



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SERVOMECANISMOS
COMO PLATAFORMAS EXPANDIBLES PARA LA ENSEÑANZA E
INVESTIGACIÓN DE TEORÍAS DE CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

ERICK PATRICIO TIPÁN POZO
erick.tipan@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GABRIEL FERNANDO BRAVO, MSC
gabriel.bravo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. LUIS RICARDO SOTO, MSC
ricardo.soto@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **ERICK TIPÁN**, bajo mi supervisión.

ING. GABRIEL FERNANDO BRAVO, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

ING. LUIS RICARDO SOTO, MSc.

CO-DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **ERICK PATRICIO TIPÁN POZO**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Erick Patricio Tipán Pozo

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Objetivos específicos	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Equipos para la enseñanza de teorías de control.....	3
1.1.1. Generalidades	5
1.1.2. Funciones principales de equipos para la enseñanza de teorías de control	6
1.1.3. Importancia de equipos interactivos en la enseñanza de teorías de control.....	7
1.2. Definición de un servomecanismo	7
1.2.1. Partes y características de un servomecanismo	8
1.2.2. Caracterización de un sistema electromecánico	10
1.3. Sensores y Equipos de control.....	11
1.3.1. Equipos de control.....	12
1.3.1.1. Controladores lógicos programables	12
1.3.1.2. Controladores para motores DC.....	13
1.3.1.2.1. Parámetros a controlar en motores DC	15
1.3.1.2.2. Tipos de controladores para motores DC.....	15
1.3.2. Dispositivos para adquisición de datos (DAQ).....	16
1.3.3. Sensores	17
1.3.3.1. Detector de posición – Potenciómetro	17
1.3.3.2. Detector de velocidad – Encoder.....	17
1.3.3.3. Transmisores de datos inalámbricos	17
1.3.3.4. Módulos RF de 433Mhz.....	18
1.3.4. Manejo de datos	18
1.4. Modelado de un motor de corriente continua	19
1.4.1. Resistencia de armadura R	21
1.4.2. Constante de torque K_t	21
1.4.3. Torque de fricción T_f	21
1.4.4. Constante de fuerza contra electromotriz K_e	21
1.4.5. Inercia efectiva J.....	22
1.4.6. Coeficiente de amortiguamiento B_{eq}	23
1.4.7. Inductancia L	23
2. METODOLOGÍA	24
2.1. Diseño conceptual	24
2.1.1. Descripción general de máquinas similares en el mercado.....	24
2.1.1.1. Rotary Servo Base Unit.....	24
2.1.1.2. Industrial Plant Emulator.....	25
2.1.2. Casa de la calidad	26
2.1.2.1. Voz del usuario.....	26

2.1.2.2. Voz del ingeniero	27
2.1.2.3. Especificaciones técnicas.....	27
2.1.3. Análisis funcional.....	28
2.1.3.1. Desarrollo de los diagramas funcionales	28
2.1.3.2. Análisis de los diagramas funcionales.....	28
2.1.3.3. Solución para cada módulo	29
2.1.3.3.1. Módulo 1.....	29
2.1.3.3.2. Módulo 2.....	33
2.1.3.3.3. Módulo 3.....	38
2.1.3.3.4. Módulo 4.....	42
2.1.3.4. Selección de las alternativas	46
2.2. Diseño mecánico	47
2.2.1. Diseño mecánico preliminar	47
2.2.1.1. Requerimientos limitadores	47
2.2.1.2. Funciones críticas.....	48
2.2.1.3. Parámetros críticos.....	48
2.2.1.3.1. Módulo 1.....	48
2.2.1.3.2. Módulo 3.....	48
2.2.1.3.3. Módulo 4.....	48
2.2.1.4. Condiciones críticas	48
2.2.1.5. Establecimiento de condiciones críticas	49
2.2.1.5.1. Módulo 1: Tipo de Estructura.....	49
2.2.1.5.1.1. Equilibrio estático sobre el cuerpo base	49
2.2.1.5.1.2. Cargas sobre el cuerpo base.....	51
2.2.1.5.2. Módulo 3: Sistema motriz de la máquina.....	54
2.2.1.5.2.1. Caja Reductora.....	54
2.2.1.5.2.2. Selección del motor	58
2.2.1.5.3. Módulo 4: Sistema de engranes planetarios.....	60
2.2.1.5.3.1. Cargas sobre los rodamientos.....	60
2.2.1.5.3.2. Cargas sobre el soporte del sistema de engranes planetarios	61
2.2.1.5.3.3. Dimensión de sección del eje de salida.....	63
2.2.1.5.3.4. Cargas sobre el soporte de montaje de los engranes planetarios.....	68
2.2.1.5.3.5. Dimensionamiento de los engranajes rectos	71
2.2.2. Diseño mecánico definitivo	75
2.3. Diseño del control automático	75
2.3.1. Requerimientos limitadores	75
2.3.2. Funciones críticas.....	76
2.3.3. Parámetros críticos.....	76
2.3.4. Condiciones críticas	76
2.3.5. Diseño preliminar del control automático.....	77

2.3.5.1. Elementos de control para el sistema de engranes planetarios	77
2.3.5.2. Elementos de control para el sistema motriz	78
2.3.6. Establecimiento de condiciones críticas	78
2.3.6.1. Especificaciones del controlador	78
2.3.6.2. Especificaciones de los elementos de entrada	79
2.3.6.2.1. Potenciómetro	79
2.3.6.2.2. Encoder	80
2.3.6.2.3. Receptor de datos inalámbrico	80
2.3.6.3. Especificaciones de los elementos de salida.....	80
2.3.6.3.1. Micromotor DC	81
2.3.6.3.2. Driver L293D	81
2.3.6.3.3. Emisor de datos inalámbrico	81
2.3.6.4. Entradas del controlador.....	82
2.3.6.5. Salidas del controlador	82
2.4. Costos de fabricación	85
2.4.1. Materiales	85
2.4.2. Mano de obra	86
2.4.3. Elementos electromecánicos.....	86
2.4.4. Costos indirectos	86
2.4.5. Elementos impresos en 3D.....	87
2.4.6. Costos totales de fabricación.....	87
2.5. Implementación	88
2.5.1. Practica 1: Reconocimiento de hardware y software.	88
2.5.2. Practica 2: Validación del modelo de un péndulo simple.....	104
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	108
3.1. Resultados	108
3.1.1. Construcción del mecanismo.....	108
3.1.2. Presupuesto total.....	109
3.1.3. Resultados de la Implementación.....	109
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	111
4.1. Conclusiones.....	111
4.2. Recomendaciones.....	111
Referencias Bibliográficas	112

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama del driver L293D.	16
Figura. 1.2. Modelo de un motor de corriente directa.	19
Figura. 1.3. Representación del circuito de un motor de corriente directa.	22
Figura. 2.1. Máquina para enseñanza de teorías de control marca Quanser.	24
Figura 2.2. Máquina para enseñanza de teorías de control marca ECP Educational.	25
Figura 2.3. Esquema de funcionamiento máquina marca ECP Educational.	25
Figura 2.4. Opción 1 para la disposición del cuerpo de la máquina.	29
Figura 2.5. Opción 2 para la disposición del cuerpo de la máquina.	30
Figura 2.6. Opción 3 para la disposición del cuerpo de la máquina.	31
Figura 2.7. Esquema de ubicación de elementos para sistema de control con placa Arduino uno.	34
Figura 2.8. Esquema de ubicación de elementos para sistema de control con PLC.	35
Figura 2.9. Esquema de ubicación de elementos para sistema de control con Raspberry pi. ...	36
Figura 2.10. Opción 1 para el sistema motriz de la máquina.	39
Figura 2.11. Opción 2 para el sistema motriz de la máquina.	39
Figura 2.12. Opción 3 para el sistema motriz de la máquina.	40
Figura 2.13. Opción 1 para la conexión entre el motor y los sensores.	43
Figura 2.14. Opción 2 para la conexión entre el motor y los sensores.	43
Figura 2.15. Opción 3 para la conexión entre el motor y los sensores.	44
Figura 2.16. Selección de alternativas.	46
Figura 2.17. Representación de módulos de la alternativa 1 de máquina.	47
Figura 2.18. Esquema de partes principales del mecanismo.	49
Figura 2.19. Diagrama de cuerpo libre del cuerpo base.	50
Figura 2.20. Cuerpo base - tensión de Von Mises.	52
Figura 2.21. Cuerpo base – Desplazamiento.	52
Figura 2.22. Cuerpo base – Factor de seguridad.	53
Figura 2.23. Convergencia de la solución en función de la tensión de Von Mises (izquierda) y en función del desplazamiento (derecha).	54
Figura 2.24. Diagrama de cuerpo libre de la barra larga de aluminio.	55
Figura 2.25. Diagrama de cuerpo libre de la barra larga de aluminio.	56
Figura 2.26. Diagrama de cuerpo libre del eje.	60
Figura 2.27. Soporte del sistema de engranes planetarios – Tensión de Von Mises.	61
Figura 2.28. Soporte del sistema de engranes planetarios – Desplazamiento.	61
Figura 2.29. Soporte del sistema de engranes planetarios – Factor de seguridad.	62
Figura 2.30. Convergencia de la solución en función de la tensión de Von Mises (izquierda) y en función del desplazamiento (derecha).	63
Figura 2.31. Diagrama de esfuerzo cortante para el eje.	64
Figura 2.32. Diagrama de momento flector para el eje.	64
Figura 2.33. Esquema de secciones del eje.	65
Figura 2.34. Esquema de sistemas de engranes planetarios.	68
Figura 2.35. Diagrama de fuerzas y momentos actuantes en el soporte de engranes planetarios.	69
Figura 2.36. Soporte de montaje de los engranes planetarios – Von Mises.	69
Figura 2.37. Soporte de montaje de los engranes planetarios – Desplazamiento.	70
Figura 2.38. Soporte de montaje de los engranes planetarios – Factor de seguridad.	70
Figura 2.39. Convergencia de la solución en función de la tensión de Von Mises (izquierda) y en función del desplazamiento (derecha).	71
Figura 2.40. Esquema del sistema de engranes planetarios.	72
Figura 2.41. Ubicación de elementos electrónicos en el sistema de engranes planetarios.	77
Figura 2.42. Esquema de conectores correspondientes al motor (a) y al controlador (b)	78
Figura 2.43. Esquema de conexión de los puertos del motor.	83
Figura 2.44. Esquema de conexión del controlador principal.	84
Figura 2.45. Esquema de conexión para el potenciómetro.	84

Figura 2.46. Esquema de conexión para el potenciómetro.	85
Figura 2.47. Interfaz principal de la primera práctica.....	90
Figura 2.48. Esquema de conexiones para medición de la resistencia de armadura.....	91
Figura 2.49. Esquema de montaje del graduador y del péndulo.	91
Figura 2.50. Esquema de montaje del péndulo en el servomecanismo.	92
Figura 2.51. Esquema de conexiones a la parte 1 de la primera práctica.....	93
Figura 2.52. Esquema de momentos actuantes sobre el eje de salida.	93
Figura 2.53. Diagrama de fuerzas para cálculo del torque aplicado por el motor.	95
Figura 2.54. Regresión lineal de los datos de torque en función del voltaje.....	96
Figura 2.55. Ejemplo de obtención de la ganancia del potenciómetro.	97
Figura 2.56. Interfaz para la determinación de la ganancia del potenciómetro.	98
Figura 2.57. Esquema de conexiones para determinación del parámetro K_e	99
Figura 2.58. Interfaz para la determinación del parámetro K_e	99
Figura 2.59. Interfaz para la validación del péndulo simple.....	102
Figura 2.60. Gráfica para determinación de t_m	102
Figura 2.61. Interfaz para la validación del péndulo simple.....	107
Figura 2.62. Interfaz para la determinación del parámetro t_m	107
Figura 3.1. Servomecanismo para la enseñanza de teorías de control.....	108
Figura 3.2. Partes del servomecanismo para la enseñanza de teorías de control.	109
Figura 3.3. Interfaz principal de la primera práctica.....	109
Figura 3.4. Interfaz correspondiente a la segunda práctica.....	110

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos y Características de un servomecanismo parte 1.	9
Tabla 1.2. Tipos y Características de un servomecanismo parte 2.	10
Tabla 1.3. Controladores para motores DC parte 1.	14
Tabla 1.4. Controladores para motores DC parte 2.	15
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas de la máquina.	27
Tabla 2.2. Matriz de criterios Módulo 1.	31
Tabla 2.3. Evaluación de la facilidad de fabricación para el Módulo 1.	32
Tabla 2.4. Evaluación del tamaño para el Módulo 1.	32
Tabla 2.5. Evaluación para la visualización de componentes para el Módulo 1.	32
Tabla 2.6. Evaluación de prioridad de las soluciones para el Módulo 1.	33
Tabla 2.7. Matriz de criterios Módulo 2.	36
Tabla 2.8. Evaluación del costo para el Módulo 2.	37
Tabla 2.9. Evaluación de la facilidad de programación para el Módulo 2.	37
Tabla 2.10. Evaluación de la facilidad de conexión para el Módulo 20.	37
Tabla 2.11. Evaluación de prioridad de las soluciones para el Módulo 2.	38
Tabla 2.12. Matriz de criterios Módulo 3.	41
Tabla 2.13. Evaluación de la facilidad de fabricación para el Módulo 3.	41
Tabla 2.14. Evaluación del costo para el Módulo 3.	41
Tabla 2.15. Evaluación del tamaño para el Módulo 3.	42
Tabla 2.16. Evaluación de prioridad de las soluciones para el Módulo 3.	42
Tabla 2.17. Matriz de criterios Módulo 4.	45
Tabla 2.18. Evaluación de la facilidad de visualización para el Módulo 4.	45
Tabla 2.19. Evaluación de la facilidad de fabricación para el Módulo 4.	45
Tabla 2.20. Evaluación del tamaño para el Módulo 4.	46
Tabla 2. 21. Evaluación de prioridad de las soluciones para el Módulo 4.	46
Tabla. 2.22. Cuerpo base- Resumen de resultados.	53
Tabla. 2.23. Características generales de la serie de cajas reductoras.	56
Tabla. 2.24. Características generales de la serie de cajas reductoras.	57
Tabla. 2.25. Características generales del motor preseleccionado.	59
Tabla. 2.26. Soporte del sistema de Engranajes planetarios-Resumen de resultados.	62
Tabla. 2.28. Eje Principal- Factores de diseño.	68
Tabla. 2.29. Eje Principal-Resumen de resultados.	68
Tabla. 2.30. Soporte de montaje de los engranajes planetarios – Resumen de resultados.	70
Tabla. 2.31. Engranajes planetarios – Datos para diseño.	73
Tabla. 2.32. Engranajes planetarios – Factores de diseño 1.	74
Tabla. 2.33. Engranajes planetarios – Factores de diseño 2.	74
Tabla. 2.34. Engranajes planetarios – Resultados de compatibilidad.	75
Tabla. 2.35. Señales de entrada del sistema de control.	82
Tabla. 2.36. Señales de salida del sistema de control.	83
Tabla. 2.37. Asignación de los conectores.	83
Tabla. 2.38. Costos de materiales.	85
Tabla. 2.39. Costos de la mano de obra implicada en la elaboración de partes.	86
Tabla. 2.40. Costos de adquisición de elementos electromecánicos.	86
Tabla. 2.41. Costos indirectos generados.	87
Tabla. 2.42. Costos de las partes y elementos impresos en 3D.	87
Tabla. 2.43. Costos totales de fabricación del mecanismo.	88
Tabla. 2.44. Valores de voltaje y posición angular del péndulo.	94
Tabla. 2.45. Parámetros iniciales para el cálculo del torque.	95
Tabla. 2.46. Puntos importantes para cálculo de t_m	103
Tabla. 2.47. Parámetros iniciales para el cálculo de la frecuencia natural.	105

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetos diseñar y construir servomecanismos como plataformas expandibles para la enseñanza e investigación de teorías de control, así como desarrollar una interfaz gráfica de usuario en MATLAB que facilite la medición de las distintas variables físicas como posición y velocidad por medio de sensores y el control de las mismas por medio de actuadores. El trabajo incluye planos de conjunto y detalle del servomecanismo diseñado a fin que este pueda replicarse para equipar los laboratorios de automatización de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El diseño 3D fue realizado con el software INVENTOR y el sistema de control utiliza microcontroladores ARDUINO.

En este proyecto se proponen dos prácticas de laboratorio que podrían formar parte del pensum académico de asignaturas como Dinámica de Sistemas, Control Automático, Mecatrónica y Robótica. La primera práctica abarca el reconocimiento de hardware y software, y la caracterización de sistemas mecatrónicos, mientras la segunda práctica trata sobre la simulación y validación experimental de modelos dinámicos para un sistema de péndulo simple accionado por un motor DC. La construcción del servomecanismo planteado y el desarrollo de las prácticas propuestas solventará en parte el problema de la falta de equipos de laboratorio en la Facultad de Ingeniería Mecánica, y contribuirá a mejorar la formación de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica en las áreas de control automático, mecatrónica y robótica.

De forma comparativa la construcción del servomecanismo diseñado es de \$556.86 frente al costo de referencia tomado de \$1000, lo cual constituye un ahorro del 44%.

Palabras clave: Caracterización, control, diseño, servomecanismo.

ABSTRACT

The main goal of this project is to design and build servomechanisms as expandable platforms for teaching and research of control theories. As part of this goal, a graphical user interface in MATLAB was developed to facilitate the acquisition of data from sensors, and the control of actuators. The project includes assembly and detail drawings of the designed servomechanism so that it can be replicated to be used in control and automation laboratories of the Mechanical Engineering Department in the Escuela Politécnica Nacional. The 3D design was made with the software INVENTOR and the control system was implemented using ARDUINO microcontrollers.

Two laboratories are proposed as part of this work, which could be integrated into the study program of courses such as Dynamic Systems and Controls, Mechatronics, and Robotics. The first laboratory includes the recognition of hardware and software, and the characterization of mechatronic systems while the second laboratory deals with the simulation and experimental validation of dynamic models for a simple pendulum actuated by a DC motor. The development of the contemplated servomechanism and the laboratories proposed contributes to partially solve the problem of the lack of laboratory equipment in the Department of Mechanical Engineering and to improve the quality of training of engineering students in areas of control, mechatronics, and robotics. The construction of the designed servomechanism is \$ 556.86 compared to a reference cost of \$ 1000, which constitutes a saving of 44%.

Keywords: Characterization, control, design, servomechanism.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SERVOMECANISMOS COMO PLATAFORMAS EXPANDIBLES PARA LA ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN DE TEORÍAS DE CONTROL

INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo en la automatización de procesos industriales hace necesario el desarrollo de nuevos prototipos que permitan a estudiantes de ingeniería el estudio y la práctica de teorías de control.

La constante evolución de los procesos industriales implica directa o indirectamente la automatización de procesos o subprocesos de manufactura, producción y servicios; lo cual se ve refleja en el ahorro de recursos o en la disminución de horas hombre-máquina. Dicha evolución hace necesario el conocimiento y manejo de distintos tipos de controladores y actuadores utilizados en procesos industriales.

A través del presente proyecto se busca equipar a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica con material práctico para la integración de temas revisados en clase como por ejemplo el análisis de la respuesta transitoria y estacionaria con el componente físico de los mismos.

La recepción de los datos se realizara a través de un encoder conectado en serie con el motor y un potenciómetro colocado en el eje de salida; el microcontrolador a utilizarse será un Arduino Uno, este permite una fácil comunicación con el ordenador además de una interfaz amigable con el usuario.

Para la fabricación del cuerpo de la máquina y de componentes estructurales se utilizara el método de impresión en 3D, el cual permite un rápido prototipado en especial para piezas con un alto nivel de detalle. El prototipo debe presentar una fácil fabricación y estará construido principalmente con polímero ABS y PLA, ya que poseen una buena resistencia mecánica y resistencia al desgaste.

Debido a que el eje de salida es un elemento móvil la transmisión de datos se la realizará de forma inalámbrica para lo cual se instalará un microcontrolador Arduino Nano que se encargará de la codificación y envió hacia el controlador principal.

Una vez ensamblado el dispositivo se procede con la definición de guías de práctica para el estudiante las cuales se encontrarán enfocadas a las actividades necesarias para el aprendizaje de temas relacionados con: manejo, funcionamiento y control de sensores, controladores y actuadores usados en sistemas dinámicos.

El servomecanismo mediante su diseño modular y con la disposición de un eje de salida que permite la conexión entre mecanismos estima ser el inicio de una serie de servomecanismos interconectados que permitirán ampliar los conocimientos revisados de manera teórica en clase.

Objetivo general

Diseñar y construir servomecanismos como plataformas expandibles para la enseñanza e investigación de teorías de control.

Objetivos específicos

- Diseñar el servomecanismo propuesto en base a la metodología y enfoque de diseño de la Ingeniería Concurrente.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario en MATLAB que facilite la adquisición de datos de sensores, el manejo y control de actuadores, y la presentación de resultados de análisis dinámicos.
- Construir un sistema modular que permita el acople de dos o más servomecanismos adicionales para el estudio e investigación de Teorías de Control.
- Proponer prácticas de laboratorio para las asignaturas de Control Automático, Mecatrónica y Robótica en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Equipos para la enseñanza de teorías de control

Uno de los campos de mayor interés en el contexto de la mecánica corresponde al aprendizaje de las teorías de control, que son responsables de explicar la manera en que funcionan muchas de las aplicaciones e instalaciones que forman parte de la vida de una persona, ya sea en sus propios hogares, lugares de trabajo, instituciones educativas o sitios de diversión, algunos ejemplos son sistema de aire acondicionado, sistema de frenos ABS, impresoras 3D, manejo de drones, juegos mecánicos en un parque de diversiones, también se aplican a otros campos como la biología e incluso la sociología.

Los equipos que se utilizan en la enseñanza del control generalmente son dinámicos debido a la necesidad actual de controlar características físicas como temperatura, presión, cantidad de materia, pH, estado de la materia las cuales están involucradas en procesos de lixiviación, decantación, destilado, trituración, condensación, entre otros, permitiendo así que las maquinarias utilizadas o un sistema se comporten de la manera requerida para que los procesos sean eficientes.

Por su parte, autores como Ollero (2011) señalan que las denominadas teorías de control se establecen como el resultado de años de estudio respecto a disciplinas como la matemática, cibernética, electrónica y la optimización de recursos que se han aplicado en diversos contextos, y que en la actualidad permiten comprender la manera en que deben estructurarse distintos procesos para generar estrategias.

Las estrategias utilizadas en las teorías de control, generando ahorro de recursos eléctricos, humanos, así como tiempo y espacio, además de que en muchos casos contribuyen con el cuidado del medio ambiente.

Precisamente desde la perspectiva de Ollero, uno de los retos que supone en la actualidad el aprendizaje de las teorías de control se encuentra en vincular la teoría con la práctica, ya que solo de esta manera es posible vincular los principios de disciplinas como la electrónica, mecánica o cibernética de una manera significativa, ya que uno de los errores más frecuentes en la academia ha sido el desarrollo de una actividad educativa fundamentada únicamente en textos y cálculos escolares, limitando la creación de aplicaciones para resolver problemáticas cotidianas.

