natural
- Motores sobrealimentados

Por la disposición y número de cilindros

- Motores en línea
- Motores en V
- Motores en bóxer
- Otros (W y estrella)

SISTEMAS DE ACELERACIÓN TRADICIONALES

El sistema de aceleración en los MCIAs cambia dependiendo de su tecnología: para motores de gasolina la aceleración tiene su origen en el sistema de aspiración de aire mediante la apertura de la válvula mariposa. Por su parte para motores Diesel, no se utiliza un cuerpo de aceleración puesto que su tipo de combustión es por compresión y la mezcla de combustible es pobre, es decir, con una relación aire-combustible alta en aire, por ende, la aceleración es llevada a cabo controlando la cantidad de combustible que se inyecta a la mezcla mediante la palanca reguladora del gobernador.

En el lado izquierdo de la Ilustración 5, se muestra el sistema de aceleración para motor a gasolina con los componentes característicos como el sistema de inyección, encendido mediante chispa y la aspiración mediante de aire mediante la válvula mariposa. En el lado derecho de la Ilustración 5, se muestra el sistema de aceleración de un motor Diesel donde resalta que el sistema de admisión de aire se encuentra libre, sin ninguna restricción y el pedal del acelerador controla directamente la inyección de combustible.

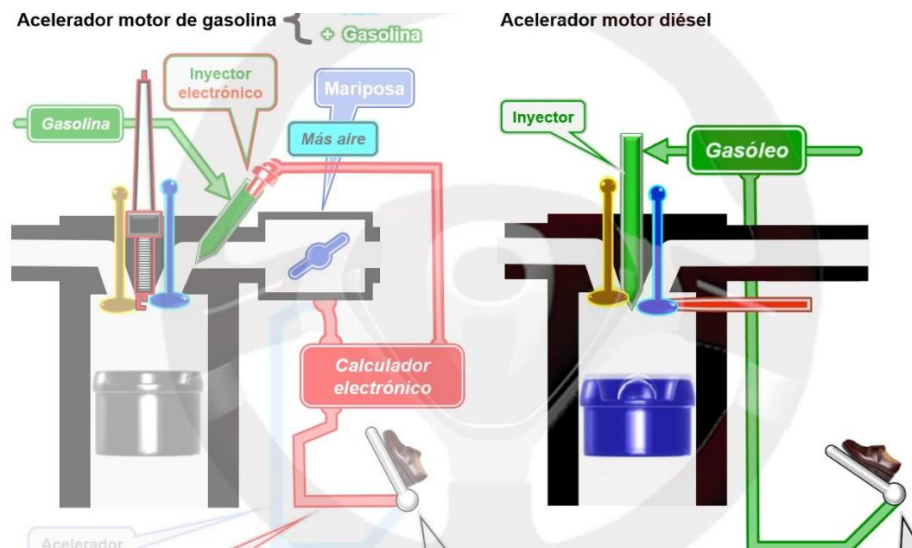


Ilustración 5. Aceleración en motores gasolina y Diesel.

Imagen tomada de ASÍ FUNCIONA EL AUTOMOVIL (I) – 1. 13 ALIMENTACIÓN Y ENCENDIDO DEL MOTOR DIÉSEL (3/13) [VIDEO]. Por TECNOLOGIA DEL AUTOMOVIL, 2021, YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=lhPnxtmehSE>

Aunque en la actualidad existen sistemas de aceleración asistidos electrónicamente el presente trabajo se enfoca en motores que emplean un mecanismo de control mecánico. En este contexto, se expone de forma general en qué consiste el proceso de aceleración de los motores disponibles en el laboratorio, destacando el punto de intervención del sistema diseñado, el cual actúa sobre la válvula mariposa en motores de encendido por chispa (ya sea mediante carburador o cuerpo de aceleración) y sobre la válvula del gobernador en motores de encendido por compresión. Esta descripción sirve como base para abordar, en el siguiente apartado, los componentes principales del sistema.

SISTEMA DE ACELERACIÓN PARA LOS MEP

En los motores de encendido provocado, la aceleración es controlada mediante la relación aire-combustible que ingresa a la cámara de combustión. La Ilustración 6 muestra los componentes principales de un sistema de admisión de aire, los cuales son un filtro de aire y un colector. Este último, se compone, por un pleno de admisión, una válvula mariposa que regula la cantidad de aire que ingresa al motor y conductos que distribuyen el aire hacia cada uno de los cilindros [6].

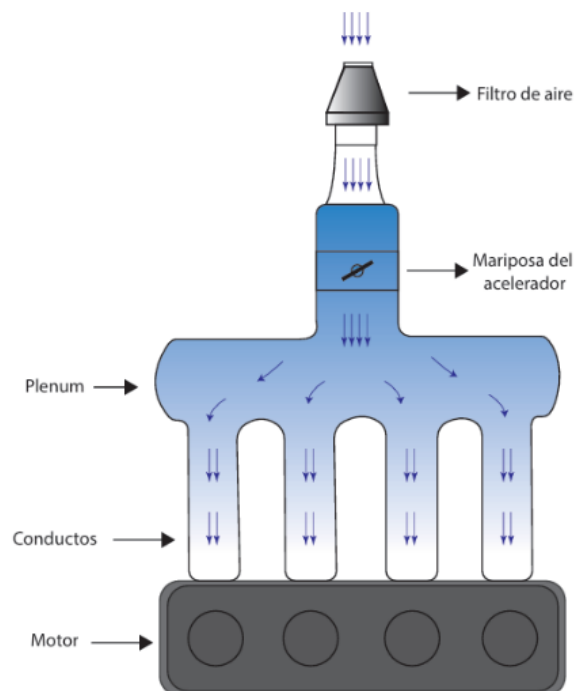


Ilustración 6: sistema de admisión de aire, donde se muestra el componente de interés: válvula mariposa.

Tomado de Fundamentos de los sistemas de inyección a gasolina y autotrónica automotriz (p. 63), por J. J. Molina Campoverde, N. Rivera Campoverde, y P. Molina Campoverde, 2025, Editorial Abya-Yala/UPS.
<https://doi.org/10.17163/abyaups.115>. © Editorial Abya-Yala/UPS 2025.

En vehículos antiguos se empleaba un sistema de aceleración mediante carburador, que regulaba la entrada de aire al motor y la relación aire-combustible de la mezcla [7]. Con la creciente demanda de motores más eficientes y menos contaminantes, se introdujo el sistema de inyección electrónica, el cual incorpora un cuerpo de aceleración el cuál es un componente del sistema de admisión que regula la cantidad de aire que se ingresa al motor [5].

Estos sensores regulan la relación aire-combustible en función de la apertura de la válvula mariposa y monitorean la presión en el colector de admisión, la presión en el riel de combustible, la velocidad del vehículo y la temperatura del motor, entre otros factores [6].

CUERPOS DE ACELERACIÓN

En los sistemas de accionamiento mecánico el cuerpo de aceleración permite regular el caudal de aire hacia el motor mediante un cable ensamblado a la palanca del acelerador. La válvula mariposa modifica el área efectiva de paso en el conducto de admisión, lo que altera el caudal másico de aire que ingresa al cilindro y la cantidad de mezcla aire-combustible disponible para la combustión [8].

En la Ilustración 7 se muestra un ensamble típico del cuerpo de aceleración; la válvula mariposa se ubica junto al conjunto de palanca del acelerador, que constituye el punto de acoplamiento con el actuador desarrollado para sustituir el pedal.

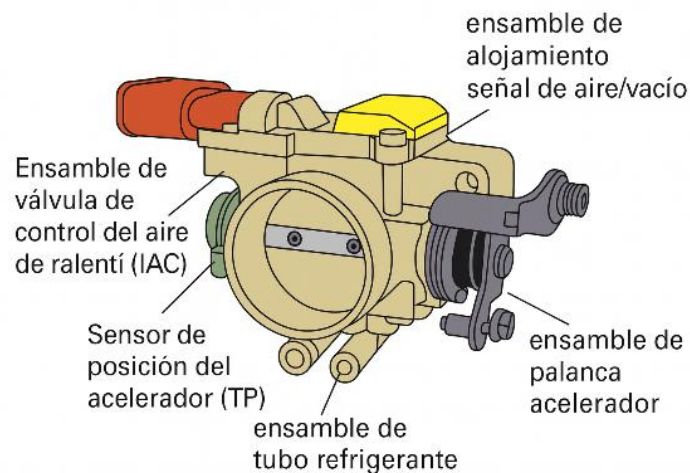


Ilustración 7. Representación de un cuerpo de aceleración mecánico y sus componentes principales.

Adaptado de Automotive Technology: A Systems Approach (p. XXX), por J. Erjavec, Delmar Thomson Learning, 2000. Adaptación realizada con asistencia de inteligencia artificial (DALL·E). © General Motors Corporation—Chevrolet Motor Division.

En el sistema de admisión, la posición angular de la válvula mariposa determina el área efectiva de paso del conducto y, por ende, la restricción al flujo másico de aire. La Ilustración 8 muestra un ejemplo esquemático de su operación. Cuando la válvula mariposa se encuentra en posición

cerrada, como se observa en la Ilustración 8.A, la sección efectiva es mínima, la presión absoluta en el colector de admisión disminuye generando vacío y el motor se mantiene en régimen de ralentí.

A medida que se abre la válvula mariposa, la restricción al flujo disminuye, lo que provoca un incremento en la presión absoluta del colector. Bajo estas condiciones, la unidad de control del motor ajusta el tiempo de inyección para mantener la relación aire-combustible, produciendo un aumento en el par desarrollado y en la velocidad de giro del motor.

Finalmente, cuando la apertura es cercana a la posición máxima ($\approx 90^\circ$), como se muestra en la Ilustración 8.B, la restricción al flujo es mínima y la presión en el colector tiende a aproximarse a la presión atmosférica. En esta condición, el motor puede alcanzar su máxima entrega de par para las condiciones de operación establecidas [8].

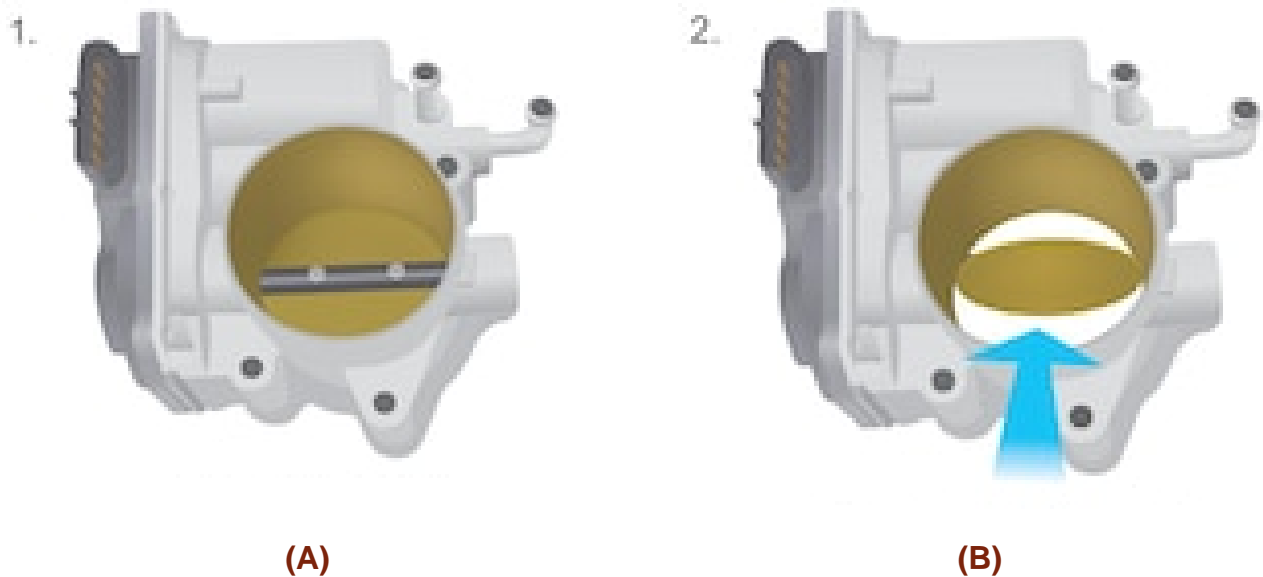


Ilustración 8. Esquema operación de la válvula mariposa del acelerador. La imagen a representa la Válvula mariposa cerrada mientras que la imagen b muestra la Válvula mariposa completamente abierta.

Imagen obtenida de Motorcycle throttle valve electronic controller open and closed illustration infographic, Dreamstime, <https://www.dreamstime.com/motorcycle-throttle-valve-electronic-controller-open-closed-illustration-infographic-image253622242>

CARBURADOR

A pesar de que en la actualidad los sistemas de inyección de combustible han sustituido a los carburadores, existen motores con carburadores en la UNICE y estos también tienen un mecanismo de aceleración en el cual se implementará el actuador.

Los carburadores funcionan mediante el efecto Venturi y el principio de presión diferencial, por esto, la cantidad de mezcla aire-combustible depende de la presión atmosférica y el vacío del sistema de aspiración, lo que permite que el combustible sea succionado desde el depósito hacia el conducto de admisión. Por lo que la mezcla aire-combustible se forma como consecuencia de la diferencia entre la presión atmosférica y el vacío generado en el sistema de aspiración. En la Ilustración 9 se observa este fenómeno: el aire ingresa desde la zona de mayor presión, la atmosfera, y se desplaza hacia la región de menor presión ubicada bajo la válvula mariposa [8]. Si bien el carburador incorpora una válvula mariposa cuyo principio de regulación es similar al descrito para el cuerpo de aceleración, la diferencia es que la dosificación del combustible no es administrada electrónicamente, sino que depende de mecánicas provenientes de la física del carburador. Por esta razón, la cantidad de mezcla suministrada al motor está directamente vinculada a las condiciones de presión del carburador.

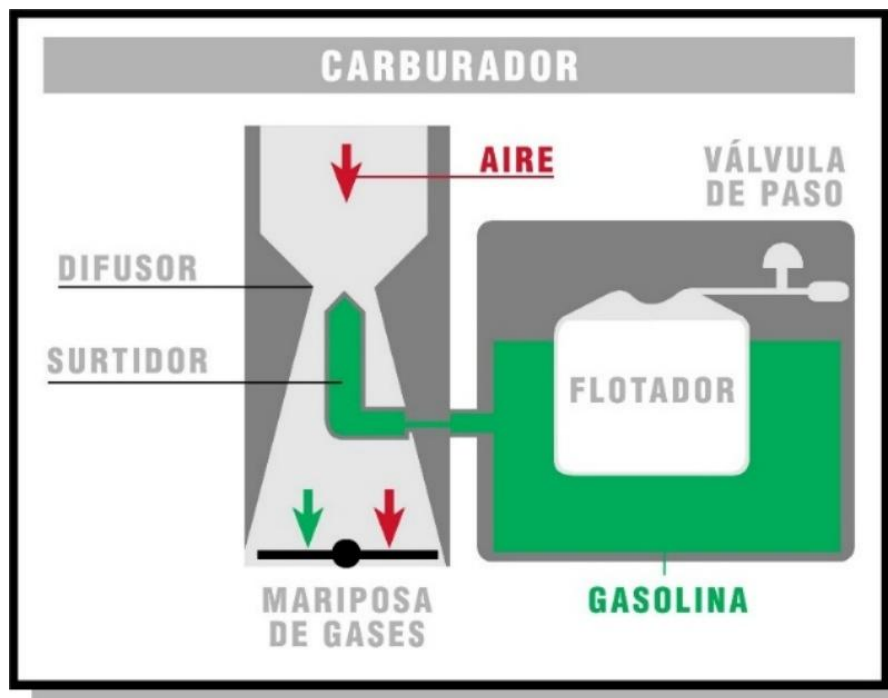


Ilustración 9. Esquema de un carburador del efecto Venturi y ubicación de la válvula mariposa de aceleración.

Imagen obtenida de Gráfico carburador, Sarreplec (Govern de les Illes Balears),

https://sarreplec.caib.es/pluginfile.php/14260/mod_imsccp/content/2/EME_MMPV02_R47_GraficoCarburador.jpg

SISTEMAS DE ACELERACIÓN PARA LOS MEC

En los motores de encendido por compresión (MEC), la mezcla aire-combustible no se forma dentro del cilindro hasta instantes previos a la combustión. Durante el recorrido del pistón, el contenido del cilindro está compuesto principalmente por aire y gases de recirculación. Por esta razón, el proceso de combustión en este tipo de motores depende directamente de la cantidad de combustible inyectado, a diferencia de los motores de encendido provocado (MEP), donde la mezcla aire-combustible se prepara con características específicas antes de su entrada al cilindro [5].

La combustión en los MEC está estrechamente relacionada con el proceso de inyección y las micro mezclas generadas durante este. El único momento en el que existe una mezcla aire-combustible es durante el tiempo de retraso, denominado así porque durante la admisión no se forma una mezcla que favorezca la combustión. Por ello, el combustible se inyecta antes de que el pistón alcance el Punto Muerto Superior (PMS), lo que permite su atomización, mezcla con el aire caliente y posterior alcance de la temperatura de autoignición. Esta es la razón por la que los MEC tienen tiempo de retraso, lo que se entiende como el tiempo desde que se inyecta el combustible hasta que se da la combustión.

Antes de la llegada de los sistemas de inyección electrónicos, la dosificación del combustible en los MEC se realizaba mediante sistemas de regulación y control, cuya función era sincronizar el suministro de combustible con la posición del cigüeñal y controlar la presión de este. En general, la función de estos sistemas de formación de mezcla debe controlar adecuadamente la mezcla durante el tiempo de retraso, calidad del chorro, pulverización, autoignición rápida y la estabilidad de cada ciclo.

Los sistemas de inyección para los MEC son todos los sistemas involucrados mecánicos, hidráulicos, eléctricos y electrónicos que deben trabajar en forma conjunta y se pueden dividir a como se muestra a continuación [5]:

1. Sistema de baja presión: es la interfaz entre el depósito de combustible y el sistema de inyección de alta presión. Esta interfaz consta de un sistema de bombeo de combustible que puede estar ubicado en el tanque o la bomba de alta presión.
2. Sistema de alta presión: este sistema consiste en una bomba de alta presión que pueden ser de tipo émbolo y lineales o radiales.
3. Inyector: la función de este componente es la dosificación del combustible, preparación del chorro y control del tiempo de inyección.
4. Regulación y control: los sistemas mencionados anteriormente están coordinados por un sistema de regulación, en los sistemas tradicionales estos sistemas eran puramente mecánicos, hidráulicos o neumáticos.

La bomba de inyección en línea es únicamente un componente del sistema de inyección de combustible, ya que su funcionamiento se complementa con el regulador. Este último tiene la función de mantener estable la velocidad del motor frente a variaciones en la carga, impedir que

el régimen supere un límite seguro que comprometa su integridad mecánica y evitar que el motor se apague durante condiciones de baja demanda, como en el ralentí. Para cumplir con estas funciones, el regulador actúa modulando la cantidad de combustible que se suministra al motor [9].

La Ilustración 10 muestra bombas de inyección con reguladores y sus mecanismos de acoplamiento, al ser un motor tradicional, este opera a través de la varilla de control que conecta al pedal del acelerador a través del regulador y un sistema de varillaje [9].

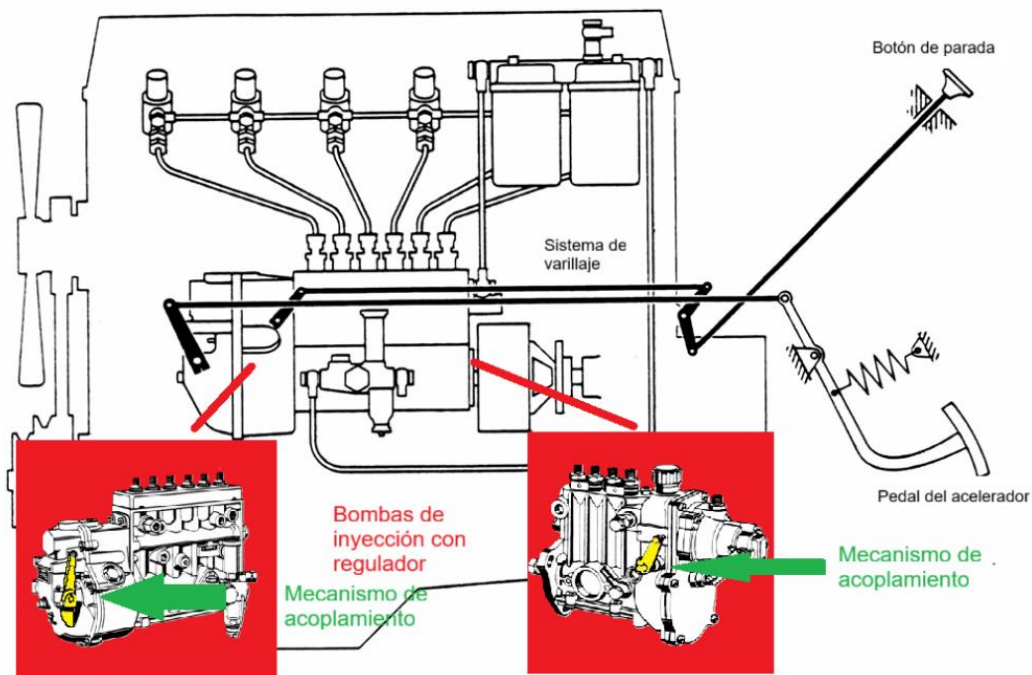


Ilustración 10. Sistema de varillaje y pedal del acelerador con bombas de inyección y regulador.

Adaptado de *Technical instruction: Fuel injection equipment for diesel engines: Governors for in-line pumps*, por Robert Bosch GmbH, 1975, Automotive Equipment Division, KH/VDT.

El efecto del pedal del acelerador sobre la bomba de combustible con regulador es lineal y se transmite a través del sistema de varillaje, mediante una barra de control. En la Ilustración 11 se muestra el funcionamiento del émbolo de la bomba en distintas condiciones de entrega (sin entrega, entrega parcial y entrega máxima). Se observa cómo el suministro de combustible depende de la posición de este elemento, presentando tres condiciones de operación: sin entrega, entrega parcial y entrega máxima. Cada una de estas posiciones corresponde a un desplazamiento particular del émbolo, lo que regula de forma proporcional la cantidad de combustible inyectado al motor.

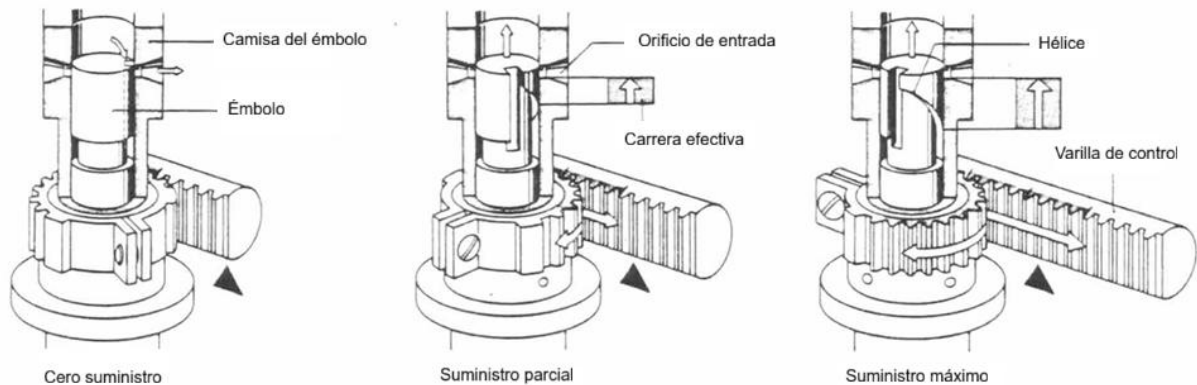


Ilustración 11. Funcionamiento del émbolo de la bomba en distintas condiciones de entrega (sin entrega, entrega parcial y entrega máxima).

Adaptado de *Technical instruction: Fuel injection equipment for diesel engines: Governors for in-line pumps* (p. [indicar si hubiera paginación]), por Robert Bosch GmbH, 1975, Automotive Equipment Division, KH/VDT

En síntesis, los sistemas de aceleración mecánicos representan una solución robusta y confiable en motores de combustión interna, donde el pedal transmite directamente el movimiento a la bomba de inyección o al cuerpo de aceleración mediante varillas, cables o palancas. Si bien su simplicidad conlleva ciertas limitaciones en términos de integración y eficiencia frente a tecnologías electrónicas más avanzadas, el estudio detallado de estos mecanismos resulta fundamental para comprender el contexto en el que operará el actuador del acelerador desarrollado en este trabajo.

Por ello, se llevó a cabo un análisis técnico, con especial énfasis en los mecanismos de acoplamiento, ya que constituyen el punto de interacción directa entre el sistema de control diseñado y el cuerpo de aceleración. Cabe destacar que este tipo de sistemas tradicionales son precisamente los disponibles en el laboratorio de la UNICE, lo que refuerza la pertinencia de su estudio para el desarrollo e implementación del prototipo propuesto.

DINAMÓMETROS AUTOMOTRICES

Un dinamómetro, es un dispositivo de prueba empleado para medir variables fundamentales como el par motor, la fuerza y la potencia entregada por motores y otros sistemas mecánicos. Las mediciones que se efectúan en estos son esenciales para determinar el rendimiento, la eficiencia y la durabilidad de un sistema, asegurando que opere dentro de parámetros adecuados [10]. Heywood, resalta que el dinamómetro constituye la herramienta más utilizada en la caracterización experimental de motores, ya que permite obtener datos precisos de potencia en condiciones controladas [11]. Killedar define el dinamómetro como tres conceptos.

En primer lugar, lo describe como un dispositivo para medir el par, fuerza y potencia en un eje rotatorio. Dentro de esta definición menciona que para medir la velocidad se emplea un tacómetro y el par se mide a través de galgas extensiométricas u otros métodos, permitiendo obtener la potencia desarrollada. Como segunda definición, se le considera como un instrumento destinado a medir potencia mecánica de un motor. Finalmente, este término también se emplea para designar a los instrumentos utilizados para la medición de la fuerza ejercida por máquinas [4].

En cuanto a las formas de realizar pruebas en base a dinamómetros hay diversas instalaciones. Existen tres métodos principales para realizar pruebas en un vehículo o motor [4]:

1. Pruebas del motor con un dinamómetro: estas pruebas se enfocan exclusivamente en el motor, permitiendo evaluar su rendimiento bajo condiciones controladas en laboratorio. En la Ilustración 12.A se muestra esta configuración.
2. Pruebas de un vehículo en un dinamómetro de chasis: en estas pruebas, se analiza el comportamiento del vehículo completo, incluyendo el motor y los sistemas de transmisión, replicando condiciones de conducción sin necesidad de mover el vehículo. En la Ilustración 12.B se muestra esta configuración.
3. Pruebas en pista de rodaje o pruebas de ruta: consisten en llevar el vehículo a una pista de pruebas real, donde se puede evaluar su rendimiento en condiciones de manejo más cercanas a las reales, como la aceleración, frenado y maniobrabilidad. En la Ilustración 12.C se muestra esta configuración.

Mientras que en la Ilustración 12 se presentan algunas de las pruebas en dinamómetros, hay otras pruebas específicas según el tipo de vehículo, como camiones de carga o de pasajeros, camionetas 4x4 y motocicletas.



(A)



(B)



(C)

Ilustración 12. Pruebas dinamométricas comunes en vehículos automotores; (A) dinamómetro de banco, (B) dinamómetro de chasis y (C) pruebas en pista.

Imagen (A) recuperada de Bing (s. f.), imagen (B) de Sáenz Dynos (s. f.) e imagen (C) de Mic V. (2013).

Killedar propone una clasificación de los dinamómetros en función del tipo de unidad de absorción o freno, también denominada PAU por sus siglas en inglés Power Absorption Unit.

Según esta clasificación, las unidades de absorción pueden subdividirse en mecánicas, hidráulicas, de corrientes parásitas y eléctricas de corriente directa o alterna [4].

Entre los primeros frenos desarrollados históricamente se encuentra el freno de Prony, creado y nombrado en honor a su creador Gaspard C. F. M. R. de Prony a inicios del siglo XIX. Su principio de operación se basa en la fricción mecánica generada por mordazas que presionan una masa inercial sujeta al eje en rotación.