Al respecto de ello, autores como Cano & otros (2015) manifiestan que en la actualidad en el mercado se han implementado una serie de equipos que poco a poco dentro de las aulas generan un aprendizaje más interactivo con los estudiantes respecto a las teorías de control, permitiendo la realización de pequeños procedimientos que contribuyen a un mayor grado de comprensión del comportamiento de los sistemas dinámicos; sin embargo señala que uno de los principales condicionantes es su valor económico, ya que muchas de las piezas o materiales que se deben adquirir tienen un costo elevado, razón por la cual en ocasiones resulta muy complejo el diseño y realización de proyectos a gran escala que resultan fundamentales en su aprendizaje.

Pese al valor económico y lo complejo de la realización de proyectos a gran escala mencionadas anteriormente, es frecuente que en la actualidad, el aprendizaje de las teorías de control se lleve a cabo mediante la adquisición de equipos como controladores lógicos programables, controladores para motores o sistemas informáticos virtuales que tienen permiten que los estudiantes puedan comprender a profundidad cada una de las funciones que desempeñan los elementos que de un sistema dinámico, planteado para resolver una necesidad en particular, en instituciones universitarias se trabajan aspectos puntuales con prototipos provenientes de países industrializados como China, los cuales pueden adquirirse a costos más accesibles, permitiendo resolver necesidades en instalaciones tales como automatización de apertura de puertas, sistemas de iluminación, entre otros, que resultan de gran interés respecto a esta clase de teorías.

Desde otra perspectiva, Ríos (2000) refiere que en los laboratorios donde se desarrolla el aprendizaje de las teorías de control es frecuente encontrar equipos o programas como MATLAB, sobre todo para resolver aquellos problemas que forman parte de la ingeniería de control, así como actividades como “respuesta a un escalón, dibujo del lugar geométrico de las raíces, y transformación entre modelos de espacio estado y modelos función de transferencia” (p. 1), por citar solo algunos ejemplos al respecto.

El uso de equipos para el aprendizaje de teorías de control se ha convertido en unas de las necesidades fundamentales en la actualidad, ya que contribuye a la generación de un aprendizaje más reflexivo que le permite al estudiante comprender los errores que se deben evitar en la práctica, y que únicamente se los puede comprender en el proceso de ensamble de un sistema, razón por la cual es fundamental establecer un contacto real con cada uno de los elementos que intervienen en dicha actividad.

1.1.1. Generalidades

Los equipos que se utilizan en la actualidad en la enseñanza de teorías de control tienen como objetivo fundamental que el estudiante comprenda la manera en que debe estructurarse un sistema para resolver una necesidad, mediante el cumplimiento de una función específica, razón por la cual cada una de estas herramientas debe ser seleccionada de acuerdo a la clase de conocimiento que se desea transmitir.

Respecto a ello, Pérez, Pérez & Pérez (2008) afirman que los equipos que se usan en el aprendizaje de las teorías de control han variado mucho con el paso del tiempo, ya que clásicamente se centraban en responder a las características de sistemas de entradas y salidas únicamente, lo cual resulta obsoleto, en la actualidad los desarrollos más recientes en “la teoría de control moderna se hallan orientados en la dirección del control óptimo de sistemas tanto determinísticos como estocásticos, así como en sistemas de control moderno a campos no ingenieriles como la biología, economía y sociología” (p. 4).

Ante este contexto, Pérez, Pérez & Pérez (2008) afirman que los equipos que se usan en las teorías de control contribuyen a que el estudiante pueda trabajar sobre escenarios hipotéticos sobre los cuales se pueden generar cambios gestados por factores externos como el ambiente, y ser capaces de establecer cálculos y programaciones que permitan tener un control adecuado de cada sistema, contribuyendo así a anticiparse a situaciones que se podrían presentar en la realidad.

De esta manera, los equipos que se utilizan en el aprendizaje de las teorías de control deben caracterizarse por:

- Dinamismo para generar un mayor grado de interacción con el estudiante
- Estar equipado con sensores que permitan obtener información de las variables que se desean controlar
- Garantizar que los experimentos o mediciones sean de fáciles de reproducir por otros estudiantes.
- Poseer una interfaz de fácil comprensión para el estudiante mediante el empleo de un computador.

Las características enlistadas se han desarrollado gracias a la tecnología actual, permitiendo que los estudiantes adquieran y generen conocimientos de forma más lógica y aplicable, pues tradicionalmente solo se utilizaban libros y cálculos.

1.1.2. Funciones principales de equipos para la enseñanza de teorías de control

Con relación a las funciones a desempeñar por los equipos destinados a la enseñanza de teorías de control, Ávila (2000) señala que estos deben ser de fácil comprensión y uso por parte del estudiante para lo cual es fundamental contar con el apoyo del docente, quien debe irlos guiando respecto a la forma en que deben utilizarse, de acuerdo a cada uno de los sistemas que se vayan desarrollando. El mismo autor manifiesta que los equipos no deben representar ninguna clase de peligro, ya que el objetivo es que el estudiante pueda equivocarse en el aula, permitiéndole comprender errores que no debe efectuar en el contexto profesional, razón por la cual deben resultar adecuadas para el ensayo y comprobación de hipótesis, y por ende para comprender de una forma significativa sus mecanismos de funcionamiento.

Otros autores como Pérez, Pérez & Pérez (2008) sostienen que otra de las funciones que desempeñan esta clase de equipos corresponde a que contribuyen al desarrollo de un aprendizaje significativo e interactivo, ya que les permite a los estudiantes observar y comprender cada uno de los principios que forman de la teoría de control y que son fundamentales de aplicarse en la práctica en el desarrollo de alguna clase de sistema, generando de esta manera experiencias fundamentales que contribuyen a un mayor grado de consciencia sobre las acciones que se desarrollan al respecto.

Ríos (2000) sostiene además que estos equipos contribuyen al desarrollo de un aprendizaje colaborativo, ya que en muchos casos es necesario que los estudiantes conformen grupos de trabajo para desarrollar un sistema que les permita dar respuesta a una necesidad específica, razón por la cual es necesario trabajar entre varias personas, a fin de agilizar el trabajo, además señala que los equipos que se utilizan en el aprendizaje de esta clase de teorías son responsables del fortalecimiento del pensamiento lógico del estudiante, ya que requieren del dominio de destrezas como la deducción, pensamiento estratégico, análisis y disciplina para diseñar un sistema que permita controlar un aspecto en particular, además que es fundamental la aplicación de distintas operaciones matemáticas, incluyendo el cálculo. Tomando en consideración lo planteado por los autores mencionados se puede inferir que los equipos utilizados para la enseñanza de teorías de control deben ser dinámicos, funcionales y prácticos, con el objetivo de generar un aprendizaje interactivo y multidisciplinar el estudiante, permitiéndole desarrollar distintas destrezas que resultan fundamentales para su comprensión respecto a distintos sistemas.

1.1.3. Importancia de equipos interactivos en la enseñanza de teorías de control

Tal como se ha planteado con anterioridad, una de las principales razones por las cuales es fundamental contar con equipos en la enseñanza de teorías de control corresponde a que el estudiante sea capaz de vincular la teoría con la práctica, y de esta manera comprender el funcionamiento de cada uno de los elementos que forman parte de un sistema, para de esta manera poder intervenir sobre los mismos en caso de requerir un cambio, o presentarse alguna alteridad.

Además como lo manifiesta Ríos (2000), otra de las causas por las cuales resulta fundamental el aprendizaje de las teorías de control se debe a que el estudiante puede obtener conocimientos que le permiten comprender el comportamiento de los sistemas dinámicos, y establecer sus principales aplicaciones.

Respecto a ello, Pérez, Pérez & Pérez (2008) afirman que la comprensión de las teorías de control son fundamentales en la actualidad ya que permiten implementar cada uno de sus principios en distintas aplicaciones de la vida cotidiana, ya sea en procesos de automatización, mejoramiento de actividades industriales, fortalecimiento de procesos de manufactura, sistemas de pilotajes, entre otros, agilitando el uso de recursos y obteniendo resultados eficientes.

Por tal razón, estos autores sostienen que es fundamental que a través de la teoría, el estudiante sea capaz de comprender en profundidad aspectos relacionados como el sistema, control, sistema de control, proceso, funcionabilidad, controladores, programación, entre otros, para aplicarlos en la realización de proyectos que pueden ser aplicados en la cotidianidad.

1.2. Definición de un servomecanismo

Desde la perspectiva de autores como Franz (2008), un servomecanismo se constituye como un dispositivo automático que:

Sirve por ejemplo, para mantener el rumbo de una nave en una dirección determinada por un giróscopo o para mantener una antena directiva de recepción, en la dirección de incidencia de una onda emitida por un avión, o en forma más abstracta, es un dispositivo que sirve para mantener la coincidencia aproximada de una magnitud o coordenada controlada, con otra coordenada de comparación. (p. 128)

Otros autores como Pérez & Readman (2015) refieren que un servomecanismo se define como un sistema que se encuentra integrado por componentes mecánicos, electrónicos que contribuyen a que una máquina pueda regular por sí misma una actividad que se encuentra desarrollando de una forma precisa, tal como lo que actualmente se efectúa en el contexto industrial y de la producción en serie.

Complementando a lo referido por los autores Pérez & Readman (2015), Orué (2009) señala que un servomecanismo se establece como un sistema de control que tiene una retroalimentación, en el cual la salida contiene algún elemento mecánico, influyendo en su velocidad, posición o aceleración y que puede formar parte de distintas aplicaciones como la dirección asistida de un vehículo, partes específicas de un robot, además que se caracteriza por desarrollar procesos que resultan más rápidos que los que se llevan a cabo en un sistema de control de procesos en lazo cerrado.

Es así que de acuerdo a las definiciones planteadas por los autores se puede referir que un servomecanismo se constituye como un sistema de control integrado por diversos elementos mecánicos, electrónicos, codificadores de posición y un control incorporado que se utilizan en distintas aplicaciones mediante formulaciones de los modelos dinámicos tanto de la parte mecánica como de la eléctrica. De esta manera un servomecanismo permite controlar diversas funciones de un equipo de forma precisa, razón por la cual se los utiliza de forma constante en distintos contextos como la industria automotriz, de telecomunicaciones, robótica, mecánica, entre otras.

1.2.1. Partes y características de un servomecanismo

Franz (2008) afirma que un servomecanismo se caracteriza por ser un sistema que funciona a partir de la conjunción de un sistema de control, una fuente de energía y una estructura mecánica, que puede ser utilizado en distintas aplicaciones como el modelismo, especialmente en barcos, aviones y trenes, a fin de controlar de forma específica aspectos como sus sistemas de motor y dirección.

Un servomecanismo se caracteriza además por ser un componente fundamental que forma parte de muchos productos industriales propios del campo de la robótica, la industria del transporte, procesos de control, además que uno de sus aspectos más importantes corresponde al “sensor de posición que mide la posición del servomotor y la convierte en una señal eléctrica que el sistema de control puede interpretar y usar” (Pérez & Readman, 2015, p. 2).

Orué (2009) señala que un servomecanismo contiene en su interior un conjunto de partes o componentes que direccionan su funcionamiento tales como el circuito de control, sensor de posición interno interno y el tope mecánico en el eje de salida, las cuales desempeñan una función específica, por lo cual si se altera una de las mismas se obtienen comportamientos diferentes que pueden ser utilizados en distintas aplicaciones de acuerdo a las necesidades que se desean satisfacer, tal como ocurre en el contexto industrial.

Por otro lado, existen varios tipos de servomecanismos, que según se vayan modificando pueden dar lugar a diferentes comportamientos, tanto si se añaden o se eliminan sus elementos, tal como se explica en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Tipos y Características de un servomecanismo parte 1.

Tipos de servomecanismo	Características
Con control	Se encarga de recibir la modulación, el tipo de pulso y ordenar al motor, así como situarse en una posición relacionada con la anchura del pulso recibido, si no se encuentra presente el sensor de posición, el circuito de control sólo puede mover el eje del motor hacia la izquierda o hacia la derecha. Esta característica se puede emplear para evitar usar etapas de potencia para mover el motor, el inconveniente es que se manejan señales de control más complicadas.
Sin control	Al quitar el circuito de control se tendrá que usar un circuito de potencia externo, pero ahora la señal será más sencilla, no será obligatorio generar modulación, para ello es necesario utilizar el sensor de posición pero el valor de éste hay que procesarlo con un circuito exterior.
Con sensor de posición	Establece un tipo de tope mecánico. Con él se pueden realizar bucles cerrados de control. Cuando se tiene el circuito de control el bucle se cerrará internamente. Esto es muy útil en aeromodelismo, ya que, por control remoto se indica la posición que debe tomar el eje y el propio servomotor se encarga de buscarla y posicionar su eje en ella. De esa forma, no hay que transmitir datos desde el avión hasta el mando de control remoto. Si no hay circuito de control el bucle se tendrá que cerrar externamente.

Tabla 1.2. Tipos y Características de un servomecanismo parte 2.

Sin sensor de posición	Se elimina el primer tope mecánico y la posibilidad de cerrar el bucle. Si se mantiene el circuito de control se puede realizar un control izquierda-derecha en bucle abierto por medio de los pulsos, evitando poner un circuito de potencia externo.
Con topes mecánicos	Sólo se tienen giros limitados, su aplicación es muy útil en brazos robots, pinzas, manipuladores, mecanismos ON/OFF, aeromodelismo, entre otros.
Sin topes mecánicos	Se eliminará el tope del rodamiento y el sensor de posición, por lo tanto se pierde la posibilidad de cerrar el bucle internamente.

Fuente: (Orué, 2009, p. 2)

1.2.2. Caracterización de un sistema electromecánico

Al respecto del sistema electromecánico, autores como Peña & otros (2015) manifiestan que su mecanismo se caracteriza porque contiene partes eléctricas y mecánicas, además de otros aspectos como: tiempo de respuesta rápido, mantenimiento bajo, modelos matemáticos que resultan relativamente sencillos, además que no requieren de condiciones especiales como iluminación, temperatura o ventilación.

Avia & Cruz (2009) señalan que esta clase de sistemas fusiona principios propios de la ingeniería eléctrica y la mecánica en un circuito integrador que incluye diversas clases de elementos de ambas disciplinas tal como ocurre con el caso de los motores eléctricos, llaves de selección eléctrica, máquinas que se utilizan en la producción industrial, entre otros, tal como es el caso de un motor de corriente continua que se fundamenta en principios físicos, convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica.

Además como lo señala Franco (2007), esta clase de sistemas:

Contienen componentes o elementos interconectados. Primero para el análisis se debe obtener un modelo matemático que se forme con los modelos de cada componente. El modelo matemático es una serie de relaciones entre entradas y salidas. El modelo matemático de los componentes se obtiene de observaciones experimentales y la ayuda de ciertos postulados fundamentales. Una vez modelado el sistema puede resolverse la salida por técnicas analíticas o computacionales. (p. 1)

A partir de lo referido por los autores citados se puede mencionar que un sistema electromecánico se caracteriza porque su estructura se encuentra integrado por partes mecánicas y eléctricas, razón por la cual se beneficia de los principios de ambas disciplinas, además de que requieren un análisis de su comportamiento dinámico el cual debe definir de la manera más exacta los fenómenos eléctricos y mecánicos involucrados en el funcionamiento del motor que se elabora de acuerdo a lo que se desea lograr respecto a su funcionalidad. Esta clase de sistemas se utilizan en la actualidad en diversas clases de aplicaciones entre las cuales se encuentran principalmente el campo de la industria de producción en serie, sector del transporte, mecánica, entre otros.

1.3. Sensores y Equipos de control

Dentro de las Teorías de control existe todo un conjunto de instrumentos que resultan fundamentales para desarrollar un sistema, entre los que se encuentran los sensores y otra clase de equipos. De acuerdo a lo referido por Gutiérrez & Iturralde (2017), un sensor de control se define como:

Un dispositivo para detectar y señalar una condición de cambio. Con frecuencia, una condición de cambio, se trata de la presencia o ausencia de un objeto o material (detección discreta). También puede ser una cantidad capaz de medirse, como un cambio de distancia, tamaño o color (detección analógica). Los sensores posibilitan la comunicación entre el mundo físico y los sistemas de control, tanto eléctricos como electrónicos, utilizándose extensivamente en todo tipo de procesos industriales y no industriales para propósitos de control y procesamiento. (p. 18)

Complementado a lo referido por los autores Gutiérrez & Iturralde (2017), Salinas (2005) sostiene que los sensores de control cumplen la función de “medición de la variable controlada en los sistemas por retroalimentación. La variable en contacto con el sensor provoca un fenómeno físico que va de acuerdo a la intensidad de la variable en aspectos como temperatura, presión, flujo y nivel” (p. 81).

Gutiérrez & Iturralde (2017) expresan que en el mercado actual se puede encontrar toda una variedad de sensores entre los que destacan: aquellos de contacto, ópticos, térmicos, para controlar la humedad, magnéticos, infrarrojos, cuyos tamaños y costos varían de acuerdo a su funcionalidad, así como del material con los cuales hayan sido elaborados.

Estos sensores pueden clasificarse también de acuerdo al tipo de salida que proporcionan, estructura interna, y los parámetros que son capaces de detectar.

Como se comprende, los sensores de control se constituyen como herramientas que proveen señales para que el controlador tome acciones con el objetivo de manejar distintas actividades que forman parte de un sistema, respecto a determinadas variables, generando información respecto a los cambios que se podrían generar, razón por la cual se han convertido en un elemento fundamental en el equipo diseñado. En el presente proyecto se utilizan sensores de posición y velocidad.

1.3.1. Equipos de control

Los equipos de control se constituyen como aquellos recursos que mediante sus principios tienen por objetivo contribuir con la funcionalidad de un sistema de control, ordenando, conduciendo y regularizando su comportamiento, razón por la que en la actualidad se los puede utilizar en distintas aplicaciones no solo dentro del contexto industrial, sino que además son útiles en distintas actividades que se llevan a cabo dentro del contexto doméstico (Ramos, 2017).

Precisamente una de las principales funciones de esta clase de equipos corresponde a facilitar el desarrollo de procesos y controlar determinadas variables que podrían influir en su aplicación, debido a distintos factores externos e internos de un sistema como los producidos a causa de condiciones climáticas, alteraciones electromagnéticas, interrupciones eléctricas, entre otras, por citar algunos ejemplos.

De esta manera, entre los principales equipos de control que actualmente se utilizan se pueden mencionar a los controladores lógicos programables y los controladores para motores DC, que a continuación se describen sus características y la forma en que funcionan, así como sus aplicaciones más frecuentes en toda clase de contexto industrial y doméstico.

1.3.1.1. Controladores lógicos programables

Los controladores lógicos programables más conocidos como PLC por sus siglas en inglés se definen como aquellos dispositivos electrónicos que:

En vez de seguir la vía de la programación de lenguajes de alto nivel, buscan un sistema mucho más básico y fácil de usar, basado en los diagramas eléctricos escalera que sustituyen. Se caracterizan por la automatización y computarización de una enorme cantidad de procesos industriales y se desarrollan nuevos métodos de manufactura mucho más precisos con el control numérico por ordenador. (Ramos, 2017, p 10)

Otros autores como López (2011) señalan que los controladores lógicos programables se definen como un sistema que hace uso de “una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones orientadas al usuario, para implantar soluciones como funciones lógicas, secuencia, temporización, recuentos y funciones aritméticas a fin de controlar mediante entradas y salidas digitales y análogas diversos tipos de máquinas o procesos” (p. 16).

Precisamente entre algunas clases de controladores lógicos programables se pueden mencionar a las placas Arduino uno y Arduino nano. En el caso de la primera esta se trata de:

Una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328. Cuenta con 14 entradas/salidas digitales, de las cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM (Modulación por ancho de pulsos) y otras 6 son entradas analógicas. Además, incluye un resonador cerámico de 16 MHz, un conector USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reseteo. La placa incluye todo lo necesario para que el microcontrolador haga su trabajo, basta conectarla a un ordenador con un cable USB o a la corriente eléctrica a través de un transformador. (Díaz, 2016)

En cambio, la placa Arduino nano se constituye como una tarjeta basada en el microcontrolador ATmega328, además que posee otras características como: “voltaje de operación: 5V, voltaje de alimentación (recomendado): 7-12V, I/O Digitales: 14 (6 son PWM), frecuencia de trabajo: 16MHz, y para programarla solo se necesita de un cable Mini USB” (Placas Arduino Chile, 2017).

1.3.1.2. Controladores para motores DC

Un control de motores se constituye como un mecanismo o herramienta a través del cual se controla determinados aspectos de un motor DC como la velocidad, el suministro de la

potencia, entre otras, lo cual puede llevarse a cabo mediante el uso de tiristores y aplicaciones propias de la electrónica de potencia (García, 2011).

Cabe señalar que existen diversos controladores para esta clase de motores, entre los que se pueden mencionar a los siguientes que se observan en la siguiente tabla:

Tabla 1.3. Controladores para motores DC parte 1.

Tipo de controlador	Características
<p>Controlador de acción Proporcional</p>	<p>En este controlador la señal de accionamiento es proporcional a la señal de error del sistema. Es el más simple de todos los controladores y su acción consiste en amplificar la señal de error antes de aplicarla al proceso. La función de transferencia de este tipo de control se reduce a una variable real, denominada K_p que determinará el nivel de amplificación del elemento de control.</p> <p>Función de transferencia del controlador</p> $\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$ <p>Donde: $K_p = \text{ganancia proporcional}$</p>
<p>Controlador de acción Integral</p>	<p>En un controlador integral, la señal de salida del mismo varía en función de la desviación y del tiempo en que se mantiene la misma, o dicho de otra manera, el valor de la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error. Esto implica que mientras que en la señal proporcional no influía el tiempo, sino que la salida únicamente variaba en función de las modificaciones de la señal de error, en este tipo de control la acción varía según la desviación de la salida y el tiempo durante el que esta desviación se mantiene.</p> <p>Función de transferencia del controlador integral</p> $\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$ <p>Donde: $T_i = \text{tiempo integral}$</p>

Tabla 1.4. Controladores para motores DC parte 2.

<p>Controlador de acción proporcional e integral</p>	<p>En la práctica no existen controladores que tengan sólo acción integral sino que llevan combinada una acción proporcional. Estas dos acciones se complementan. La primera en actuar es la acción proporcional (instantáneamente) mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo. Así y por medio de la acción integral se elimina la desviación remanente (proporcional).</p> <p>Función de transferencia del controlador</p> $\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$ <p>Donde: $T_i = tiempo\ integral$</p>
--	---

Fuente: (García, 2011, pp. 45 - 47), (Ogata, 2010, pp. 24)

1.3.1.2.1. Parámetros a controlar en motores DC

De acuerdo a lo referido por Carrasco (2015), el motor de corriente continua es el que caracteriza por convertir “la energía eléctrica en energía mecánica (del tipo rotacional) generando con esto trabajo mecánico” (p. 1). Por esta razón, existen un conjunto de parámetros que requieren ser controlados en esta clase de motores, entre los que se debe señalar los siguientes, mismos que están definidos en la sección 1.4.