La Ilustración 13 muestra el freno de Prony, donde las mordazas están acopladas a una viga que permite medir la fuerza ejercida mediante contrapesos, lo que da cabida al par desarrollado en las mordazas de madera ubicadas en la periferia de la masa inercial.

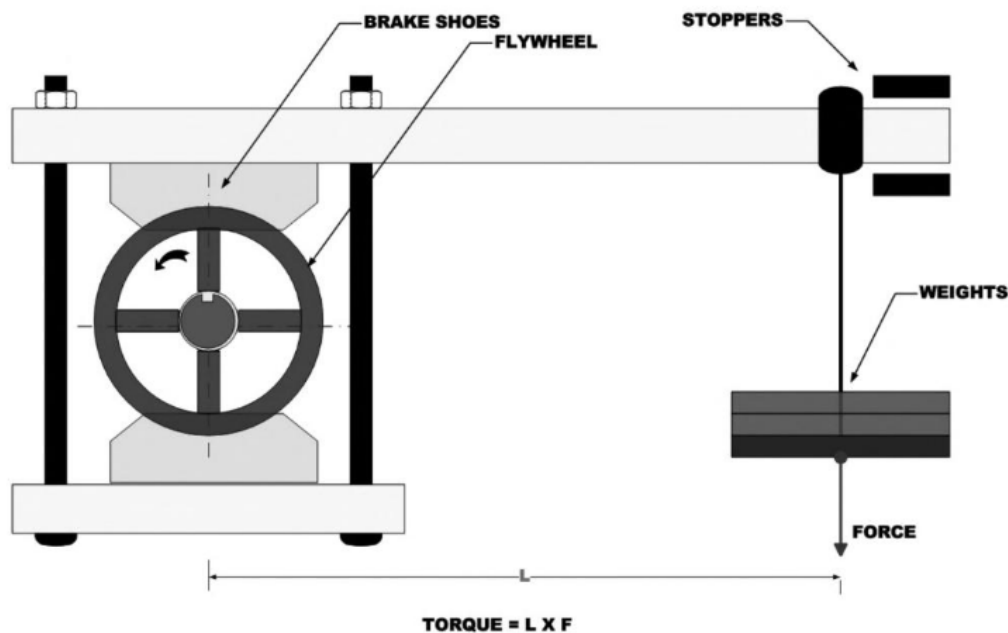


Ilustración 13. Freno de Prony.

Ilustración obtenida de Killedar (2012).

Posteriormente surgió el freno de cuerda, atribuido a Lord Kelvin en 1858, el cual constituye una evolución del diseño de Prony. En la Ilustración 14 se muestra la lógica del freno de cuerda, las mordazas se sustituyen por una cuerda enrollada alrededor de la masa inercial acoplado al eje como se muestra. Los extremos de la cuerda se conectan a una balanza de resorte y a un sistema de masas de contrapeso, permitiendo estimar el par a partir de la diferencia de tensiones generadas por la fricción [4].

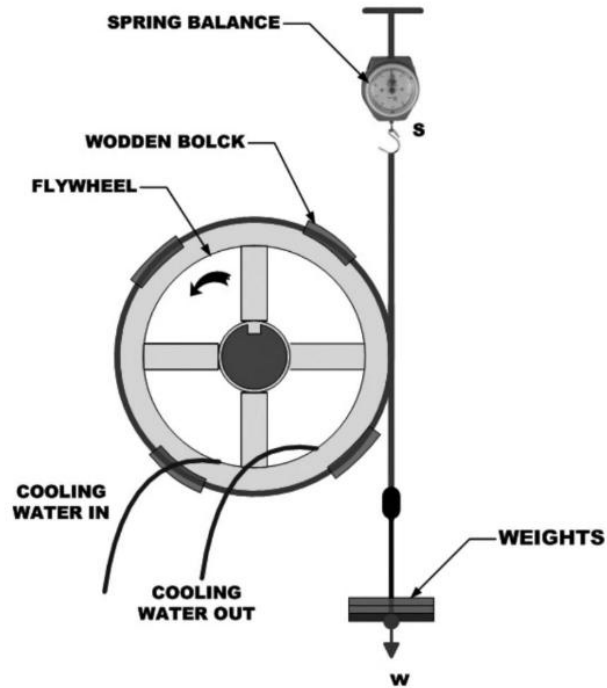


Ilustración 14. Freno de cuerda.

Ilustración obtenida de Killedar (2012).

Con el avance tecnológico, estos sistemas mecánicos dieron paso a los frenos hidráulicos, cuyo funcionamiento se basa en la disipación de energía mediante la fricción producida por una sustancia viscosa como podría ser agua o aceite. El par se genera por la interacción del fluido dentro de una cámara con elementos rotativos y estacionarios, produciendo vórtices controlados que convierten la energía mecánica en energía térmica. Los dinamómetros hidráulicos dominaron las pruebas de motores durante gran parte del siglo XX, hasta la consolidación de los sistemas eléctricos [4].

En la Ilustración 15 se presentan ejemplos de frenos tradicionales, como el freno de cuerda e hidráulico. Finalmente, considerando que en la actualidad predominan los dinamómetros que utilizan frenos eléctricos, se aborda la categoría de dinamómetros por corrientes parásitas, los cuales serán analizados con mayor profundidad debido a que son los equipos disponibles actualmente en la UNICE.



(a)



(b)

Ilustración 15. Ejemplo de dinamómetros de absorción tradicionales; (A) dinamómetro de cuerda (B) dinamómetro hidráulico.

Imagen (a) recuperada de Sunseastech (2019) e imagen (b) de Taylor Dynamometer (2018).

Los dinamómetros de corrientes parásitas o corrientes de Foucault, se denominan de esa forma debido al fenómeno descubierto por el físico Leon Foucault en 1851, este fenómeno ocurre debido a las corrientes inducidas en un conductor por un campo magnético variable.

La Ilustración 16 muestra el principio de la generación de corrientes de Foucault en una placa conductora cuando un imán se desplaza respecto a ella. El movimiento relativo entre el campo magnético del imán y la placa induce corrientes circulares en el material conductor debido a la variación del flujo magnético. Estas corrientes producen un campo magnético secundario que se opone a la variación del flujo original, generando un efecto de frenado electromagnético [4].

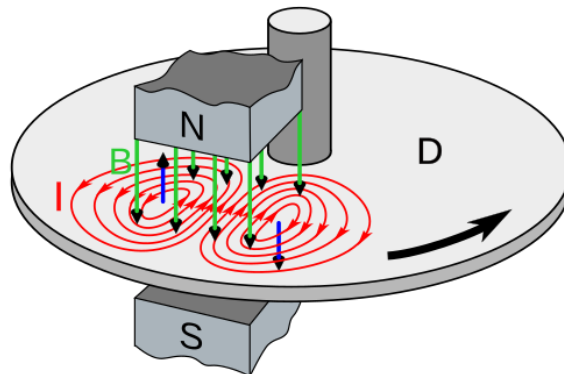


Ilustración 16. Corrientes de Foucault inducidas sobre una placa de metal conductora de electricidad.

Imagen recuperada de Geek3 (2007), en Wikimedia Commons.

Los dinamómetros de corrientes parásitas también se clasifican en dos tipos, del tipo entrehierro seco y entre hierro húmedo. Las unidades de absorción de potencia del tipo entre hierro seco necesitan de métodos indirectos para la refrigeración como el aire, en cambio los del tipo

entrehierro húmedo están parcialmente sumergidos en agua [4]. Finalmente, en la Ilustración 17 se muestra una unidad de absorción de corrientes parásitas del tipo entrehierro seco.



Ilustración 17. Unidad de absorción de potencia de corrientes parásitas.

Imagen recuperada de Trade India (2026)

CELDA DE PRUEBAS

Una celda de prueba dinamométrica integra el MCIa bajo ensayo, el sistema de absorción de carga, la instrumentación de medición y una sala de control separada físicamente del área de pruebas [3]. Esta separación responde a razones de seguridad, ventilación, control térmico y mitigación de ruido, lo que obliga a que el operador supervise y controle el motor de forma remota. Una ejemplificación de lo mencionado anteriormente puede observarse en la Ilustración 18 donde se observa que la sala de control se encuentra separada del cuarto de pruebas, en el cual está instalado el dinamómetro y la unidad bajo prueba.



Ilustración 18. Ejemplificación de celda de prueba con visibilidad a la unidad bajo prueba.

Imagen tomada de ETC (2026).

Los MCIA's se someten a pruebas con fines de investigación básica, validación de diseño, monitoreo de desempeño o control de calidad en procesos de producción. Estas actividades requieren tanto conocimientos técnicos especializados como la participación de un equipo multidisciplinario capaz de integrar las herramientas necesarias para la ejecución adecuada de las pruebas.

En el caso de estudio de la UNICE, el objetivo principal es analizar el desempeño de los motores, utilizando diversas herramientas como dinamómetros de banco y chasis para caracterizar el comportamiento del motor bajo condiciones controladas.

Desde el punto de vista energético, una celda de prueba requiere suministro de combustible, aire, sistemas de enfriamiento y energía eléctrica, mientras que como salidas se tienen potencia mecánica absorbida por el dinamómetro, gases de escape y disipación térmica. Para garantizar ensayos repetibles, todas estas variables deben mantenerse bajo condiciones controladas [12].

Debido a que el operador no se encuentra físicamente junto al motor, el control del régimen debe realizarse mediante mecanismos remotos. Tradicionalmente, este control se ha implementado mediante sistemas mecánicos de empuje-tracción tipo T, los cuales transmiten el movimiento lineal hacia la mariposa o sistema de inyección [3]. Aunque estos mecanismos son robustos y simples, pierden capacidad de evolucionar a sistemas modernos y posible automatización.

CONTROL DE ACELERACIÓN DESDE LA CONSOLA Y ACTUADORES COMERCIALES

Cuando el operador necesita manipular manualmente el motor mediante un control del acelerador de tipo esfera o mancuerna tipo T, debe contar con una manera de identificar la velocidad angular del motor de manera analógica o digital [3].

Los mecanismos de control de aceleración de esfera o manija tipo T, también conocidos como de empuje-tracción han sido empleados tradicionalmente en consolas de prueba y en vehículos debido a su simplicidad y robustez. Este sistema se compone de una varilla rígida que transmite el movimiento lineal aplicado por el operador hacia el mecanismo de mariposa o la bomba de inyección. Al empujar o tirar de la palanca, se regula directamente la apertura del acelerador, lo que permite incrementar o reducir el régimen del motor.

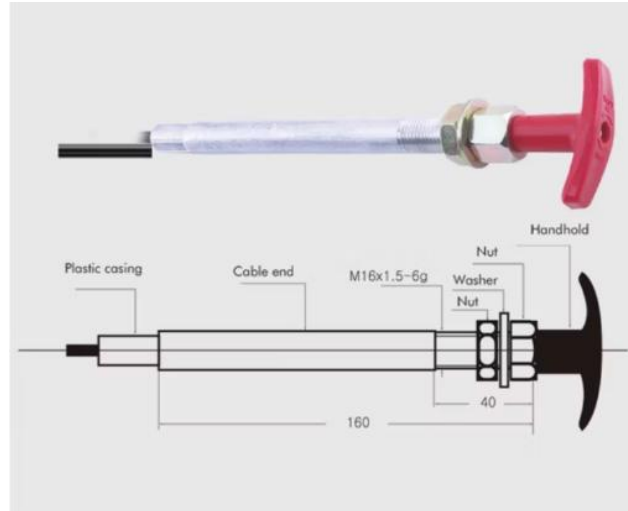


Ilustración 19. Cable de control tipo mancuerna tipo T utilizado en sistemas mecánicos de control

Imagen recuperada de Joyce Control. (s. f.). Micro adjust cable control, push-pull control head, push-pull control cable for machinery.

El mecanismo de la Ilustración 19 ofrece simplicidad mecánica al no requerir sistemas electrónicos complejos, ofrece buena fiabilidad y adaptación a diferentes tipos de motores. Además, proporciona una sensación de control directa al operador de la prueba.

No obstante, este tipo de mecanismos tiene limitaciones en cuanto a precisión, repetibilidad y automatización, que resultan fundamentales en los ensayos sobre celdas de prueba. Es aquí donde este trabajo de tesis proporciona una solución al operador para que este pueda realizar las pruebas de manera segura, repetible, precisa y exacta.

Finalmente, este mecanismo puede ser manipulado para obtener tres comportamientos diferentes:

- Mantener una apertura constante del acelerador.
- Mantener una velocidad del motor constante.
- Mantener un par del motor constante.

La unidad de absorción de potencia se manipula para obtener los siguientes comportamientos,

- Mantener una velocidad del motor constante.
- Mantener una carga constante.
- Reproducir una característica particular de par-velocidad.

Así mismo, estas configuraciones pueden aplicarse de manera combinada para obtener el resultado deseado en las pruebas [3].

A continuación, se aborda el tema de cables de control, puesto que el actuador elaborado en este trabajo posee uno, así como los actuadores disponibles en el mercado pensados para el accionamiento de mecanismos de aceleración tradicionales.

CABLES DE CONTROL

Los cables de control de empuje-tracción son mecanismos diseñados para transmitir fuerza o movimiento mecánico a distancia mediante empuje, tracción o una combinación de ambos. Estos sistemas permiten implementación en una amplia gama de aplicaciones industriales, automotrices, marinas y aeronáuticas, donde se requiere precisión, seguridad y durabilidad [13].

Para el prototipo desarrollado se optó por un cable de control Bowden o de tensión, al que denominaremos cable de tracción simple, por ofrecer simplicidad, flexibilidad y adaptabilidad a sistemas mecánicos debido a sus opciones de configuración [14].

La elección de un cable de tracción simple se debe a que los sistemas de aceleración utilizados en la UNICE suelen contar con un resorte de retorno, el cual garantiza el cierre mecánico del actuador sin necesidad de aplicar una fuerza en sentido contrario. Por esta razón, el uso de un cable de tracción simple resulta adecuado, ya que simplifica la implementación mecánica y permite una mayor flexibilidad del cable. En caso de que se requiera un sistema que permita control bidireccional, es decir, que no tenga resorte de retorno el uso de un cable que permita ejercer presión y tensión deberá considerarse [15].

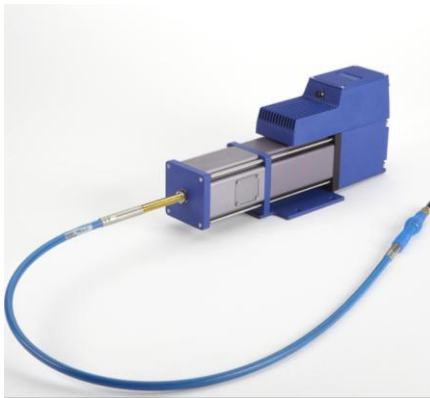
ACTUADORES DE SISTEMAS DE ACELERACIÓN

Como parte del análisis de los distintos actuadores empleados en el control de aceleración de motores de combustión interna, se propone una clasificación general en dos categorías, de acuerdo con su principio de funcionamiento:

- **Mecánicos:** aquellos que operan exclusivamente mediante elementos físicos, como palancas, cables o pedales, y cuyo accionamiento es completamente manual.
- **Electromecánicos:** sistemas que combinan componentes eléctricos con motores de corriente directa (CD), permitiendo la automatización parcial del control mediante señales eléctricas.
- **Robotizados:** mecanismos avanzados que simulan el movimiento humano a través de actuadores programables y algoritmos de control, generalmente integrados en plataformas automatizadas o de prueba dinámica.

La Ilustración 20 presenta ejemplos de actuadores comerciales utilizados en sistemas de aceleración para aplicaciones en bancos de prueba. En la Ilustración 20.A se muestra un actuador compacto diseñado para integración directa con sistemas dinamométricos, caracterizado por su configuración lineal y transmisión mediante cable flexible. La Ilustración 20.B corresponde a un actuador orientado específicamente a pruebas de banco, cuya

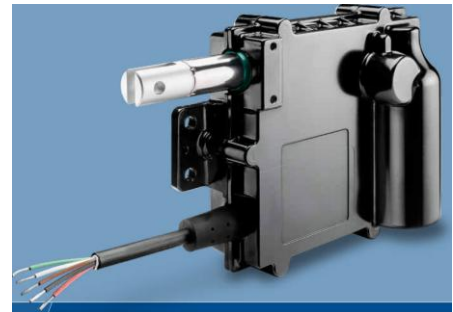
arquitectura permite su instalación remota y acoplamiento mecánico al sistema de aceleración existente. Finalmente, en la Ilustración 20.C se observa un actuador electromecánico de propósito para aplicaciones de aceleración de motores, empleado en aplicaciones industriales donde se requiere posicionamiento lineal controlado.



(A)



(B)



(C)

Ilustración 20. Actuadores comerciales para sistemas de aceleración; (A) actuador AVL COMPACT, (B) actuador AVL para pruebas de banco y (C) actuador Thompson de aceleradores.

Imagen (A) obtenida de IndiaMART (2016), imagen (B) obtenida de AVL (2024) e imagen (C) obtenida de Thomson (2024).

Estos dispositivos comparten el principio de convertir una señal eléctrica en un desplazamiento lineal capaz de regular la posición del mecanismo de aceleración. Su implementación en celdas de prueba permite separar el control del acelerador de la intervención manual directa, facilitando la integración con sistemas de adquisición de datos y control automatizado. La disponibilidad comercial de este tipo de soluciones confirma la necesidad técnica del enfoque adoptado en el presente trabajo, al tiempo que establece un marco de referencia para el desarrollo del actuador propuesto y posibilidad de automatizar el dinamómetro en un futuro.

En aplicaciones de control de aceleración, los actuadores electromecánicos suelen incorporar motores de corriente continua o motores paso a paso, acoplados a un tornillo de avance o a un sistema reductor, con el objetivo de incrementar el par disponible. Su desempeño depende directamente de la interacción entre la carga mecánica, la velocidad de rotación y la capacidad del controlador para modular con precisión la posición o el par de salida. Estas características los ubican como una solución intermedia entre los sistemas puramente mecánicos y los actuadores electrónicos de alto desempeño utilizados en bancos de pruebas modernos.

Con base en la experiencia adquirida durante la búsqueda de sistemas de aceleración en bancos de prueba, es posible proponer una clasificación funcional de actuadores según la forma en que transmiten el movimiento al mecanismo de aceleración. Desde este enfoque, los actuadores pueden agruparse en dos configuraciones principales:

- Actuadores lineales a distancia: aquellos que convierten el movimiento rotacional del motor en desplazamiento lineal para accionar un cable tractor.
- Actuadores rotacionales acoplados directamente: son los que genera un movimiento angular aplicado directamente sobre el eje del acelerador.



(A)



(B)

Ilustración 21. Configuraciones de actuadores para sistemas de aceleración: (A) conversión de movimiento rotacional a lineal para accionamiento por cable; (B) accionamiento angular directo sobre el eje del acelerador.

Imagen (A) obtenida de Schmedmann Cruice control (s. f.) e imagen (B) obtenida de AT power (s. f.).

La primera categoría, mostrada en la Ilustración 21.A, corresponde a actuadores que emplean un sistema de reducción y un elemento circular o tambor para transformar la rotación del motor eléctrico en movimiento lineal. Este desplazamiento es transmitido mediante un cable flexible hacia la mariposa o sistema de inyección, conservando la arquitectura mecánica tradicional basada en empuje-tracción y la distancia de accionamiento del actuador.

La segunda configuración, mostrada en la Ilustración 21.B, acopla el actuador directamente al eje del acelerador. En este caso, el motor eléctrico produce un desplazamiento angular controlado que regula de manera directa la apertura de la válvula mariposa.

Finalmente, mientras que el accionamiento por cable facilita la adaptación a sistemas previamente instalados, el accionamiento angular directo ofrece una integración más compacta y potencialmente mayor precisión en el control de posición. Por ello fue por lo que para el prototipo presente en este trabajo se utiliza el accionamiento por cable, permitiendo así, una facilidad a la hora de instalarlo en diversos sistemas de aceleración.

A continuación, se presentan algunos de los actuadores disponibles en el mercado en el momento que se escribe este documento. Cabe destacar que no se incluyen en este análisis los sistemas de acoplamiento directo al eje de la válvula mariposa, ya que en su mayoría estos no son comerciales.

Para establecer un panorama claro sobre las soluciones comerciales existentes, se elaboró la Tabla 1, que resume las principales características de los actuadores de aceleración disponibles en el mercado. En ella se identifican aspectos técnicos como el principio de operación, aplicación, ventajas, limitaciones y un rango de precios estimado a partir de las referencias en internet.

Los actuadores encontrados en el mercado cuentan con ciertas limitaciones en cuanto al costo, disponibilidad y documentación pública, por lo que esto motiva a la construcción de un actuador para sistemas de aceleración.

El análisis de los actuadores de aceleración disponibles en el mercado permite identificar la diversidad de tecnologías actualmente empleadas en los bancos de prueba automotrices, todos comparten el objetivo de reproducir con precisión el accionamiento del acelerador en condiciones controladas. Sin embargo, los resultados del estudio comparativo muestran que, aunque estos dispositivos ofrecen un desempeño sobresaliente, su costo y grado de integración los vuelven poco accesibles para entornos académicos o de investigación con recursos limitados. Por esta razón, se plantea el desarrollo de un actuador propio que conserve la funcionalidad y precisión de los equipos comerciales, pero con una estructura adaptable, de menor complejidad y costo reducido, adecuada para los dinamómetros disponibles en la UNICE.

Tabla 1. Comparación de algunos actuadores comerciales encontrados en la web.

Fabricante / Modelo	Aplicación principal	Ventajas	Limitaciones	Precio estimado
AVL – Throttle Actuator Compact [16]	Bancos dinámicos de motor y chasis	Alta precisión, diseño compacto, integración con sistemas AVL	Costo elevado, documentación técnica restringida	Precio desconocido
AVL – Actuators for Engine, Powertrain, and Vehicle Testbeds [17]	Pruebas de motor, tren motriz e híbridos	Versatilidad, soporte industrial, precisión controlada	Requiere integración con software AVL, alto costo	Precio desconocido
Thomson – Actuador lineal Electrak [18]	Desplazamiento lineal	Alta fuerza lineal, diseño robusto, mantenimiento mínimo	Menor velocidad de respuesta frente a actuadores rotativos, sin realimentación.	Hasta 6000 MXN, modelo Electrak D12-20b5-08z1)

CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL ACTUADOR

Para el diseño conceptual del actuador se plantea el desarrollo de un mecanismo capaz de generar un movimiento lineal controlado, similar al mecanismo presentado en la Ilustración 2. Se opta por este tipo de movimiento debido a que permite aprovechar el sistema de acoplamiento presente en los motores de la UNICE, lo cual facilita la integración del actuador logrando la compatibilidad entre sistemas de aceleración.

En la Ilustración 22 se muestra un ejemplo de mecanismo de acoplamiento que se busca conservar perteneciente al motor V6 que se encuentra en la UNICE. Este consiste en un cable tractor simple que se conecta al sistema de accionamiento del acelerador, en este caso a un cuerpo de aceleración que interactúa con la válvula mariposa mediante una palanca de acelerador.

El cable tractor se fija a un punto estructural denominado pivote, el cual funciona como punto de anclaje del sistema. A partir de este punto, el movimiento transmitido por el cable sigue una trayectoria lineal debido a la interacción del cable tractor con la palanca del acelerador. De esta manera, la fuerza generada por el actuador se transmite hacia el sistema de accionamiento de la válvula, produciendo su apertura o cierre.

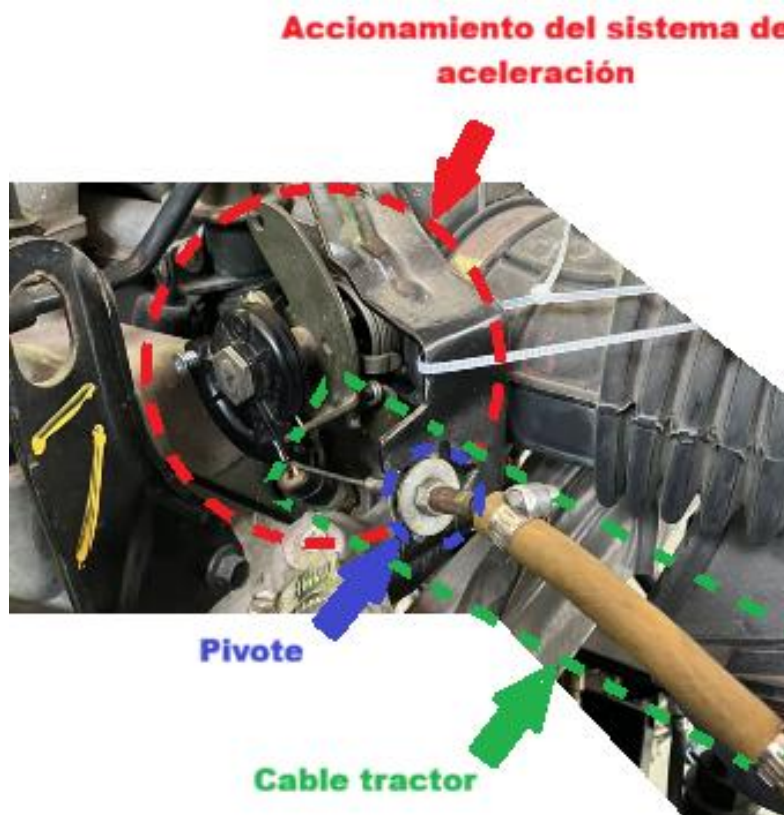


Ilustración 22. Mecanismo de acoplamiento como idea conceptual del diseño del actuador

Para accionar el mecanismo de aceleración es necesario incorporar un elemento capaz de generar el movimiento requerido de forma controlada. Debido a que el sistema forma parte de un entorno de pruebas instrumentado, se requiere que el actuador pueda ser regulado mediante señales provenientes del sistema de control. Por esta razón, se selecciona un motor eléctrico como elemento de accionamiento, ya que permite transformar energía eléctrica en movimiento mecánico de forma controlable y repetible.

En la Ilustración 23, se muestra en ejemplo de motor de CD, que utilizaremos en el prototipo, conocido como motor paso a paso al cuál lo llamaremos motor PaP a lo largo del documento. Su elección recae sobre su integración con sistemas digitales la cual resulta sencilla, ya que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, o también conocidos como pasos. De esta forma, el motor puede girar una cantidad específica de pasos determinada por las señales de control [16].



Ilustración 23. Motor eléctrico como fuente de movimiento.

Tomado de Grassi, M. (s.f.). Motores paso a paso. En Mecatrónica.

Por otro lado, los motores PaP operan bajo una estrategia de control de lazo abierto, es decir, operan en función del tiempo sin tener certeza de la posición real del eje del motor. Para hacer el sistema más robusto y obtener una realimentación de la posición del eje del motor, se opta por una estrategia de control de lazo cerrado PID, que permite ajustarse de forma automática ante cualquier desviación o perturbación.

Para la medición angular en el actuador se seleccionó el sensor AS5600, un codificador rotatorio magnético absoluto de 12 bits, el cual proporciona una resolución angular de 0.088° por bit, suficiente para tareas de control de posición en un sistema de avance lineal por husillo. Lo cual resulta en una resolución más fina de la que el motor puede alcanzar siendo la resolución del codificador de $2 [\mu m]$ contra los $2.5 [\mu m]$ del motor en una configuración de 1/16 pasos.

De forma experimental se determinó que la forma más sencilla de obtener movimiento lineal a partir de un motor rotativo es mediante un mecanismo de transmisión basado en un husillo o tornillo sinfín con tuerca, el cual convierte el giro del eje del motor en desplazamiento lineal.

La Ilustración 24 muestra la estructura conceptual propuesta para el actuador, basada en un mecanismo de accionamiento lineal mediante un husillo, tuerca tipo T y barras lisas que funcionan como guías para reducir la fricción y evitar desplazamientos radiales. En este sistema, la tuerca se encuentra acoplada a un elemento móvil el cual se denomina deslizador o carro y sobre este irá ensamblado un extremo del cable tractor.