- Resistencia de Armadura.
- Inductancia de Armadura.
- Constante Contra Electromotriz.
- Constante de Torque.
- Constante de Tiempo Mecánica.
- Momento de Inercia.
- Corriente de Arranque del Motor.
- Torque de Fricción, y

1.3.1.2.2. Tipos de controladores para motores DC

En la actualidad existe todo un conjunto de controladores para motores DC entre los que se encuentran aquellos denominados BMD y los BMSD. En el caso de los primeros, estos se constituyen como “un driver de velocidad para motores DC con funcionalidad avanzada”, mientras que los segundos “controlan la velocidad, sentido, tiempo de aceleración y deceleración y provee frenada activa” (SmartMotorDevices, 2012).

Además existen otros controladores de gran potencia de 9 amperios, aquellos analógicos, sin escobillas, de paso a paso, micropaso, digital, así como el driver L293D, que puede “controlar 2 motores de corriente continua o un motor paso a paso. Entre sus características se encuentran: tensión de alimentación: 4,5V a 25V, intensidad continua por canal: 600mA, intensidad máxima por canal: 1200mA y diodos de protección” (Leantec Robotics & Electronics, 2018).

Al respecto del driver L293D, Carletti (2017) señala que:

Incluye cuatro circuitos para manejar cargas de potencia media, en especial pequeños motores y cargas inductivas, con la capacidad de controlar corriente hasta 600 mA en cada circuito y una tensión entre 4,5 V a 36 V. Los circuitos individuales se pueden usar de manera independiente para controlar cargas de todo tipo y, en el caso de ser motores, manejar un único sentido de giro. La figura 1.1 muestra el diagrama del driver L293D.



Figura 1.1. Diagrama del driver L293D.
(<https://prometec.mx/producto/driver-293d/>)

1.3.2. Dispositivos para adquisición de datos (DAQ)

El hardware para actualización de datos actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una computadora pueda interpretarlas. Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC. Varios dispositivos DAQ incluyen otras funciones para automatizar sistemas de medidas y procesos. Por ejemplo, los convertidores digitales-analógicos (DACs) envían señales analógicas, las líneas de E/S digital reciben y envían señales digitales y los contadores/temporizadores cuentan y generan pulsos digitales. (National Instruments (2019).

1.3.3. Sensores

También llamado un transductor, convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir. Dependiendo del tipo de sensor, su salida eléctrica puede ser un voltaje, corriente, resistencia u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. Algunos sensores pueden requerir componentes adicionales y circuitos para producir correctamente una señal que puede ser leída con precisión y con toda seguridad por un dispositivo DAQ. (National Instruments (2019).

1.3.3.1. Detector de posición – Potenciómetro

Los potenciómetros lineales son opciones económicas y fiables para la medición de distancias y posiciones. Es uno de los dos usos que posee la resistencia o resistor variable mecánica (con cursor y de al menos tres terminales). Este tipo de potenciómetros trabajan como divisores de tensión. Los potenciómetros lineales cuentan con un diseño sencillo y una gran precisión (linealidad de hasta 0,05% del área de medición). Los variados diseños junto con las diferentes posibilidades de aplicación permiten el uso de estos dispositivos en incontables aplicaciones (Kuo, 1996).

1.3.3.2. Detector de velocidad – Encoder

Este dispositivo de detección básicamente se encarga de suministrar una respuesta, ya que se encarga de convertir el movimiento en una señal eléctrica, que puede ser proporcionada por un equipo de instrumentación como un PLC. El encoder transmite una señal de respuesta que puede ser utilizado para determinar la posición, velocidad o dirección. Un PLC puede usar esta información para enviar un comando para una función en particular (Franz, 2008).

1.3.3.3. Transmisores de datos inalámbricos

La tecnología actual ha desarrollado métodos de comunicación inalámbricos a través de ondas electromagnéticas invisibles que permite transmitir datos desde grandes distancias en poco tiempo. Existen varios tipos de sistemas de transmisión inalámbrica de datos.

La radio es un medio inalámbrico que transfiere datos a través de ondas electromagnéticas de baja frecuencia a lugares distantes mediante un conductor eléctrico y una antena. A veces, las ondas electromagnéticas tienen interferencias en caso de las obstrucciones tales como montañas o en ubicaciones de recepción muy lejanas a la señal de la radio. Así, en dichas circunstancias se inhabilita la frecuencia.

Un tipo eficaz de transmisión inalámbrica de datos es la del microondas, la cual permite que la información viaje usando dos métodos individuales. Uno de ellos es el método terrestre, que usa dos torres de microondas con un campo de visión claro entre ellas; por lo tanto, no hay obstáculos para interrumpir dicho campo visual. Otro de los métodos utilizados para transmitir datos mediante el medio inalámbrico del microondas es el del satélite, que transmite información vía un satélite. Las estaciones terrestres envían y reciben señales de datos hacia y desde el satélite con una frecuencia que oscila desde los 11 GHz a 14 GHz, y con una velocidad de transmisión de 1 Mbps a 10 Mbps (Martínez & Jiménez, 2010).

1.3.3.4. Módulos RF de 433Mhz

El módulo de radiofrecuencia es muy utilizado en la actualidad debido a su bajo costo y fácil implementación. Para su funcionamiento, este dispositivo posee un receptor y emisor incorporados, el tipo de comunicación es simplex, es decir en un solo canal y unidireccional, trabaja a una frecuencia de 433MHz, debido a que es una banda de libre uso. Para utilizar estos módulos basta con alimentarlos y conectar el pin de datos por un lado del Transmisor (TX) y en otro el Receptor (RX). Para la programación con el software Arduino no es necesario agregar ningún tipo de librería, sin embargo, existen algunas que ofrecen ciertas ventajas como: verificación de errores, mejor transmisión, direccionamiento, enrutamiento, mallas, etc. (Werner, 2007).

1.3.4. Manejo de datos

Debido a los avances tecnológicos el manejo de datos se ha convertido en un aspecto fundamental para organizar y controlar la información, lo cual implica que se utilicen sistemas que permitan organizarla y controlarla en el menor tiempo posible, consiste en una manipulación que generalmente se da a través de medios electrónicos que permitan analizar variables de estudio para realizar investigaciones confiables y manejar los datos en el menor tiempo posible.

Existen distintas plataformas como Visual Basic, Matlab, LabView por mencionar algunos que permiten la recolección, almacenamiento y organización de los datos.

Al hablar del software Matlab, se hace referencia a un entorno de programación, esto quiere decir el desarrollo de algoritmos (conjunto de instrucciones), con los cuales el análisis de datos, la visualización y el cálculo numérico pueden solucionar problemas de cálculo técnico más rápidamente que con lenguajes de programación tradicionales tales como C, C++ o Fortran.

MATLAB abarca una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales e imágenes, comunicaciones, diseño de control, pruebas y medidas, modelado y análisis financiero o biología computacional. MATLAB es el lenguaje del cálculo técnico y un entorno de con infinitud de posibilidades, un ejemplo claro de esto es la tarjeta Arduino que es una placa perteneciente a una plataforma de software y hardware libre que permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los cuales se les puede dar varios usos como control de elementos a través de sensores o convertir información en una acción.

Una de las grandes ventajas de las tarjetas de Arduino es que son compatibles con Matlab la cual permite realizar la adquisición de datos. Matlab ofrece un paquete Arduino I/O que permite obtener una conexión entre Guide de Matlab y Arduino, este paquete puede ser usado normalmente en versiones de Matlab R2013b o versiones anteriores, pero no antes de R2011a.

Uno de los ejemplos más básicos consiste en leer datos de un sensor conectado a la placa de Arduino y transmitirlos a un PC mediante comunicación serial; los datos se leen numéricamente en una pantalla y se transmiten a Matlab, y así se puede trabajar con esos datos (Gutiérrez & Iturralde, 2017).

1.4. Modelado de un motor de corriente continua

Un motor de corriente continua es una máquina eléctrica que permite transformar energía eléctrica en energía mecánica rotatoria, cuyas aplicaciones pueden ir desde el movimiento de juguetes infantiles hasta aplicaciones en robótica con máquinas de control numérico. Ramírez & Castañeda (2017) señalan que para aplicaciones especiales en donde es esencial conocer la posición y velocidad del eje del motor se debe realizar un análisis de su comportamiento dinámico el cual debe definir de la manera más exacta los fenómenos eléctricos y mecánicos involucrados en el funcionamiento del motor.

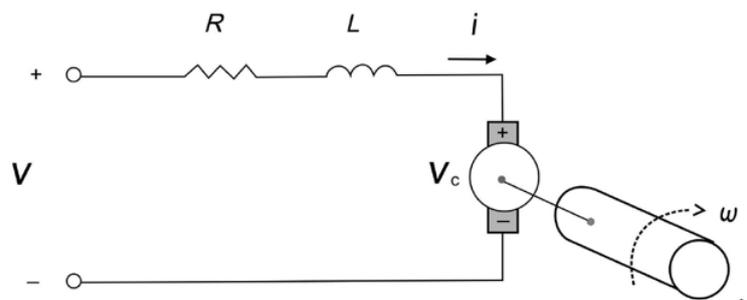


Figura. 1.2. Modelo de un motor de corriente directa.
(Fuente: Ramírez & Castañeda)

A partir de la figura 1.1 se puede obtener el modelo de la parte eléctrica:

(Ecuación 1.1)

$$L \frac{di}{dt} + Ri + vc = V$$

En donde: L = Inductancia del embobinado del motor
R = Resistencia del embobinado del motor
i = Corriente que circula por el motor
vc = Fuerza contra electromotriz
V = Voltaje de entrada

De la misma forma a partir de la figura 1.1 se obtiene el modelo de la parte mecánica:

(Ecuación 1.2)

$$J \frac{d\omega}{dt} + k_f \omega + T_m = T_L$$

En donde: J = Momento de inercia
k_f = Coeficiente de fricción viscosa
ω = Velocidad angular del motor
T_m = Torque generado por el motor
T_L = Carga aplicada al motor

Además de las condiciones mecánicas y eléctricas mencionadas en las ecuaciones 1.1 y 1.2 se tiene las equivalencias para la fuerza contra electromotriz y para el torque del motor respectivamente:

(Ecuación 1.3)

$$vc = k_e \omega$$

(Ecuación 1.4)

$$T_m = k_T i$$

(Ecuación 1.5)

$$T_f = k_f \omega$$

En donde: k_e = Constante de fuerza contra electromotriz
k_T = Constante de torque
T_f = Torque de fricción
i_{arr} = Intensidad de corriente en el arranque

Sustituyendo las ecuaciones 1.3 y 1.4 en las ecuaciones 1.1 y 1.2 respectivamente se obtiene el modelo matemático que rige el comportamiento del motor de corriente continua.

(Ecuación 1.6)

$$L \frac{di}{dt} + Ri + k_e \omega = V$$

(Ecuación 1.7)

$$J \frac{d\omega}{dt} + Tf + k_T i = T_L$$

A partir de las ecuaciones anteriores se puede apreciar que los parámetros que definirán el comportamiento del motor son R, L, Tf, ke, kT, J. Una vez que estos parámetros se encuentren definidos se puede diseñar un algoritmo que permita controlar la posición y velocidad del motor.

A continuación se definen los parámetros R, L, Tf, ke, kT, J y como cada uno se relaciona con la respuesta dinámica del motor de corriente continua.

1.4.1. Resistencia de armadura R

Es la oposición al paso de corriente que presenta el bobinado del motor eléctrico, esta se puede medir con un multímetro conectado entre los terminales.

1.4.2. Constante de torque Kt

La constante de torque de un motor es aquella que permite relacionar valores de intensidad de corriente con la magnitud del par aplicado en el eje de salida.

El método general para calcular la constante de torque es establecer experimentalmente una relación lineal para varios valores de intensidad de corriente el torque aplicado en el eje de salida. Se puede tomar como referencia la ecuación 1.4 para realizar el cálculo.

(Ecuación 1.8)

$$k_T = \frac{Tm}{i}$$

1.4.3. Torque de fricción Tf

El torque de fricción es el par necesario para iniciar el movimiento y vencer la fricción generada entre los distintos componentes del motor. Se lo puede calcular tomando como referencia la ecuación 1.4.

(Ecuación 1.9)

$$Tf = k_T i_{arr}$$

1.4.4. Constante de fuerza contra electromotriz Ke

La constante de fuerza contra electromotriz es aquella que permite relacionar valores de velocidad de giro del eje del motor con la magnitud de la fuerza electromotriz (Vc) utilizada por el motor.

Uno de los métodos para calcular la constante de fuerza contra electromotriz es midiendo la intensidad de corriente que circula por el sistema con un amperímetro y aplicando la ley de tensiones de Kirchoff según la siguiente figura.

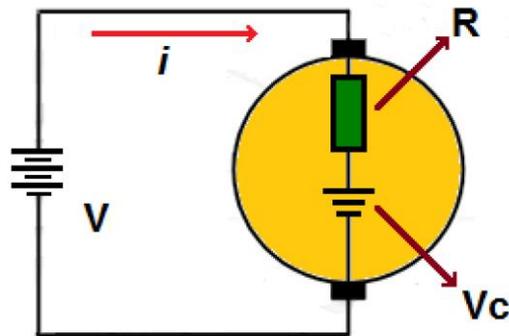


Figura. 1.3. Representación del circuito de un motor de corriente directa.
(Fuente: Ramírez & Castañeda (2017))

En donde se puede establecer la siguiente relación:

(Ecuación 1.10)

$$V = i \times r + v_c$$

Reemplazando la ecuación 1.3 en la ecuación 1.10 y despejando se obtiene:

(Ecuación 1.11)

$$k_e = \frac{V - i \times r}{\omega}$$

1.4.5. Inercia efectiva J

La inercia efectiva del motor es la resistencia que presentan las partes encargadas de transmitir el movimiento rotacional a cambiar su velocidad angular.

El valor de la inercia efectiva del motor puede ser calculado mediante la siguiente relación:

(Ecuación 1.12)

$$J = \frac{t_m k_T k_e}{R}$$

En donde: k_e = Constante de fuerza contra electromotriz

k_T = Constante de torque

t_m = Constante mecánica de tiempo

R = Resistencia de la armadura

Los valores de R , k_e , k_T , se obtienen de pasos anteriores, mientras que el valor de la constante mecánica de tiempo se lo halla mediante el análisis de la respuesta de la velocidad angular del motor en función del tiempo para una entrada de tipo escalón.

El valor de la constante de tiempo mecánica corresponde al tiempo que tarda el motor en alcanzar el 63.2% del valor de su velocidad de operación.

1.4.6. Coeficiente de amortiguamiento B_{eq}

El valor del coeficiente de amortiguamiento corresponde a la resistencia que presenta el motor al movimiento una vez que se encuentra en estado estable. Para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento se utiliza la siguiente relación:

(Ecuación 1.13)

$$B_{eq} = \frac{w \times k_e}{i}$$

Si se aplica la ley de Ohm para la intensidad y se sustituye la ecuación 1.3 podemos obtener una relación dependiente únicamente de los parámetros R, k_e , k_T .

(Ecuación 1.14)

$$B_{eq} = \frac{k_T \cdot k_e}{R}$$

1.4.7. Inductancia I

El valor de la inductancia de la armadura de un motor eléctrico depende específicamente de las características físicas del embobinado del motor. Para la medición de la inductancia se puede usar el dispositivo de Henry que permite la medición directa de este parámetro. El valor de la inductancia generalmente se desprecia porque la respuesta es demasiado rápida en comparación a los otros términos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño conceptual

2.1.1. Descripción general de máquinas similares en el mercado

En el mercado ecuatoriano no se cuenta con mecanismos para la enseñanza de teorías de control. En el mercado internacional los fabricantes de estas máquinas proveen el software mediante el cual se comunica el equipo con el ordenador.

Existen empresas dedicadas a la manufactura de este tipo de equipos, siendo los dispositivos más representativos los que se presentan a continuación:

2.1.1.1. Rotary Servo Base Unit

Rotary Servo Base Unit desarrollada por Quanser Innovate Educate, es una unidad base que cuenta con un sistema de servo mecanismos conectados con un juego de engranajes. El módulo consta de un motor DC en un marco metálico.

La unidad base utiliza la siguiente configuración, en la parte inferior del sistema se ubica el motor encargado de dar el movimiento al sistema, este transmite el movimiento al conjunto de ruedas dentadas y estas se encuentran conectadas con un potenciómetro encargado de registrar las condiciones del sistema. La disposición de los componentes en el sistema es la siguiente:



Figura. 2.1. Máquina para enseñanza de teorías de control marca Quanser.
(Fuente: <https://www.quanser.com/>)

Esta unidad base permite el montaje de masas inerciales en su parte superior, o de ser necesario permite la conexión de módulos adicionales para ampliar el alcance en la enseñanza de conceptos de control.

Sus principales características son:

- Dimensiones: 15cm x 15cm x 18cm
- Alimentación del motor 6 V.
- Sensibilidad del tacómetro: 0.0015 V/RPM.
- Velocidad máxima del motor: 6000 RPM.

2.1.1.2. Industrial Plant Emulator

Industrial Plant Emulator desarrollado por ECP Educational Control Products presenta un servomecanismo orientado al estudio del control de sistemas dinámicos.

El mecanismo cuenta con dos discos para ensamblar las masas de inercia al mecanismo, en este caso los discos están conectados con una banda para transmitir el movimiento.

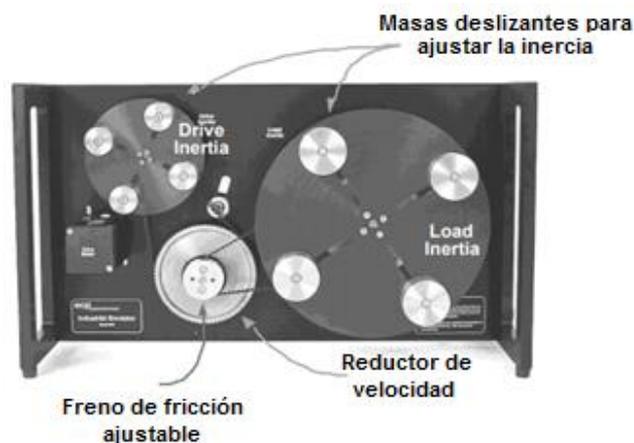


Figura 2.2. Máquina para enseñanza de teorías de control marca ECP Educational.
(Fuente: <http://www.ecpsystems.com/controls.htm>)

El movimiento se da desde el motor eléctrico ubicado en la parte superior de manera vertical, el cual transmite el movimiento a la rueda dentada principal, mediante con bandas transmite el movimiento a las ruedas de inercia, que se encuentran conectadas con dos encoders de alta resolución para monitorear el sistema.

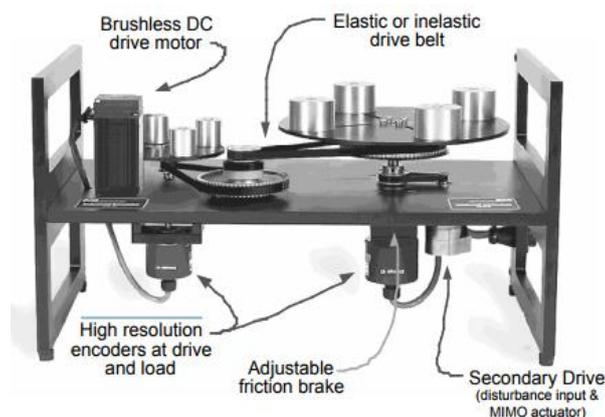


Figura 2.3. Esquema de funcionamiento máquina marca ECP Educational.
(Fuente: <http://www.ecpsystems.com/controls.htm>)

El modelo diseñado por ECP consiste en un motor DC conectado a un encoder de alta resolución a la entrada del eje transmisor, este va conectado a dos ruedas de carga mediante bandas, estas pueden ser de carácter elástico o inelástico, las ruedas de inercia poseen masas deslizables para regular la carga de inercia.

Después de la segunda rueda de inercia se encuentra un freno de fricción ajustable, junto a un encoder que permite obtener la posición del eje de salida.

Sus características principales son:

- Dimensiones: 30cm x 30cm x 51cm
- Relación de transferencia: de 1.5:1 a 24:1
- Carga de inercia: de 0.006 a 0.025 Kg-m².

2.1.2. Casa de la calidad

Como método para conocer los requerimientos específicos de la máquina a diseñarse, se procede a la realización de la casa de la calidad, una herramienta sumamente importante dentro del método QFD (Quality Function Deployment) (Riba, 2002), con la que se pretende conocer las necesidades del cliente y hallar las especificaciones técnicas que satisfarían estas necesidades.

(Ver anexo 1)

2.1.2.1. Voz del usuario

El usuario según su criterio nos da a conocer las características que la máquina debe poseer.

- Bajo costo
- De fácil uso
- Que sea silenciosa
- Debe permitir la conexión con distintos módulos
- Que el material sea resistente
- Que sea de fácil mantenimiento y reparación
- Rango de velocidad que permita la visualización de las distintas prácticas y que sea seguro para los estudiantes.
- Capacidad para trabajar con una barra de aluminio de 7 pulgadas o de 31 pulgadas acoplada al eje de salida.
- Capacidad para trabajar con un disco metálico de 460 gr. o con un disco plástico de 490 gr. los cuales se utilizarán para estudio dinámico de un péndulo simple.

2.1.2.2. Voz del ingeniero

Una vez conocidos los requerimientos del usuario, se procede a expresarlos con criterios técnicos cuantificables:

- Eficiencia en el diseño
- Ergonomía
- Nivel de ruido
- Modularidad
- Confiabilidad
- Baja necesidad de mantenimiento
- Rango de velocidad entre 10 y 20 RPM.
- Torque mínimo del motor de 0.07 N-m

2.1.2.3. Especificaciones técnicas

Para resumir las conclusiones llegadas a través de la casa de la calidad, se presenta la siguiente tabla donde se resume las principales especificaciones técnicas para la máquina a diseñarse:

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas de la máquina.

Concepto	Propone	R/D	Descripción
Función	D	R	Introducir conceptos y teorías de control básico en una plataforma fácil de usar.
Voltaje de alimentación del motor	D	R	Corriente continua 12 [V]
Velocidad de salida	D	R	10 a 20 RPM
Torque de salida	D	R	0,064 N-m
Voltaje de alimentación de los sensores	C	D	Corriente continua 5 [V]
Voltaje de alimentación del controlador	C	D	Corriente continua 7 - 12 [V]
Número de operarios necesario	C	D	Un operario
Tiempo entre mantenimientos	D	R	Cada tres meses
Dimensiones del mecanismo	C	D	Dimensiones máximas 25cm x 25cm x25cm
Costo	C	D	Costo máximo referencial de \$1000

Propone:	C = Cliente	D = Diseñador
R/D:	R = Requerimiento	D = Deseo

Fuente: (Elaboración propia)

2.1.3. Análisis funcional

El análisis funcional se lo realiza usando una técnica propuesta por Miles (2015), cuyo principal propósito es separar la acción que se efectúa del componente, para de este modo buscar nuevas alternativas de solución para un mismo problema, y así obtener mejores productos a un menor costo.

Es importante identificar las funciones principales y secundarias de la máquina; las funciones primarias son aquellas por las que el cliente adquiere la máquina, que en este caso es la de permitir la enseñanza de teorías de control automático. Las funciones secundarias son aquellas que permiten la ejecución de la función primaria, siendo estas las que se determinan mediante este análisis.