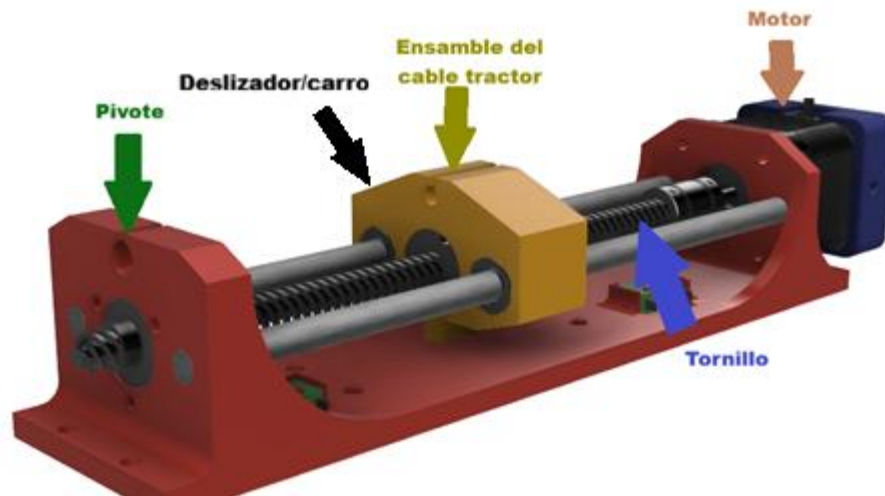


Ilustración 24. Estructura conceptual del actuador.

Por su parte, la Ilustración 25 muestra el funcionamiento del actuador para accionar el sistema de aceleración transformando el movimiento rotacional del motor en desplazamiento lineal. En la parte izquierda se representa el cuerpo de aceleración, donde se encuentra la mariposa del acelerador. A este elemento está conectada la palanca del acelerador, la cual gira alrededor de su eje cuando se aplica una fuerza sobre ella y cuando el cable se tensa, provoca el giro de la palanca, lo que produce la apertura de la válvula mariposa del acelerador.

En la parte derecha se muestra el actuador acoplado al cable tractor, al girar el husillo, la tuerca se desplaza linealmente a lo largo de él, luego se transmite al cable, produciendo tensión en el mismo. Entre el actuador y el cable se incorpora un pivote o punto de articulación, que permite adaptar la dirección del movimiento y facilita la transmisión de la fuerza.

Las flechas en azul incluidas en la ilustración indican de forma conceptual los sentidos de giro y desplazamiento de los distintos elementos del sistema, mostrando cómo el movimiento generado por el husillo termina convirtiéndose en el accionamiento rotacional de la palanca del acelerador.

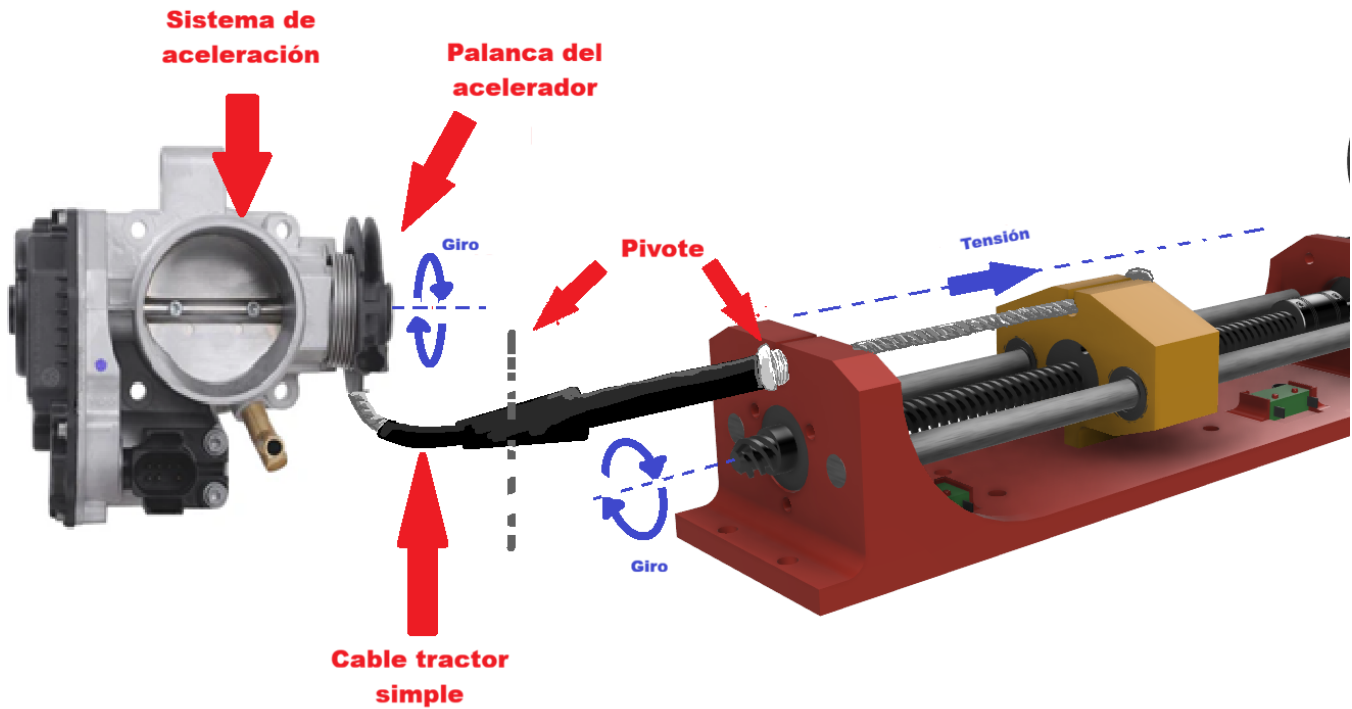


Ilustración 25. Dinámica del actuador con ejemplificación de movimiento.

Para explicar el diseño del actuador, se ha dividido en tres secciones; el diseño mecánico, que abarca las piezas manufacturadas y ensamble de los componentes mecánicos; el diseño electrónico, que describe los circuitos empleados en el actuador; y la programación, donde se explica el proceso para lograr controlar la posición del deslizador y por ende la posición del sistema de aceleración.

COMPONENTES COMERCIALES SELECCIONADOS

En esta sección se detalla los elementos que conforman el actuador propuesto, considerando un análisis previo de los materiales disponibles y la justificación técnica de su selección. Inicialmente, la elección de componentes se fundamenta en criterios de disponibilidad comercial y facilidad de adquisición en el contexto académico, sin comprometer la funcionalidad del sistema.

La Ilustración 26, muestra los elementos que fueron adquiridos como componentes estándar con el fin de garantizar precisión dimensional y repetibilidad:

1. Husillo multihilo de 8 mm
2. Motor paso a paso NEMA 17 modelo 17HS8401
3. Cople flexible D18L25 5–8 mm motor–husillo
4. Tuerca tipo T
5. Varillas lisas de 8 mm
6. Rodamientos lineales LM8UU
7. Rodamiento de soporte KP08
8. Interruptores para límites de carrera KW12.

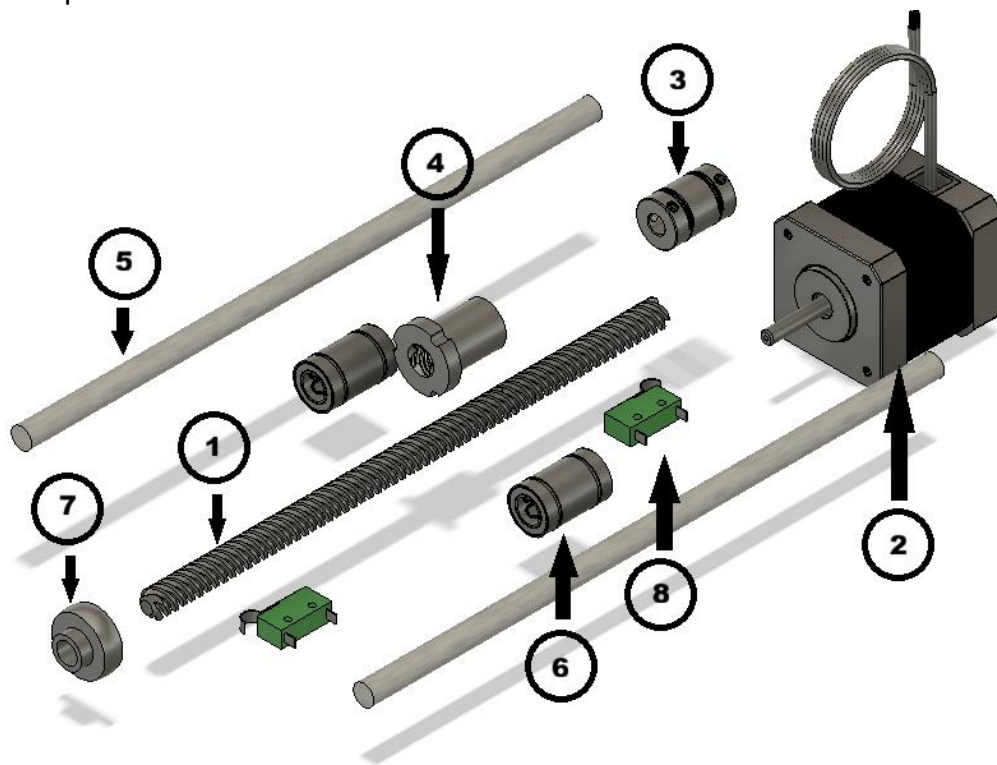


Ilustración 26. Explosivo de ensamble para componentes adquiridos.

Las características del tornillo elegido son:

- Paso de 2 mm
- Diámetro de 8 mm
- Avance de 8 mm
- Cuerda de 4 hilos

Este diseño multihilo permite que, por cada revolución completa del husillo, la tuerca se desplace 8 mm lineales, lo cual aumenta la velocidad de desplazamiento sin sacrificar precisión en el guiado. El paso de 2 mm por hilo proporciona una buena relación entre resolución mecánica y rapidez de operación, mientras que el perfil trapezoidal asegura una alta capacidad de carga y resistencia al desgaste, siendo ideal para aplicaciones donde se requiere repetibilidad y rigidez, como en el caso del actuador implementado en esta tesis. En la Ecuación 1 se muestra el cálculo para el avance por revolución de un husillo multihilo [17].

Ecuación 1

$$A = P * n$$

Donde A es el avance por revolución, P es el paso del husillo y n es el número de hilos de entrada. De esta forma una revolución de 360°, permitirá a la tuerca tipo T avanzar una distancia de 8 [mm] ya que tiene un paso de 2 [mm] y 4 hilos de entrada.

La elección de utilizar un motor a pasos recae sobre su integración con sistemas digitales que resulta sencilla, ya que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos. De esta forma, el motor puede girar una cantidad específica de pasos determinada por las señales de control [16].

La selección del motor NEMA 17 modelo 17HS8401 se realizó considerando su capacidad de par sostenido, ya que los sistemas de aceleración automotriz requieren fuerzas de máximo 55 [N] [21]. Este motor proporciona un par sostenido aproximado de 55 [N*cm] en el eje, la Ecuación 2 determina la fuerza (Q) entregada por un husillo en función de la eficiencia (η), el par (T) y el avance (A) que entregará el husillo [17].

Ecuación 2

$$Q = \eta \frac{2\pi * T}{A} \frac{1}{1000}$$

Se sabe que la eficiencia de este tipo de husillos suele estar entre un rango del 15% al 85%, dependiendo de la calidad del material y forma del husillo, lubricación, avance, así como las características de la tuerca [22]. Con esta información si se considera el peor de los escenarios cuando la eficiencia es igual al 15%, es decir, $\eta = 0.15$, con un par proporcionado por el motor

de 0.55 [Nm] y un avance de 8 [mm] el husillo entregaría una fuerza útil de 65 [N] por lo que se supera la carga máxima experimentada por algunos sistemas que es de 55 [N] [17].

El motor Nema 17 17HS8401 tiene un paso de 1.8 [°], conociendo que el avance es de 8 [mm] por cada 360°, cuando este de un paso tendremos una resolución de 0.04 [mm] o 40 [μm]. En cambio, si seleccionamos pasos medios o micropasos podemos alcanzar una resolución de hasta 2.5 [μm] debido a que el paso original puede dividirse hasta una razón de 1/16.

Los componentes más relevantes del sistema son el husillo de avance y el motor a pasos, los cuales determinan la conversión del movimiento rotacional en desplazamiento lineal, así como la capacidad de fuerza y resolución del actuador. No obstante, el funcionamiento adecuado del mecanismo requiere además de elementos auxiliares de transmisión, guiado, soporte y detección de posición límite.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los componentes mecánicos requeridos junto con sus principales características dimensionales y eléctricas. Esta información permite identificar las especificaciones técnicas de los elementos estándar empleados en la construcción del actuador, particularmente aquellos que no fueron analizados en detalle en los apartados anteriores.

Tabla 2. Resumen de componentes adquiridos

Componente	Características
(1) Husillo ACME	Avance de 8 [mm], perfil trapezoidal, 4 hilos, longitud de 210 [mm].
(2) Motor Nema 17 17HS8401	1.8 [A] x fase, par 55 [N cm], paso de 1.8°, eje 22xφ5 [mm], voltaje nominal de 12 a 24 [V]
(3) Cople flexible D18L25	Longitud de 25 [mm], $\phi_{in} 5 \times \phi_o 8$ [mm], diámetro externo de 19 [mm]
(4) Tuerca tipo T	Longitud de 15 [mm], diámetro de 22 [mm].
(5) Varilla lisa	Diámetro 8 [mm], acero 1045, longitud de 224 [mm].
(6) Rodamientos lineales LM8UU	Diámetro interno de 8 [mm], diámetro externo 15 [mm], largo de 24 [mm]
(7) Rodamiento	Dimensiones 55x28x13 [mm], d. interior de 8 [mm], con opresores para fijación de 1.5 [mm]
(8) Interruptores Kw12	Corriente máxima de 5 [A] a 250 [V], dimensiones 20.2x10.4x6.4 [mm], cola de 19 [mm].

BASE DEL ACTUADOR

Para el modelado de la base y ensamble se empleó un software de Diseño Asistido por Computadora (por sus siglas en inglés, CAD) el software Fusion 360, fue seleccionado por su practicidad y compatibilidad con herramientas de diseño y manufactura. Este diseño de la base mecánica del actuador se realizó mediante un enfoque empírico-experimental, apoyado en recomendaciones del equipo del laboratorio.

La Ilustración 27 muestra la base que constituye el elemento portante del actuador. Esta pieza integra en una sola geometría la plataforma inferior y dos soportes laterales, diseñados para alojar los componentes del sistema de transmisión. En cada uno de los extremos se observan perforaciones circulares y orificios de fijación que permiten ensamblar los rodamientos de soporte y el motor del actuador. Asimismo, en la base se incluyen orificios destinados a la fijación del conjunto al chasis o estructura donde será instalado el actuador.

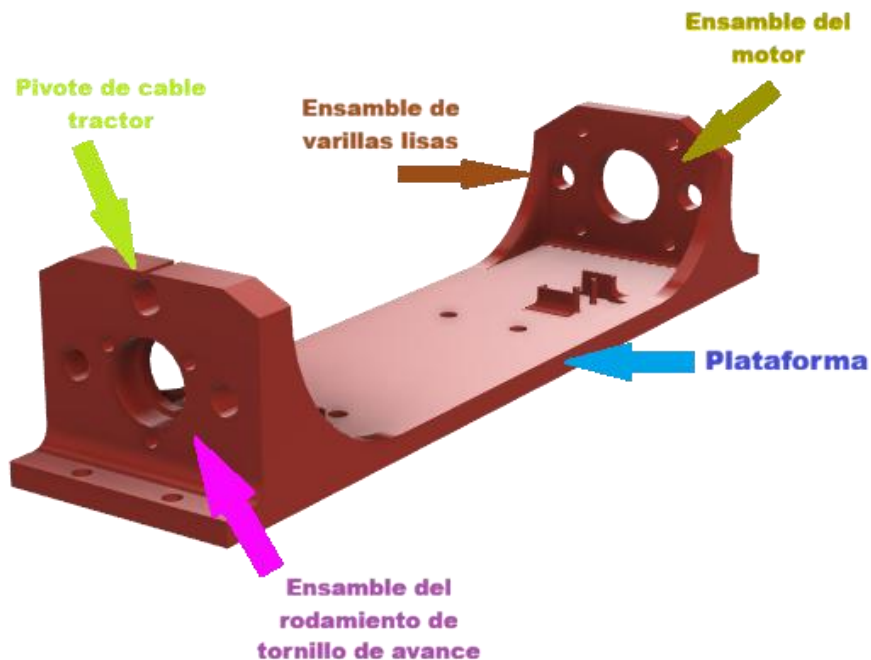


Ilustración 27. Base del actuador

Esta pieza busca proporcionar rigidez estructural, mantener la alineación entre el tornillo de avance y las guías lineales, y facilitar el ensamble de todos los elementos mecánicos del sistema. Por esta razón, se adoptó una arquitectura basada en:

- Tornillo de avance tipo ACME
- Dos varillas lisas como guías
- Rodamientos lineales para reducción de fricción

Esta configuración permite transformar el movimiento rotacional en desplazamiento lineal, mientras las guías absorben esfuerzos laterales y mantienen la alineación bajo carga.

DESLIZADOR O CARRO

El deslizador constituye la parte móvil del sistema. Se acopla a la tuerca del tornillo de avance, convirtiendo el giro del motor en desplazamiento lineal. El guiado se realiza mediante rodamientos lineales montados sobre varillas lisas, lo que reduce la holgura transversal y mejora la estabilidad del movimiento. La salida mecánica del carro es la encargada de transmitir el movimiento al sistema de tracción por cable.

En la Ilustración 28.A se presenta el modelo tridimensional de la pieza estructural del deslizador, la cual fue diseñada para acoplarse al sistema de transmisión y guiado del actuador. Esta pieza incorpora alojamientos cilíndricos destinados a la instalación de rodamientos lineales, que permiten el desplazamiento suave del carro sobre las varillas guía, así como un orificio central destinado al montaje de la tuerca tipo T que se acopla al tornillo de avance.

En la Ilustración 28.B se muestra el ensamble del deslizador con sus componentes, incluyendo la tuerca tipo T y los rodamientos lineales. La tuerca se acopla al tornillo de avance, transformando el movimiento rotacional del motor en desplazamiento lineal, mientras que los rodamientos permiten un guiado estable sobre las varillas lisas, reduciendo la fricción y evitando movimientos laterales durante la operación del actuador. Este conjunto constituye el elemento móvil principal del sistema, encargado de transmitir el desplazamiento lineal generado por el mecanismo de accionamiento.

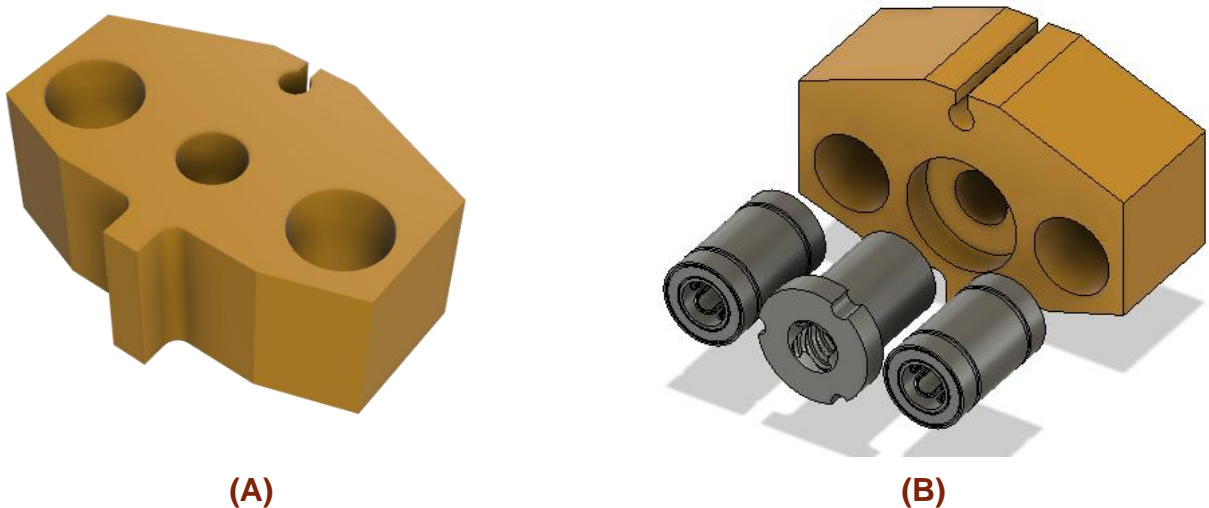


Ilustración 28. Deslizador o carro propuesto; (A) deslizador, (B) ensamble deslizador con tuerca T y rodamientos.

SISTEMA DE RETROALIMENTACIÓN

Se diseñó una tapa para el motor paso a paso que integra el sensor o codificador rotatorio. Esta tapa permite:

- Montaje concéntrico del sensor respecto al eje
- Posicionamiento controlado del imán
- Separación adecuada para lecturas estables

La realimentación juega un papel esencial en los sistemas de control de lazo cerrado, ya que permite al actuador ajustarse de forma automática ante cualquier desviación. En nuestro caso, la variable de salida es la posición angular, por lo que se utiliza el codificador rotatorio AS5600 que es un sensor magnético unipolar que traduce el movimiento mecánico en señales eléctricas, digital o analógica [18].

La Ilustración 29 muestra el diseño de la tapa posterior del motor a pasos. En la Ilustración 29.A se presenta el modelo de la tapa diseñada, cuya geometría permite fijarse al cuerpo del motor y al mismo tiempo proporcionar el espacio necesario para la integración del sensor. Por su parte, la Ilustración 29.B muestra el ensamble de los elementos que conforman el sistema de medición de posición, incluyendo el motor paso a paso, el imán acoplado al eje, la tapa de soporte y la tarjeta de circuito impreso donde se monta el codificador magnético AS5600. Esta configuración permite realizar la lectura de la posición angular del eje del motor, información que posteriormente es utilizada por el sistema de control para el seguimiento de posición del actuador.

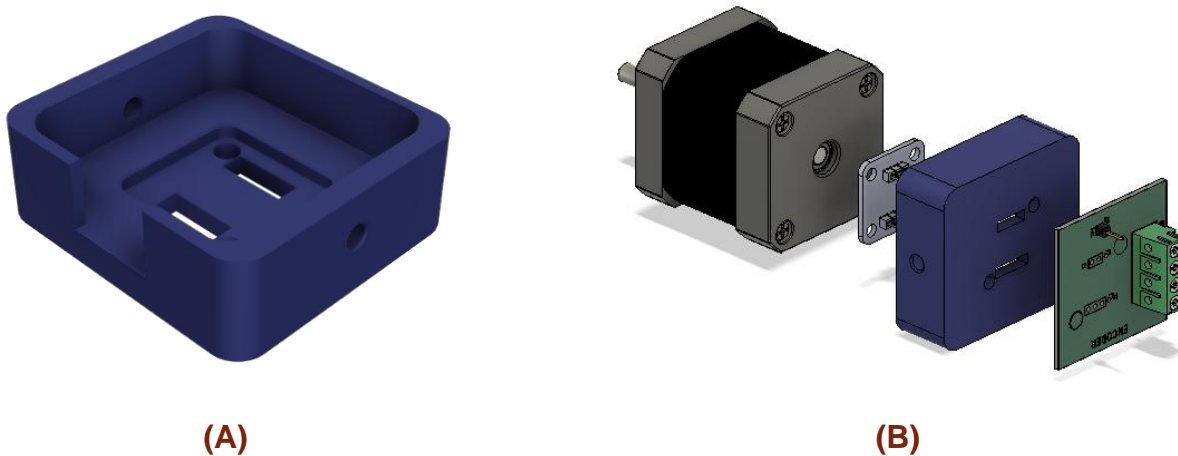


Ilustración 29. Tapa del motor PaP que alberga el codificador as5600; (A) tapa del motor PaP, (B) ensamble con codificador As5600, motor PaP y tarjeta para interconexión.

DISEÑO ELECTRÓNICO

Los circuitos empleados en el actuador se encargan de ejecutar las tareas necesarias para generar un efecto directo sobre el accionamiento del cable tractor, el cual se encuentra acoplado a la salida del husillo de avance. Esta capa es fundamental para materializar la lógica de control, permitiendo que las señales digitales del microcontrolador se traduzcan en acciones mecánicas.

El diseño se dividió en submódulos que abarcan:

- Etapas de potencia
- Interfaz con sensores
- Acondicionamiento de señales
- Lógica.

Esta estructura modular permite un análisis sistemático de cada circuito involucrado y facilita futuras ampliaciones o mantenimientos al sistema. Para analizar cómo se estructuraron los componentes principales del sistema de control del actuador, se presenta a continuación una arquitectura de control en lazo cerrado a nivel de diagrama de bloques, como paso previo a la revisión del diagrama eléctrico detallado.

En la Ilustración 30 se presenta el diagrama a bloques de los componentes electrónicos físicos del actuador. La señal de entrada es procesada por el controlador basado en Arduino UNO R3, el cual envía señales al controlador A4988 alimentando al motor PaP y produciendo movimiento mecánico. La posición del motor es medida por el codificador de posición AS5600, cuya señal es enviada de regreso al controlador como realimentación. Adicionalmente, se incluyen las señales de límites de carrera, las cuales actúan como restricciones de operación para evitar desplazamientos fuera del rango permitido.

El diagrama omite el detalle del cableado, representando las interconexiones mediante buses, donde el número indicado corresponde a la cantidad de conductores entre bloques.

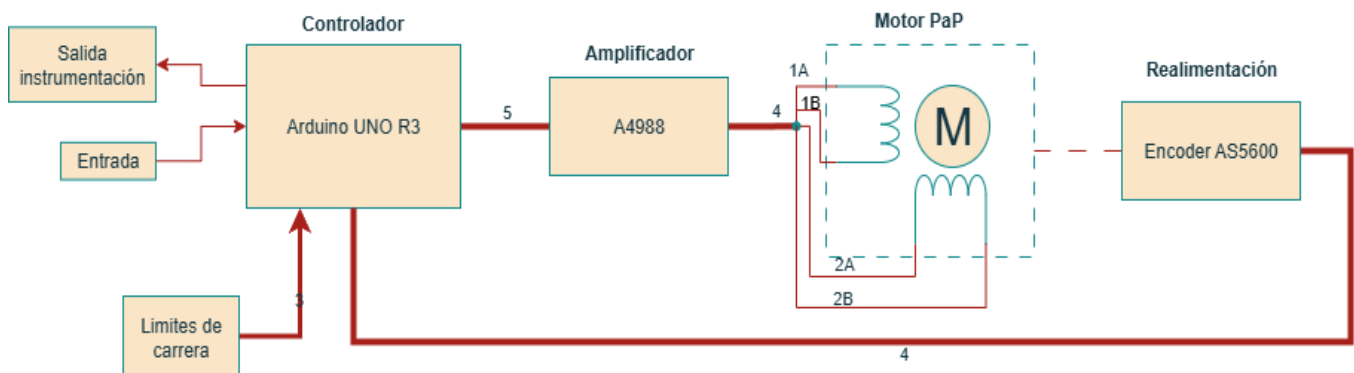


Ilustración 30. Diagrama a bloques de los componentes electrónicos físicos del actuador.

TARJETA DE DESARROLLO ARDUINO UNO R3

El circuito principal del actuador, a manera de prototipado se ha implementado sobre una tarjeta de desarrollo Arduino UNO R3 tal y como se puede observar en la Ilustración 30, es el encargado de ejecutar las tareas de control necesarias para llevar al actuador a la posición lineal deseada. Para ello, emplea diversos periféricos internos, terminales digitales de propósito general, convertidores analógico-digitales (del inglés, ADC), interfaces de comunicación I2C, módulos PWM (Pulse-Width Modulation), entre otros.

Esta tarjeta se eligió debido a su versatilidad, facilidad de uso y compatibilidad con diversos periféricos, fue seleccionada como plataforma de desarrollo principal para este proyecto. Esta decisión toma en cuenta que la mayoría de los estudiantes involucrados en el laboratorio no necesariamente cuentan con experiencia en programación de arquitecturas enfocadas a la industria.