Una vez establecidas las funciones secundarias, se procede a plantear soluciones adecuadas para cumplir dichas funciones, y con esto seleccionar las más convenientes. Estas funciones pueden ser agrupadas con el fin de obtener módulos que cumplan las funciones de un conjunto determinado y así obtener un diseño modular.

2.1.3.1. Desarrollo de los diagramas funcionales

(Ver anexo 2)

2.1.3.2. Análisis de los diagramas funcionales

Se ha estimado conveniente desarrollar el diagrama funcional hasta el nivel 2 ya que, un despliegue mayor conduciría a establecer implícitamente determinadas soluciones.

- Nivel 0: Explica la función global o primaria, que en este caso es la de controlar la rotación del motor y sus partes.
- Nivel 1: Se especifican de manera general las funciones a realizarse para cumplir con los requerimientos para el desarrollo de las prácticas.
- Nivel 2: Se desglosan las actividades que son fundamentales para cumplir cada una de las funciones generales de la máquina, se controlan las entradas y salidas del mecanismo para definir las interfaces existentes entre los módulos del mecanismo.

Se establecen los flujos energéticos, de materiales y control en la definición de los módulos (Ver anexo 3).

La división de módulos consiste en separar el producto en varios bloques (módulos) funcionales, para de esta manera reducir costos, tener facilidad de mantenimiento, facilidad de producción, entre otros.

2.1.3.3. Solución para cada módulo

2.1.3.3.1. Módulo 1

Este módulo cumple las siguientes funciones

Soportar componentes principales

La estructura principal del dispositivo debe presentar la rigidez necesaria como para mantenerse estable con el movimiento de los distintos componentes.

Permitir montaje de componentes

El dispositivo debe permitir el montaje y el desmontaje de los distintos componentes según la necesidad de los objetivos de la práctica.

A continuación se proponen posibles soluciones para cada función.

Estructura de disposición horizontal

Esta estructura permite el montaje de los componentes de manera horizontal.

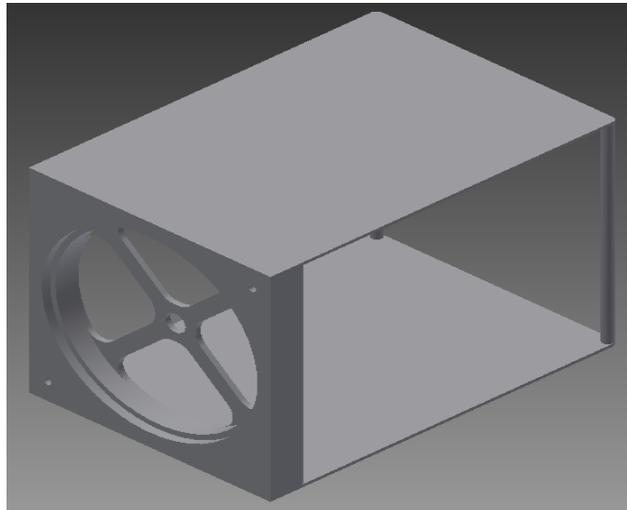


Figura 2.4. Opción 1 para la disposición del cuerpo de la máquina.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Las dimensiones de fabricación son menores a 20 cm por lado
- Permite una clara visualización de los componentes
- Permite un fácil mantenimiento.

Desventajas

- Se requieren varias piezas para formar la estructura
- La geometría frontal es compleja
- Poco espacio para colocar la parte electrónica

Estructura de disposición tipo mesa

En la estructura con este tipo de disposición los componentes principales como el motor y los sensores se encuentran en la parte inferior del cuerpo principal, mientras que los componentes de transmisión de movimiento o masas inerciales para cada práctica se los ensambla en la parte superior.

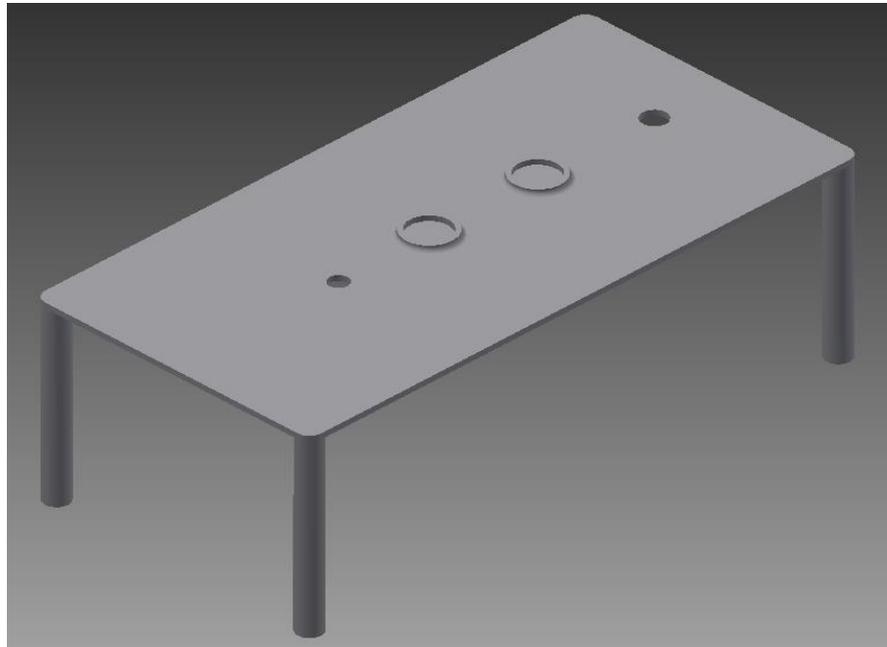


Figura 2.5. Opción 2 para la disposición del cuerpo de la máquina.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Presenta una sencilla fabricación
- Permite fácil mantenimiento
- El montaje inicial es fácil

Desventajas

- Las dimensiones principales superan los 20 cm.
- Los componentes principales no son visibles en su funcionamiento.

Estructura de disposición vertical

Con esta estructura el eje motriz se encuentra dispuesto de manera vertical. Se dispone de 4 ejes en los vértices que sirven para alinear los distintos componentes que se ensamblen a la estructura.

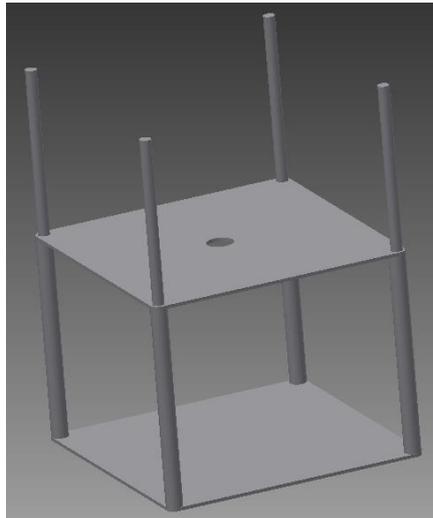


Figura 2.6. Opción 3 para la disposición del cuerpo de la máquina.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Presenta una sencilla fabricación
- El montaje de los componentes específicos se puede hacer por separado en la placa superior y luego montarlo en el cuerpo principal.

Desventajas

- Las dimensiones principales superan las requeridas por el cliente.
- Las conexiones de la parte electrónica no será fácilmente visible debido a que los cables se encontrarán cruzados desde la parte superior hacia la inferior del cuerpo.
- Son varias piezas para la fabricación y el montaje del cuerpo.
- En caso de requerir reparación se debe separar la placa superior lo que implica el desmontaje de todo el mecanismo por completo

Matriz de criterios

Tabla 2.2. Matriz de criterios Módulo 1.

Tamaño > Visualización de componentes > Facilidad de fabricación

Criterio	Facilidad de fabricación	Tamaño	Visualización de comp.	$\sum + 1$	Ponderación
Facilidad de fabricación		0	0	1	0,167
Tamaño	1		1	3	0,500
Visualización de comp.	1	0		2	0,333
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Facilidad de fabricación**

Tabla 2.3. Evaluación de la facilidad de fabricación para el Módulo 1.

Solución 2 > Solución 3 = Solución 1

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum + 1$	Ponderación
Solución 1		0	0.5	1.5	0,250
Solución 2	1		1	3	0,500
Solución 3	0.5	0		1,5	0,250
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Tamaño**

Tabla 2.4. Evaluación del tamaño para el Módulo 1.

Solución 1 > Solución 3 > Solución 2

F. Manufactura	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum + 1$	Ponderación
Solución 1		1	1	3	0,500
Solución 2	0		0	1	0,167
Solución 3	0	1		2	0,333
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Visualización de componentes mecánicos y electrónicos**

Tabla 2.5. Evaluación para la visualización de componentes para el Módulo 1.

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum + 1$	Ponderación
Solución 1		1	1	3	0,500
Solución 2	0		1	2	0,333
Solución 3	0	0		1	0,167
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 2.6. Evaluación de prioridad de las soluciones para el Módulo 1.

Conclusiones	Facilidad de fabricación	Tamaño	Visualización de comp.	Σ	Prioridad
Solución 1	0,250 x 0,167	0,500 x 0,500	0,500 x 0,333	0,4583	1
Solución 2	0,500 x 0,167	0,167 x 0,500	0,333 x 0,333	0,2777	2
Solución 3	0,250 x 0,167	0,333 x 0,500	0,167x 0,333	0,2638	3

Fuente: (Elaboración propia)

2.1.3.3.2. Módulo 2

Este módulo es el encargado de medir las variables físicas necesarias para el estudio del comportamiento del mecanismo y de sus componentes. Las funciones que cumple el módulo 2 son las siguientes:

Crear una conexión serial

El módulo debe permitir una transmisión en tiempo real con la PC, con el fin de conocer los datos de entrada de los sensores.

Registrar variables físicas del mecanismo

El sistema de control debe contar con sensores ubicados de manera que sea posible registrar valores de posición y velocidad del mecanismo

Ejecutar instrucciones

El controlador debe permitir la programación y ejecución de líneas de programación.

A continuación se proponen posibles soluciones para cada función.

Sistema de control con placa Arduino Uno

El sistema de control con placa Arduino Uno permite una conexión fácil con el ordenador tanto como para la carga del programa como para una transmisión de datos desde los sensores.

Este sistema trabaja con un voltaje de alimentación de 5V, y permite una conexión directa a cada uno de los componentes electrónicos del sistema.

Los componentes principales para este módulo son: Arduino Uno, Arduino Nano, Potenciómetro, Protoboard.

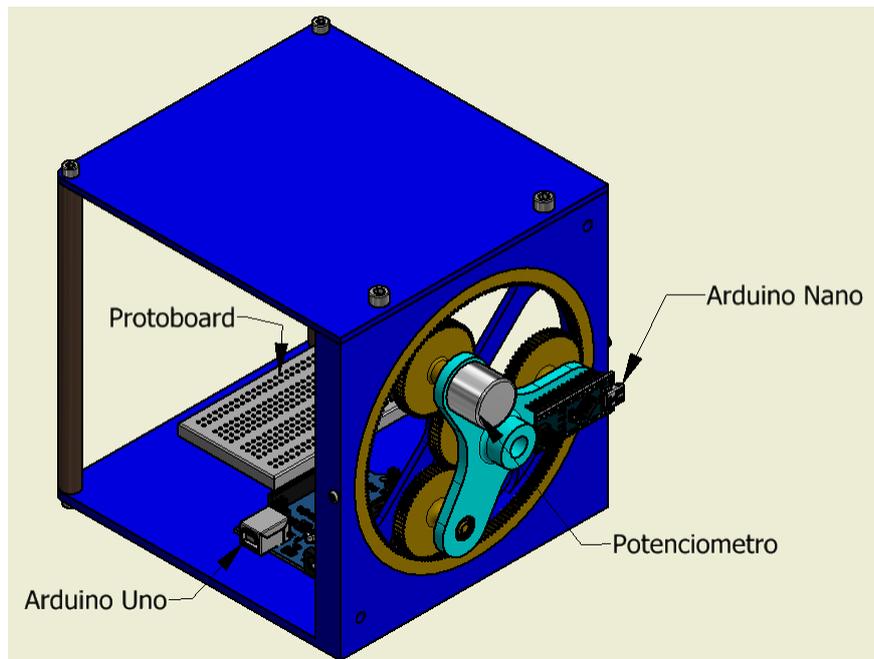


Figura 2.7. Esquema de ubicación de elementos para sistema de control con placa Arduino uno.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Fácil conexión
- Bajo costo
- Software libre
- Facilidad de adquisición de librerías para el controlador

Desventajas

- Capacidad de almacenamiento
- Resistencia al medio de trabajo
- Limitado rango de entradas y salidas en el controlador

Sistema de control con PLC

El controlador PLC permite manejar procesos en tiempo real, y es un equipo robusto que por lo general se utiliza en ambientes industriales.

Este sistema trabaja con un voltaje de alimentación de 24V, y requiere de una caja de control en donde exista un transformador de corriente para la conexión a cada uno de los componentes electrónicos del sistema.

Los componentes principales para este módulo son: PLC Siemens, Potenciómetro, caja de control, transformador, cables apantallados.

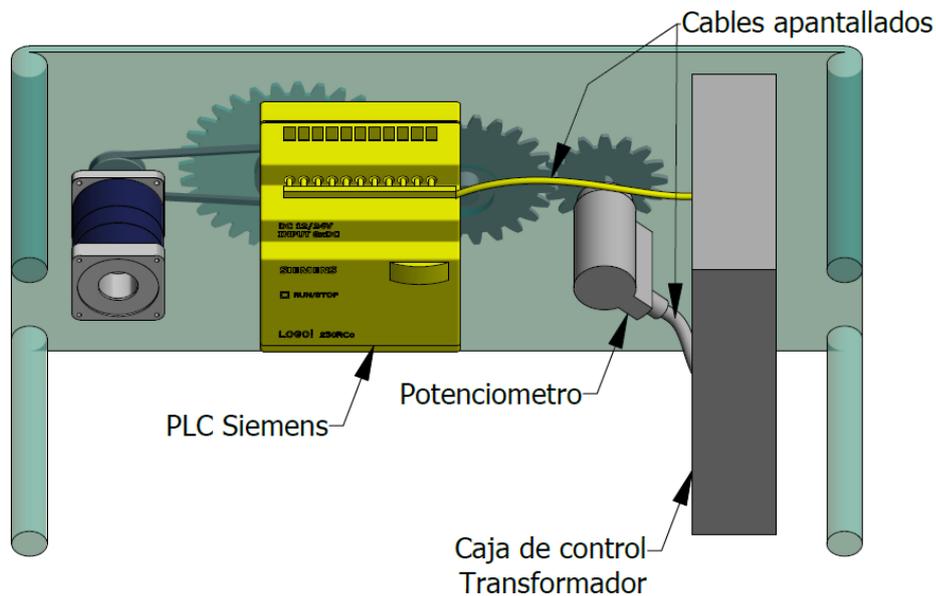


Figura 2.8. Esquema de ubicación de elementos para sistema de control con PLC.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Resistencia al polvo, humedad y vibraciones
- Fácil programación
- Amplio rango de entradas y salidas

Desventajas

- Capacidad de almacenamiento
- Alto costo
- Gran tamaño
- Software del controlador dependiente de la marca

Sistema de control con Raspberry pi

El controlador Raspberry pi más que un microcontrolador es un dispositivo que se comporta como una mini computadora, permite una conexión fácil con el ordenador además de tener una amplia memoria de almacenamiento.

Este sistema trabaja con un voltaje de alimentación de 5V con una corriente de 3A mediante una conexión mediante un puerto USB-C, y permite una conexión directa a cada uno de los componentes electrónicos del sistema.

Los componentes principales para este módulo son: Raspberry pi, Driver codificador RF, Potenciómetro, Protoboard.

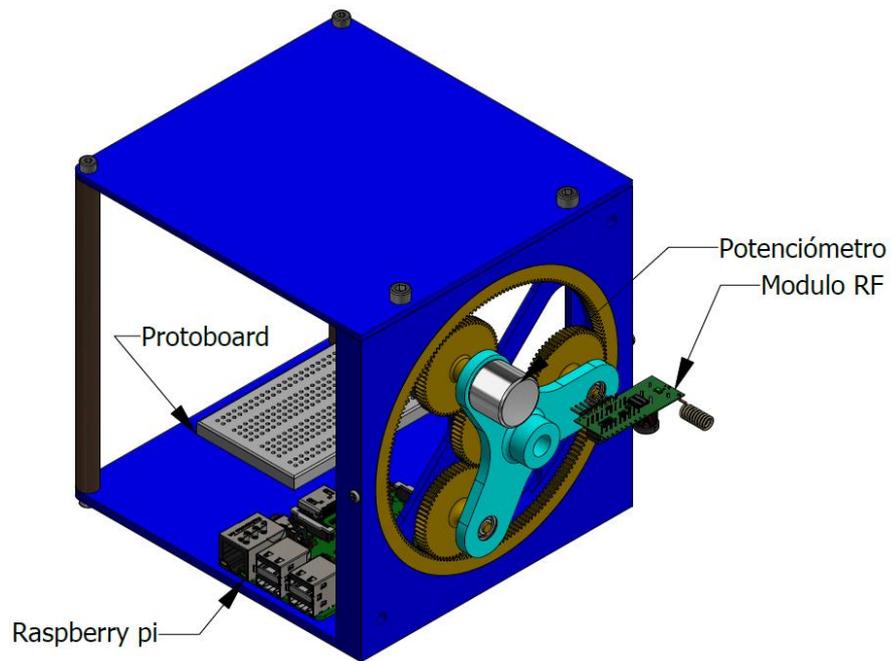


Figura 2.9. Esquema de ubicación de elementos para sistema de control con Raspberry pi.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Gran memoria de almacenamiento
- Costo moderado

Desventajas

- Resistencia al medio de trabajo
- Limitado rango de entradas y salidas
- La conexión con sensores no es fácil de lograr

Matriz de criterios

Tabla 2.7. Matriz de criterios Módulo 2.

Costo > Facilidad de programación = Facilidad de conexión

Criterio	Costo	Facilidad de programación	Facilidad de conexión	$\Sigma + 1$	Ponderación
Costo		1	1	3	0,500
Facilidad de programación	0		1	1.5	0,250
Facilidad de conexión	0	0		1.5	0,250
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Costo**

Tabla 2.8. Evaluación del costo para el Módulo 2.

Solución 1 > Solución 3 > Solución 2

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum + 1$	Ponderación
Solución 1		1	1	3	0,500
Solución 2	0		0	1	0,167
Solución 3	0	1		2	0,333
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Facilidad de Programación**

Tabla 2.9. Evaluación de la facilidad de programación para el Módulo 2.

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3

F. Manufactura	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum + 1$	Ponderación
Solución 1		1	1	3	0,500
Solución 2	0		1	2	0,333
Solución 3	0	0		1	0,167
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Facilidad de Conexión**

Tabla 2.10. Evaluación de la facilidad de conexión para el Módulo 2.

Solución 1 = Solución 2 > Solución 3

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\sum + 1$	Ponderación
Solución 1		0.5	1	2,5	0,417
Solución 2	0.5		1	2,5	0,417
Solución 3	0	0		1	0,166
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 2.11. Evaluación de prioridad de las soluciones para el Módulo 2.

Conclusiones	Costo	F. Manufactura	F. Conexión	Σ	Prioridad
Solución 1	0,500 x 0,5	0,500 x 0,250	0,417 x 0,250	0,479	1
Solución 2	0,167 x 0,5	0,333 x 0,250	0,417 x 0,250	0,271	2
Solución 3	0,333 x 0,5	0,167 x 0,250	0,166 x 0,250	0,250	3

Fuente: (Elaboración propia)

2.1.3.3.3. Módulo 3

Este módulo es el encargado de generar el movimiento rotatorio de manera controlada desde un motor hasta un eje de principal. Las funciones que cumple el módulo 3 son las siguientes:

Mover los componentes principales

El sistema motriz principal será el encargado de dar el movimiento a los componentes ensamblados en el mecanismo.

Controlar la velocidad de trabajo

El sistema debe ser capaz de llevar el movimiento desde el motor hacia los distintos componentes a una velocidad controlada.

Registrar el desplazamiento del eje

El sistema debe permitir obtener el desplazamiento y la velocidad instantánea del eje de salida del motor.

A continuación se proponen posibles soluciones para cada función.

Motor DC con engrane

Este mecanismo posee un motor de corriente continua conectado a una caja reductora de velocidad de engranes planetarios, para la obtención de la velocidad del motor se utiliza un encoder de alta resolución que permite registrar el desplazamiento angular del eje del motor.

Conectado en el eje de salida de la caja reductora se encuentra ensamblado un engrane recto que servirá como conexión entre el sistema motriz y los componentes móviles del módulo 4.

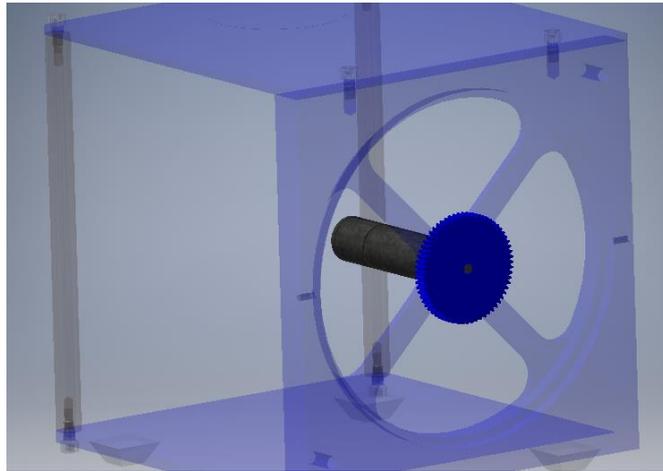


Figura 2.10. Opción 1 para el sistema motriz de la máquina.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Baja necesidad de mantenimiento.
- Tamaño reducido.
- No tiene límite en el rango de movimiento.

Desventajas

- La selección de relación de transmisión es limitada
- Costo considerable

Motor paso a paso con poleas

El mecanismo cuenta con un motor de corriente continua que viene definido de manera que por cada pulso que se aplique rota un ángulo determinado.

El eje del motor se encuentra conectado un sistema de poleas con una banda el cual permitirá conexión entre el sistema motriz y los componentes móviles del módulo 4.

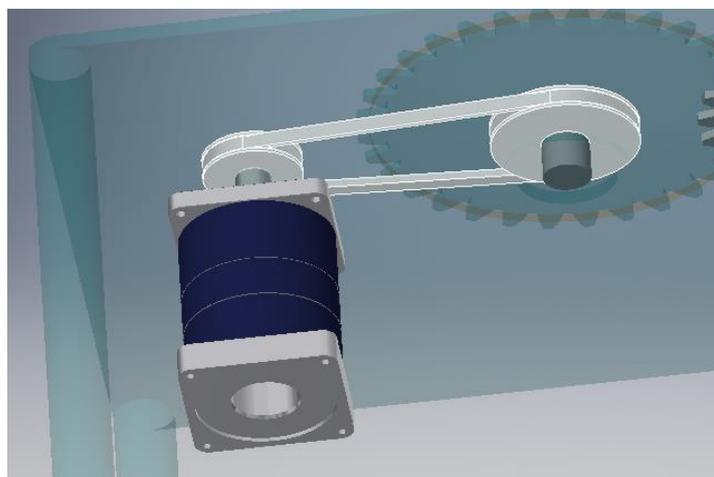


Figura 2.11. Opción 2 para el sistema motriz de la máquina.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- No tiene límite en el rango de movimiento.
- Permite fácil mantenimiento

Desventajas

- Presenta un tamaño mayor respecto a un servomotor.
- A altas velocidades pierde definición en los pasos.
- A bajas velocidades no se produce un movimiento continuo.

Servomotor con correas dentadas

Este mecanismo cuenta con un tipo de motor de corriente continua que viene incorporado con una tarjeta controladora y un sensor de posición que le permite rotar de manera inmediata a una posición definida.

El eje del motor se encuentra conectado con una polea dentada, el cual mediante una correa dentada permitirá una conexión entre el sistema motriz y los componentes móviles del módulo 4.

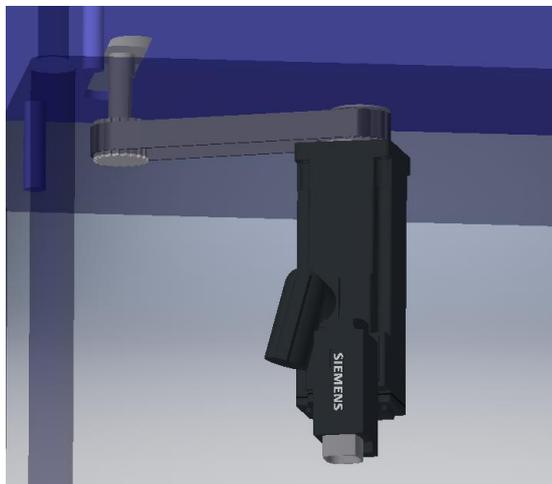


Figura 2.12. Opción 3 para el sistema motriz de la máquina.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Presenta reducido tamaño.
- Alta precisión en el movimiento.
- Tiene incorporada una caja de reducción de velocidad.

Desventajas

- Presenta elevado costo.
- Requiere de mantenimiento.
- El rango de movimiento es de máximo 360°.

Matriz de criterios

Tabla 2.12. Matriz de criterios Módulo 3.

Rango de movimiento > Costo > Tamaño

Criterio	Rango de movimiento	Tamaño	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación	
Rango de movimiento		1	1	3	0,500	
Tamaño	0		0	1	0,167	
Costo	0	1		2	0,333	
				Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Rango de movimiento**

Tabla 2.13. Evaluación de la facilidad de fabricación para el Módulo 3.

Solución 1 = Solución 2 > Solución 3

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación	
Solución 1		0.5	1	2.5	0,417	
Solución 2	0.5		1	2.5	0,417	
Solución 3	0	0		1	0,167	
				Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Costo**

Tabla 2.14. Evaluación del costo para el Módulo 3.

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3

F. Manufactura	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación	
Solución 1		1	1	3	0,500	
Solución 2	0		1	2	0,333	
Solución 3	0	0		1	0,167	
				Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Tamaño**

Tabla 2.15. Evaluación del tamaño para el Módulo 3.

Solución 1 > Solución 3 > Solución 2

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1		1	1	3	0,500
Solución 2	0		0	1	0,167
Solución 3	0	1		2	0,333
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 2.16. Evaluación de prioridad de las soluciones para el Módulo 3.

Conclusiones	Facilidad de fabricación	Costo	Tamaño	Σ	Prioridad
Solución 1	0,417 x 0,500	0,500 x 0,333	0,500 x 0,167	0,4585	1
Solución 2	0,417 x 0,500	0,333 x 0,333	0,167 x 0,167	0,3472	2
Solución 3	0,167 x 0,500	0,167 x 0,333	0,333x 0,167	0,1946	3

Fuente: (Elaboración propia)

2.1.3.3.4. Módulo 4

El módulo 4 es el encargado de distribuir el movimiento a los distintos componentes encargados de medir posición y velocidad. Este módulo debe ser desmontable y debe poseer un eje de salida que permita ensamblar componentes adicionales. Este módulo cumple las siguientes funciones.

Distribuir el movimiento a los componentes ensamblados

El sistema de distribución es el encargado de llevar el movimiento desde el motor hacia los distintos componentes y sensores ensamblados.

Proporcionar un eje de salida

El sistema debe poseer un eje de salida para poder conectar dispositivos. A continuación se proponen posibles soluciones para cada función.

Transmisión con correas dentadas

Este mecanismo permite el montaje y desmontaje de los componentes de manera sencilla, en esta disposición el eje motriz se encontrará de manera vertical, el requerimiento principal es el tensado de las correas.

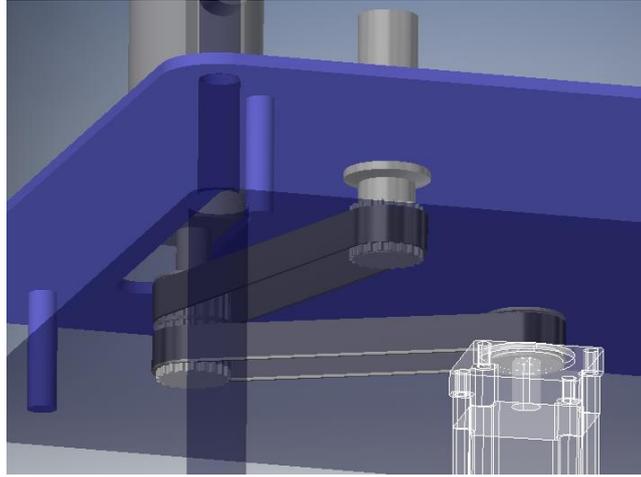


Figura 2.13. Opción 1 para la conexión entre el motor y los sensores.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Bajo costo
- Permite un fácil mantenimiento en caso de rotura
- Permite fácil conexión de los demás componentes

Desventajas

- Se requiere verifica la tensión en la correa antes de cada uso.
- Puede existir deslizamiento entre los ejes y la correa

Conexión con tren de engranes

Este sistema presenta una disposición con tres ejes en donde se encuentran ubicados los engranes del mecanismo principal. El motor, controlador y potenciómetro se encuentran ubicados la parte inferior de la estructura.

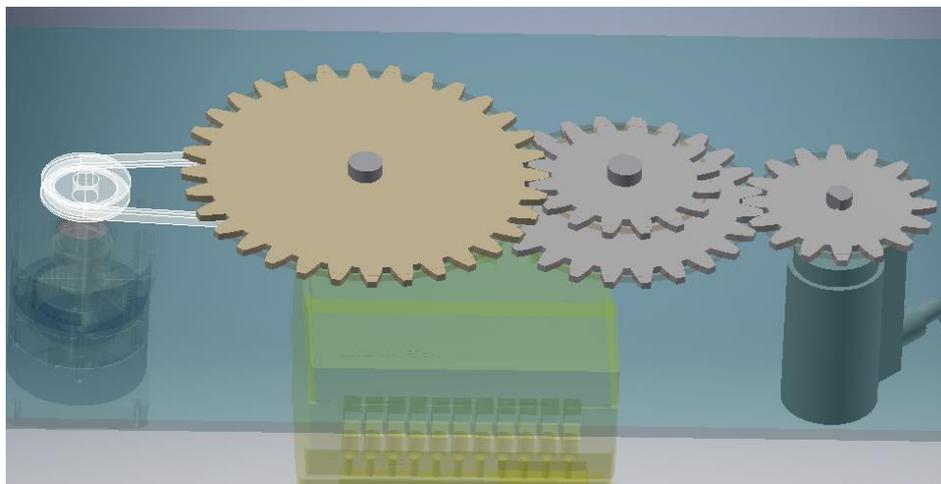


Figura 2.14. Opción 2 para la conexión entre el motor y los sensores.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Presenta una sencilla fabricación
- Permite fácil mantenimiento
- El montaje inicial es fácil

Desventajas

- Las dimensiones del tren de engranes son considerables.
- Los componentes principales no son visibles en su funcionamiento.

Sistema de engrane planetario

Este sistema dispone de tres engranes móviles que rotan alrededor del eje principal.

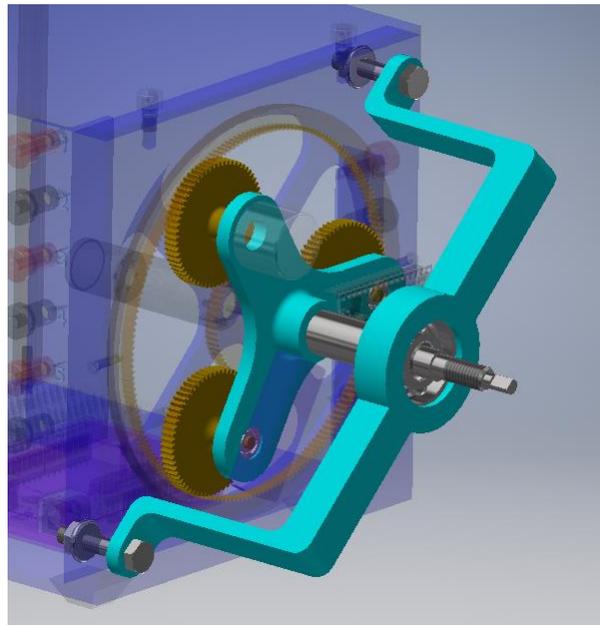


Figura 2.15. Opción 3 para la conexión entre el motor y los sensores.
(Fuente: Elaboración propia)

Ventajas

- Crea una mejor distribución de esfuerzos.
- La visualización de los componentes es completa.
- Presenta un eje de salida con reducción para distintos usos.

Desventajas

- El proceso de fabricación presenta una dificultad considerable.
- Se dificulta la toma de datos como posición y velocidad de los distintos elementos.

Matriz de criterios

Tabla 2.17. Matriz de criterios Módulo 4.

Visualización de componentes > Facilidad de fabricación > Tamaño

Criterio	Visualización de componentes	Tamaño	Facilidad de fabricación	$\Sigma + 1$	Ponderación
Visualización de componentes		1	1	3	0,500
Tamaño	0		1	2	0,167
Facilidad de fabricación	0	0		1	0,333
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Visualización de componentes**

Tabla 2.18. Evaluación de la facilidad de visualización para el Módulo 4.

Solución 3 > Solución 2 > Solución 1

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1		0	0	1	0,167
Solución 2	1		0	2	0,333
Solución 3	1	1		3	0,500
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Facilidad de fabricación**

Tabla 2.19. Evaluación de la facilidad de fabricación para el Módulo 4

Solución 1 = Solución 2 > Solución 3

F. Manufactura	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1		0.5	1	2,5	0,417
Solución 2	0.5		1	2,5	0,417
Solución 3	0	0		1	0,166
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Evaluación del peso específico del criterio **Tamaño**

Tabla 2.20. Evaluación del tamaño para el Módulo 4.

Solución 3 > Solución 2 > Solución 1

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución 1		0	0	1	0,167
Solución 2	1		0	2	0,333
Solución 3	1	1		3	0,500
			Suma	6	1

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 2. 21. Evaluación de prioridad de las soluciones para el Módulo 4.

Conclusiones	Visualización de componentes	Facilidad de fabricación	Tamaño	Σ	Prioridad
Solución 1	0,167 x 0,500	0,417 x 0,167	0,167 x 0,333	0,2082	3
Solución 2	0,333 x 0,500	0,417 x 0,167	0,333 x 0,333	0,3450	2
Solución 3	0,500 x 0,500	0,166 x 0,167	0,500x 0,333	0,4443	1

Fuente: (Elaboración propia)

2.1.3.4. Selección de las alternativas

En base a las alternativas que se encontraron para cada uno de los módulos, se ha elaborado la siguiente matriz, en la cual se establecen conexiones entre módulos potencialmente compatibles, capaces de originar una máquina única en sus características y funcionamiento.

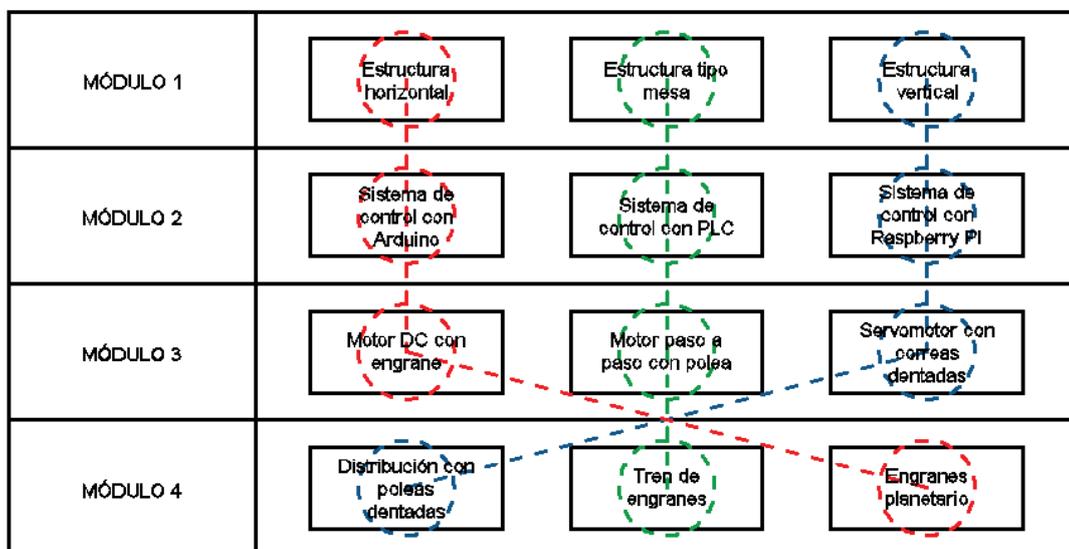


Figura 2.16. Selección de alternativas.
(Fuente: Elaboración propia)

La alternativa 1 presenta en conjunto las soluciones para cada módulo que sirven como base para el desarrollo del diseño mecánico, se encuentra conformada por los siguientes componentes:

- Un controlador Arduino
- Estructura con disposición horizontal de los elementos.
- Motor DC con caja reductora
- Sistema de engranes planetarios

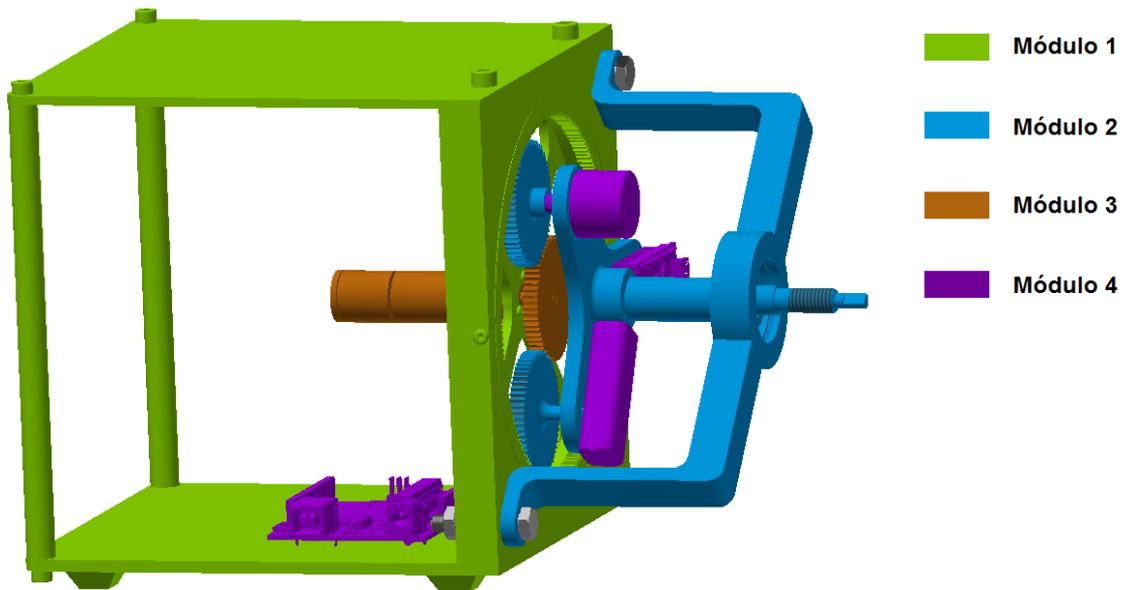


Figura 2.17. Representación de módulos de la alternativa 1 de máquina.
(Fuente: Elaboración propia)

2.2. Diseño mecánico

2.2.1. Diseño mecánico preliminar

Una vez definida la alternativa de solución para el dispositivo se procede a la definición de partes y componentes, así como sus dimensiones, material, acabados, entre otros.

2.2.1.1. Requerimientos limitadores

Las restricciones principales en el diseño mecánico preliminar son:

RL1) Torque mínimo en el eje de salida: 64.1 mN.m

RL2) Velocidad en el eje de salida: 10 - 20 RPM

RL3) Vida útil: 10000 horas

RL4) Dimensiones máximas del mecanismo: 0.25 x 0.20 x 0.20 metros

RL5) Costo de fabricación: menor a 1500 USD

2.2.1.2. Funciones críticas

Las funciones principales que surgieron a partir del diseño conceptual son las que se toman como mínimas para el diseño mecánico preliminar:

FC1) Movimiento de elementos conectados al eje de salida

FC2) Permitir la conexión modular con distintos complementos

FC3) Capacidad de mover los implementos acoplados

2.2.1.3. Parámetros críticos

Los parámetros críticos se definen para cada módulo y son las condiciones mínimas de funcionamiento determinantes para cada parte del servomecanismo.

2.2.1.3.1. Módulo 1

PC1) Cargas sobre el cuerpo base

PC2) Equilibrio estático del cuerpo base

2.2.1.3.2. Módulo 3

PC1) Relación de transmisión

PC2) Torque máximo y torque efectivo del motor

PC3) Torque en el eje de salida

2.2.1.3.3. Módulo 4

PC1) Cargas sobre el soporte del sistema de engranes planetarios

PC2) Cargas sobre los rodamientos

PC3) Fuerzas actuantes sobre los engranes rectos

PC4) Dimensión de sección del eje de salida

PC5) Dimensionamiento de los engranajes rectos

PC6) Dimensionamiento de la corona del sistema de engranes planetarios

2.2.1.4. Condiciones críticas

A partir de los requerimientos y de las funciones críticas nombradas anteriormente se definen las condiciones cuantitativas (CCt) y las condiciones cualitativas (CCI)

CCt1) Los engranes deben funcionar bajo el criterio de vida infinita

CCt2) El servomotor debe suministrar el torque suficiente sin detenerse

CCt3) El eje debe ser diseñado bajo el criterio de vida infinita

CCt4) El cuerpo debe presentar estabilidad en su funcionamiento

CCt5) El cuerpo base debe resistir las cargas actuantes sobre el mismo

CCI1) Los componentes deben ser de fácil ensamblaje.

CCI2) El dispositivo debe ser fácilmente replicable

CCI3) Las cargas colocadas en el extremo del eje deben poder moverse de forma continua.

2.2.1.5. Establecimiento de condiciones críticas

Para el establecimiento de las condiciones críticas se definen las partes principales del mecanismo para su respectivo análisis

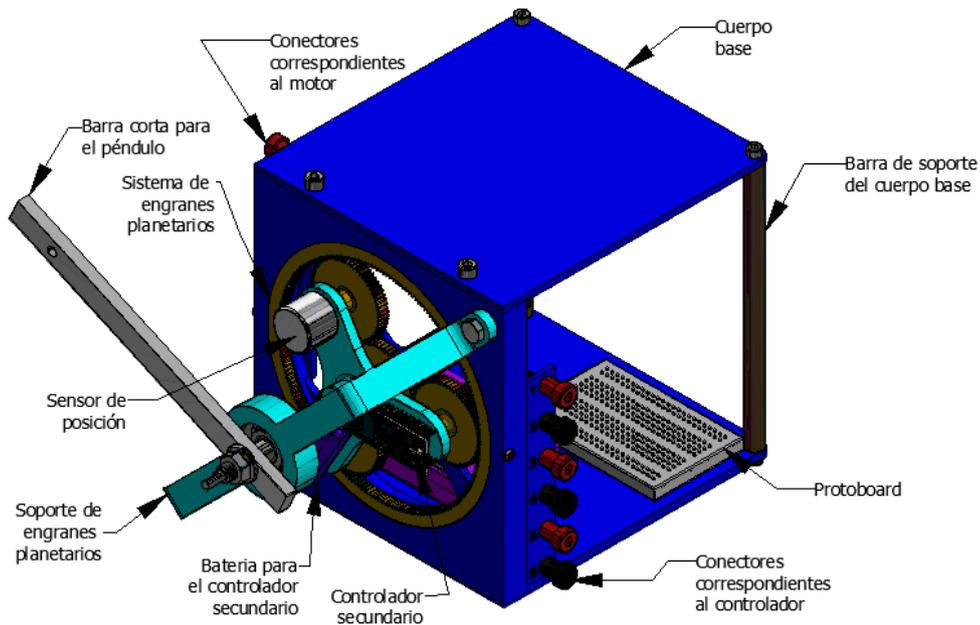


Figura 2.18. Esquema de partes principales del mecanismo.
(Fuente: Elaboración propia)

2.2.1.5.1. Tipo de Estructura

2.2.1.5.1.1. Equilibrio estático sobre el cuerpo base

Para el análisis de equilibrio estático se parte de los siguientes datos obtenidos a partir del cálculo de masas del programa INVENTOR:

- Masa de la tapa superior del cuerpo: 0.068 [Kg]
- Masa total del cuerpo: 0.0252 [Kg]
- Masa de los soportes de bronce: 0.087 [Kg]
- Masa del motor y de sus componentes adyacentes: 0.076 [Kg]
- Masa total del módulo 1: 0.072 [Kg]
- Masa total del módulo 4: 0.247 [Kg]
- Masa a cargarse en el eje de salida: 0.5 [Kg]
- Gravedad: 9.8 [m/s²]

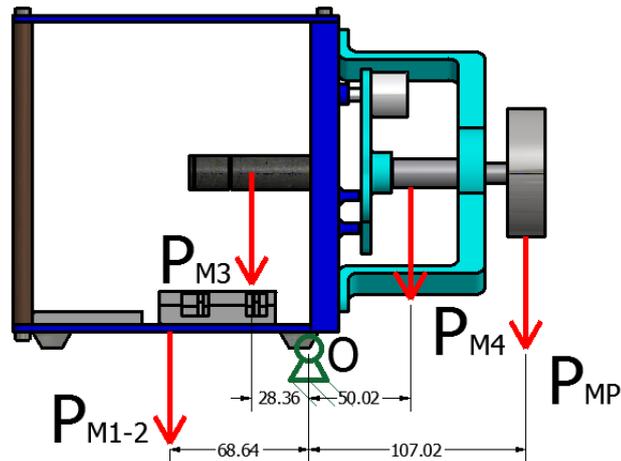


Figura 2.19. Diagrama de cuerpo libre del cuerpo base.
(Fuente: Elaboración propia)

- En dónde:
- P_{M1-2} = Peso de los módulos 1 y 2, [N].
 - P_{M3} = Peso del módulo 3, [N].
 - P_{M4} = Peso del módulo 4, [N].
 - P_{MP} = Peso de la masa para la práctica, [N].
 - m_1 = Masa del módulo 1, [N]
 - m_2 = Masa del módulo 2, [N]
 - m_3 = Masa del módulo 3, [N]
 - m_4 = Masa del módulo 4, [N]
 - m_p = Masa desmontable para la práctica, [N]

Calculo P_{M1-2}

$$P_{M1-2} = (m_1 + m_2) \cdot g$$

$$P_{M1-2} = 0.59[Kg] \cdot 9.8[m/s^2]$$

$$P_{M1-2} = 5.78 [N]$$

Calculo P_{M3}

$$P_{M3} = (m_3) \cdot g$$

$$P_{M3} = 0.076[Kg] \cdot 9.8[m/s^2]$$

$$P_{M3} = 0.7448 [N]$$

Calculo P_{M4}

$$P_{M4} = (m_4) \cdot g$$

$$P_{M4} = 0.214[Kg] \cdot 9.8[m/s^2]$$

$$P_{M4} = 2.097 [N]$$

Calculo P_{MP}

$$P_{MP} = (m_p) \cdot g$$

$$P_{MP} = 0.49[Kg] \cdot 9.8[m/s^2]$$

$$P_{MP} = 4.802 [N]$$

Para el análisis de estabilidad se realiza sumatoria de momentos respecto al posible punto de giro que son los apoyos frontales del mecanismo según la figura 2.21, de donde obtenemos:

$$\sum M_O = P_{M1-2} \cdot d1 + P_{M3} \cdot d2 - P_{M4} \cdot d3 - P_{Mp} \cdot d4$$

$$\sum M_O = -0.2[\text{N} \cdot \text{m}]$$

El valor del momento calculado es el que se debe contrarrestar para brindar estabilidad al dispositivo cuando se encuentre ensamblado con el componente de mayor peso.