La tarjeta de desarrollo recibe diversas señales de entrada que permiten gestionar de forma segura y precisa el funcionamiento del actuador. Entre estas señales se encuentran:

- Entradas de límite de carrera, utilizadas para evitar colisiones mecánicas con los extremos de la estructura del actuador.
- Señal de control, consiste en un voltaje de entrada proveniente de un potenciómetro o un DAC (del inglés, Digital to Analog Converter), el cual define la posición deseada del sistema.
- Señal de realimentación de posición, proporcionada por el codificador magnético AS5600, el cual transmite la posición angular del eje a través de una interfaz de comunicación I2C bidireccional, permitiendo tanto la lectura del valor actual como la configuración del sensor.
- Salidas digitales generadas por el controlador dirigidas al controlador del motor PaP, y consisten en señales digitales que definen la dirección de giro, la habilitación, el número de pasos y el modo de operación (resolución de micro pasos), permitiendo así el accionamiento lineal preciso del sistema.
- Salidas PWM dirigida a la instrumentación externa, con el objetivo de informar el porcentaje de aceleración aplicado por el actuador. Esta señal puede expresarse como un valor entre 0 % y 100 %, representando el nivel de apertura o cierre relativo de la válvula mariposa, o bien la proporción de avance lineal respecto al recorrido total del actuador.

La Ilustración 32 muestra la tarjeta de desarrollo Arduino Uno R3, la cual constituye el núcleo electrónico del sistema propuesto. En la imagen se pueden identificar sus componentes principales, tales como el microcontrolador ATmega328P, el puerto de comunicación USB tipo B, el conector de alimentación de y las regletas de pines digitales y analógicos fundamentales

para la interfaz con la celda de prueba. Asimismo, se aprecian elementos de soporte críticos como el oscilador de cristal, el botón de reinicio y los LEDs indicadores de estado.



Ilustración 31. Arduino uno rev3

Tomado de *Arduino UNO R3 datasheet (A000066)* [PDF], por Arduino, s.f., en Arduino Documentation. Recuperado de <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>

CARACTERÍSTICAS

La tarjeta de desarrollo Arduino Uno R3, cuya apariencia física se detalla en la Ilustración 31, integra un microcontrolador ATmega328P de arquitectura AVR que opera a una velocidad de reloj de 16 MHz. Su organización interna se describe a grandes rasgos en el diagrama de bloques de la Ilustración 32, el cual ilustra la interconexión entre la unidad de gestión de energía (POWER), los módulos de memoria y los periféricos de entrada/salida de propósito general. Este esquema resalta los componentes críticos para el control del actuador, tales como los temporizadores para la generación de señales PWM, el convertidor analógico-digital (ADC) y los protocolos de comunicación UART e I2C. Cabe precisar que la ilustración se centra exclusivamente en las características internas aprovechadas para este proyecto.

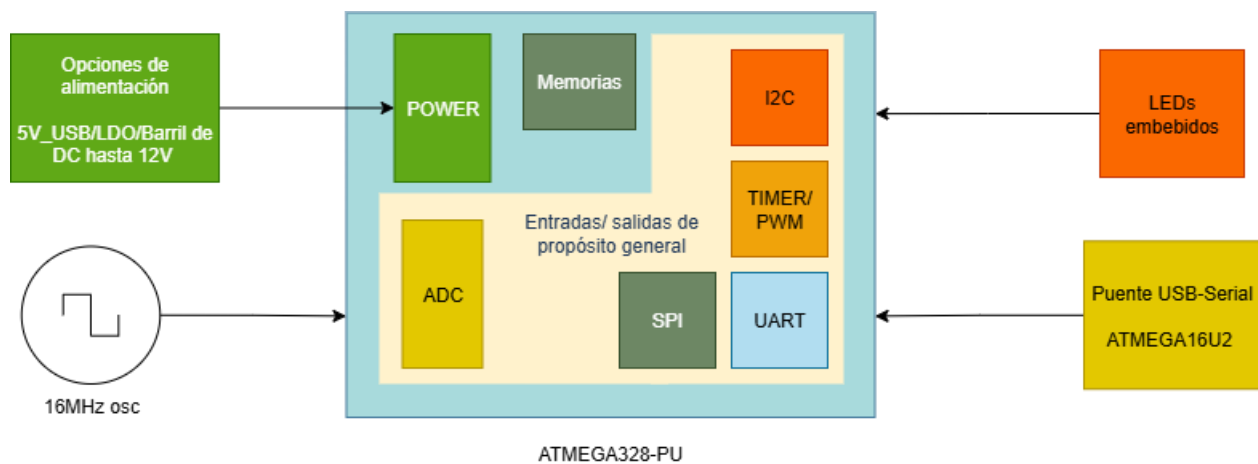


Ilustración 32. Diagrama funcional de la tarjeta de desarrollo Arduino uno rev3.

CONFIGURACIÓN DE LOS TERMINALES

Los terminales digitales del Arduino UNO R3 se utilizan para el control del controlador A4988, asignando señales para STEP, DIR, ENABLE y configuración de micro pasos mediante los terminales MS1, MS2 y MS3. Por otro lado, los terminales A4 y A5 se emplean como líneas SDA y SCL, respectivamente, para la comunicación I2C con el sensor de posición AS5600. El terminal A0 se destina a la lectura del voltaje de control proveniente de la instrumentación, el cual es convertido mediante el ADC del ATmega328P.

Finalmente, se provee una salida de voltaje proporcional para realimentar a la instrumentación en el terminal D5, conectada a través de un terminal PWM. El resumen de la configuración utilizada en este proyecto puede verse en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción de terminales para la tarjeta de desarrollo de Arduino uno R3

Terminal	Función
D13	Límite de carrera superior
D12	Límite de carrera inferior
D9	A4988 STEP
D8	A4988 DIR
D7	A4988 ENABLE
D6	Interfaz STOP
D5	Interfaz Realimentación
D4	A4988 MS1
D3	A4988 MS2
D2	A4988 MS3
A0	ADC Interfaz Potenciómetro/Señal
A4	AS5600 SDA
A5	AS5600 SCL
VIN	+5 [V] proveniente de la fuente de voltaje

GND

0 [V] proveniente de la fuente de voltaje

INTEGRACIÓN EN EL ACTUADOR

La tarjeta Arduino UNO R3 se conecta directamente sobre la tarjeta principal del sistema, funcionando como el núcleo lógico del actuador. Desde esta ubicación, centraliza la adquisición de señales, la ejecución del algoritmo de control, y la generación de las salidas hacia los módulos de potencia.

Su integración es simple, ya que no requiere circuitos externos de programación ni interfaces complejas. Al emplear periféricos estándar y terminales fácilmente direccionables, su inclusión en la arquitectura del actuador permite una configuración ordenada del sistema de control. Gracias a sus características, el Arduino UNO R3 proporciona un entorno confiable para implementar y validar el control PID discretizado y, en su caso, estrategias de control de dos posiciones. Esta implementación se ve fortalecida por la compatibilidad con módulos de sensores, la baja sensibilidad a ruidos digitales y la posibilidad de expansión futura del sistema.

CONTROLADOR PARA MOTOR PAP A4988

Para la gestión del motor, se optó por el controlador A4988 debido a su equilibrio entre costo, disponibilidad y facilidad de integración técnica. La Ilustración 33 muestra sus conexiones principales destacan las señales de control de avance (STEP), dirección (DIR) y habilitación (ENABLE), además de los pines de configuración de micropasos (MS1, MS2 y MS3) que definen la resolución del paso. Asimismo, el módulo incorpora terminales de alimentación (VMOT, VDD y GND) y las salidas correspondientes a las fases del motor (2A-2B y 1A-1B).

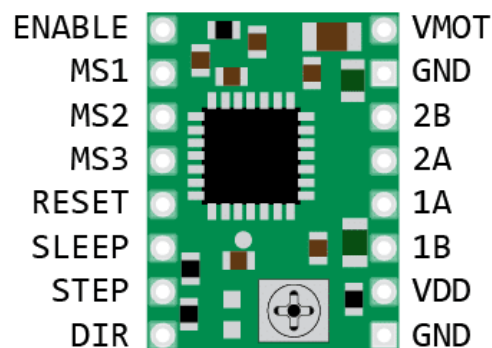


Ilustración 33. Diagrama de conexiones del controlador A4988

Recuperado de Arduino Forum. (s.f.). Diagrama de conexión de driver A4988 con motor paso a paso [Imagen].

La arquitectura interna del módulo A4988 se compone de un doble puente H fabricado con tecnología CMOS, el cual se encarga de controlar las fases del motor paso a paso. Además de

gestionar la conmutación de corriente en las bobinas, la lógica interna proporciona mecanismos de protección contra sobrecorrientes y sobrecalentamientos.

CARACTERÍSTICAS

Las características de este componente de acuerdo con la hoja de especificaciones de Allegro Microsystems (2007):

- Hasta 2 [A] de corriente máxima cuando se usa disipador, equivalente a 1 [A] por fase.
- Voltaje de control lógico de 3.3 [V] o 5 [V]
- Voltaje de alimentación del motor de 8 [V] a 35 [V] (VMOT)
- 5 resoluciones de pasos: full-step, 1/2, 1/4, 1/8 y 1/16
- Protecciones integradas: cortocircuito, sobre corriente, sobre temperatura y desconexión de tierra.
- Control de corriente ajustable mediante resistencia de medición (R_s).
- Control mediante 3 señales principales: STEP, DIR y ENABLE.
- Periodo para paso mínimo de 2 [μs].

CONFIGURACIÓN DE TERMINALES

Las especificaciones técnicas de las señales necesarias para la operación del controlador se detallan en la Tabla 4. La terminal STEP requiere un pulso digital con un periodo mínimo de 4 [μs] para ejecutar cada avance del motor. Por su parte, la señal DIR utiliza niveles lógicos digitales de tipo VDD o GND para determinar el sentido de giro, donde el sentido quedará en función de la conexión de las fases del motor. Finalmente, la función ENABLE gestiona la activación del módulo mediante lógica inversa, estableciendo que un estado VDD mantiene el dispositivo deshabilitado mientras que un estado GND permite su funcionamiento normal.

Tabla 4. Terminales de importancia para la implementación del controlador

Señal de control	Tipo
STEP	Pulso digital (Periodo mínimo 4 [μs], 2 [μs] ON/OFF)
DIR	Digital SI/NO (VDD o GND) *El sentido dependerá de la conexión de las fases del motor.
ENABLE	Digital SI/NO (VDD deshabilitado o GND habilitado)

Este esquema de control resulta de fácil implementación, ya que la modulación de corriente necesaria para generar micro pasos se realiza internamente por el propio controlador A4988. Por tanto, no es necesario programar manualmente una tabla de micro pasos, lo cual representa

una ventaja significativa cuando se utiliza un microcontrolador de recursos limitados, como el ATmega328P.

Por otra parte, la configuración del modo de micro pasos en el controlador A4988 se determina mediante los niveles lógicos aplicados a los terminales MS1, MS2 y MS3. Según la combinación de estos tres terminales, es posible seleccionar entre diferentes resoluciones de paso, desde paso completo hasta 1/16 de paso, como se resume en la Tabla 5.

Tabla 5. Configuración de micropasos

MS1	MS2	MS3	Resolución
GND	GND	GND	Paso completo
VDD	GND	GND	Medio paso
GND	VDD	GND	¼ de paso
VDD	VDD	GND	⅓ de paso
VDD	VDD	VDD	1/16 de paso

Finalmente, el papel del controlador A4988 en el esquemático general lo podemos observar en la esquina inferior derecha de la Ilustración 66 representada en la Ilustración 34.

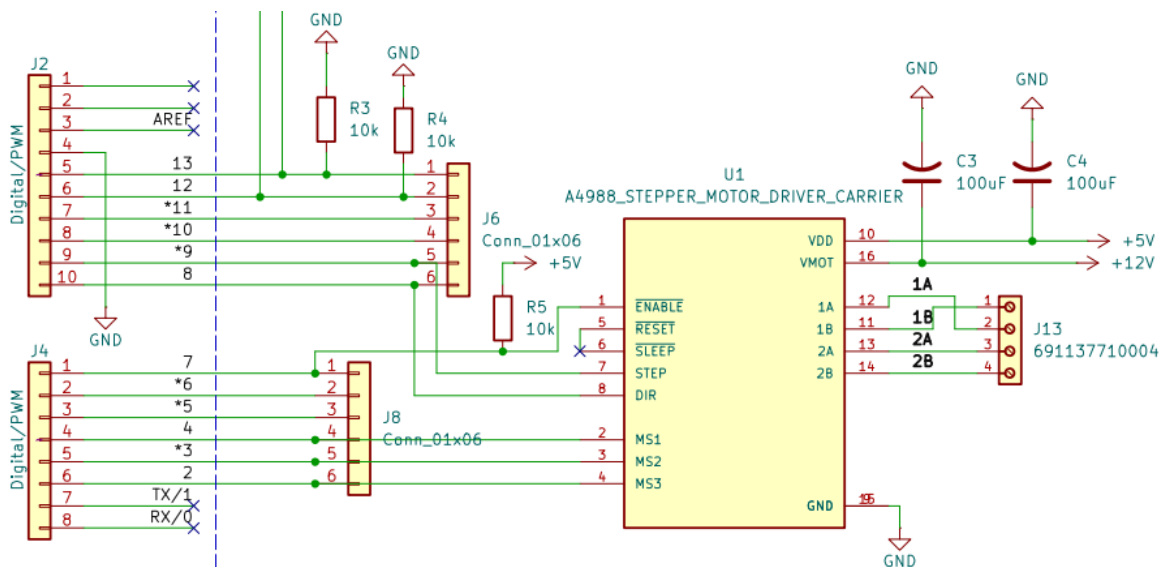


Ilustración 34. Diagrama de la implementación del controlador A4988

En el circuito del controlador A4988 se ha incorporado un capacitor de filtrado y desacople identificado como C3 y C4, el valor típico recomendado por el fabricante es de al menos

100 [μF], y el voltaje nominal del capacitor debe ser superior al voltaje de alimentación del motor. Por ejemplo, si el motor opera a 12 [V], se recomienda utilizar un capacitor de al menos 16 [V] para garantizar un margen de seguridad adecuado.

Adicionalmente, en la Ilustración 34, se ha incorporado una resistencia R5 de pull-up en el terminal ENABLE del controlador. La Ilustración 35 muestra el propósito de la resistencia R5, en caso de que el microcontrolador no esté activo o no envíe señal, el terminal mantenga un estado lógico alto, lo cual mantiene deshabilitado el motor por defecto. El valor de dicha resistencia fue elegido para garantizar un bajo consumo de corriente cuando se conmuta de estado, por lo tanto, el valor de esta es de 10 [kOhm].

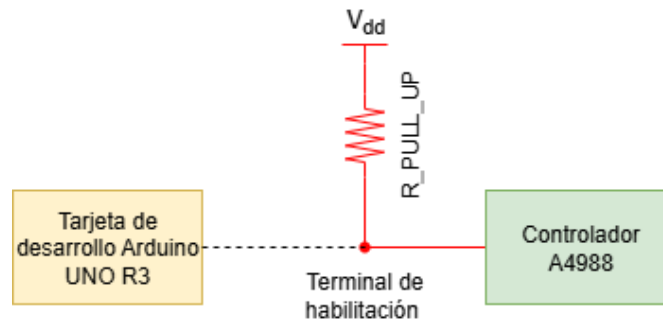


Ilustración 35. Estados de la resistencia R5 de pull-up

Los conectores J2, J4 y J13 actúan como interfaz física:

- J2 y parte de J4 permite la conexión de las señales de control desde el microcontrolador (STEP, DIR, ENABLE, MS1, MS2 y MS3).
- J13 conecta las fases del motor bipolar paso a paso mediante una bornera de salida.

El controlador A4988 utiliza un limitador de intensidad que permite operar al motor a tensiones superiores a las que proporcionan los valores nominales de corriente y resistencia. El valor de corriente empleado en el controlador debe ajustarse mediante un potenciómetro integrado en la tarjeta de este. Para configurar el controlador y evitar calentamiento excesivo en el motor o daños por mal funcionamiento, se utiliza la fórmula mostrada en la Ecuación 3.

Ecuación 3

$$I_{TRIP} = \frac{V_{REF}}{8 \times R_S}$$

Donde I_{TRIP} es la corriente máxima del motor, V_{REF} es el voltaje de referencia para ajustar la corriente de salida del controlador, 8 es una constante especificada por el fabricante y R_S es la resistencia de sensado o sensibilidad (varía dependiendo del módulo, para este caso son de 0.1[Ohm]). Si se utiliza un motor de 1.2 [A], con una resistencia de sensado de 0.1 [Ohm], despejando V_{REF} de la Ecuación 3, se tiene la Ecuación 4.

Ecuación 4

$$V_{REF} = I_{TRIP} * (8xR_S) = 1.7 * (8x0.1) = 1.36 [V]$$

Ahora bien, se comenta que, para su uso en pasos completos, ambas fases se mantienen energizadas, es por ello por lo que se recomienda mantener un 70% de la corriente nominal para evitar calentamientos, en este caso $0.7xV_{REF}$ [19]. La Ilustración 36 ejemplifica como debe de medirse este valor para ajustar la corriente suministrada por el controlador.

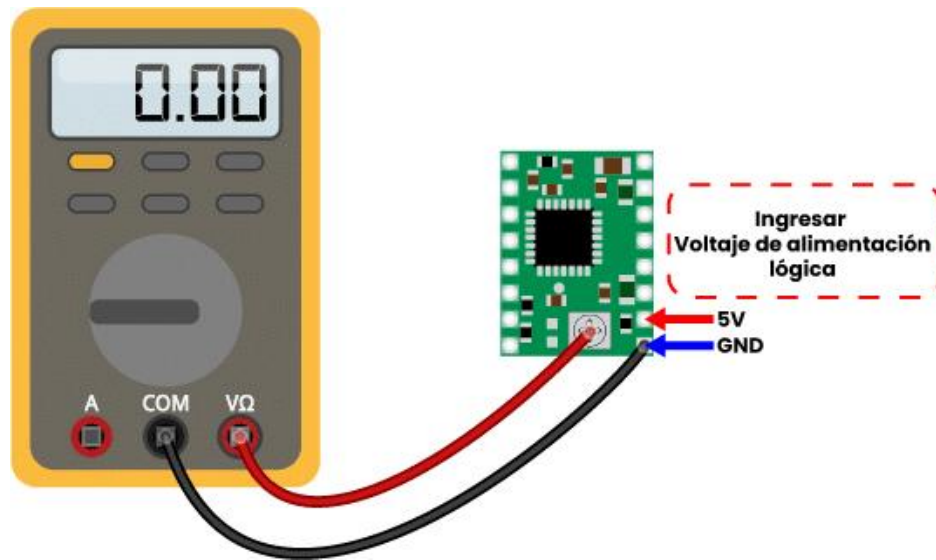


Ilustración 36. Ejemplo de medición de voltaje para ajustar corriente del motor PaP.

Recuperado de UNIT Electronics. (2018). Puntos de prueba para límite de corriente en A4988 [Imagen].

CODIFICADOR DE POSICIÓN MAGNÉTICA AS5600

Para implementar un control de lazo cerrado, es necesario medir constantemente la variable de salida, en este caso una posición angular. Para esta tarea, se optó por una solución económica y con alta disposición en el mercado, de sencilla implementación para un microcontrolador.

La arquitectura interna del chip AS5600 se conforma por una serie de sensores Hall distribuidos a lo largo de los 360 grados de detección. Seguido de una etapa de control para la obtención de la posición angular en función del campo magnético detectado donde se tiene la electrónica encargada del postproceso de los datos obtenidos por los sensores de efecto Hall de tal forma que se codifica la información. Después de haber obtenido la información magnética se realiza un tratamiento digital a dicha información que se envía mediante comunicación digital I2C o en paralelo es posible generar una salida PWM o en un convertidor DAC de 12 Bits proporcional a la posición angular detectada por los sensores.

PINOUT

AS5600 Encoder Magnético 12 Bits

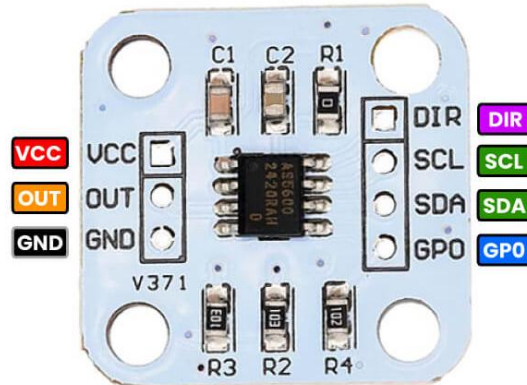


Ilustración 37. Configuración de terminales y representación del módulo AS5600

Recuperado de UNIT Electronics. (2024). *Terminalout del encoder magnético AS5600 de 12 bits* [Imagen].

CARACTERÍSTICAS

El codificador AS5600 es un codificador de posición magnético capaz de medir la posición angular con una resolución de 12 bits, es decir, hasta 4096 posiciones en un intervalo de 360 grados. Esta resolución es más que suficiente para la implementación del proyecto.

Las características de este componente son:

- Voltaje de operación: 3.3 [V] o 5 [V] (Regulador de baja caída interno)
- Resolución: 12 bits (4096 posiciones por revolución).
- Rango de medición: 0 a 360°.
- Tipo de sensor: magnético sin contacto.
- Umbral de detección de 0.5 a 3 [mm]
- Salida: I2C y PWM.

CONFIGURACIÓN DE TERMINALES

Para nuestra aplicación es importante conocer la configuración de los terminales, pues algunos tienen un estado lógico fijo mientras otros son dinámicos y permiten la obtención de la información.

Tabla 6. Configuración de terminales del módulo as5600

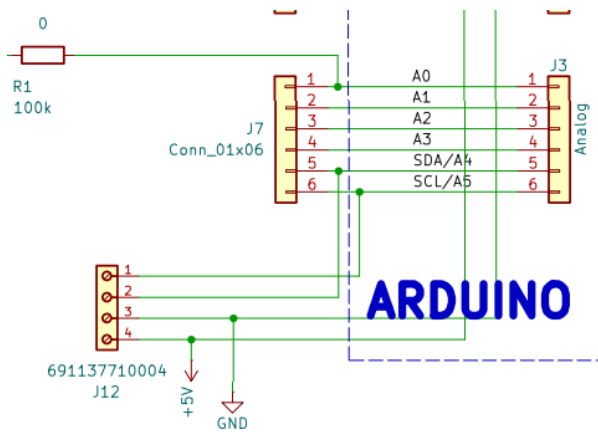
Nombre del terminal	Tipo	Descripción
VCC	Alimentación	Voltaje positivo de alimentación topador a 5V (el módulo ya incluye un capacitor de desacoplamiento para evitar ruido).
OUT	Salida analógica	Señal de salida que puede ser codificada en PWM y voltaje proporcional a la posición medida.
GND	Alimentación	Tierra analógica.
DIR	Entrada digital	Polaridad de la dirección (GND, incrementa de manera horaria; VCC, incrementa de manera antihoraria).
SCL	Entrada digital	Reloj I2C (el módulo ya considera la resistencia de pull-up)
SDA	Entrada/salida digital	Datos I2C (el módulo ya considera la resistencia de pull-up)
GPO/PGO	Entrada digital	Terminal de programación (En caso de utilizar algunas de las funciones internas del codificador).

Con esto, la Tabla 6 explica la función de cada uno de los puertos del módulo y la Ilustración 37 muestra la configuración de estos en el módulo que se utiliza.

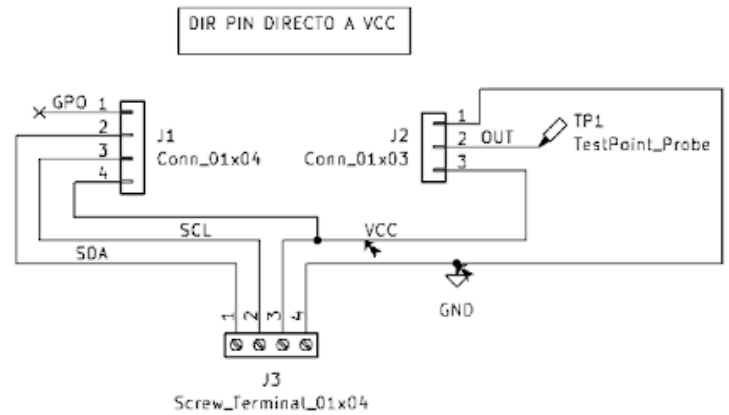
INTEGRACIÓN EN EL ACTUADOR

Además de una correcta configuración de los terminales del módulo, resulta indispensable asegurar un acoplamiento mecánico adecuado entre el eje del motor y el sensor AS5600. La Ilustración 38.A muestra el conector J12 correspondiente a la interconexión con el módulo AS5600; en este se encuentra el bus de comunicación I2C mediante la conexión de las líneas de comunicación SDA y SCL en el conector J7 de la tarjeta de desarrollo.

Por su parte, en la Ilustración 38.B se muestra el esquemático de la tarjeta en la cual se monta el módulo AS5600, también mostrada previamente en la Ilustración 54, la cuál es de especial utilidad para mantener el módulo de forma coaxial al eje del motor además de contener la configuración de la terminal DIR, que mantiene el sentido de giro antihorario.



(A)



(B)

Ilustración 38. Esquemático para el codificador AS5600: (A) apartado de la terminal de conexión del AS5600 en la tarjeta principal, (B) esquemático de la tarjeta dedicada al AS5600.

La Ilustración 39 muestra el ensamble del imán que se montó de forma concéntrica al eje del motor, respetando la distancia axial especificada en la hoja de datos del fabricante, la cual se encuentra en un intervalo de 0.5 a 3 [mm], lo que garantiza una detección uniforme del campo magnético a lo largo de los 360° de giro. Esta configuración asegura la fidelidad de la señal de posición y minimiza errores de lectura.

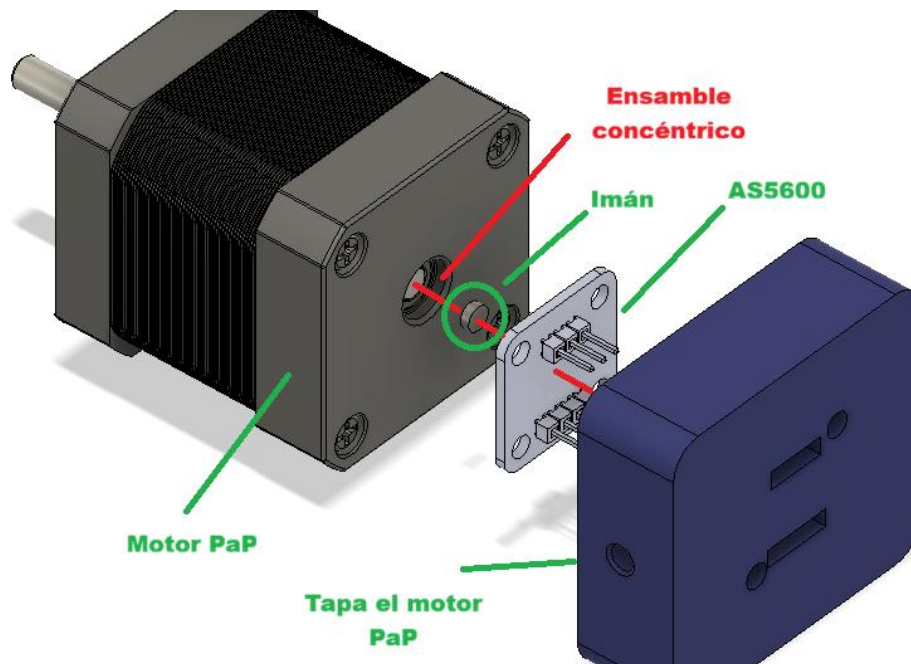


Ilustración 39. Ensamble concéntrico del sistema de retroalimentación.

ENTRADA DE CONTROL

El actuador dispone de una etapa de entrada de control diseñada para ofrecer flexibilidad en la selección de la señal de control del actuador. En la Ilustración 40 se muestra la implementación de un interruptor de tipo tiro doble con un solo polo, con identificador SW1, el operador puede elegir entre dos fuentes de entrada disponibles en el conector J10. Esta arquitectura permite la integración de dispositivos externos, como un potenciómetro analógico o un convertidor digital-analógico, para suministrar un voltaje de corriente continua en un rango de 0 a 5 [V] que actúe como valor de referencia.

Para facilitar esta conexión, el conector J9 de la tarjeta suministra de forma directa las señales de alimentación y tierra necesarias para el funcionamiento de dichos periféricos. Asimismo, se incluye una resistencia de protección R1 que evita estados flotantes y mitiga el ruido ambiental, asegurando una lectura estable cuando no hay señal conectada a las terminales 1 y 2 del conector J10.

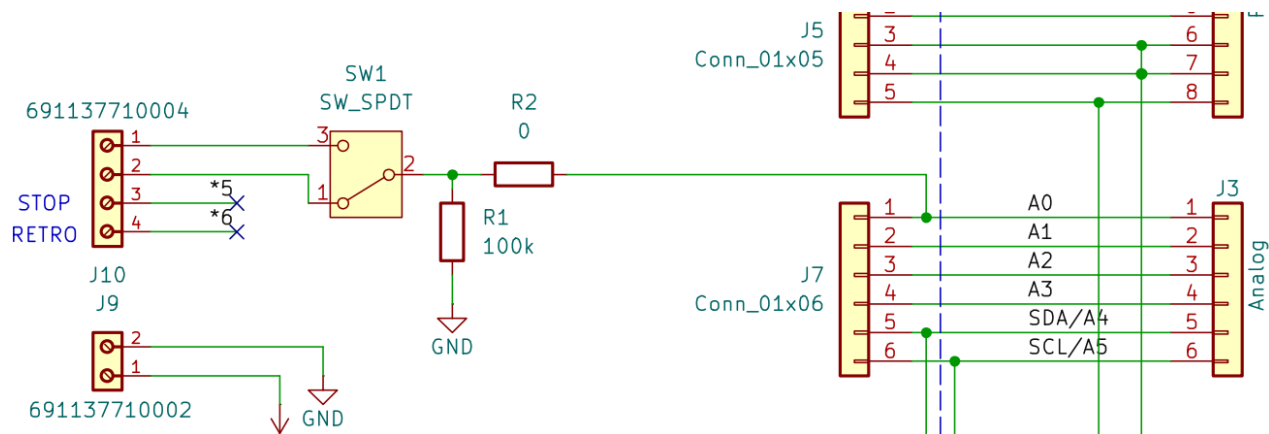


Ilustración 40. Implementación de la instrumentación.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN/REGULADOR CONMUTADO

El sistema requiere dos niveles de tensión para operar adecuadamente: 12 [V] para la etapa de potencia (motor y controlador) y 5 [V] para la lógica de control (Arduino, sensor, señal de realimentación). Para satisfacer esta necesidad, se optó por una fuente de alimentación conmutada dual, que proporciona ambos voltajes de forma independiente.

A diferencia de integrar etapas de regulación en la tarjeta principal del sistema, se empleó una fuente conmutada externa y especializada por las siguientes razones:

- Estabilidad y precisión: Las fuentes conmutadas modernas ofrecen tensión regulada con bajo rizado, adecuada tanto para la lógica digital como para la alimentación de carga inductiva como lo es un motor paso a paso.

- Reducción de complejidad: Al no integrar reguladores lineales o convertidores DC-DC adicionales en la tarjeta electrónica, se disminuye el riesgo de sobrecalentamiento, interferencia electromagnética y errores de diseño.
- Facilidad de mantenimiento y escalabilidad: El uso de una fuente externa permite una reconfiguración rápida en caso de daño, así como una posible expansión si se requiere más corriente para futuras versiones del prototipo.

En este proyecto se empleó una fuente RD-85^a la cual proporciona de 12 [V] a 3 [A] para alimentar el controlador A4988 y el ventilador del disipador, y una línea de 5 [V] para alimentar directamente la tarjeta Arduino UNO R3 y los sensores conectados. Aunque el consumo total de la línea de 5 [V] es inferior a 1 [A], la fuente seleccionada cuenta con una derivación de 5 [V] a 7 [A], lo cual, aunque sobredimensionado, representa una ventaja potencial para futuras ampliaciones del sistema, como la inclusión de una pantalla gráfica u otros periféricos.

ESQUEMA DE CONEXIONES

La Ilustración 41 presenta el esquema general de interconexión de la tarjeta de control del actuador. En primer lugar, se muestra la alimentación proveniente de la fuente conmutada, la cual suministra 12 [V] para la etapa de potencia, 5 [V] para la lógica de control y una referencia común de tierra para todo el sistema.

Asimismo, se ilustran las conexiones correspondientes a los límites de carrera, implementados mediante dos micro interruptores que permiten delimitar el recorrido mecánico del actuador. Se incluye también la interfaz denominada instrumentación, encargada de generar la señal de control que gobierna el movimiento del sistema.

De igual manera, se detallan las conexiones del codificador magnético AS5600 para la realimentación de posición, las fases del motor paso a paso y, de manera opcional, la conexión de un ventilador destinado a la disipación térmica del controlador de motor.

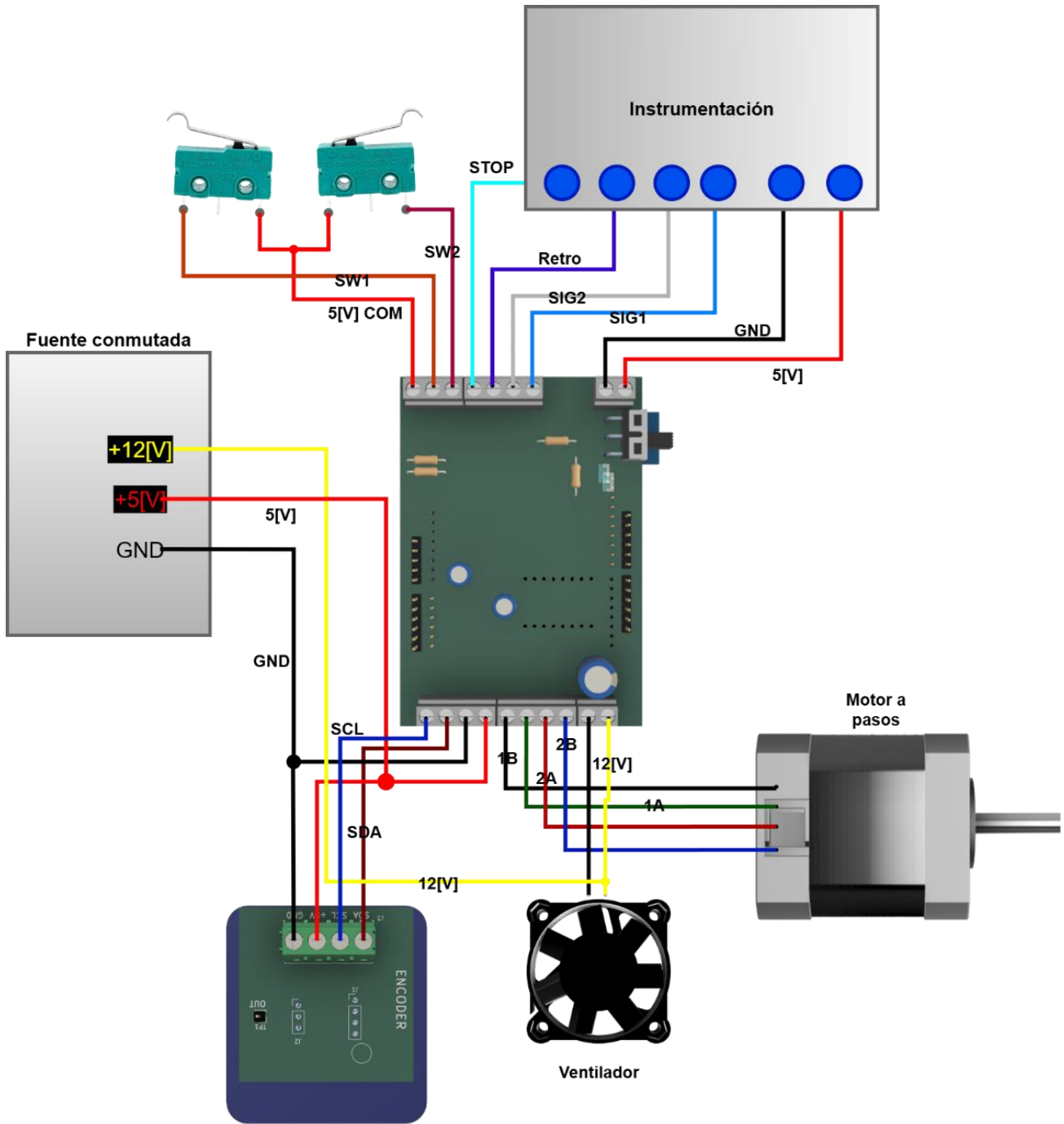


Ilustración 41. Esquema de conexiones eléctricas del actuador.

PROGRAMACIÓN

La programación fue necesaria para la implementación del controlador, responsable del funcionamiento del lazo cerrado para el actuador. Para ello, debemos definir las características del controlador:

1. Señal de control (señal analógica)
2. Realimentación por codificador de posición AS5600.
3. Estrategia de control PID.
4. Etapa de potencia con controlador A4988.
5. Micro interruptores de límite de carrera.
6. Proceso de posición inicial.

Para lograr implementar los puntos anteriores, es necesario definir las terminales de entrada y salidas del microcontrolador. Que también se han configurado vía hardware en la tarjeta de desarrollo, por ello es importante tener siempre en mente el uso de estos pines para futuras pruebas con el hardware. La Tabla 3 muestra los pines de la tarjeta de control del actuador, que en la programación las terminales de los pines referentes a la comunicación I2C no se especifican de manera explícita, ya que estos forman parte por defecto de la biblioteca de la tarjeta y, por ende, no necesitan definirse en el código.

El programa se esquematiza mediante un diagrama de flujo en la Ilustración 42, donde se describe la secuencia de inicialización del sistema, la cual incluye la configuración de los puertos de entrada y salida, la habilitación de los periféricos y la inicialización de los parámetros asociados con la estrategia de control. Esta etapa concluye con la ejecución de uno de los subprocesos de arranque más relevantes: la rutina encargada de posicionar el deslizador del actuador en el inicio de la estructura, específicamente en el pivote del cable tractor facilitando su correcta instalación y asegurando condiciones iniciales reproducibles para la operación posterior del sistema. Esta se ejecuta posterior a la fase de configuración del microcontrolador.

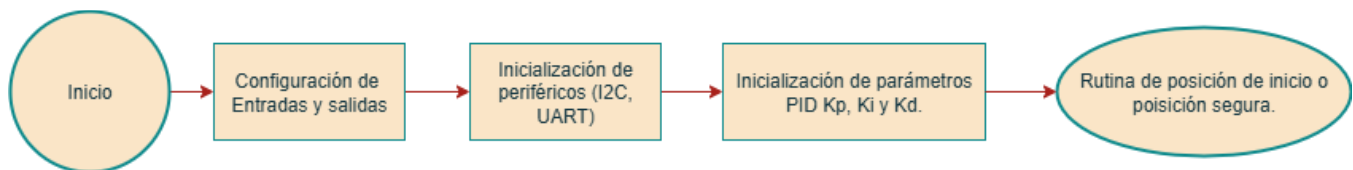


Ilustración 42. Diagrama de flujo de inicio del sistema.

La Ilustración 43 muestra el motor desplazando el deslizador en dirección del micro interruptor correspondiente a la posición más cercana del pivote del cable tractor, que con referencia al motor corresponde al sentido horario. El motor continúa su movimiento hasta que se produce la activación del micro interruptor de límite de carrera, el cual se activa únicamente una vez durante la inicialización del sistema.

Durante la ejecución de esta rutina se presiona el micro interruptor inferior y, durante su activación, puede presentarse el fenómeno de rebote mecánico propio del interruptor. Este fenómeno ocurre cuando se cierra el contacto del micro interruptor y las superficies metálicas de contacto rebotan entre sí antes de establecer un contacto estable. Este comportamiento se debe a la liberación inmediata entre los contactos, provocando múltiples rebotes en un intervalo muy corto hasta que el contacto mecánico se estabiliza.

Como consecuencia de este fenómeno, el sistema del actuador puede detectar múltiples activaciones en lugar de una sola señal válida. Para evitar lecturas falsas o activaciones no deseadas, se implementa un algoritmo que filtra estas transiciones rápidas. En este caso, se emplea un intervalo de 10 [ms], el cual resulta suficiente para eliminar las activaciones por el rebote mecánico.

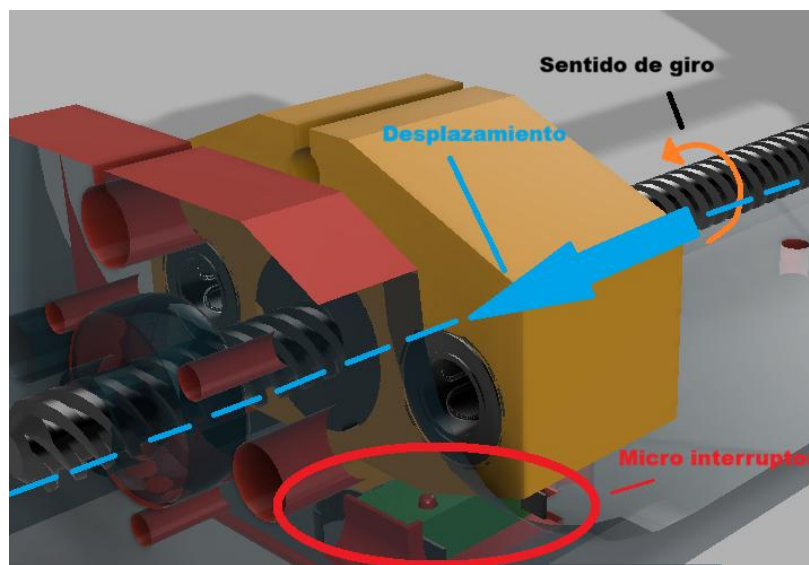


Ilustración 43. Ejemplificación de activación de límite de carrera inferior.

El diagrama de flujo mostrado en la Ilustración 45, describe de mejor manera la rutina de inicio o posición segura mencionada anteriormente, donde una vez detectada la primera activación válida del interruptor, se ejecuta una secuencia controlada de pasos de retroceso y activaciones iterativas, con el fin de asegurar que la posición de referencia sea definida con mayor exactitud.

Posteriormente, se inicia la lectura de la posición angular mediante el codificador AS5600. Dado que este sensor proporciona información angular en un rango de 12 bits por revolución, es necesario ejecutar un conjunto de tres funciones destinadas a la detección de operación multivuelta. Para ello el diagrama de la Ilustración 44, muestra la serie de pasos a seguir para realizar la lectura multivuelta, donde inicialmente se lee la posición cruda del codificador, es decir, el ángulo leído a partir de la solicitud de información codificada en bits por parte de la comunicación I2C. Posteriormente, se corrige o se rota la lectura en función del ángulo pivote medido a partir del inicio de la ejecución del programa. Finalmente, se realiza un barrido de

cuadrantes en un rango de 360°, esto con la finalidad de saber si ha incrementado o decrementado el número de vueltas.

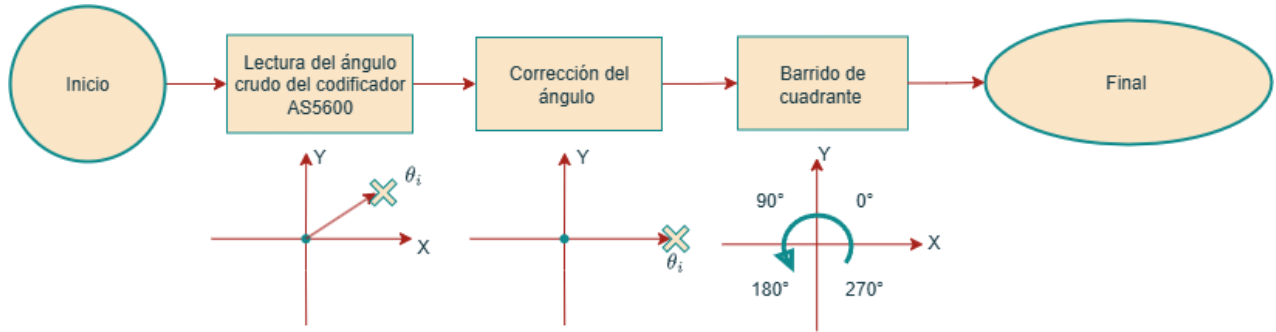


Ilustración 44. Rutina de lectura multivuelta

Una vez que se han ejecutado los pasos de retroceso en dos ocasiones y se ha estabilizado la lectura del sensor, se define formalmente la posición mínima permisible del sistema, la cual es utilizada como referencia inicial para la operación normal del actuador.

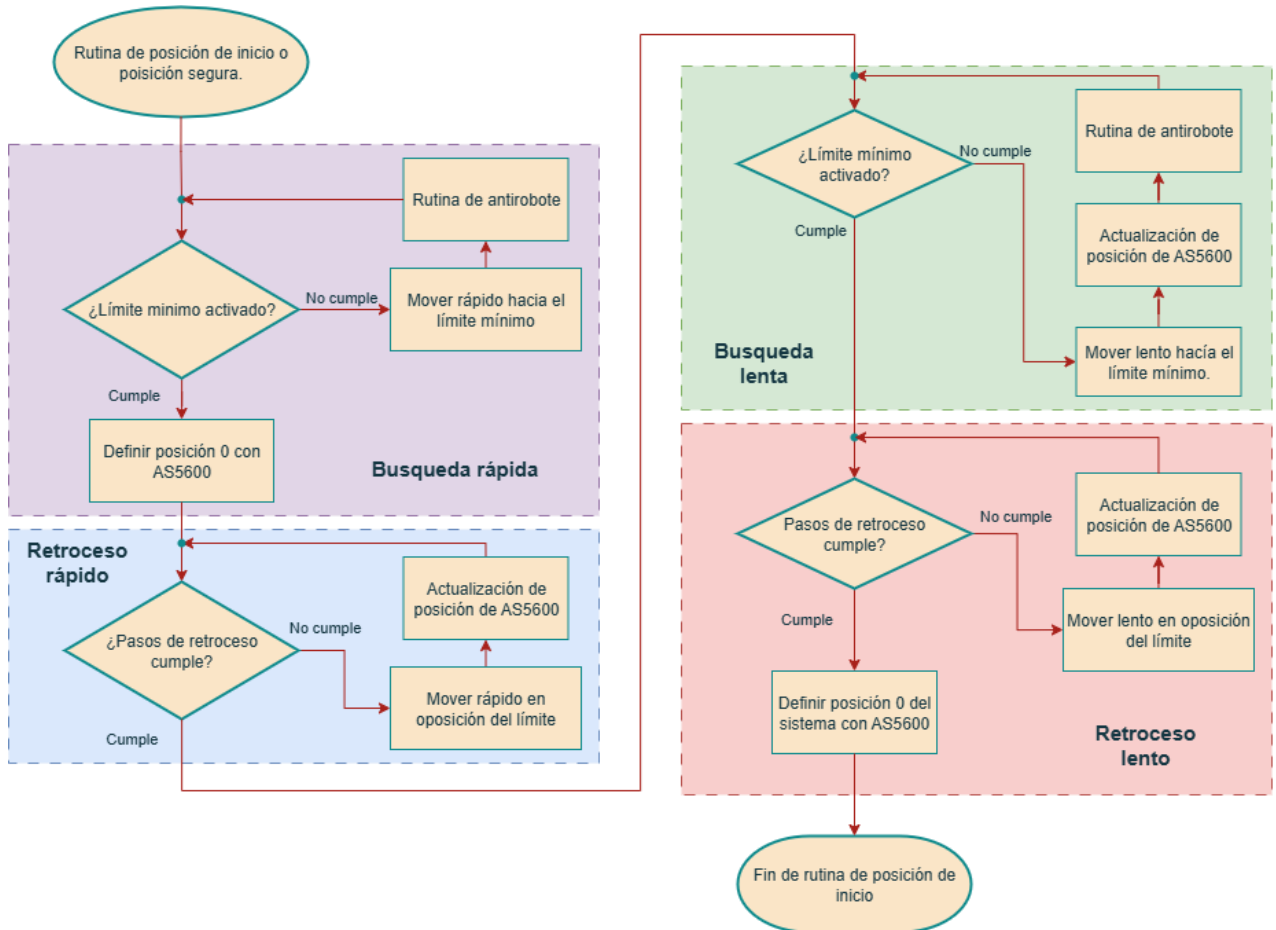


Ilustración 45. Rutina de posición segura/inicial.

El diagrama de flujo presentado en la Ilustración 46 describe el funcionamiento del bucle principal de control del actuador lineal, el cual se ejecuta de manera cíclica durante la operación normal del sistema. Este bucle integra la adquisición de la señal de control, la realimentación de posición, el cálculo del controlador PID y la generación de las señales de control para el motor a pasos.

El proceso inicia con la lectura de la señal analógica proveniente del potenciómetro de usuario mediante el convertidor analógico digital del microcontrolador. Esta señal representa la posición deseada del actuador.

Posteriormente, el valor digital obtenido del ADC es convertido a una referencia angular, la cual se encuentra dentro del rango operativo previamente definido durante la rutina de la posición segura. De forma paralela, la posición actual del actuador, obtenida a partir del codificador magnético, es asociada como la variable de entrada del controlador PID.

Con la referencia y la variable de proceso definidas, se realiza el cálculo del controlador PID, el cual determina la magnitud y el sentido de la acción de control en función del error de posición. Para la implementación del controlador PID discreto se empleó la librería desarrollada por Beauregard [25]. Dicha librería implementa la formulación clásica del controlador PID en tiempo discreto, incorporando mecanismos de limitación de la señal de control y ajuste del tiempo de muestreo, lo cual resulta adecuado para sistemas de control en lazo cerrado con recursos computacionales limitados. El uso de esta librería permite asegurar una implementación confiable y reproducible del algoritmo de control, evitando errores comunes asociados a la programación manual del PID y facilitando la validación experimental del sistema. Asimismo, la librería ofrece flexibilidad en la configuración de los parámetros proporcional, integral y derivativo, lo que resulta especialmente conveniente para el ajuste del comportamiento dinámico del actuador lineal desarrollado en este trabajo.

A continuación, el sistema evalúa si el error se encuentra dentro de una banda muerta preestablecida. En caso afirmativo, el sistema evita generar movimiento, limitándose a actualizar la medición de la posición. Esta estrategia reduce oscilaciones y vibraciones cuando el actuador se encuentra cercano a la posición objetivo.

Si el error excede la banda muerta, se evalúa la dimensión del error, lo que permite seleccionar dinámicamente la resolución de los micro pasos del motor PaP. Cuando el error es pequeño, se habilita un micro paso fino (1/16 de paso) con el objetivo de mejorar la resolución y suavidad del posicionamiento. En caso contrario, se selecciona el modo de paso completo, priorizando velocidad y capacidad de desplazamiento.

Una vez determinada la resolución de paso, el sistema procede a la generación de pulsos de control STEP/DIR, los cuales son enviados al controlador del motor para provocar el movimiento del actuador en la dirección requerida.

Antes de consolidar el movimiento, se realiza una verificación de los límites de carrera, con el fin de evitar desplazamientos fuera del rango mecánico permitido. Si no se detecta la activación de los finales de carrera, se permite la ejecución del movimiento.

Finalmente, el sistema realiza la actualización de la posición, incorporando la nueva medición del codificador, y retorna al inicio del bucle principal, cerrando así el ciclo de control en tiempo discreto.

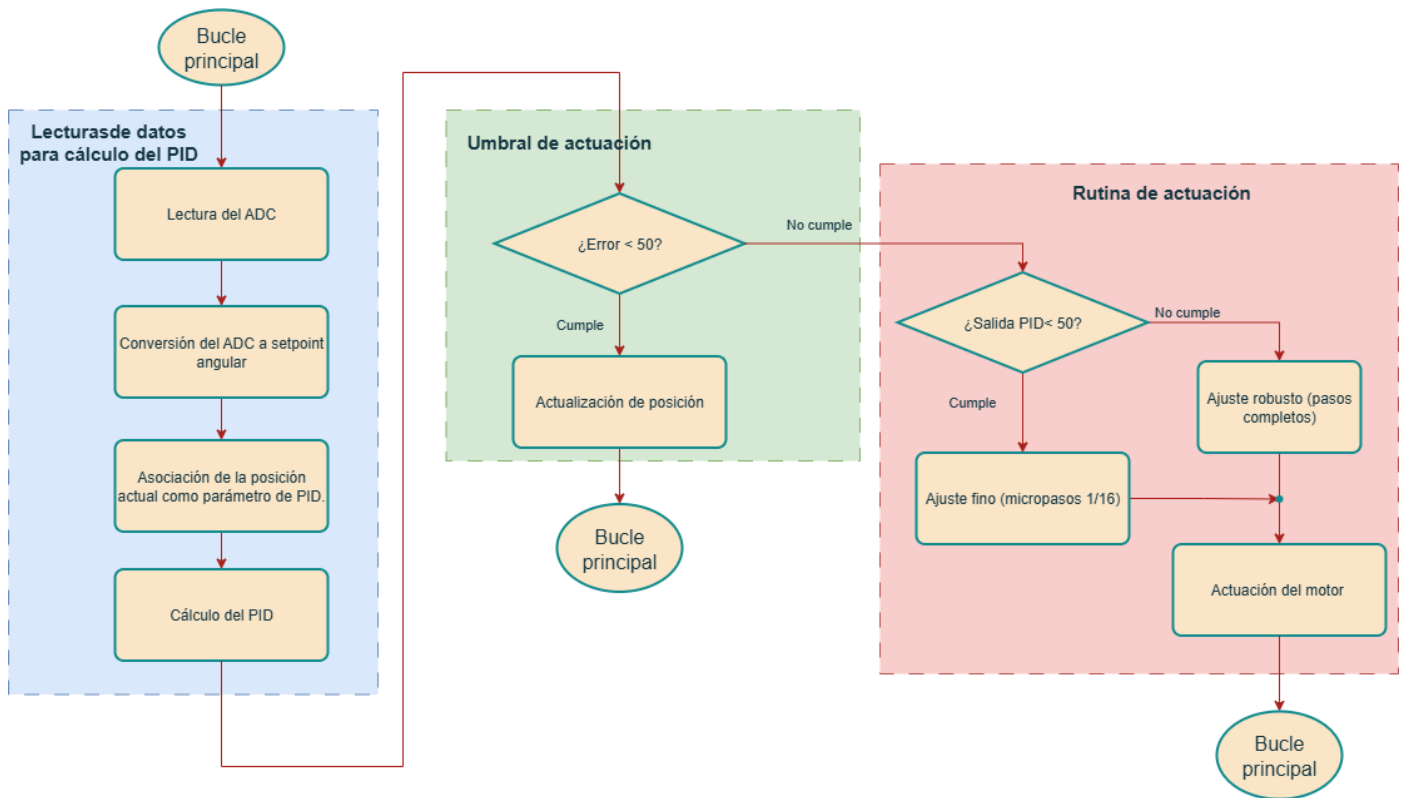


Ilustración 46. Diagrama de flujo del bucle principal.

CAPÍTULO 3: MANUFACTURA

Con el objetivo de obtener un prototipo funcional aplicable a ensayos experimentales celdas de prueba, se desarrolló una versión preliminar del actuador de sistemas de aceleración. El proceso combinó modelado tridimensional, manufactura aditiva mediante impresión 3D de filamento fundido con máquinas de código numérico (CNC). Para las tarjetas de circuito impreso se empleó la manufactura sustractiva con fresadora CNC y herramientas manuales de fabricación. Esta integración permitió validar tanto el diseño mecánico como las tarjetas de circuito impreso en condiciones reales de operación. La validación del diseño requirió fabricar físicamente la base mecánica, el sistema de transmisión y las tarjetas electrónicas, sometiéndolos posteriormente a pruebas funcionales.

La Ilustración 47, muestra la máquina para impresión 3D modelo Anet A8 Plus, la cual fue utilizada en este proyecto para realizar la manufactura aditiva. Esta impresora cuenta con un volumen de impresión de 300 x 300 x 350 [mm], 250 [°C] de temperatura máxima del extrusor, 100 [°C] de temperatura máxima de la cama de impresión.