Para contrarrestar el momento resultante se debe anclar el mecanismo a la mesa de trabajo, en caso de no poder realizarlo se debe colocar un contrapeso en la parte opuesta a la masa ensamblada, para calcular la masa del contrapeso se toma como referencia una distancia de 10[cm] para la colocación del contrapeso.

$$M_o = P_{CP} \cdot d_{CP}$$

En dónde: M_o = Momento respecto al punto O, [N-m].

d_{CP} = Distancia desde el punto O hasta el contrapeso, [m].

P_{CP} = Peso del contrapeso necesario para equilibrar la máquina. [N]

$$m_{CP} = \frac{0.2[\text{N} \cdot \text{m}]}{0.1[\text{m}] \cdot 9.8[\text{m}/\text{s}^2]}$$

$$m_{CP} = 0.204[\text{Kg}]$$

2.2.1.5.1.2. Cargas sobre el cuerpo base

Para el análisis se utiliza del complemento “Simulation” de Inventor, el cual permite efectuar simulaciones estáticas y dinámicas bajo diversas condiciones de carga, obteniéndose resultados rápidos y relativamente aceptables.

El software emplea varios métodos para mejorar la exactitud de las soluciones. En este caso se emplea el método “h”, que consiste en la utilización de elementos más pequeños en regiones con altos niveles de error. Después de ejecutar el estudio y estimar los errores, el software automáticamente refina la malla donde sea necesario para mejorar los resultados. El método “h” adaptivo se aplica bajo el parámetro de un error de no más del 1% en los resultados obtenidos.

La estructura es la encargada de soportar el peso de toda la máquina más el peso del motor que es uno de los componentes principales.

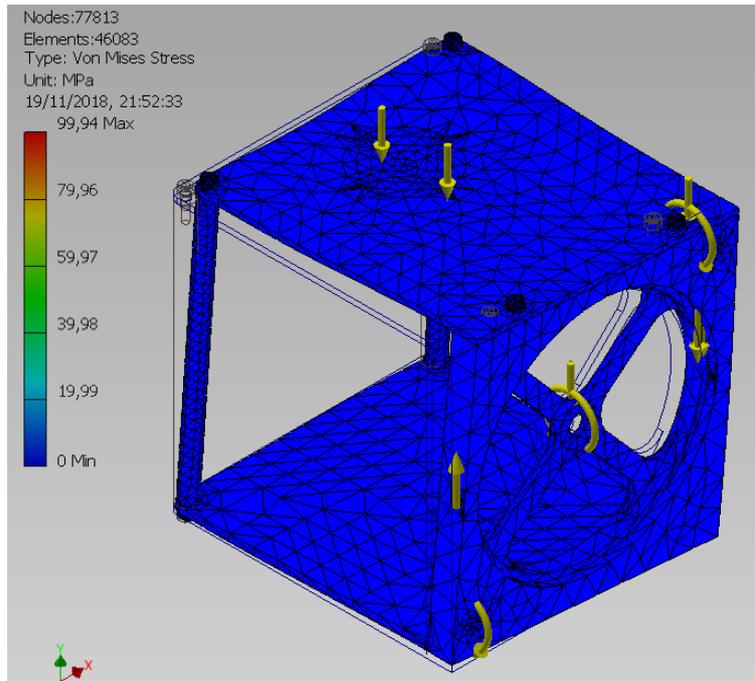


Figura 2.20. Cuerpo base - tensión de Von Mises.
(Fuente: Elaboración propia)

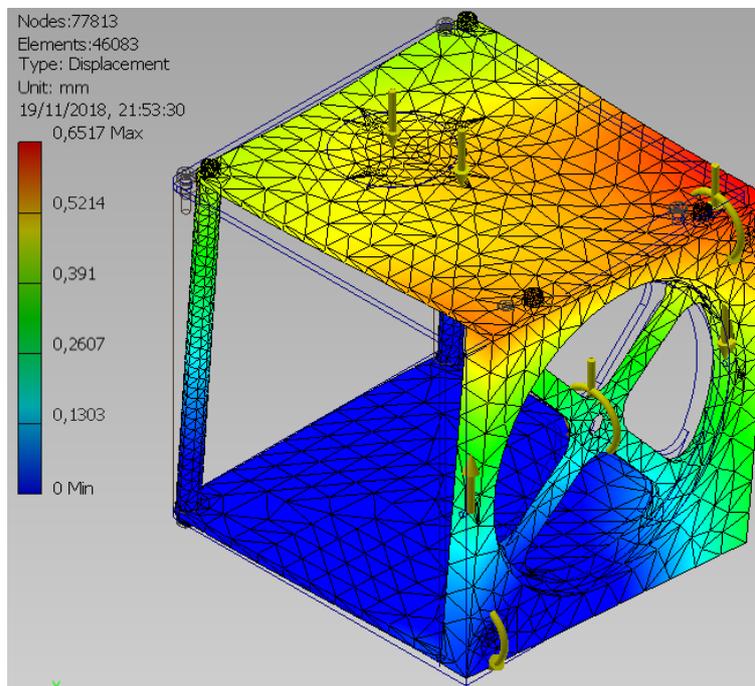


Figura 2.21. Cuerpo base – Desplazamiento.
(Fuente: Elaboración propia)

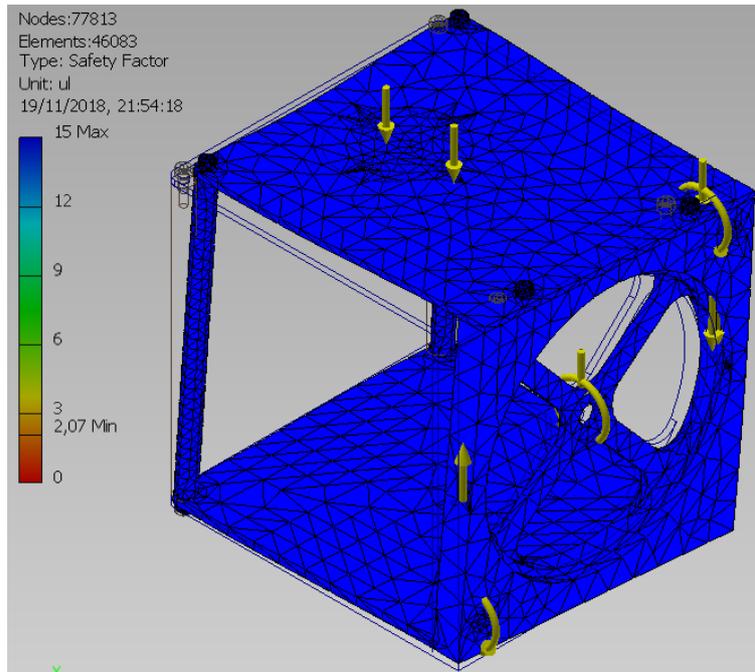


Figura 2.22. Cuerpo base – Factor de seguridad.
(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados del análisis de cargas sobre el cuerpo base se presentan en la siguiente tabla:

Tabla. 2.22. Cuerpo base- Resumen de resultados.

DENOMINACIÓN	MÍNIMA	MÁXIMA
Tensión de Von Mises [Mpa]	0.000	99.940
Primera tensión principal [Mpa]	-28.900	136.300
Tercera tensión principal [Mpa]	-101.400	33.700
Desplazamiento [mm]	0.000	0.652
Coefficiente de seguridad [-]	2.1	15.0

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

Para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante el análisis de elementos finitos se debe verificar la convergencia de los resultados y el porcentaje de desviación que estos presentan.

Para el análisis se prueba distintos valores para el número de pasos hasta obtener una desviación menor al 1%, la respuesta en función de la tensión de Von Mises y del desplazamiento se presenta en la figura 2.24.

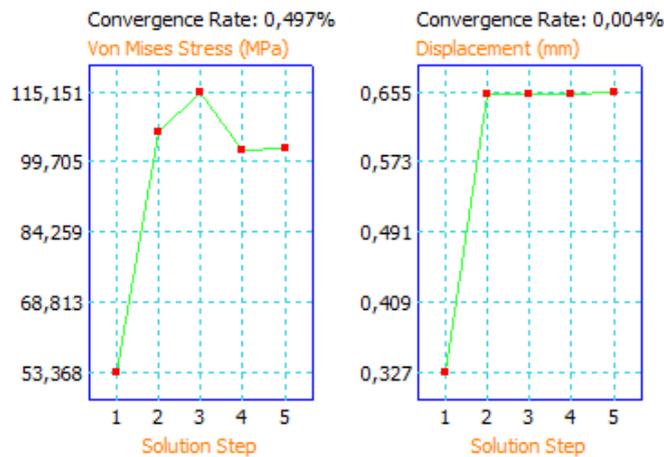


Figura 2.23. Convergencia de la solución en función de la tensión de Von Mises (izquierda) y en función del desplazamiento (derecha).
(Fuente: Elaboración propia)

Se realiza el análisis con 5 pasos con lo cual se obtiene un error mínimo de 0,497% el cual verifica la validez de los resultados presentados en la tabla 2.22.

El cuerpo principal fue diseñado considerando las dimensiones físicas necesarias para ensamblar todos los componentes del mecanismo. El análisis muestra un factor de seguridad mínimo de 2.1 lo que indica que el cuerpo principal puede operar con condiciones mayores a las máximas estimadas para el análisis.

2.2.1.5.2. Sistema motriz de la máquina

El motor es el encargado de transmitir movimiento a todos los componentes del equipo, por lo cual la potencia transmitida debe ser la mayor potencia necesaria para mover todos los componentes ensamblados.

Para la selección del motor se toma como referencia el catálogo en línea de motores de corriente continua de la marca Faulhaber.

2.2.1.5.2.1. Caja Reductora

El motor de corriente continua será seleccionado a partir de los requerimientos de torque en su eje de salida, el cual para una de las prácticas se encontrará conectado con un sistema de engranes planetarios que se encuentra especificado en la sección concerniente al módulo 4.

Cálculo del torque necesario en el eje de salida de la caja reductora

El torque necesario en el eje se calcula mediante la aplicación de la condición de equilibrio rotacional, para ello se muestra el diagrama de cuerpo libre del mecanismo en la figura 2.24, en el cual se presentan las fuerzas que actúan sobre el eje de salida del mecanismo.

$$\sum M_o = 0[\text{N.m}]$$

$$M - T_{P1} - T_{P2} = 0[\text{N.m}]$$

- En dónde: ΣM_o = Sumatoria de momentos respecto al eje del mecanismo, [N.m].
 M = Momento transmitido por el eje de salida, [N.m].
 T_{p1} = Torque producido por el peso de la barra de aluminio, [N.m]
 T_{p2} = Torque producido por el peso del disco para prácticas, [N.m]

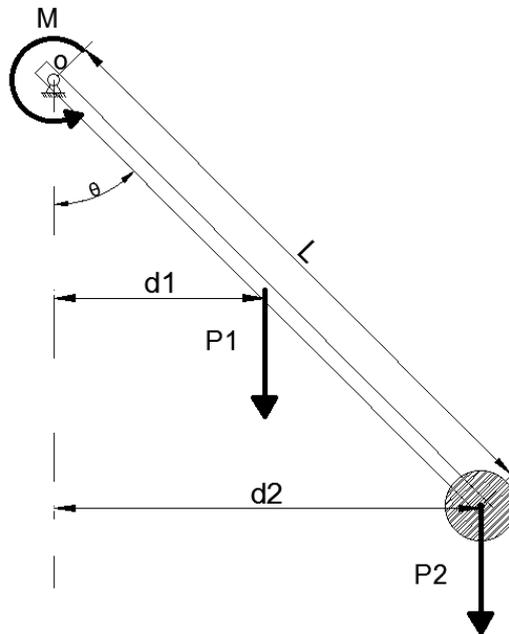


Figura 2.24. Diagrama de cuerpo libre de la barra larga de aluminio.
(Fuente: Elaboración propia)

A partir de la condición de equilibrio rotacional se puede calcular el torque mínimo necesario para que funcione el mecanismo.

$$M = T_{P1} + T_{P2} [\text{N.m}]$$

$$M = d1 \cdot P1 + d2 \cdot P2 [\text{N.m}]$$

$$M = \frac{L}{2} \cdot \text{sen}(\theta) \cdot P1 + L \cdot \text{sen}(\theta) \cdot P2 [\text{N.m}]$$

- En dónde: $d1$ = Distancia desde el eje de salida del mecanismo hasta la línea de acción de fuerza $P1$, [m].
 $P1$ = Peso de la barra de aluminio, [N].
 $d2$ = Distancia desde el eje de salida del mecanismo hasta la línea de acción de fuerza $P2$, [m].
 $P2$ = Peso del disco colocado al extremo de la barra, [N].
 L = Longitud total de la barra de aluminio, [m].
 θ = Ángulo formado por la barra de aluminio con la vertical, [°].

Para calcular el valor del momento mínimo necesario en el eje de salida del mecanismo se toma el máximo valor de la función seno, el cual es igual a 1 cuando el ángulo que forma con la vertical es de 90°. De esta forma la expresión para el cálculo del momento necesario en el eje de salida es:

$$M = \frac{L}{2} \cdot P1 + L \cdot P2 \text{ [N.m]}$$

El momento mínimo requerido en el eje de salida es dependiente del peso de la barra de aluminio, el peso del disco colocado al extremo de la barra y de la longitud de la barra. Se muestra el cálculo del momento para las posibles configuraciones a utilizarse en las prácticas de laboratorio para la barra de aluminio y el disco en el mecanismo.

Tabla. 2.23. Características generales de la serie de cajas reductoras

Barra utilizada	Disco utilizado	Masa de elementos [Kg]		Peso de elementos [N]		Longitud de la barra [m]	Momento requerido [Nm]
		Barra de aluminio	Disco	Barra de aluminio	Disco		
Barra corta de aluminio	Sin disco	0,035	0	0,343	0	0,127	0,022
	Disco metálico	0,035	0,4516	0,343	4,426	0,127	0,584
	Disco plástico	0,035	0,4909	0,343	4,811	0,127	0,633
Barra larga de aluminio	Sin disco	0,1744	0	1,70912	0	0,7493	0,640

El momento máximo calculado para las distintas configuraciones es 0.64 [N.m], el eje de salida del mecanismo debe ser capaz de proporcionar el momento máximo calculado, el eje de salida del mecanismo transmite el movimiento proveniente de la caja reductora del motor mediante un sistema de engranes planetarios.

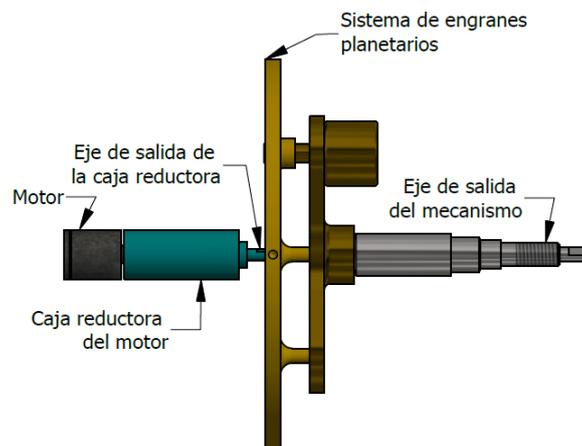


Figura 2.25. Diagrama de cuerpo libre de la barra larga de aluminio.
(Fuente: Elaboración propia)

Para calcular el valor del momento necesario a la salida de la caja reductora se multiplica por la relación de transmisión y por la eficiencia del sistema de transmisión del sistema de engranes planetarios, que se encuentra entre el 60% y el 80% debido al rozamiento de los distintos componentes (Del Castillo, 2002).

Tomando una eficiencia promedio del 70% y la relación de transmisión del sistema de engranes planetarios de 0.25 la cual se encuentra definida en la sección 2.2.1.5.4.5 para el dimensionamiento de los engranes, se reemplazan los valores correspondientes para obtener el valor del torque necesario en la salida de la caja reductora según la siguiente relación.

$$M_m = \frac{M \cdot G}{\eta} \cdot f \text{ [N. m]}$$

En dónde: G = Relación de transmisión respecto al motor, [-].

η = Eficiencia de la transmisión, [-].

f = Factor de sobredimensionamiento, [-].

M_m = Torque de salida necesario en el motor

Una de las funciones principales del mecanismo es contar con la proyección de poder conectarse con otros módulos para el estudio de las teorías de control, por lo cual se asigna un factor de sobredimensionamiento de 2 el cual implica que el motor posee la capacidad de poder trabajar con el doble de la carga de diseño.

$$M_m = \frac{0.627 \cdot 0.25}{0.70} \cdot 2 \text{ [N. m]}$$

$$M_m = 0.448 \text{ [N. m]}$$

La caja reductora debe tener un momento en el eje de salida de al menos 0.448 [N.m].

Preselección de la caja reductora

Tomando el valor de 0.448 [N.m] como momento mínimo necesario para la caja reductora se escoge en el catálogo de Faulhaber una caja reductora de la serie 17/1 que posee un momento de salida de 0.55 [N.m] que es el inmediato superior disponible en comparación con el momento requerido.

Esta serie de cajas reductoras presentan las siguientes características:

Tabla. 2.24. Características generales de la serie de cajas reductoras

PARÁMETRO		VALOR
Torque en operación continua	M_G	550 mN.m
Máxima velocidad de entrada	VM_{in}	8000 RPM

Cálculo de la relación de transmisión

Para el cálculo de la relación de transmisión el catálogo de Faulhaber sugiere el uso de la siguiente relación:

$$i_N = \frac{VM_{in}}{V_{out}}$$

En dónde: i_N = Relación de transmisión calculada, [-].

VM_{in} = Máxima velocidad recomendada en la entrada, [min^{-1}].

V_{out} = Velocidad deseada, [min^{-1}].

En los requerimientos el rango de velocidad deseado va entre 10 y 20 RPM, se toma un valor intermedio de 15 RPM para realizar el cálculo de la relación de transmisión.

$$i_N = \frac{8000 \text{ min}^{-1}}{15 \text{ min}^{-1}}$$
$$i_N = 533.3$$

La relación de transmisión ideal para el mecanismo sería de 533:1

Selección de la caja reductora

De las cajas reductoras disponibles de la serie seleccionada la relación de transmisión más cercana a la calculada es 494:1.

Bajo los parámetros anteriores la caja reductora seleccionada del catálogo de motores de corriente continua Faulhaber es: 17/1 494:1

2.2.1.5.2.2. Selección del motor

El motor de corriente continua se selecciona a partir del requerimiento de torque que presenta la caja reductora, el cual se calcula con la siguiente relación.

$$M_{in} = \frac{M \cdot 100}{i \cdot \eta} \text{ [N.m]}$$

En dónde: M_{in} = Momento requerido en la entrada de la caja reductora, [N.m].

M = Momento requerido a la salida de la caja reductora, [N.m].

i = Relación de transmisión de la caja reductora, [-]

η = Eficiencia de la caja reductora, [%].

El momento requerido corresponde al torque de la carga de diseño que corresponde a 0.448 [N.m], de las especificaciones de la caja reductora se tiene que su eficiencia es del 50%.

$$M_{in} = \frac{0.448 \cdot 100}{494 \cdot 50} \text{ [N.m]}$$

$$M_{in} = 1.81 \text{ [mN.m]}$$

Se dispone de una fuente de alimentación capaz de entregar al mecanismo un voltaje efectivo de 12V.

Bajo estos parámetros se preselecciona del catálogo Faulhaber el motor DC de la serie 1717 T 012 SR que presenta las siguientes características.

Tabla. 2.25. Características generales del motor preseleccionado.

PARÁMETRO		VALOR
Voltaje nominal	U	12 V
Torque en operación continua	M	2.2 mN.m
Torque de parada	M _H	5.38 mN.m
Corriente sin carga	I _o	0.023 A
Velocidad sin carga	n _o	14000 RPM

Para asegurar que el funcionamiento del motor es el óptimo se debe verificar que cumpla con dos condiciones con el fin alargar su vida útil.

$$n \geq \frac{n_o}{2}$$

$$M \leq \frac{M_H}{2}$$

En dónde: M_H = Torque de parada, [N.m].

M = Torque de trabajo del motor, [N.m].

n = Velocidad de trabajo del motor, [min⁻¹]

n_o = Velocidad del motor sin carga, [min⁻¹].

Reemplazando los valores preseleccionados en las condiciones se tiene:

$$8000 \text{ min}^{-1} \geq \frac{14000}{2} \text{ min}^{-1}$$

$$8000 \text{ min}^{-1} \geq 7000 \text{ min}^{-1}$$

$$1.81 \text{ mN.m} \leq \frac{5.38 \text{ mN.m}}{2}$$

$$1.81 \text{ mN.m} \leq 2.69 \text{ mN.m}$$

Al cumplir las dos condiciones se verifica que el funcionamiento del motor es el óptimo bajo las condiciones establecidas de funcionamiento para la combinación del y caja reductora de marca Faulhaber 1717T012S RL + 17/1 494:1

2.2.1.5.3. Sistema de engranes planetarios

2.2.1.5.3.1. Cargas sobre los rodamientos

La carga efectuada en el soporte es la transmitida a través del rodamiento que se conecta con el eje, para lo cual primero se debe realizar el cálculo de las cargas y reacciones en el eje principal.

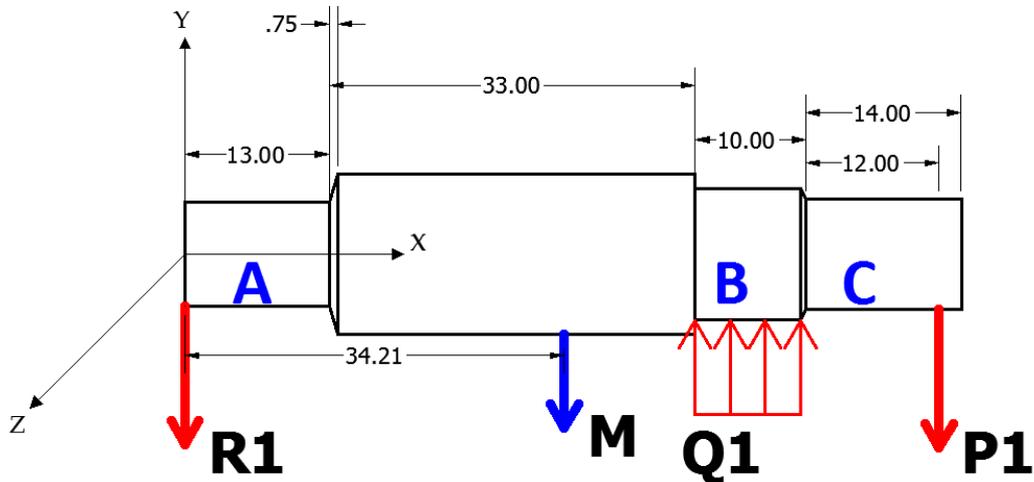


Figura 2.26. Diagrama de cuerpo libre del eje.
(Fuente: Elaboración propia)

Para el cálculo de la reacción vertical del eje en el rodamiento se analiza todos los momentos angulares generados respecto al punto A, considerando que el punto B es el punto medio de la superficie de contacto entre el eje y el rodamiento:

$$\sum M_X = 0 \text{ [N.m]}$$

$$Q_1 = \frac{g(M \cdot d_M + P_1 \cdot d_{P_1})}{d_{q_1} \cdot L_B} \text{ [N.m]}$$

En dónde: g = Gravedad, [m/s²].

M = Masa del eje, [Kg].

P_1 = Masa de los componentes desmontables a movilizar (masa plastica), [Kg].

d_M = Distancia hasta el centro de masa del eje, [m].

d_{P_1} = Distancia hasta el punto de sujeción de los componentes adicionales, [m].

d_{q_1} = Distancia hasta el punto medio de la línea de contacto del rodamiento, [m].

L_B = Longitud de la línea de acción del rodamiento, [Kg].

La magnitud de la carga Q_1 es la reacción que debe soportar el soporte del sistema de engranes planetarios, por lo tanto:

$$Q_1 = \frac{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (0.067 \text{Kg} \cdot 0.034 \text{ m} + 0.49 \text{Kg} \cdot 0.068 \text{m})}{0.051 \text{m} \cdot 0.01 \text{m}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

$$Q_1 = 684.04 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

Aplicado sobre la superficie de contacto en el rodamiento la carga Q_1 produce una fuerza de reacción igual a:

$$Q_{1d} = Q_1 \cdot d$$
$$Q_{1d} = 684.04 \cdot 0.01 [N]$$
$$Q_{1d} = 6.84 [N]$$

2.2.1.5.3.2. Cargas sobre el soporte del sistema de engranes planetarios

El soporte del sistema de engranes planetarios soporta una sola carga en la superficie de contacto con el rodamiento, mientras que las reacciones se presentan en los puntos de apoyo en los cuales se une el soporte con la estructura principal.

La visualización de los resultados se presenta de la siguiente manera:

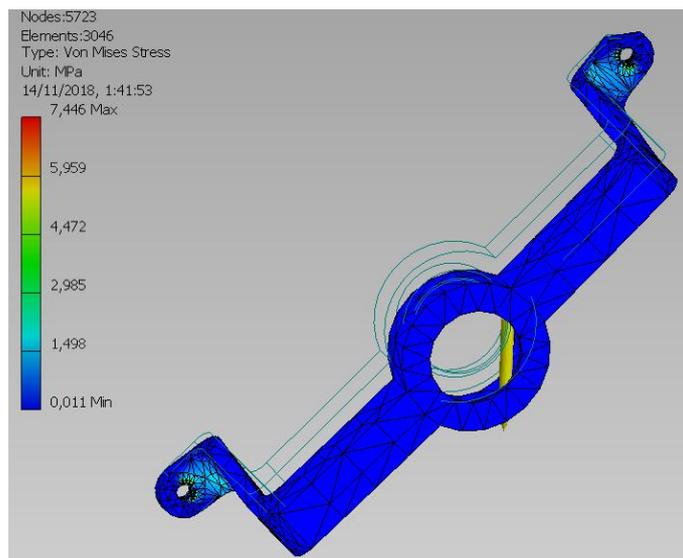


Figura 2.27. Soporte del sistema de engranes planetarios – Tensión de Von Mises.
(Fuente: Elaboración propia)

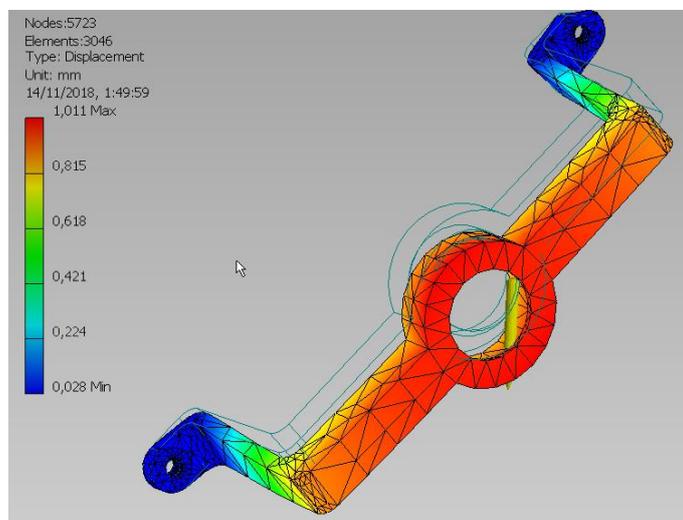


Figura 2.28. Soporte del sistema de engranes planetarios – Desplazamiento.
(Fuente: Elaboración propia)

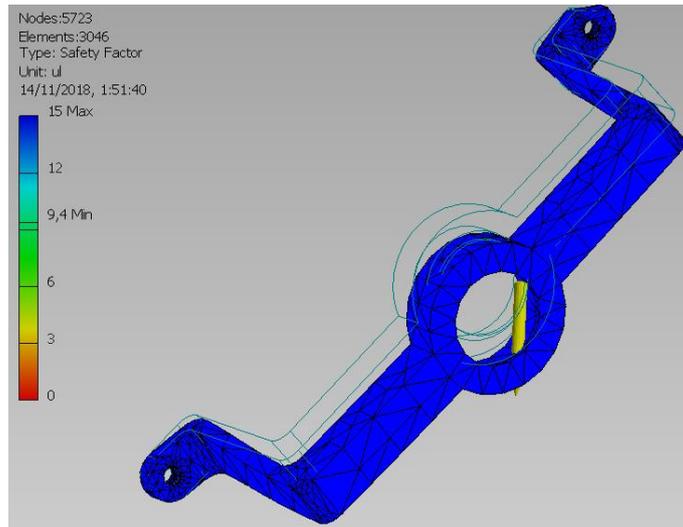


Figura 2.29. Soporte del sistema de engranes planetarios – Factor de seguridad.
(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados del análisis por el método de elementos finitos para el soporte de engranes planetarios se presentan en la siguiente tabla:

Tabla. 2.26. Soporte del sistema de Engranajes planetarios-Resumen de resultados.

DENOMINACIÓN	MÍNIMA	MÁXIMA
Tensión de Von Mises [Mpa]	0.011	7.446
Primera tensión principal [Mpa]	-1.911	9.008
Tercera tensión principal [Mpa]	-8.292	1.611
Desplazamiento [mm]	0.028	1.011
Coefficiente de seguridad [-]	9.4	15.0

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

El tamaño de malla y el número de pasos asignados presentan una respuesta en función de la tensión de von mises y del desplazamiento de manera que el error sea menor al 1%, como se presenta en la figura 2.31.

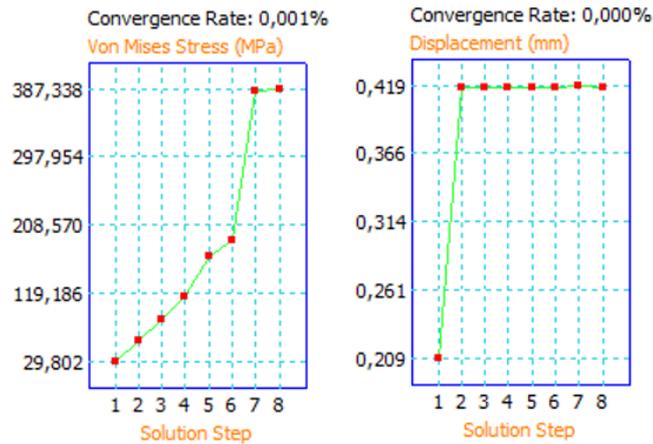


Figura 2.30. Convergencia de la solución en función de la tensión de Von Mises (izquierda) y en función del desplazamiento (derecha).
(Fuente: Elaboración propia)

Al incrementar el número de pasos en el análisis hasta 8 se obtiene el error de 0,001% el cual permite verificar la validez de los resultados presentados en la tabla 2.25.

El soporte para el sistema de engranes planetarios fue diseñado considerando la geometría del mecanismo, al presentar el análisis un factor de seguridad mínimo de 9.4 se verifica la confiabilidad de la pieza, este soporte puede operar con condiciones mayores a las máximas estimadas.

2.2.1.5.3.3. Dimensión de sección del eje de salida

ANÁLISIS ESTÁTICO

Para dimensionar el eje de salida primero se debe realizar el análisis estático de las fuerzas actuantes sobre el eje.

Según la figura 2.21 la carga Q1 es la reacción proporcionada por el soporte de engranes planetarios, la cual se calcula mediante la sumatoria de fuerzas verticales.

$$\sum F_{y-y} = 0 \text{ [N]}$$

$$Q1_d - R1 - M \cdot g - P1 \cdot g = 0 \text{ [N]}$$

$$6.84 \text{ [N]} - R1 - 0.067 \text{ Kg} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} - 0.49 \text{ Kg} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0 \text{ [N]}$$

$$R1 = 1.38 \text{ [N]}$$

Una vez calculados los valores de todas las fuerzas actuantes se realiza el diagrama de esfuerzo cortante y momento flector, que se obtienen mediante el programa MDsolids.

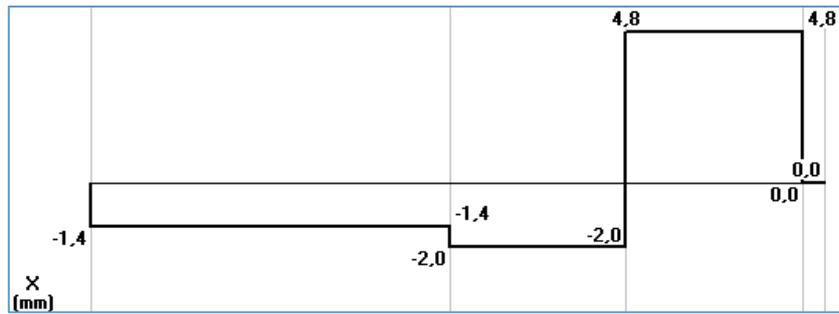


Figura 2.31. Diagrama de esfuerzo cortante para el eje.
(Fuente: Elaboración propia)

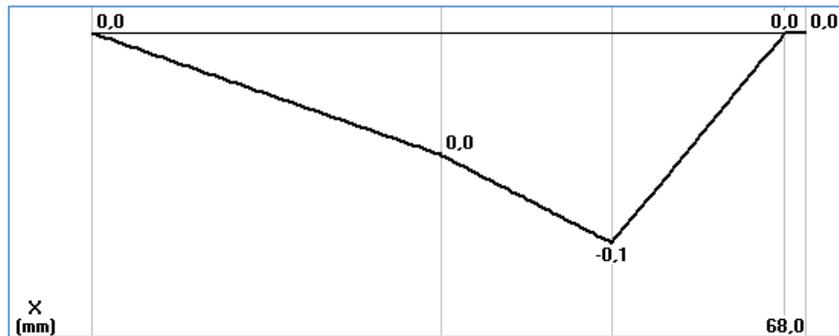


Figura 2.32. Diagrama de momento flector para el eje.
(Fuente: Elaboración propia)

Debido a que el eje no posee fuerzas cortantes ni momentos flectores en otros planos el momento máximo que debe soportar el eje es:

$$M_{max} = 0.0816 \text{ [N.m]}$$

ANÁLISIS DE FATIGA

El material seleccionado para el eje es: acero de transmisión ASTM A36, con las siguientes propiedades mecánicas:

$$S_{ut} = 400 \text{ [Mpa]}$$

$$S_y = 250 \text{ [Mpa]}$$

Para el cálculo del diámetro mínimo del eje mediante análisis estático se utiliza la fórmula que obedece a la energía de distorsión.

$$d = \left\{ \frac{32n}{\pi S_y} \left[M^2 + \frac{3}{4} T^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

- En dónde:
- d = Diámetro mínimo del eje [m].
 - n = Factor de seguridad, [-].
 - S_y = Esfuerzo de fluencia del material, [Pa].
 - M = Momento máximo, [N.m].
 - T = Torque, [N.m].

Reemplazando los valores calculados anteriormente se tiene:

$$d = \left\{ \frac{32n}{\pi(2.5 \cdot 10^8 \text{ Pa})} \left[(0.0816 \text{ N. m})^2 + \frac{3}{4} (2.09 \text{ N. m})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Empleando un factor de seguridad de 2 se obtiene que el diámetro mínimo del eje debe ser:

$$d = 5.25 \text{ [mm]}$$

GEOMETRÍA DEL EJE

La geometría del eje se diseña tomando en cuenta los tipos de apoyo a emplearse a lo largo del eje.

Debe ser capaz de soportar cargas radiales, por lo cual se ha elegido utilizar un rodamiento rígido de bolas.

En el extremo debe permitir el apoyo del soporte de engranes planetarios, por cuestiones de espacio la distancia mínima de separación entre estas dos superficies debe ser de 33mm.

En base a las consideraciones anteriores se establece la geometría del eje según se muestra en la figura:

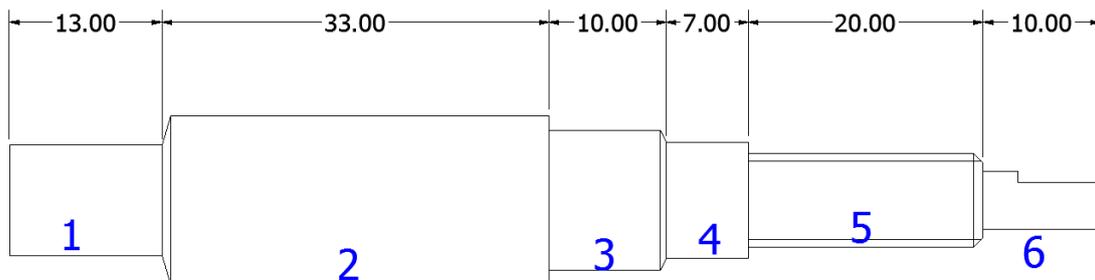


Figura 2.33. Esquema de secciones del eje.
(Fuente: Elaboración propia)

En donde la sección 5 y sección 6 no soportan carga directamente y se encuentran definidas por su funcionalidad, la sección 6 sirve como proyección para conexión con un futuro servomecanismo, mientras que la sección 5 posee una rosca que sirve para asegurar la barra de aluminio para las distintas prácticas.

En la sección 6 del eje se conserva el criterio del diámetro mínimo ya definido de 5.25mm,

Para la sección 5 se define una rosca métrica M8 debido a que el diámetro interior debe ser mayor a 5.25mm, además la parte cercana a la sección 4 está destinada al montaje de la barra de aluminio que presenta un diámetro de 8mm, definido a partir de la rosca M8.

La sección 4 sirve como apoyo posterior para la barra de aluminio por lo cual presenta un diámetro de 10mm ya que debe ser mayor que la sección 5, y como separación entre la barra de aluminio y el rodamiento.

La sección 3 alojará el rodamiento que permitirá el movimiento relativo entre el eje y el soporte de engranes planetarios. Como referencia se toma el catálogo de rodamientos de la marca SKF y se selecciona un rodamiento con diámetro 12mm que presente un diámetro superior a la sección anterior.

Para la sección 2 se toma en cuenta el diámetro de apoyo recomendado por el catálogo SKF que indica para el rodamiento de diámetro interno 12mm un incremento radial de 1.25mm.

La sección 1 se define procurando evitar concentradores de esfuerzos por grandes cambios de sección, se define un diámetro referencial de 9.5mm.

Tabla. 2.27. Definición de secciones del eje.

Secciones del eje	d [mm]
1	9.5
2	14.5
3	12
4	10
5	8

ANÁLISIS DE FATIGA

Considerando la geometría anterior se realiza el análisis dinámico el cual considera los efectos de fatiga; para lo cual se emplea la fórmula de energía de distorsión bajo el criterio de una vida infinita.

(Ecuación 2.1)

$$d = \left\{ \frac{48n}{\pi} \left[\left(\frac{T}{S_y} \right)^2 + \left(\frac{M}{S_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

En dónde: S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica, [Pa].

S_y = Esfuerzo de fluencia del material, [Pa].

M = Momento máximo, [N.m].

n = Factor de seguridad, [-].

T = Torque máximo, [N.m].

Para el cálculo del valor de S_e se debe utilizar la siguiente fórmula:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

En dónde: k_a = Factor de modificación de la condición superficial, [-].

k_b = Factor de modificación del tamaño, [-].

k_c = Factor de modificación de la carga, [-].

k_d = Factor de modificación de la temperatura, [-].

k_e = Factor de confiabilidad, [-].

k_f = Factor de modificación de efectos varios, [-].

S_e' = Límite de resistencia a la fatiga, [N.m].

Calculo S_e'

$$S_e' = 0,5 S_{ut} ; \text{ si } S_{ut} < 1400 \text{ MPa}$$

$$S_e' = 0,5 * 400 = 200$$

Calculo k_a

$$k_a = a S_{ut}^b$$

Eje maquinado o estirado en frio

$$a = 4,51$$

$$b = -0,265$$

$$k_a = 4.51(400)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.92$$

Calculo k_b

$$k_b = 1,25d^{-0,107}; \text{ si } 2,79 < d < 51 \text{ [mm]}$$

Calculo k_c

$$k_c = 0,59 ; \text{ Sometido a torsion}$$

Calculo k_d

$$k_d = 1 ; \text{ Temperatura de trabajo } < 450 \text{ }^\circ\text{C}$$

Calculo k_e

$$k_e = 0,868; \text{ Confiabilidad del 95\%}$$

Calculo k_f

kt, tabla A 15, Shigley 8va edicion

$$k_f = 1 + q(kt - 1)$$

En la siguiente tabla se muestra los valores de los coeficientes y del límite de fluencia corregido para cada sección del eje.

Tabla. 2.28. Eje Principal- Factores de diseño.

Secciones del eje	Se [Mpa]	ka	kb	kc	kd	ke	kf
1	82.9611	0.922	0.982	0.59	1	0.868	1
2	81.3583	0.922	0.938	0.59	1	0.868	1
3	89.7391	0.922	0.958	0.59	1	0.868	1
4	91.5069	0.922	0.977	0.59	1	0.868	1
5	94.4956	0.922	1.00	0.59	1	0.868	1

Fuente: (Elaboración propia)

Finamente reemplazando los valores de S_e en la ecuación 2.1 se obtiene los valores de los factores de seguridad para las distintas secciones del eje, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla. 2.29. Eje Principal-Resumen de resultados.

Secciones del eje	Se [Mpa]	d [mm]	n
1	82.9611	9.5	6.05
2	81.3583	14.5	23.70
3	89.7391	12	13.45
4	91.5069	10	7.78
5	94.4956	8	4.71

El eje definido principalmente por consideraciones geométricas presenta en su sección mínima un factor de seguridad de 4.71 lo que indica que es capaz de trabajar en condiciones superiores a las requeridas.

2.2.1.5.3.4. Cargas sobre el soporte de montaje de los engranes planetarios

El soporte de montaje de los engranes planetarios es el encargado de soportar y transmitir el torque desde los engranes rectos móviles hacia el eje de salida del mecanismo.

En el agujero central se genera un momento como reacción al momento transmitido por el eje principal, mientras que cada uno de los engranes rectos transmiten una fuerza tangente a su trayectoria, estas fuerzas permiten la rotación del sistema. Los elementos que interactúan con el soporte para engranes planetarios se presentan en la siguiente figura:

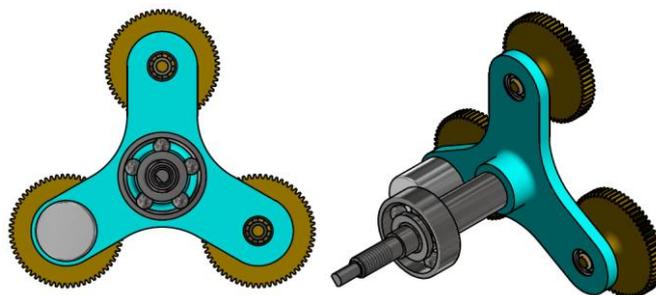


Figura 2.34. Esquema de sistemas de engranes planetarios.
(Fuente: Elaboración propia)

Debido a que el eje se encuentra soportado solo por un rodamiento, este también transmite una componente vertical debido al peso del péndulo. Esta componente también se encuentra representada en el siguiente diagrama de cuerpo libre.

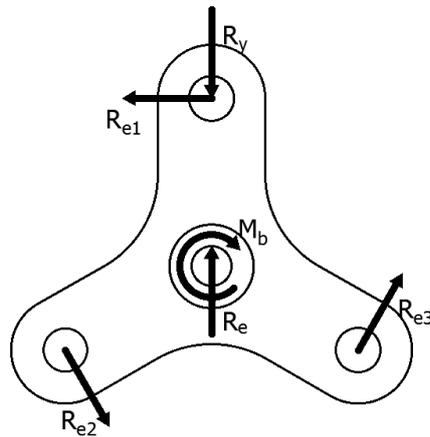


Figura 2.35. Diagrama de fuerzas y momentos actuantes en el soporte de engranes planetarios.
(Fuente: Elaboración propia)

- En dónde:
- R_y = Reacción vertical del engrane 1, [N].
 - R_{e1} = Reacción generada por el engrane 1, [N].
 - R_{e2} = Reacción generada por el engrane 2, [N].
 - R_{e3} = Reacción generada por el engrane 3, [N].
 - R_e = Reacción vertical generada por el eje, [N].
 - M_b = Momento transmitido por el eje, [N.m].