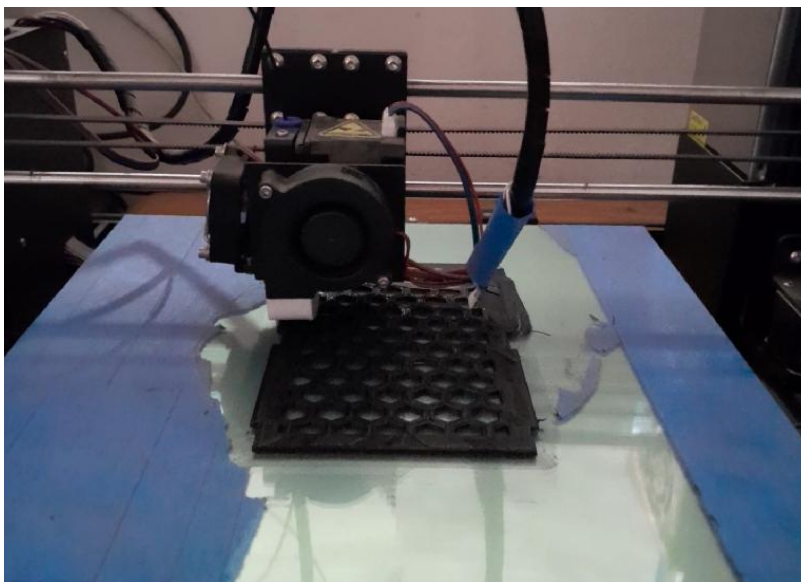


Ilustración 47. Proceso de manufactura aditiva con impresora 3D.

MANUFACTURA ADITIVA

La impresión 3D de filamento fundido fue el método principal de fabricación de las piezas estructurales.

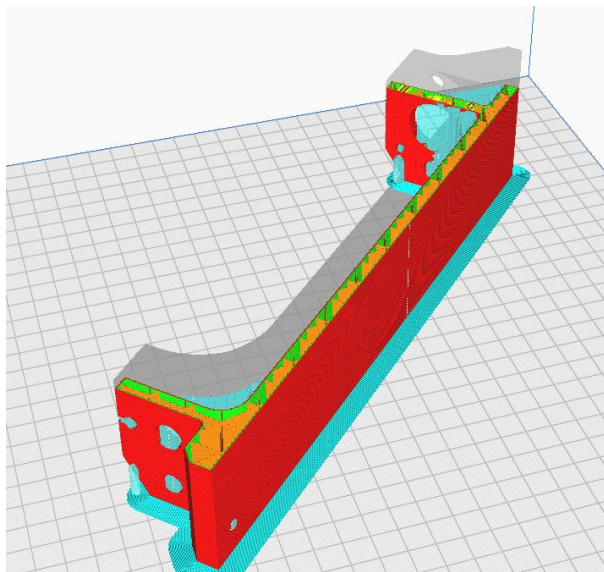
Durante esta etapa de prototipado se utilizó PLA por su facilidad de impresión. Los parámetros empleados fueron los siguientes:

- Temperatura de extrusión: 200°C
- Temperatura de cama: 60°C

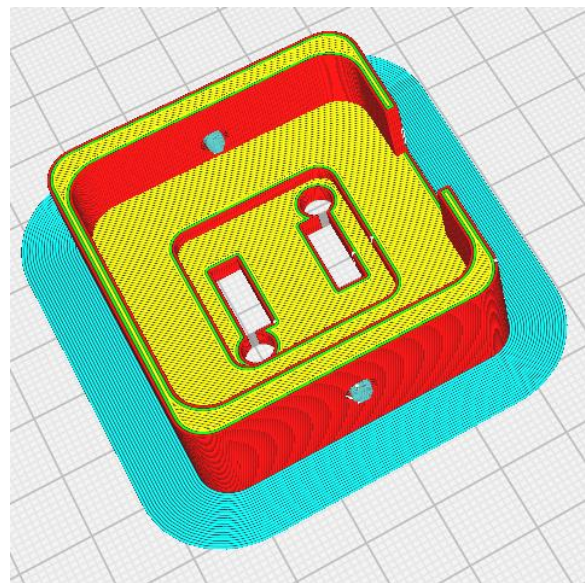
- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Altura de capa: 0.3 [mm]
- Anchura de pared: 1 [mm]
- Soporte de impresión: borde de adhesión, es decir, realiza un borde para aumentar el área de la capa principal para mejorar la adhesión en la cama de impresión.
- Material de impresión: PLA

Un aspecto importante a la hora de depositar capas de material, es la orientación en la que estas se depositan de modo que la dirección de las capas permita resistir de mejor manera los esfuerzos generados que estarán presentes en la función de la pieza.

La Ilustración 48 muestra la orientación de deposición utilizada para dos de las piezas del sistema en el programa de laminado UltiMaker Cura. En la parte Ilustración 48.A se observa la orientación lateral empleada para la base del actuador, mientras que en la parte la Ilustración 48.B se muestra la orientación horizontal utilizada para la tapa del motor, seleccionada en función de los requerimientos estructurales de dicha pieza.



(A)



(B)

Ilustración 48. Orientación de deposición de capas en UltiMaker Cura: (A) deposición lateral para la base del actuador, (B) deposición horizontal para tapa del motor.

La base del actuador se orientó de forma que la dirección de las capas permita resistir de mejor manera los esfuerzos generados por la tensión del cable tractor y el par transmitido por el motor. En contraste, para componentes como el deslizador y la tapa del motor se empleó una orientación vertical, lo que proporciona una mayor rigidez en las direcciones donde se presentan los principales esfuerzos durante su funcionamiento.

Otro aspecto importante durante el proceso de impresión es la limpieza de la cama de la impresora. Si la superficie presenta polvo, grasa o residuos de impresiones anteriores, puede

producirse una mala adhesión de las primeras capas. Esto puede provocar que la pieza se desprenda durante las primeras etapas de la impresión, ocasionando fallas en el proceso o deformaciones que afecten la funcionalidad del componente. Para evitar este problema, la superficie de impresión se limpia antes de la impresión de cada pieza utilizando un paño limpio y alcohol.

Asimismo, se empleó un borde de adhesión como estrategia para estabilizar el inicio de la impresión y mejorar la adherencia de la pieza a la cama. Este elemento puede observarse en la Ilustración 48, representado en color cian. El uso de este borde incrementa el área de contacto entre la pieza y las primeras capas de la impresión, lo que favorece la adhesión de la pieza a la cama de impresión.

TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO

Para este proyecto se utilizó la herramienta de diseño KICAD que se trata de un software de código abierto. Esta herramienta es usada en la industria y proyectos de investigación, haciéndolo viable para este entorno académico. Para la manufactura, se emplearon máquinas fresadoras de control numérico, es decir, siguiendo un proceso de manufactura sustractiva con el objetivo de agilizar la producción y optimizar la precisión en el diseño de las tarjetas electrónicas mediante el prototipado rápido.

El proceso de diseño para una tarjeta electrónica [20], es el siguiente:

1. Prototipado o esquemas sobre papel: Sobre este se eligen los componentes que se utilizarán y de ser posible se probarán sobre una tarjeta de pruebas, para validar el concepto del circuito.
2. Captura esquemática: Se realiza la selección de los componentes electrónicos y su interconexión en el editor de la herramienta digital. Se asignan huellas a los componentes elegidos, las huellas son el diseño físico real que ocupara el componente en la tarjeta electrónica.
3. Diseño de la tarjeta electrónica, es la parte más compleja dado que en este diseño se plasma la capa física:
 - a. Configuración de reglas de diseño y apilado de la tarjeta electrónica. Para cumplir con diseño de aplicación, manufactura y prueba.
 - b. Definición de la forma de la tarjeta. En este se debe de tener especial cuidado de las restricciones dimensionales que pueda tener la silueta de la tarjeta y la organización de los componentes.
 - c. Colocación de componentes. Los componentes se organizan en bloques funcionales, tales como alimentación, acondicionamiento de señal, potencia, comunicación y medición. Esta acción facilita la revisión del diseño y reduce la probabilidad de errores durante la interconexión.
 - d. Ruteo. Se interconectan los componentes mediante el dibujo de pistas.

- e. Planos de masa. Se dibujan grandes áreas de cobre que se conectan a tierra para reducir el ruido eléctrico.
4. Verificar violaciones de diseño
 - a. Se verifica que se cumpla con el espaciado entre pistas, pistas a borde, pistas a terminales, ancho de pista.
5. Generación de archivos para fabricación.
 - a. Archivos para manufactura (GBRL y EXCELLON).
 - b. Lista de materiales.

La Ilustración 49 muestra un ejemplo del proceso de captura esquemática en Kicad, donde se ejemplifica el punto 2 del proceso mencionado, donde podemos observar que ya se han incorporado los componentes en el área de trabajo, así como sus respectivas huellas de los componentes, de forma que el esquema no solo representa la conexión lógica del circuito, sino también la representación física para cada componente en la creación de la tarjeta electrónica.

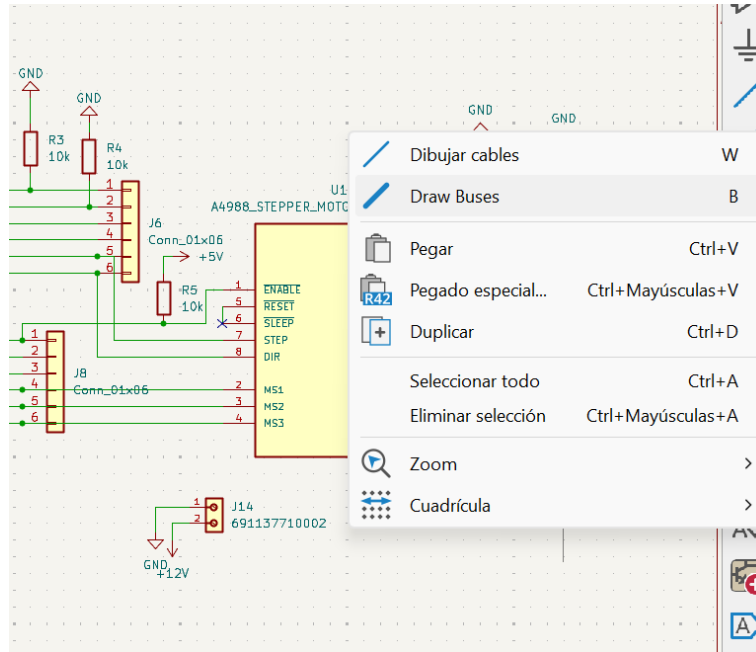


Ilustración 49. Captura esquemática para tarjeta electrónica.

En la Ilustración 50, se muestra gráficamente el proceso del punto 3, en este caso un ejemplo de una fuente de voltaje conmutada, en donde se eligieron componentes con disponibilidad en el mercado y sus respectivas huellas. En este paso ya se han importado las huellas de los componentes en el editor de la tarjeta y se ha configurado el espacio de trabajo con las reglas de diseño y el apilado de la tarjeta electrónica.

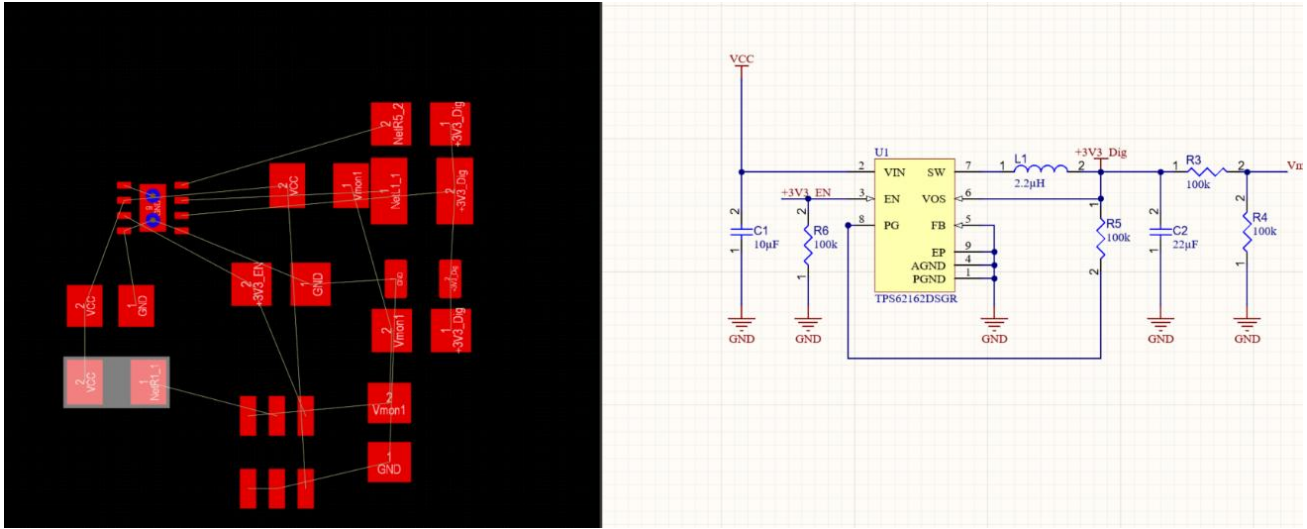


Ilustración 50. Importación de componentes en el editor de la tarjeta electrónica.

Para concluir con el diseño de la tarjeta, se muestra en la Ilustración 51, el proceso 3, en donde ya se han agrupado los componentes electrónicos, definido la forma de la tarjeta y enrutado en las dos capas de cobre disponibles. En rojo se muestran las pistas de la capa superior, mientras las azules representan las de la capa inferior. En esta tarjeta también se cuenta con áreas de cobre destinadas a la alimentación, VCC y GND.

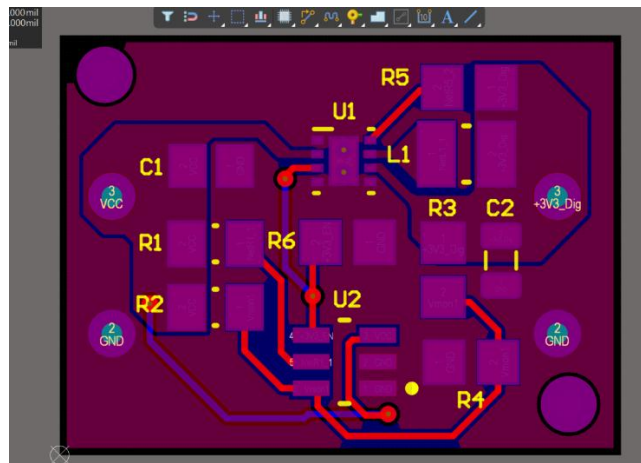


Ilustración 51. Organización, enrutado, relleno de áreas de cobre, definición de límite de la tarjeta.

Finalmente, para la manufactura, las reglas de diseño debieron definirse en función de las limitaciones del equipo y de las herramientas de la casa de manufactura, que en nuestro caso es mediante máquina de enrutador CNC. Para este proyecto se utilizó un cortador en V cuyo diámetro fue 0.2 [mm] con un ángulo de 45°, para enrutar pistas de cobre es necesario cortar una profundidad de al menos 0.1[mm], valor que varía dependiendo de las características de la

tarjeta virgen de cobre, para lograr esto, la herramienta necesita un diámetro efectivo de 0.3 [mm]. En la Ilustración 52 se muestra un ejemplo de enrutamiento de pistas para tarjeta electrónica.

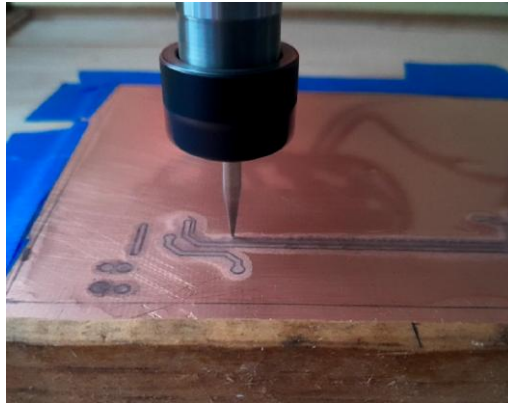


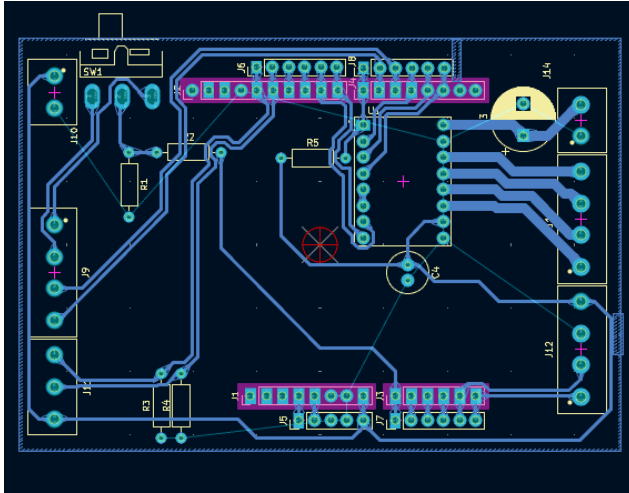
Ilustración 52. Enrutamiento mecánico con fresadora CNC.

TARJETA PRINCIPAL

La tarjeta principal, forma parte del hardware del lazo de control del actuador, añade funciones específicas a la tarjeta de desarrollo Arduino UNO R3. En este caso, la tarjeta principal integra las funciones requeridas para el funcionamiento del actuador: acondicionamiento de señales de control, lectura de límites de carrera, comunicación con el sistema de realimentación y la interfaz de comunicación con la instrumentación principal.

Las consideraciones diseño más importantes recaen sobre las restricciones mecánicas debido a que, al tratarse de una expansión, debe acoplarse con exactitud a los pines del Arduino UNO R3 para evitar colisiones mecánicas que provoquen fallas en la tarjeta manufacturada.

La Ilustración 53 muestra la tarjeta electrónica considerando las restricciones mecánicas impuestas por la tarjeta de desarrollo a la cual se acopla. En la Ilustración 53.A se presenta el ruteo de la tarjeta electrónica, donde se resaltan en color rosa los conectores que deben coincidir con las coordenadas físicas de la tarjeta de desarrollo para garantizar su correcta interconexión. La Ilustración 53.B muestra una vista del ensamble en la que se identifican, mediante círculos rojos, algunos de los elementos físicos que impactan en el diseño de la tarjeta principal, tales como conectores hembra y otras estructuras mecánicas que pueden interferir con los pines de las borneras de la tarjeta electrónica diseñada. Estas interferencias potenciales podrían provocar colisiones mecánicas o incluso cortocircuitos si no se consideran durante el diseño.



(A)



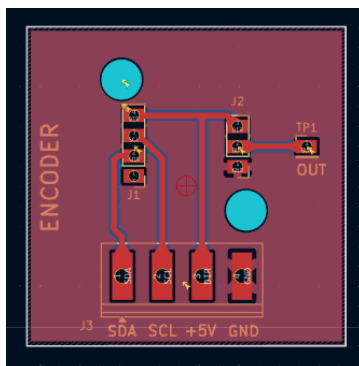
(B)

Ilustración 53. Ejemplificación de restricciones mecánicas de la tarjeta principal.

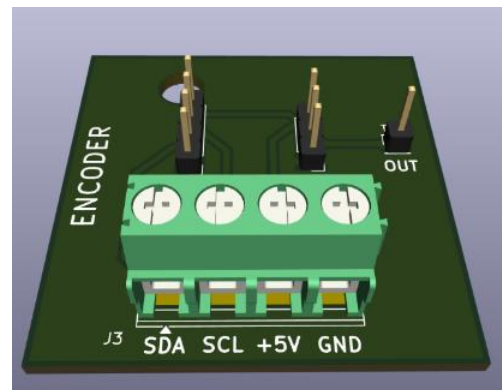
TARJETA PARA EL CODIFICADOR AS5600

Con el objetivo de integrar el codificador AS5600 de manera confiable al sistema de control, se diseñó una tarjeta de circuito impreso dedicada que permite su montaje mecánico alineado con el eje del servomecanismo como se muestra en la Ilustración 29. Esta cumple la función de acondicionar mecánicamente el sensor y garantizar una lectura estable de la posición angular, reduciendo efectos asociados a ruido eléctrico y desalineación mecánica.

Al igual que la tarjeta de control, la limitación de diseño se basa en restricciones mecánicas dado que necesita tener coordenadas exactas para la integración del codificador, por ello es por lo que los conectores J1 y J2, mostrados en la Ilustración 53.A, los cuales tienen las coordenadas exactas para que se pueda insertar el módulo AS5600.



(A)



(B)

Ilustración 54. Diseño de la tarjeta electrónica para codificador AS5600: (A) enrutamiento, (B) vista en tercera dimensión.

ACOPLAMIENTO DEL SERVOMOTOR CON SISTEMAS DE ACELERACIÓN

La Ilustración 55 muestra el acoplamiento entre el actuador y el sistema de aceleración del motor que se realiza mediante un cable de tracción simple, el cual actúa mediante el cable tractor como interfaz mecánica entre el deslizador y la palanca del acelerador del motor. Esta elección permite desacoplar físicamente el actuador del cuerpo de aceleración, facilitando su adaptación a diferentes configuraciones de motores disponibles en el laboratorio.

El uso del cable de tracción simple responde a la necesidad de contar con un sistema flexible, en el que el mismo actuador pueda emplearse en distintos motores sin requerir modificaciones estructurales significativas. Cada motor presenta diferencias en la geometría del cuerpo de aceleración, recorrido angular y fuerza de retorno, por lo que el acoplamiento mediante cable permite realizar ajustes específicos sin alterar el diseño base del servomecanismo.

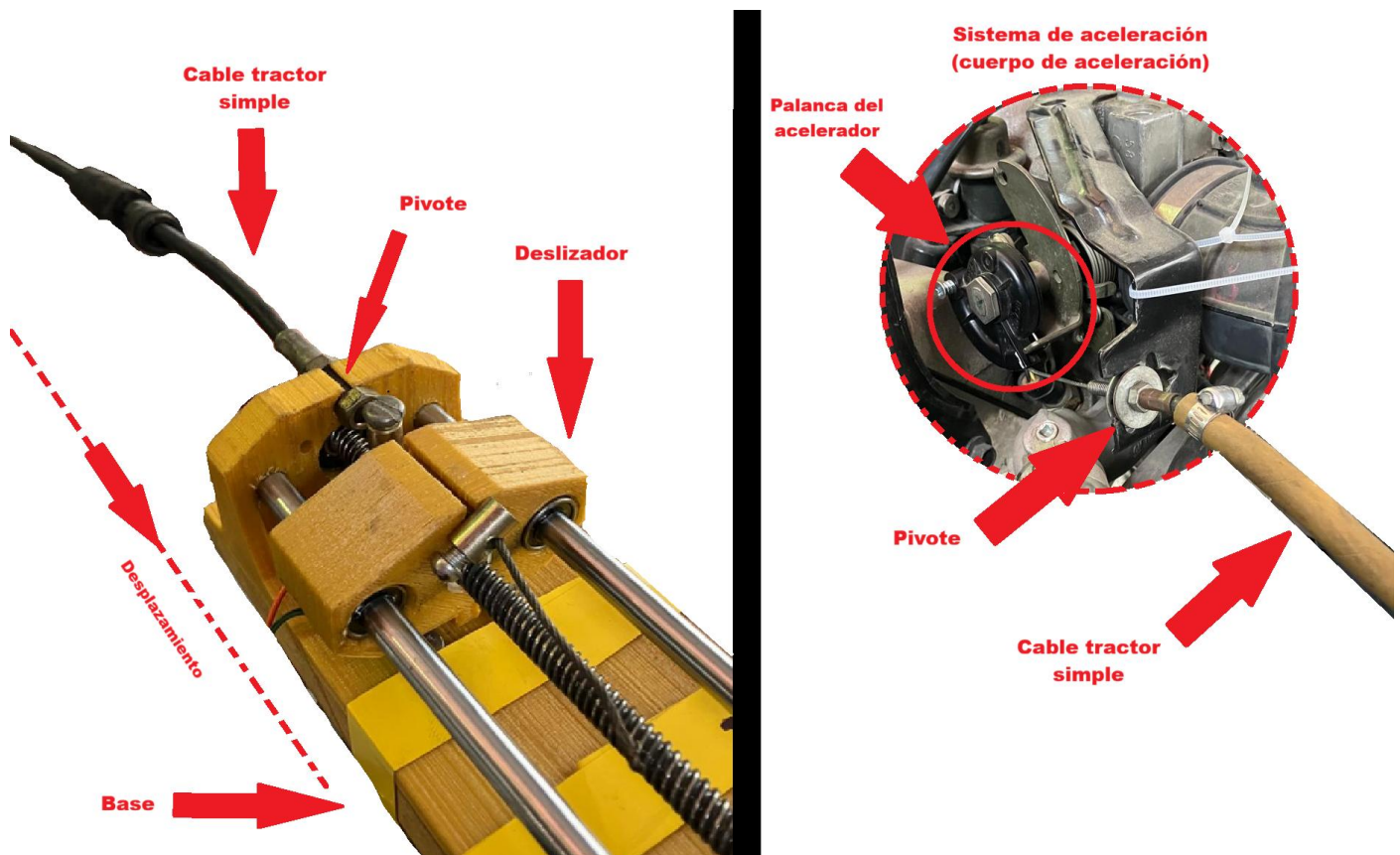


Ilustración 55. Aplicación del actuador para sistemas de aceleración.

CAPÍTULO 4: EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS

Con el propósito de verificar la funcionalidad del prototipo y caracterizar su desempeño, se realizaron un conjunto de pruebas orientadas a obtener información básica sobre su comportamiento operativo. Dichas pruebas permiten evaluar tanto la compatibilidad del actuador con los sistemas disponibles en el laboratorio como sus prestaciones en términos de sensibilidad, repetibilidad, exactitud y durabilidad.

En primer lugar, se realizó una prueba funcional, cuyo objetivo es comprobar que el actuador es compatible o puede ser adaptado a los distintos motores presentes en el laboratorio, garantizando un funcionamiento mecánico y eléctrico adecuado dentro del rango operativo del sistema de aceleración.

También, se implementó una prueba de sensibilidad, cuyo objetivo es determinar el desplazamiento mínimo reproducible por el actuador dado un cambio en el voltaje de la señal de control. Esta prueba consiste en aplicar incrementos sucesivos mínimos en la referencia de posición y registrar el cambio efectivo medido por el sistema de realimentación, permitiendo identificar la menor variación de posición que puede ser realizada por el conjunto actuador–sensor.

Posteriormente, se llevó a cabo la prueba de repetibilidad, la cual consiste en repetir una misma posición dentro del recorrido permisible del sistema de aceleración, registrando la variabilidad de la posición medida por el codificador de posición en cada repetición, con el fin de evaluar la repetibilidad del sistema.

Asimismo, se efectuó una prueba de exactitud, la cual evalúa la cercanía entre la posición de referencia establecida y la posición efectivamente alcanzada por el actuador en estado estacionario, considerando distintos puntos del rango operativo. Esta prueba permite cuantificar el error absoluto del sistema y verificar su capacidad para seguir la referencia impuesta.

Finalmente, se implementó una prueba de durabilidad, la cual se desarrolló durante un periodo aproximado de 12 horas, en el que el actuador fue conmutado cada 5 minutos entre valores representativos del rango permisible, con el fin de analizar su comportamiento ante un uso prolongado y repetitivo.

PRUEBA FUNCIONAL

OBJETIVO

- Verificar que el actuador puede operar correctamente y adaptarse a los distintos motores disponibles en el laboratorio sin fallas mecánicas o eléctricas.
- Verificar que el actuador puede cumplir con la manipulación de la velocidad angular del motor.

CONDICIONES

- Actuador acoplado al motor en estudio, con carga mecánica proveniente del sistema de aceleración.
- Motor a una temperatura de 90 [°C].
- Al menos 1 [min] de prueba por régimen:
 - Para el motor V6
 - Los puntos de operación son 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 y 2000 [RPM]
 - Para el motor Diesel monocilíndrico
 - Los puntos de operación son 2500, 3000 y 3500 [RPM].
- Alimentación nominal del sistema 12 [V] y 5 [V].
- Recorrido completo del rango permisible del sistema de aceleración.

CRITERIOS CUANTITATIVOS

- Velocidad angular promedio del motor V6 y Diesel monocilíndrico.
- Desviación estándar de la velocidad angular del motor V6 y Diesel monocilíndrico.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

1. Se preparó el motor en estudio asegurando que se encuentre correctamente instalado en el dinamómetro, con los sistemas de monitoreo y adquisición de datos activos y listos para operación.
2. Se conectó un extremo del cable de tracción al mecanismo de aceleración del motor.
3. Se energizó el actuador y verificó su correcto encendido.
4. Se conectó el extremo libre del cable de tracción al actuador, ajustándolo hasta alcanzar una tensión adecuada que elimine holguras sin accionar el mecanismo de aceleración en condición de reposo.
5. Se encendió el motor y se esperó su estabilización térmica hasta alcanzar una temperatura de operación de 90 [°C]. Para el caso del ensayo del motor V6, la temperatura se monitoreó mediante una herramienta de diagnóstico automotriz que muestra variables de interés como la temperatura y las revoluciones por minuto del motor, que se muestra en la Ilustración 57. Para el motor Diesel monocilíndrico, se

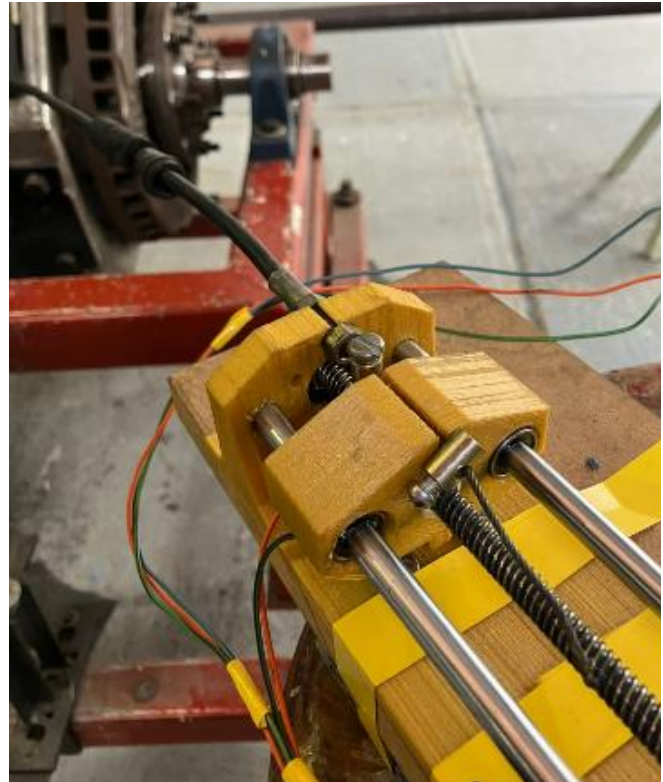
mantuvo encendido el motor durante 5 [min] a 2500 [RPM], para garantizar la estabilización del motor.

6. Se ajustó el régimen del motor mediante el potenciómetro conectado a la señal de control, conectado al actuador, incrementando la señal de control hasta alcanzar el régimen objetivo. Para el motor V6 la verificación del régimen puede realizarse utilizando la herramienta de diagnóstico automotriz mencionada previamente, para el motor Diesel monocilíndrico.
7. Se ejecutaron los regímenes de prueba conforme al tipo de motor evaluado, manteniendo cada punto de operación durante un mínimo de 1 a 3 minutos:
 - a. Para el motor Diesel monocilíndrico: iniciar en 2500 RPM y elevar la velocidad en incrementos de 500 RPM hasta 3500 RPM.
 - b. Para el motor V6 a gasolina: iniciar en 1000 RPM e incrementar en pasos de 200 RPM hasta 2000 RPM.

La Ilustración 56 muestra la configuración del actuador para operar sobre el motor V6 que se encuentra en la UNICE. La ilustración se basa principalmente en mostrar el acople del cable tractor.



(A)

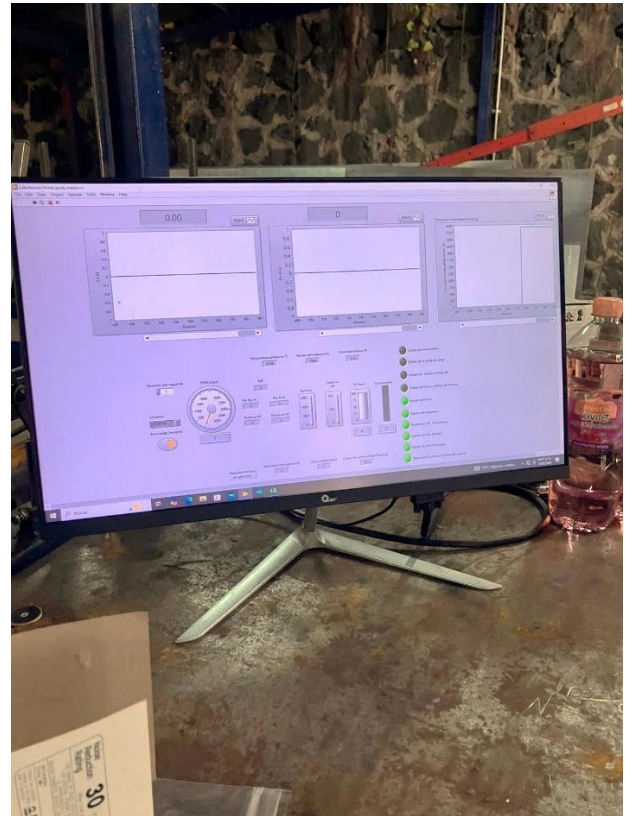


(B)

Ilustración 56. Acople de cable tractor para prueba funcional: (A) acople de cable tractor a cuerpo de aceleración de un motor V6, (B) acople de cable tractor a actuador de sistemas de aceleración



(A)



(B)

Ilustración 57. Interfaz para verificación de prueba funcional: (A) interfaz de herramienta de diagnóstico OBDII, (B) interfaz de datos instrumentación UNICE.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

MOTOR V6

Con la finalidad de observar el comportamiento del motor, se obtuvo su comportamiento en ralentí mostrado en la Ilustración 58, para observar que el régimen suele variar con ± 19 [RPM]. Esto nos dice que esperaremos variaciones para los ensayos siguientes.

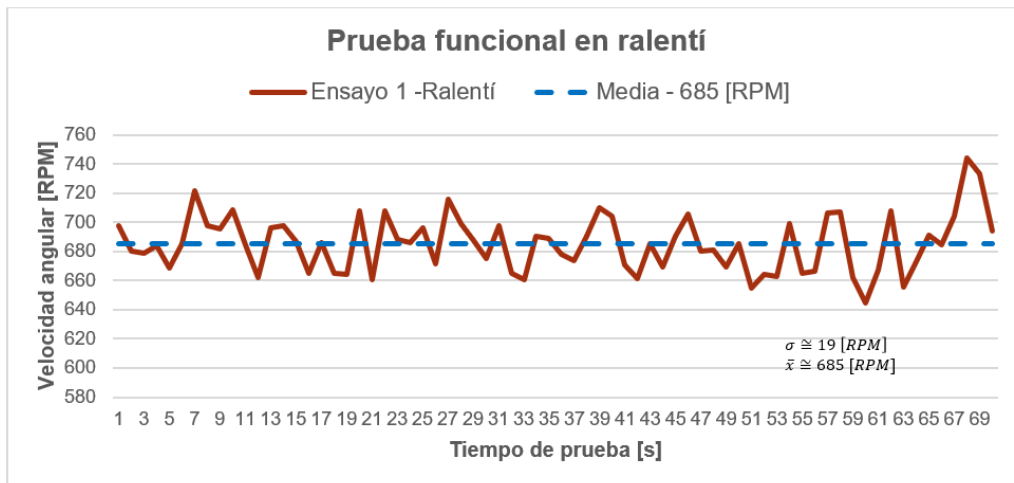


Ilustración 58. Prueba funcional en ralentí.

La Tabla 7, muestra el resumen de los datos obtenidos en la prueba funcional para el motor V6, donde en la primera columna se enlistan las velocidades angulares objetivos, y en las columnas contiguas se reportan las velocidades alcanzadas por cada punto de operación y su desviación estándar.

Tabla 7. Resultados de prueba funcional para motor V6.

Velocidad angular objetivo [RPM]	Promedio de velocidad angular alcanzada [RPM]	Desviación estándar [RPM]
1000	994	14
1200	1161	13
1400	1370	22
1600	1629	8.5
1800	1802	19
2000	2018	10

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que, para el motor V6 disponible en el laboratorio, el actuador es capaz de regular el régimen de revoluciones por minuto con un nivel de exactitud adecuado dentro del rango de operación evaluado, presentando un desempeño estable y repetible que resulta satisfactorio para las pruebas realizadas en el dinamómetro de banco.

MOTOR DIESEL MONOCILÍNDRICO

El caso del motor Diesel monocilíndrico, los puntos de operación se reducen a 2500, 3000 y 3500 [RPM]. La Tabla 8 muestra el resumen de estos datos, manteniendo el formato de la Tabla 7.

Tabla 8. Resultados de prueba funcional para motor Diesel monocilíndrico.

Velocidad angular objetivo [RPM]	Promedio de velocidad angular alcanzada [RPM]	Desviación estándar [RPM]
2500	2506	30
3000	2998	32
3500	3508	36

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que, para el motor Diesel monocilíndrico disponible en el laboratorio, el actuador es capaz de regular el régimen de revoluciones por minuto con un nivel de exactitud adecuado dentro del rango de operación evaluado, presentando un desempeño funcional para las pruebas realizadas en el dinamómetro de banco.

SENSIBILIDAD

OBJETIVO

- Determinar los cambios mínimos que pueden ejecutarse con el actuador de sistemas de aceleración.

VARIABLE INDEPENDIENTE

- Valor de la señal de control en donde se registra cambio en la posición del eje del actuador.

VARIABLE DEPENDIENTE

- Posición angular desplazada (θ_{Δ}).

CRITERIOS CUANTITATIVOS

- Pendiente de la regresión lineal aplicada sobre la curva de respuesta θ_{Δ} vs. V_{Δ}

INFORMACIÓN PREVIA

Para la ejecución de las pruebas de resolución, exactitud y precisión se desarrolló un módulo auxiliar de pruebas basado en Arduino, el cual integra un convertidor digital–analógico (DAC) para la generación controlada de señales de control, un módulo de reloj en tiempo real (RTC) para el registro temporal de eventos y una pantalla LCD para la visualización local de parámetros.

Este módulo, en adelante denominado Módulo Auxiliar de Prueba, permitió aplicar variaciones digitales controladas en el rango de 0 a 1000 unidades, mapeadas linealmente al intervalo de 0 a 5 [V], correspondiente al rango de control del actuador. De esta manera, fue posible generar incrementos mínimos reproducibles en la señal de entrada y evaluar el comportamiento del sistema ante perturbaciones discretas conocidas.

CONDICIONES

- Potenciómetro digital conectado a la señal de control.
- Alimentación nominal del sistema del actuador 12 [V] y 5 [V].
- Se partió de una posición intermedia de 3.3 [V], esto debido a que los casos de 0 y 5 [V] son casos especiales donde no se puede analizar las características del actuador debido a que estas zonas son afectadas por los límites de carrera.
- Sin carga mecánica, es decir, sin conexión al sistema de aceleración alguno.
- Tiempo de estabilización 15 [s].

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

1. Se conectó la salida del convertidor digital–analógico (DAC) del prototipo de prueba a una de las entradas de control del actuador.
2. Se alimentó el prototipo de prueba conectando VCC y GND en la placa de pruebas correspondiente.
3. Se energizó el actuador y se verificó su correcto funcionamiento.
4. Se conectó el controlador del actuador a una computadora mediante puerto USB para visualizar, a través del monitor serie de la IDE, la posición angular medida por el codificador.
5. Se conectó el módulo auxiliar de pruebas mediante puerto USB a la computadora para generar la señal de referencia digital hacia el DAC. El sistema permite enviar valores numéricos al módulo auxiliar de pruebas en el rango de 0 a 1000, los cuales se relacionan linealmente al intervalo de 0 a 5 [V] correspondiente al rango permisible de la señal de control del actuador.

6. Se ajustó el valor del módulo auxiliar hasta obtener una salida aproximada de 3.3 [V], verificando el valor real con un multímetro. Experimentalmente, se determinó que en el prototipo de prueba un valor cercano a 649 produce dicho valor de voltaje.
7. Una vez establecido el punto de referencia inicial, se realizó un barrido ascendente del valor digital en incrementos mínimos donde se detecta movimiento, esto hasta registrar 15 muestras.
8. Una vez se concluyó el ensayo ascendente, se volvió a establecer el voltaje de 3.3 [V] en el módulo auxiliar de pruebas y se realizó un barrido descendente hasta registrar 15 muestras.
9. Cada muestra, se identificó como el punto mínimo de variación que genere un desplazamiento angular detectable del actuador. El movimiento puede confirmarse mediante:
 - a. Cambio en la lectura del codificador a través del monitor serie de la IDE,
 - b. Observación directa del eje,
 - c. Señal auditiva asociada al movimiento del motor.
10. Registrar al menos 15 valores consecutivos en cada dirección (incremento y decremento) donde se detecte movimiento, anotando para cada caso:
 - a. Voltaje real de la señal de control medido con multímetro,
 - b. Desplazamiento angular correspondiente desde IDE Arduino.
11. Con los datos obtenidos, se conformó un conjunto aproximado de 31 puntos de operación del voltaje de la señal de control contra el desplazamiento angular del eje del actuador, los cuales se emplearán para determinar la sensibilidad del actuador.

La Ilustración 59 muestra la configuración empleada para la prueba de sensibilidad, mismo que se utilizó para las pruebas siguientes de precisión, exactitud y tiempo de uso. En esta ilustración, se muestran dos monitores, uno para la comunicación con el módulo auxiliar de pruebas, mientras el otro se visualiza el estado del actuador mediante la escritura serial de la posición angular del eje de este.

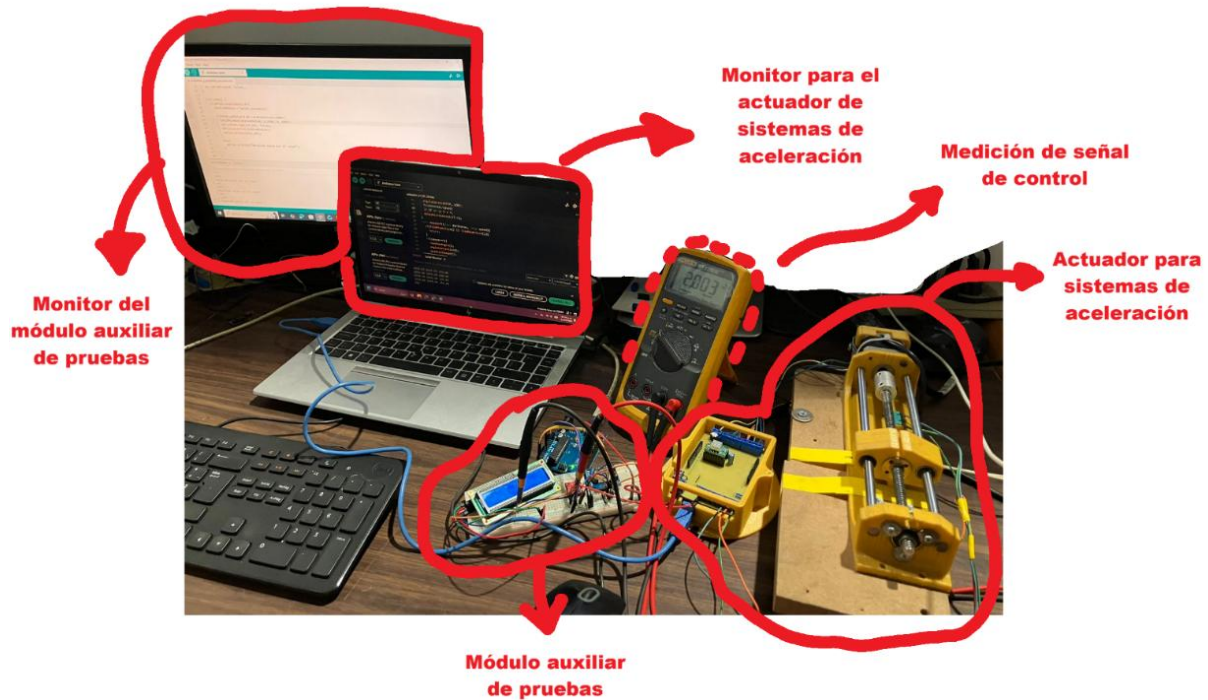


Ilustración 59. Configuración de la prueba de sensibilidad, repetibilidad, exactitud y tiempo de uso.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Ilustración 60 muestra la curva característica ascendente donde se obtuvo la sensibilidad del actuador, en el eje de las abscisas se reporta el desplazamiento angular, mientras que, en el eje de las ordenadas se muestra el voltaje de la señal de control que provoca dicho desplazamiento.

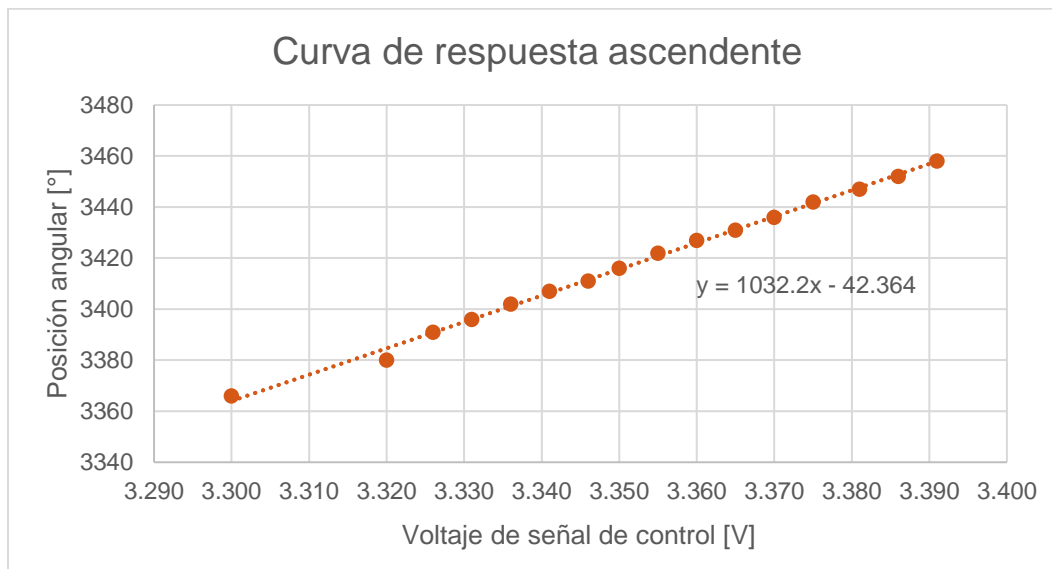


Ilustración 60. Resultados de prueba de sensibilidad ascendente en el actuador.

La interpretación de los datos obtenidos en la Ilustración 60 para estimar la sensibilidad del actuador de manera ascendente, es mediante el ajuste de una línea de tendencia sobre la curva de respuesta, donde la pendiente de dicha recta representa la razón de cambio del ángulo por cada muestra registrada. La pendiente de la proyección lineal obtenida es de 1032 [°/V]. Esto indica que, por cada voltio de variación en la señal de control, el actuador registrará un desplazamiento angular de 1032 [°].

Por su parte, en la Ilustración 61 se muestra la curva de respuesta descendente. En esta la sensibilidad es de 1082 [°/V], lo que significa que cada voltio de variación provocará un desplazamiento angular de 1082 [°].

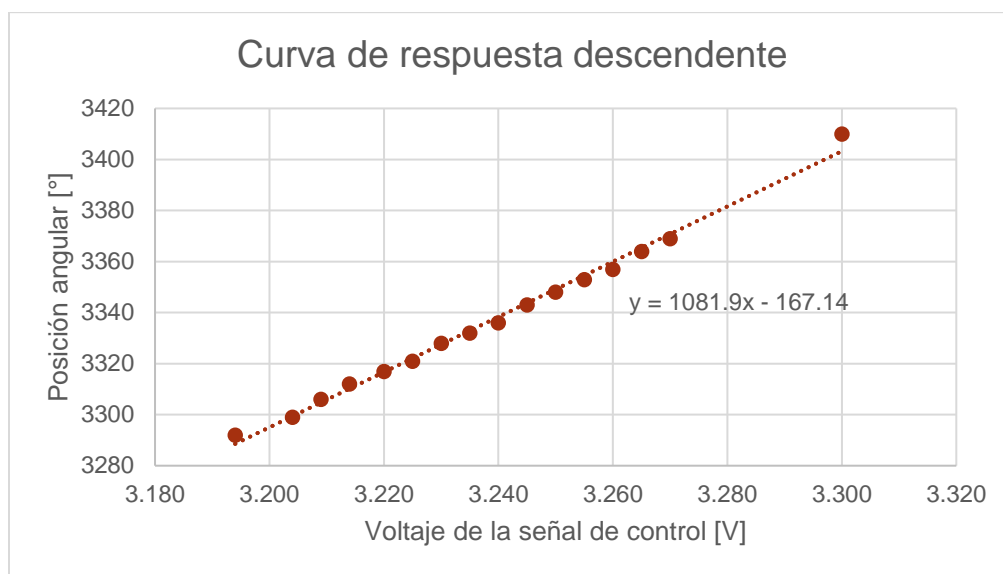


Ilustración 61. Resultados de prueba de sensibilidad descendente en el actuador.

El voltaje mínimo detectable por el actuador es de 5 [mV], esto debido a las características del ADC de la tarjeta de desarrollo. Para una dirección ascendente, con una sensibilidad de 1081.9 [°/V] se produce un efecto mínimo de 5.40 [°]. En dirección descendente, con una sensibilidad de 1032.2 [°/V], se produce un efecto mínimo de 5.161 [°].

Considerando la sensibilidad obtenida en esta prueba, se concluye que el actuador presenta una resolución aproximada de 5 [°]. Este valor corresponde a un desplazamiento lineal mínimo cercano a 130 [μm], tomando en cuenta que el sistema emplea un husillo con un avance de 8 [mm] por revolución. En consecuencia, se puede afirmar que el sistema presenta una resolución adecuada para aplicaciones de control de posición en sistemas de aceleración, donde se requiere un desplazamiento continuo y controlado del mecanismo.

REPETIBILIDAD Y EXACTITUD

OBJETIVO

- Evaluar la repetibilidad del actuador al alcanzar una misma posición angular en ejecuciones sucesivas y el error presente entre las muestras tomadas por cada iteración de ejecuciones.

VARIABLE INDEPENDIENTE

- Voltaje de señal de control
- Posición angular esperada
- Cantidad de secuencias ejecutadas

VARIABLE DEPENDIENTE

- Posición angular real en el actuador (medida por el codificador de posición del actuador).

CONDICIONES DE PRUEBA

- Señal de control proveniente del actuador DAC proveniente del Módulo Auxiliar de Pruebas.
- Alimentación nominal del sistema 12 [V] y 5 [V].
- Se tendrán 10 muestras por cada voltaje de la señal de control donde se proponen 1, 2, 3 y 4 [V].
- Secuencia de voltaje de señal de control ascendente (1,2,3 y 4 [V]) y descendente (4, 3, 2 y 1 [V]).
- 40 muestras en total, lo que implica que se tendrá que repetir 5 veces la secuencia ascendente y 5 veces la secuencia descendente.
- Tiempo de estabilización 15 [s].
- Sin carga mecánica, es decir, sin conexión al sistema de aceleración alguno.

CRITERIOS CUANTITATIVOS

Desviación estándar (σ) de la posición angular de cada muestra por voltaje de la señal de control, este cálculo permitirá determinar la repetibilidad.

Ecuación 5

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\theta_i - \bar{\theta})^2}{N - 1}}$$

Donde θ_i es la posición angular de cada muestra por valor de voltaje de la señal de control, $\bar{\theta}$ es el promedio de la variación de la posición angular de las muestras y N corresponde al número total de muestras.

Promedio de error (E) para determinar la exactitud.

Ecuación 6

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N=40} \left| \theta_{teórica} - \theta_{k_{exp}} \right|$$

Donde $\theta_{teórica}$ es el valor esperado para la posición angular del eje del actuador, el cual varía dependiendo del voltaje de la señal de control en estudio. Continuando, $\theta_{k_{exp}}$ es la posición angular medida en el actuador. N corresponde al número total de muestras.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

1. Dado que se usó la misma configuración de la prueba de resolución, se siguen los pasos de la prueba anterior yendo del punto 1 al punto 5.
2. Una vez se ejecutaron los pasos anteriores, se procedió a ejecutar los valores de referencia de voltaje en el DAC del Módulo Auxiliar de Pruebas en el siguiente orden 1,2,3 y 4 [V]. Experimentalmente se determinó que el valor que genera cada uno de los voltajes en el módulo auxiliar de pruebas son 196, 393, 590 y 787 respectivamente.
3. La secuencia anterior se repitió 5 veces, esperando 15 [s] por cada muestra, posteriormente 5 veces en sentido descendente, es decir, de 4 a 1 [V]. De esta forma, al finalizar la prueba se obtuvieron 40 muestras que fueron analizadas para obtener las características de repetibilidad y exactitud.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Ilustración 62 representa la secuencia ejecutada de manera ascendente y su correspondencia en posición angular para cada secuencia, donde para 1, 2, 3 y 4 [V] corresponde una posición angular teórica de 1040, 2040, 3120 y 4160 [°]. En esta ilustración también se puede observar que entre cada muestra se esperó 15 [s] para que el actuador se estabilizara. Esta secuencia se repitió 5 veces donde una vez se llega a 4 [V] se restablece la señal en 1 [V] y se repite la secuencia.

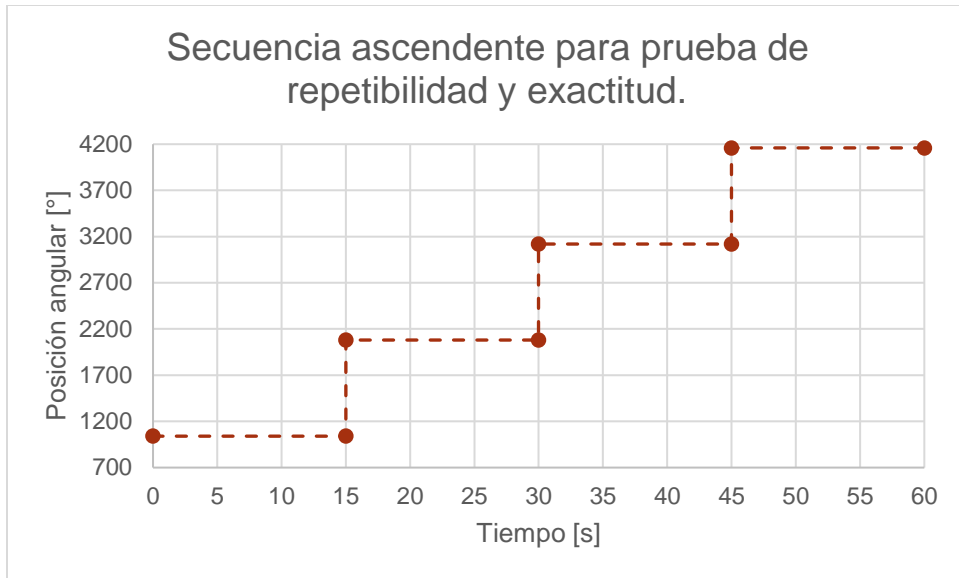


Ilustración 62. Secuencia ascendente para caracterización del actuador.

De manera similar a la ilustración anterior, se repitió 5 veces una secuencia descendente para obtener una respuesta más completa del actuador, dado que puede operar en sentido ascendente y descendente. El tiempo entre muestra también se tomó como 15 [s] y la repetición de nuevamente fue de tipo circular.

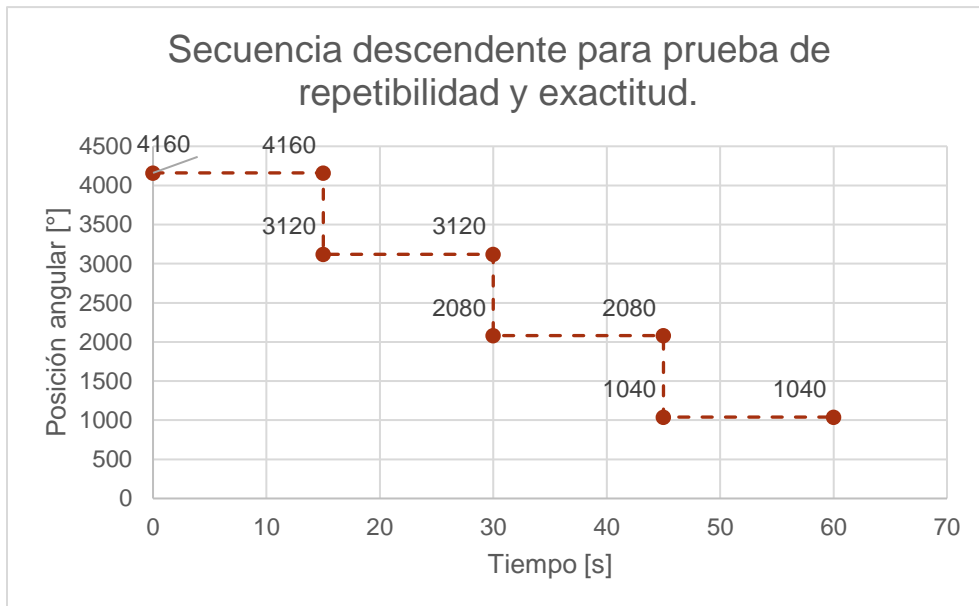


Ilustración 63. Secuencia descendente para caracterización del actuador.

Los resultados de cada ensayo se resumen en la Tabla 9, donde se muestra la exactitud obtenida con la Ecuación 6 y la repetibilidad obtenida con la Ecuación 5.

Tabla 9. Resultados de prueba de repetibilidad y exactitud.

Ensayo [°]	Error [°]	Repetibilidad [°]
1040	24.30	20.77
2080	32.20	33.99
3120	41	30.83
4160	88.40	2.065
PROMEDIO	46.475	21.92

Finalmente, se observa que el error promedio del actuador es aproximadamente 46.5 grados, que en desplazamiento lineal corresponde a un error de 1.03 [mm] para la configuración actual de husillo con avance de 8 [mm]. Por su parte, la repetibilidad muestra que la posición angular puede tener una variación de ± 22 [°] representando una variación de ± 0.5 [mm] en términos de desplazamiento lineal.

TIEMPO DE USO (MAYOR A 7 HRS)

OBJETIVO

Evaluar el comportamiento del actuador y sus componentes ante un uso prolongado y repetitivo.

VARIABLE INDEPENDIENTE

- Tiempo de operación

VARIABLE DEPENDIENTE

- Número de ciclos ejecutados

CONDICIONES DE PRUEBA

- Duración total ≈ 20 h
- Conmutación cada 5 min entre dos posiciones del rango permisible

INFORMACIÓN PREVIA

La finalidad de esta prueba es corroborar que el actuador es capaz de alcanzar un tiempo de prueba mínimo de 7 horas en conmutación continua, dado que las pruebas que se realizan en el laboratorio tienden a abarcar estos ciclos de operación. La prueba se ejecutó realizando una conmutación continua cada 5 minutos, para medir los ciclos de conmutación se utilizó como señal de salida el micro interruptor de límite de carrera superior del actuador para indicarle al módulo auxiliar de pruebas que se ha iniciado un ciclo de conmutación.

La Ilustración 64 muestra la secuencia para la prueba de tiempo de uso que ejecuta el actuador de sistemas de aceleración con ayuda del módulo auxiliar de pruebas que permite que cada 5 minutos el DAC mande una señal de control de 5 [V], conmutando el estado del actuador. Cuando se activa el micro interruptor de límite de carrera superior, se regresa el actuador a la posición cero mediante una escritura en el DAC de 0 [V].

Los relojes mostrados a la derecha en la Ilustración 64, representan el tiempo que tarda el actuador en llegar a la posición deseada en cada paso de la secuencia, cuando el actuador está en reposo en la primer iteración el tiempo que se registra es de 0 minutos, sucesivamente cuando se llega a los 5 minutos, la conmutación se toma 30 [s] para completar un ciclo. Cuando el micro interruptor se libera el módulo auxiliar de pruebas incrementa un contador para registrar un ciclo de conmutación completo.

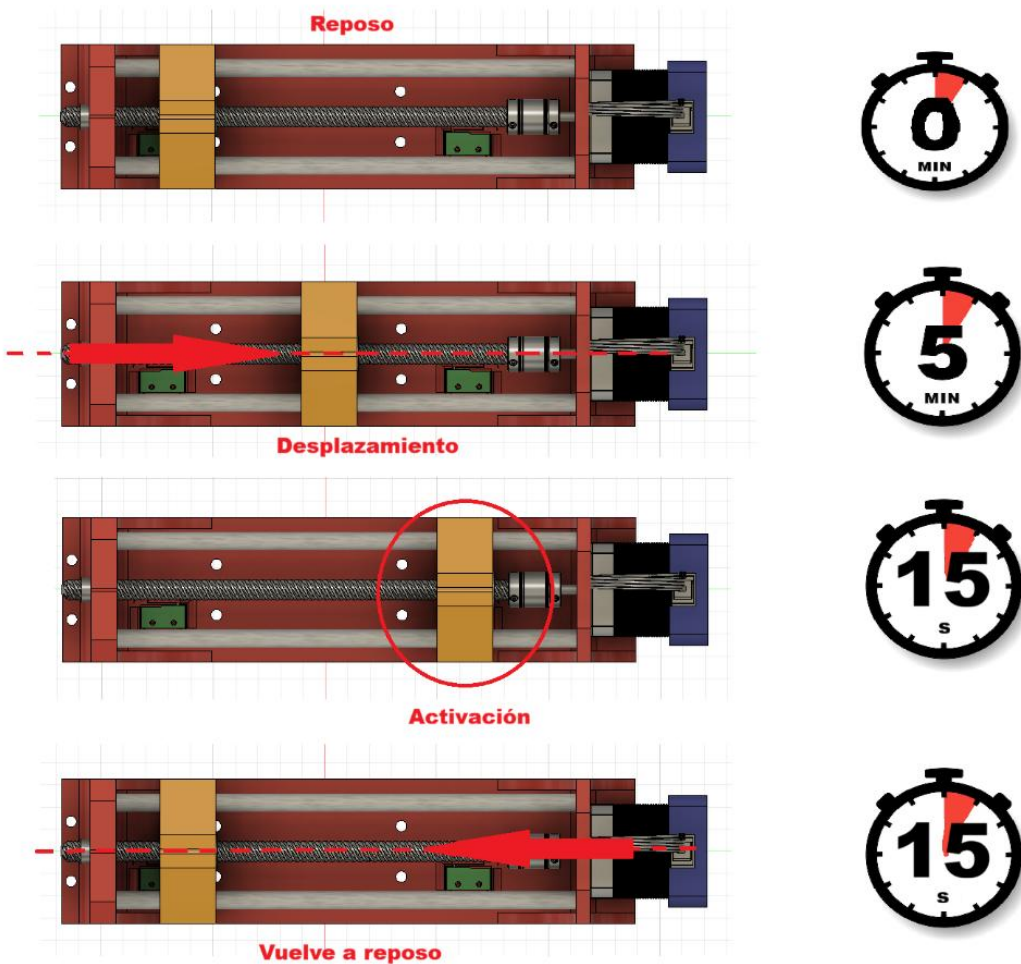


Ilustración 64. Secuencia de un ciclo de conmutación.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

1. Dado que se usó la misma configuración de la prueba de resolución, se siguen los pasos de la prueba anterior yendo del punto 1 al punto 3.
2. Una vez se ejecutaron los pasos anteriores, se estará ejecutando la rutina cada 5 [min] hasta que se cumpla el tiempo establecido, dado que para esta prueba se ha tenido que cargar una rutina distinta para el módulo auxiliar de pruebas, que cuando se energiza, comienza automáticamente a ejecutar el algoritmo de cuenta.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se basa en el número de ciclos de conmutación esperados contra los detectados por el módulo auxiliar de pruebas. El tiempo registrado en el ensayo fue de 20 horas con 41 minutos, para calcular el número de ciclos de conmutación debemos expresar el tiempo del ensayo en minutos para contabilizar el número de ciclos de conmutación.

Ecuación 7

$$T_{ensayo} = 20 * 60 [min] + 41 [min] = 1241 [min]$$

Ahora que se sabe el tiempo del ensayo en minutos, el número de ciclos de conmutación se obtiene como el cociente entre el tiempo del ensayo y el tiempo de conmutación.

Ecuación 8

$$N_{cc} = \frac{T_{ensayo}}{T_c} = \frac{1241}{5} = 248$$

Por ende, el número de ciclos esperados para el tiempo de duración de la prueba, son 248 ciclos, donde experimentalmente se registraron 243 ciclos lo cual equivale a un tiempo de operación útil de 20 horas con 15 minutos.

En la Ilustración 65 se muestra la configuración de la prueba de tiempo de uso, efectuada con ayuda del módulo auxiliar y de su pantalla LCD integrada. En esta se muestra los días, horas y minutos de prueba ejecutados. También se muestra el estado del micro interruptor con la etiqueta "SW". Finalmente, se muestra la cantidad de conmutaciones realizadas mostrados con la etiqueta "CNT" que hace referencia a la palabra "cuenta".

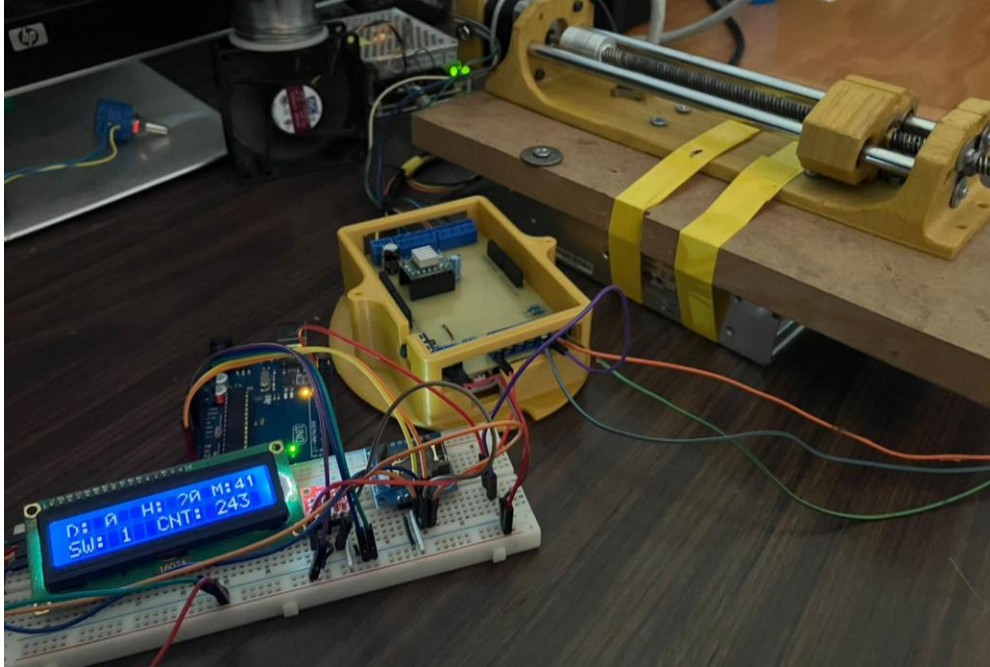


Ilustración 65. Configuración de la prueba de tiempo de uso.

CONCLUSIÓN

El desarrollo e implementación del actuador de sistemas de aceleración presentado en este trabajo permitió cumplir con el objetivo de controlar de manera precisa en el rango permisible la velocidad angular de motores de combustión interna en una celda de pruebas. A través de la integración de un sistema electromecánico con control en lazo cerrado, se logró una relación directa entre la señal de control y la respuesta del motor.

Los resultados obtenidos en las pruebas funcionales evidencian que el sistema es capaz de alcanzar las velocidades angulares objetivo en los sistemas de aceleración, lo que valida su desempeño en condiciones reales de operación y que a su vez valida el objetivo de actuar en el rango permisible de los sistemas de aceleración.

Mediante la prueba de sensibilidad se obtuvo la respuesta del actuador ante una señal de control, determinando una sensibilidad de $1032 [^{\circ}/V]$ en sentido descendente y $1082 [^{\circ}/V]$ en sentido ascendente. Esto implica que, al aplicar una señal de $1 V$, el sistema genera un desplazamiento angular de $1032 [^{\circ}]$ en sentido descendente y $1082 [^{\circ}]$ en sentido ascendente. Considerando un valor mínimo de cambio de $5 [mV]$ en la entrada, el sistema presenta un desplazamiento angular mínimo de aproximadamente $5 [^{\circ}]$, lo que corresponde a un desplazamiento lineal cercano a $0.13 [mm]$.

Las pruebas de exactitud y repetibilidad se obtuvieron las características de repetibilidad del actuador, con una exactitud de $46 [^{\circ}]$ y una repetibilidad de $22 [^{\circ}]$, de esta forma, la posición del

deslizador del actuador puede tener un error de 1 [mm] en cuánto al desplazamiento lineal y 0.5 [mm] de variación al volver a la misma posición.

Estos parámetros característicos del actuador, particularmente la sensibilidad, exactitud y repetibilidad, permiten evaluar su viabilidad de implementación en distintos sistemas de aceleración. Esto se debe a que, al conocer las exigencias del mecanismo donde será acoplado, es posible determinar si el actuador puede operar dentro de los incrementos mínimos requeridos, garantizando un control adecuado del régimen del motor.

Con la prueba de tiempo de uso, se comprobó que el actuador es capaz de entregar un tiempo útil de operación mayor a 7 horas, donde experimentalmente se ejecutó una prueba que duró 20 horas con 15 minutos.

La manufactura del actuador además involucró diseño mecánico y electrónico, que da al sistema la facilidad de ser reparado ante cualquier daño que este pueda presentar. A lo largo de este trabajo, se reemplazaron componentes electrónicos que se dañaban por descargas electrostáticas o conexiones erróneas, fácilmente estos se detectaban mediante inspección o diagnóstico electrónico y la reparación consistía únicamente en reemplazar las piezas dañadas. De esta forma, se cumple con el objetivo de hacer que el sistema sea de fácil diagnóstico y reparación.

No obstante, en la etapa final del actuador se identificaron áreas de mejora que permitirán incrementar la repetibilidad, robustez y confiabilidad del sistema, especialmente en aplicaciones de uso prolongado o bajo condiciones más exigentes. Estas oportunidades de mejora se enfocan en futuros desarrollos del actuador como una mejor herramienta dentro de las celdas de prueba de la UNICE.

TRABAJO A FUTURO

Como parte del desarrollo futuro de este sistema se proponen diversas áreas de mejora enfocadas a la confiabilidad del actuador.

REDUCCIÓN NEMA 17 O NEMA 23

Se plantea la evaluación del uso de motores con diferentes características de par, como configuraciones basadas NEMA 23 o cajas reductoras de velocidad. En el caso de utilizar una reducción se puede alcanzar un mayor par y resolución entregadas por el motor.

HUSILLO DE PASO FINO.

Se propone la implementación de un husillo de paso fino en el mecanismo de transmisión. Esta modificación tiene como objetivo mejorar la resolución del desplazamiento lineal que implica un mejor control de la posición y velocidad. Además, la Ecuación 2 muestra que si el paso del

husillo A es menor, entonces la fuerza entregada por la transmisión es mayor. De esta forma no solo se tendría un control más fino, sino que una mayor transmisión de fuerza.

IMPRESIÓN EN PETG

En términos de la manufactura de la base del actuador, se considera la utilización de materiales como PETG para la impresión de componentes estructurales. Este material presenta mejores propiedades mecánicas y térmicas en comparación con alternativas como el PLA, lo que permitirá aumentar la durabilidad ante esfuerzos repetitivos y condiciones de operación más exigentes.

IMPLEMENTACIÓN DE TIMEOUT.

En cuanto al control y seguridad, se plantea una rutina que permita detectar errores en la trayectoria del actuador para llevar el actuador a una posición segura donde se permita analizar qué es lo que ha causado el fallo del sistema.

DRIVER CON MENOR RUIDO ACÚSTICO Y ELÉCTRICO

La sustitución del controlador del motor por alternativas con menor ruido acústico y eléctrico es de suma importancia ya que no solo contribuirá a una operación más silenciosa, sino que también reducirá interferencias en los sistemas de medición, en este caso en la adquisición de la señal de control del actuador.

PROGRAMACIÓN DEL PID

Finalmente, se propone profundizar en la programación y ajuste del controlador PID, mediante técnicas de discretización sistemáticas que permitan optimizar la respuesta dinámica del sistema, omitiendo el uso de bibliotecas y mejorando el conocimiento sobre este algoritmo.

ANEXOS

CAPTURA DE ESQUEMA ELECTRÓNICO DE LA TARJETA PRINCIPAL DEL ACTUADOR

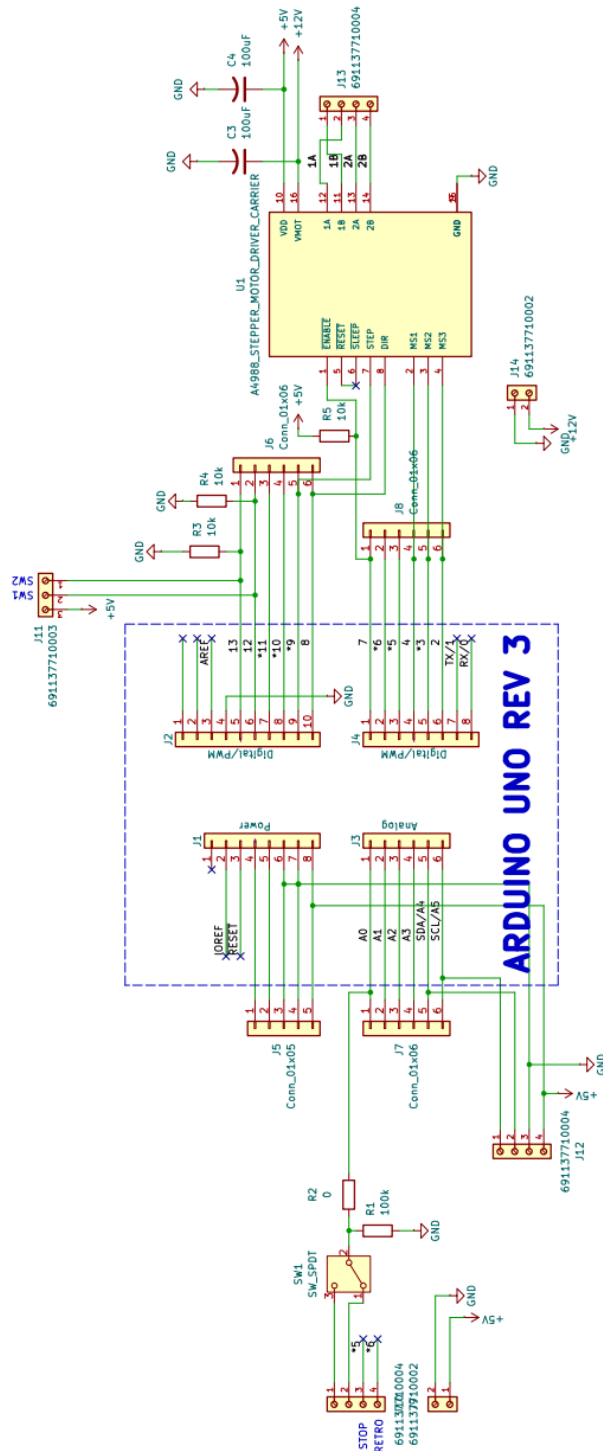


Ilustración 66: captura de esquema de la tarjeta principal del actuador

GUÍA DE USO

En este apartado se describe el procedimiento de operación del actuador, el cual debe seguirse para garantizar un funcionamiento correcto y seguro del sistema.

Los pasos para seguir son los siguientes:

1. Verificar que las conexiones eléctricas del actuador correspondan a las mostradas en la Ilustración 41, asegurando la correcta interconexión entre la tarjeta de control, el sistema de potencia y los elementos de medición.
2. Prestar especial atención al momento de conectar la alimentación de la tarjeta, ya que una conexión incorrecta puede provocar daños irreparables en los módulos electrónicos. En particular, se debe evitar la inversión de los niveles de alimentación, 5 [V] y 12 [V], así como la inversión de polaridad, es decir, la conexión incorrecta entre GND y las líneas de 5 [V] o 12 [V].
3. Hay que asegurar que el cable del interruptor SW1 sea el más cercano al pivote del cable tractor. De no respetarse esta condición, el actuador podría desplazarse fuera de su rango mecánico, provocando colisiones
4. La fuente de alimentación cuenta con un interruptor integrado para facilitar su operación. Una vez verificadas todas las conexiones, se debe colocar dicho interruptor en la posición ON para energizar el sistema.
5. La fuente de alimentación cuenta con un interruptor integrado para facilitar su operación. Una vez verificadas todas las conexiones, se debe colocar dicho interruptor en la posición "ENCENDIDO" para energizar el sistema.
6. Al energizar el sistema, el motor debe moverse en dirección al pivote, si esto no es así, DESENERGIZA rápidamente el sistema e invierte una de las fases del motor, vuelve a energizar y corrobora que el motor se mueva en la dirección deseada.
7. Al completar los pasos anteriores, el actuador debe inicializarse correctamente, realizando su movimiento hacia la posición cero del sistema, para posteriormente responder de manera proporcional a la señal del potenciómetro de control.

En caso de que el comportamiento descrito no se presente, se deberá consultar la siguiente lista de problemas donde se detallan posibles causas y actividades correctivas.

1. El motor PaP del actuador no se mueve.
 - a. Mala conexión con el codificador AS5600.
 - b. Mala recepción de campo de imán, tapa del motor mal colocada.
 - c. Codificador AS5600 en mal estado.
 - d. Controlador A4988 en falso contacto o en mal estado.

2. El motor se mueve erráticamente.
 - a. Alguna de las fases está en falso contacto o desconectada
 - b. Controlador A4988 en mal estado.
 - c. Potenciómetro o DAC en mal estado.

REFERENCIAS

- [1 Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México, «Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020,» Dirección General de Calidad del Aire , Ciudad de México, 2023.
- [2 J. L. Reyes, *Desarrollo de un sistema de instrumentación para dinamómetros automotrices*, Ciudad Universitaria, 2025.
- [3 A. J. Martyr y M. A. Plint, *Engine testing: Theory and practice*, Butterworth-Heinemann, 1998.
- [4 J. S. Killedar, *Automotive dynamometer: A technical guide*, CRC Press, 2012.
- [5 A. Rovira de Antonio y M. Muñoz Domínguez, *Motores de combustión interna*, Madrid: UNED, 2015.
- [6 J. J. Molina Campoverde, N. Rivera Campoverde y P. Molina Campoverde, *Fundamentos de los sistemas de inyección a gasolina y autotrónica automotriz*, N/A: Abya-Yala, 2025.
- [7 W. W. Pulkrabek, *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*, Pearson, 2014.
- [8 J. Erjavec, «Automotive technology: A systems approach,» Thomson Learning, N/A., 2000.
- [9 Robert Bosch GmbH, *Technical instruction: Fuel injection equipment for Diesel engines: Governors for in-line pumps*, Automotive Equipment Division, 1975.
- [1 G. M. Smith, *Dynamometers guide*, Dewesoft, 2024.
- 0]

- [1 J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York: McGraw-Hil, 1998.
1]
- [1 A. J. Martyr y M. A. Plint, *Engine testing: The design, building, modification and use of
2] powertrain test facilities*, Butterworth-Heinemann, 2012.
- [1 Cable Motion Controls, «Motion control cables design guide.,» 2024. [En línea]. Available:
3] <https://cablecraft.com/wp-content/uploads/2024/03/motion-control-cables-design-guide.pdf>.
- [1 CarlStahl Techno CAbles, «Cables Bowden, cable de control push-pull.,» [En línea].
4] Available: <https://www.carlstahl-technocables.com/gb/en/rope-technology/bowden-cables/>.
- [1 Felsted Products, *Mechanical control systems: Control cables, levers and push-pull
5] assemblies*, 2009.
- [1 R. Acosta, D. Argüello y R. Robalino, «Caracterización de los motores paso a paso y su
6] aplicación,» *Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA) Universidad Técnica de Cotopaxi.*,
2021.
- [1 MITCalc, «Power Screw,» [En línea]. Available:
7] <https://www.mitcalc.com/doc/powerscrew/help/en/PowerScrew.htm>. [Último acceso: febrero
2026].
- [1 . Hao y . Liu, «Study on a Novel Absolute Magnetic Encoder,» *IEEJ Journal of Industry
8] Applications*, 2016.
- [1 UNIT electronics, *A4988 Driver para motor a Pasos con Disipador*, Ciudad de México.
9]
- [2 Z. Peterson, «Conceptos básicos del proceso diseño de PCB para nuevos diseñadores,»
0] Altium, 29 diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://resources.altium.com/es/p/pcb-design-basics-new-designers>.
- [2 R. N. K. Loh, T. Pornthanomwong, J. S. Pyko, A. Lee y M. N. Karsiti, «Electronic throttle
1] control system: modeling, indentification and model-based control designs.,» *Engineering* ,
Vol.5 No.7, pp. 1029-1035, 2013.

[2 Bryant Industries, LCC, «Custom Control Cables,» [En línea]. Available:
2] <https://www.cccables.com/>.

[2 K. Ogata, Ingeniería de control moderna, Prentice Hall Hispanoamericana, 1980.
3]

[2 M. D. Pérez, Máquinas eléctricas modernas, Kimerius, 2000.
4]

[2 Monolithic Power Systems, «Stepper motors: Basics, types, and uses».
5]

[2 S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, 2012.
6]

[2 I. Ionica, . Modreanu y . Boboc, «Design and modeling of a hybrid stepper motor,» p. 10th
7] International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)., 2017.

[2 M. y. Control., «Tornillo ACME 1 metro,» [En línea]. Available:
8] <https://maquinariaycontrol.com.mx/tienda/acme1metro>.

[2 Electronics, Arrow, «Rotary Encoder vs Potentiometer – How to Choose,» Mayo 2019. [En
9] línea].

[3 Microchip Technology, «AVR221: Discrete PID Controller on tinyAVR and megaAVR
0] Devices,» 2016. [En línea].

[3 AVL, «Actuators for engine, powertrain and vehicle testbeds,» 2024. [En línea]. Available:
1] <https://www.avl.com/en/testing-solutions/ice/hybrid-propulsion-testing/powertrain-testing/actuators-engine-powertrain-and-vehicle-testbeds>.

[3 IndiaMART, «Avl throttle actuator compact,» 2016. [En línea]. Available:
2] <https://www.indiamart.com/proddetail/avl-throttle-actuator-compact-14404675955.html>.

[3 J. B. Song y K. S. Byun, «Throttle actuator control system for vehicle traction control,»
3] *Mechatronics*, pp. 477-495, 1999.

[3 Z. Sun y X. Jiao, «Adaptive prescribed performance servo control of an automotive electronic
4] throttle system with actuator constraint,» *Turkish Journal of Electrical Engineering &
Computer Sciences*, p. 956–968, 2020.

[3 Thomson, «Electrak® throttle actuator: The next generation of throttle control technology,»
5] 2024. [En línea]. Available:
https://www.thepneumaticstore.com/images/pdf/Thomson%20Throttle%20Actuator%20Catalog.pdf?srsltid=AfmBOooVq7fZvAqyb114CbSEtCxOH9JSagqiYZKk_7LMIouPGiUqbPZd.

[3 AVL, «Actuators for Engine, Powertrain and Vehicle Testbeds,» 2024. [En línea]. Available:
6] <https://www.avl.com/en/testing-solutions/ice/hybrid-propulsion-testing/powertrain-testing/actuators-engine-powertrain-and-vehicle-testbeds>.

[3 B. Beauregard, «PID library for Arduino,» 2011. [En línea]. Available:
7] <https://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary/> .

[3 NOOK, «Glosario y datos técnicos de acme screw,» [En línea]. Available:
8] <https://www.nookindustries.com/resources/general-technical-references/acme-screw-glossary-and-technical-data/>. [Último acceso: febrero 2026].