La visualización de los resultados se presenta de la siguiente manera:

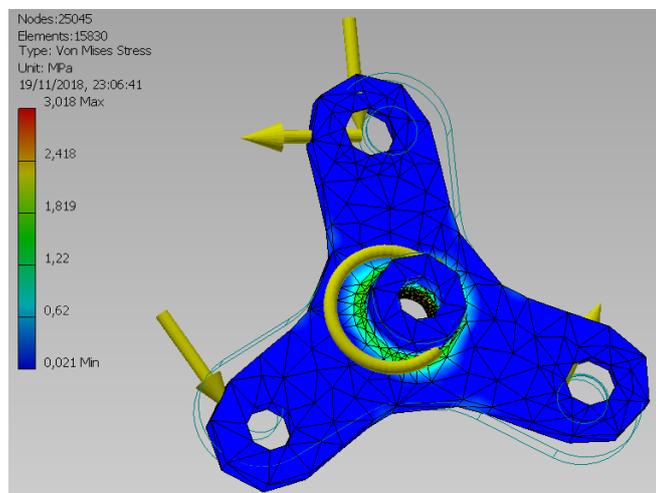


Figura 2.36. Soporte de montaje de los engranes planetarios – Von Mises.
(Fuente: Elaboración propia)

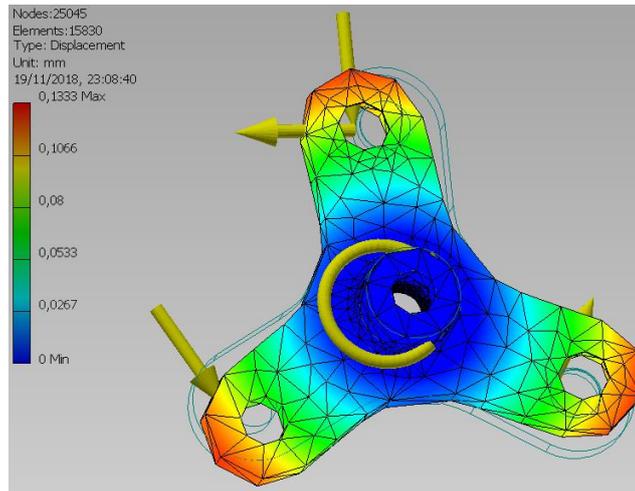


Figura 2.37. Soporte de montaje de los engranes planetarios – Desplazamiento.
(Fuente: Elaboración propia)

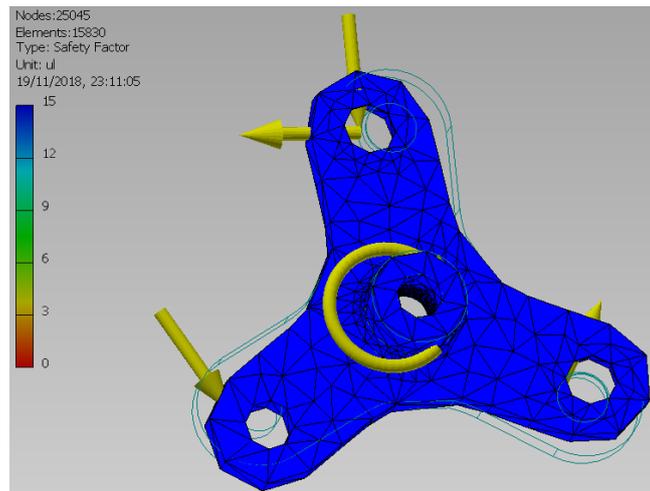


Figura 2.38. Soporte de montaje de los engranes planetarios – Factor de seguridad.
(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados del análisis de cargas sobre el soporte de montaje de los engranes planetarios se presentan en la siguiente tabla:

Tabla. 2.30. Soporte de montaje de los engranajes planetarios – Resumen de resultados.

DENOMINACIÓN	MÍNIMA	MÍNIMA
Tensión de Von Mises [Mpa]	0.021	3.18
Primera tensión principal [Mpa]	-0.062	1.869
Tercera tensión principal [Mpa]	-1.836	0.091
Desplazamiento [mm]	0.0	0.133
Coefficiente de seguridad [-]	15.0	15.0

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

Se asigna un tamaño de malla y número de pasos hasta conseguir una respuesta en función de la tensión de von mises y del desplazamiento con un error menor al 1%, como se presenta en la figura 2.36.

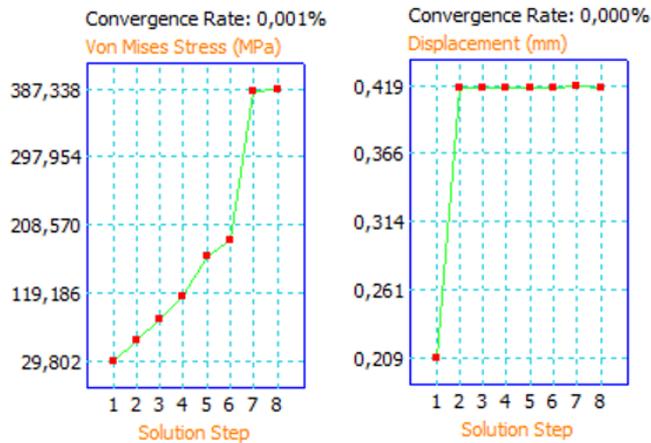


Figura 2.39. Convergencia de la solución en función de la tensión de Von Mises (izquierda) y en función del desplazamiento (derecha).

Al incrementar el número de pasos en el análisis hasta 8 se obtiene el error de 0,001% el cual permite verificar la validez de los resultados presentados en la tabla 2.29.

El soporte para el sistema de engranes planetarios fue diseñado considerando la geometría del mecanismo, al presentar el análisis un factor de seguridad mínimo de 9.4 se verifica la confiabilidad de la pieza, este soporte puede operar con condiciones mayores a las máximas estimadas.

2.2.1.5.3.5. Dimensionamiento de los engranes rectos

Para el dimensionamiento de engranes se debe partir de la relación de velocidad entre el eje de entrada y de salida del movimiento.

El sistema de reducción requerido es mediante engranes planetarios debido a que por tener un mayor número de dientes en contacto permiten una mejor distribución de los esfuerzos. Chasi (2012) indica que para el dimensionamiento del tamaño de los engranes se debe verificar que el número de dientes de los engranes cumplan con la siguiente condición con el fin de evitar interferencia geométrica:

(Ecuación 2.2)

$$n_p = \frac{Z_s}{Z_s + Z_r}$$

En donde: n_p = Relación de transmisión del sistema planetario, [-].

Z_s = Número de dientes del engrane central, [-].

Z_r = Número de dientes de la corona, [-].

Para el cálculo de la relación de transmisión se debe calcular la relación entre el torque que se desea obtener en la salida del sistema de engranes planetarios y el suministrado por el motor.

$$n_p = \frac{M_{out}}{M_{in}}$$

En donde: M_{out} = Torque a la salida del sistema de engranes, [N.m].

M_{in} = Torque suministrado por el motor, [N.m].

Sustituyendo los valores calculados en la sección correspondiente a la definición del módulo 3 se tiene:

$$n_p = \frac{1.792 \text{ N.m}}{0.448 \text{ N.m}}$$

$$n_p = \frac{4}{1}$$

Sustituyendo el valor calculado de la relación de transmisión en la ecuación 2.2, se obtiene la relación entre el número de dientes de la corona y del engrane:

(Ecuación 2.3)

$$Z_r = 3Z_s$$

El espacio máximo disponible en la máquina para el sistema de engranes planetarios es de 150mm, por lo cual se toma como referencia un diámetro primitivo de la corona de 120mm.

Utilizando la relación existente entre el tamaño de los engranes se puede definir el diámetro primitivo del engrane central y de los engranes móviles el cual es de 40mm.

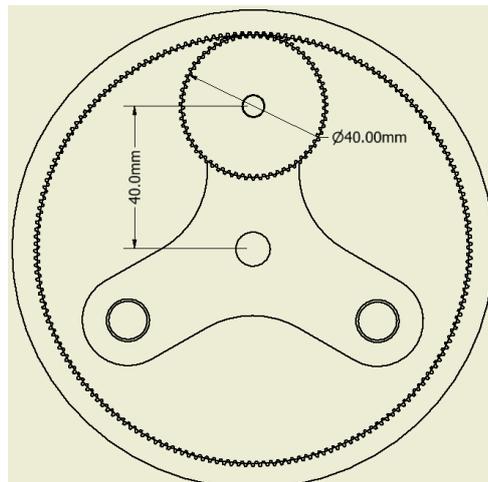


Figura 2.40. Esquema del sistema de engranes planetarios.
(Fuente: Elaboración propia)

El coeficiente de engranaje se calcula como la relación existente entre las velocidades de los engranes en contacto, para la relación entre la Corona y el engrane móvil se establece un coeficiente de 0.33 de acuerdo a la ecuación 2.3.

Para la relación entre el engrane central y los engranes móviles se establece tomando en cuenta que debido al movimiento relativo existente en el engrane móvil se tiene que por cada 4 vueltas que realiza el engrane central los engranes móviles realizan tres vueltas, lo que define un coeficiente de 0.75. En función de lo mencionado se puede establecer la relación de transmisión entre la corona y el engrane móvil de 1:3.

Para el cálculo de paso diametral se toma como referencia un número de dientes igual a 63 y se aplica la relación:

$$d_p = \frac{\text{Número de dientes}}{\text{Diámetro primitivo}}$$

Para la definición de las condiciones de diseño se utiliza las relaciones de transmisión establecidas y se parte de los datos de torque y velocidad angular para el engrane central definidos en la sección de definición del servomotor.

La potencia a transmitir por el sistema de engranes se calcula a partir del torque y la velocidad angular del sistema.

$$P_t = T \cdot \omega$$

En donde: T = Torque, [N.m].

ω = velocidad angular, [N.m].

Aplicando las relaciones mencionadas se obtiene los parámetros de diseño que se encuentran presentados en la siguiente tabla.

Tabla. 2.31. Engranajes planetarios – Datos para diseño.

Denominación		Engrane central	Engrane movil	Corona
Coeficiente de engranaje	i	0.75		0.33
Paso diametral	Pd [dientes/mm]	1.575		
Diámetro primitivo	dp [mm]	40	40	120
Torque	T [N.m]	0.55	0.733	2.2
Velocidad angular	ω [RPM]	16.19	12.14	4.09
Potencia	P [Kw]	0.00163	0.001632	0.00163
Material		Engrane central	Engrane movil	Corona
Material seleccionado		PLA (Ácido poliláctico)		
Resistencia a la tracción	Su [Mpa]	59		
Límite de elasticidad	Sy [Mpa]	79		
Módulo de elasticidad	E [Mpa]	3500		
Coeficiente de Poisson	μ	0.36		
Tensión de plegado admitida	Sat[Mpa]	58		
Tensión de contacto admitida	Sac[Mpa]	68		

Fuente: (Elaboración propia)

Para el diseño de los engranes rectos y de la corona se utilizará el módulo generador de componentes de engranes rectos del programa INVENTOR, el método de cálculo se basa en la Norma ANSI/AGMA 2001-D04:2005, según esta el programa define los siguientes parámetros:

Tabla. 2.32. Engranajes planetarios – Factores de diseño 1.

FACTORES DE CARGA		Engrane central	Engrane móvil	Corona
Factor de sobrecarga	Ko	1.2		
Factor dinámico	Kv	1.008		
Factor de tamaño	Ks	1	1	1
Factor de fiabilidad	Kr	1		
Factor de temperatura	Kt	1		
Factor de distribución de carga	Km	1.155	1.155	1.155
Factor de corrección de plomo	Cmc	1	1	1
Factor de corrección de alineación de malla	Ce	1		
Modificar la proporción de piñón	Cpm	1		
Factor de alineación de malla	Cma	0.15		

Tabla. 2.33. Engranajes planetarios – Factores de diseño 2.

FACTORES DE CONTACTO		Engrane central	Engrane móvil	Corona
Factor de condición de superficie	Cf	1	1	1
Factor de ciclo de tensión	Zn	0.971	0.987	1.05
Factor de coeficiente de dureza	Ch	1	1	1
Factor de geometría	I	0.232		
FACTORES DE CONTACTO		Engrane central	Engrane móvil	Corona
Factor de carga inversa	Ya	1	1	1
Factor de grosor de anillo	Kb	1	1	1
Factor de ciclo de tensión	Yn	0.983	0.993	1.028
Factor de geometría	J	0.699	0.17	0.068

Fuente: (Elaboración propia)

A partir de los factores asignados por el programa se calcula la compatibilidad del sistema junto con los factores de seguridad los cuales se muestran en la tabla:

Tabla. 2.34. Engranajes planetarios – Resultados de compatibilidad.

PARÁMETROS DE DISEÑO		Engrane central	Engrane móvil	Corona
Número de dientes	Z	63	63	189
Diámetro de paso	d [mm]	1.575	1.575	1.575
Anchura de cara	b [mm]	5	5	5
Coefficiente de contacto	ϵ	1.93		
Coefficiente de seguridad contra corrosión	Kf	32.7	20.256	21.541
Coefficiente de seguridad contra rotura de diente	Kn	10.96	5.31	2.20

Fuente: (Elaboración propia)

En base a los coeficientes de seguridad para las condiciones establecidas de diseño se encuentra que el elemento crítico es la corona ya que presenta un coeficiente de seguridad menor que los demás componentes. Los valores obtenidos indican que el mecanismo es capaz de trabajar en condiciones mayores a las establecidas en el diseño.

2.2.2. Diseño mecánico definitivo

El diseño mecánico definitivo se refiere a la solución global del diseño mecánico preliminar, que da respuesta al problema planteado inicialmente, en este se fija las uniones, ensambles y dimensiones reales de todos los elementos del mecanismo.

Este se presenta de forma provisional con los planos de los componentes, y de manera definitiva con la construcción del mecanismo de acuerdo con soluciones planteadas en el diseño preliminar (ANEXOS - PLANOS)

2.3. Diseño del control automático

En el diseño del control automático se fija los rangos de operación del dispositivo, en función de los requerimientos y especificaciones técnicas de la máquina.

El resultado a presentarse por parte del diseño del control automático es el esquema y la puesta en marcha del dispositivo, que permitirá la visualización del funcionamiento del controlador y de los actuadores.

Como parte del diseño del control automático se define los siguientes lineamientos a seguir:

2.3.1. Requerimientos limitadores

Los requerimientos limitadores son restricciones principales del control automático, según las especificaciones del diseño mecánico son:

RL1) Número mínimo de pines en el controlador: 10 pines

RL2) Voltaje de trabajo: 12V

RL3) Intensidad de corriente requerida para el motor: 0.32A

2.3.2. Funciones críticas

Las funciones principales que surgieron a partir del diseño mecánico preliminar son las que se toman como base para el diseño del control automático preliminar:

FC1) Transmitir datos de posición y velocidad del eje de salida

FC2) Transmitir datos en tiempo real desde el controlador hacia el ordenador.

FC3) Controlar posición y velocidad del micromotor.

FC4) Transmisión de datos inalámbrica desde el sensor de posición hacia el controlador.

FC5) Permitir operación segura del mecanismo a prueba de fallos.

FC6) Señalización visible que muestre una correcta operación

2.3.3. Parámetros críticos

Los parámetros críticos definen las condiciones mínimas que debe cumplir el control automático.

PC1) Cantidad de pines del controlador principal

PC2) Cantidad de pines del controlador secundario

PC3) Especificaciones de cada controlador

PC4) Especificaciones de sensores y receptores

PC5) Especificaciones de actuadores y emisores

2.3.4. Condiciones críticas

A partir de los requerimientos y de las funciones críticas nombradas anteriormente se definen las condiciones cuantitativas (CCt) y las condiciones cualitativas (CCI).

CCt1) Los actuadores deben funcionar durante el tiempo de vida previsto sin presentar fallos.

CCt2) El motor debe suministrar el torque de manera efectiva y constante.

CCt3) La fuente de energía debe presentarlos niveles requeridos por los distintos elementos.

CCt4) El mecanismo debe presentar dispositivos de protección contra choques eléctricos con el fin de proteger al controlador.

CCI1) El controlador debe transmitir los datos en tiempo real

CCI2) El dispositivo debe indicar si el sensor de posición se encuentra cerca de sus límites posicionales.

CCI3) La señalización visual debe indicar el correcto funcionamiento

2.3.5. Diseño preliminar del control automático

El sistema de engranes planetarios por el hecho de presentar movimiento relativo respecto al cuerpo base en todos sus elementos presenta dificultad para una conexión directa entre el sensor de posición y el controlador principal, por lo cual el control automático se dividirá en dos partes, una encargada de medir las características del eje de salida del sistema de engranes planetarios mientras la otra se encarga del control del motor y manejo de datos.

2.3.5.1. Elementos de control para el sistema de engranes planetarios

UBICACIÓN DE ELEMENTOS

Para definir el parámetro de la posición angular del eje de salida del sistema de engranes planetarios se utilizará un potenciómetro lineal el cual irá conectado directamente a alguno de los elementos móviles del sistema.

Debido a que no se puede realizar una conexión directa entre el potenciómetro y el controlador principal es necesario utilizar un módulo para transmisión de datos de manera inalámbrica.

Este sistema trabajara de forma independiente respecto al controlador principal por lo cual se debe utilizar un controlador secundario encargado de codificar la señal del potenciómetro para poder transmitirla al controlador principal.

Además requiere se requiere de una fuente de energía independiente que permita el funcionamiento y transmisión de datos de manera continua.

En función de las condiciones anteriores se establece la ubicación de los elementos seleccionados de la siguiente manera:

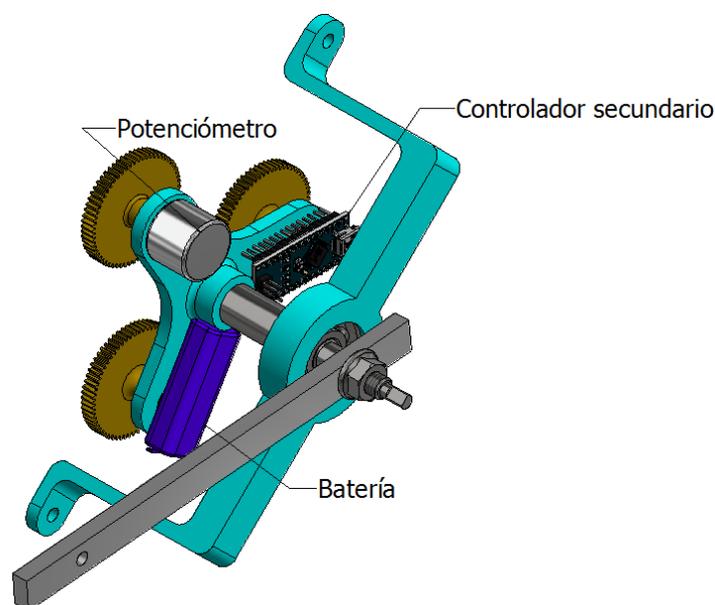


Figura 2.41. Ubicación de elementos electrónicos en el sistema de engranes planetarios.
(Fuente: Elaboración propia)

2.3.5.2. Elementos de control para el sistema motriz

Debido a que el voltaje nominal de alimentación del motor es de 12V es necesario implementar para el control de giro del motor un dispositivo electrónico que permita al controlador principal enviar señales al motor sin necesidad de ser la fuente directa de alimentación.

El controlador principal debe ser capaz de recibir y codificar la señal proveniente del controlador secundario.

El diseño del control automático debe estar enfocado a la interacción del dispositivo con el estudiante. Como primer punto, es necesario asegurar la visualización de las conexiones desde el motor hacia el controlador.

Las conexiones se realizarán externamente mediante conectores tipo banana; en la parte derecha del motor se encontrarán los puntos conectores del motor, en la parte izquierda se encontrarán los conectores correspondientes a entradas y salidas del controlador Arduino, como en la figura.

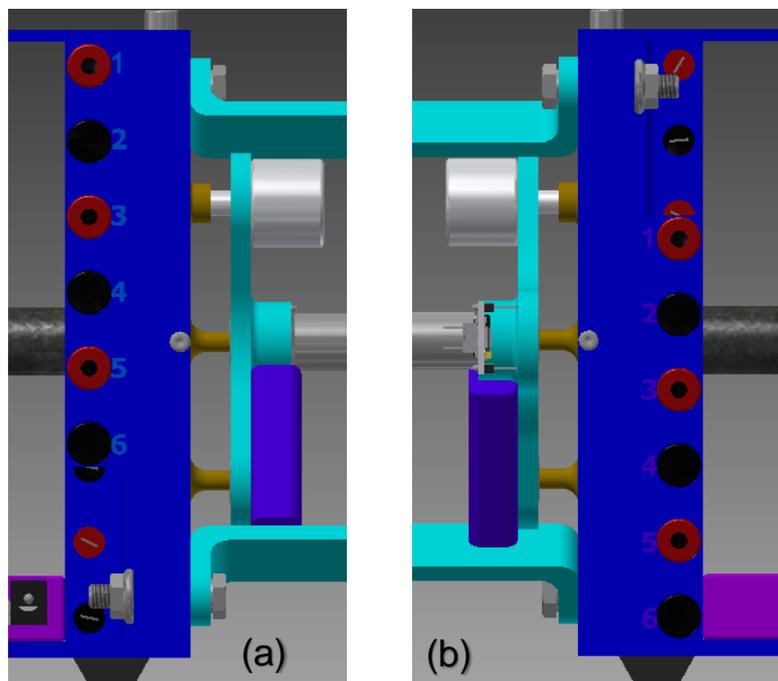


Figura 2.42. Esquema de conectores correspondientes al motor (a) y al controlador (b)
(Fuente: Elaboración propia).

2.3.6. Establecimiento de condiciones críticas

2.3.6.1. Especificaciones del controlador

Debido a la ventaja de poseer software libre se tomará como punto de partida a la gama de microcontroladores ARDUINO.

Para la selección específica de los microcontroladores se toma como condición el número de entradas y salidas que debe poseer el dispositivo como mínimo:

- Entradas digitales: 3
- Entradas analógicas: 1 (En el microcontrolador secundario)
- Salidas digitales: 4

En base a los requerimientos anteriores se elige como controlador principal al dispositivo ARDUINO UNO, y como controlador secundario debido a las dimensiones se utilizará el controlador ARDUINO NANO

2.3.6.2. Especificaciones de los elementos de entrada

Para la definición de los elementos de entrada se muestra la función que debe cumplir cada elemento, y en base a dicha función se selecciona un dispositivo y un modelo específico para la implementación en el dispositivo diseñado.

El controlador principal debe recibir información de velocidad del motor y además debe recibir la información de posición angular de uno de los elementos móviles, una de las principales limitantes es que debido a la disposición de la máquina no es posible el uso de cables para la transmisión de la señal.

2.3.6.2.1. Potenciómetro

Un potenciómetro permite regular la tensión eléctrica, la cual para este caso es necesario que varíe de forma lineal en proporción al ángulo girado por la perilla, el mecanismo debe funcionar por al menos 4 ciclos completos para lo cual se implementará un potenciómetro que cumpla con la condición de linealidad de alta definición el cual permitirá un funcionamiento constante y una lectura con una mayor precisión de la señal de posición.

Los datos del potenciómetro seleccionado son:

- Denominación: Vishay 534-1 103
- Masa del potenciómetro: 35.44 gramos
- Diámetro del eje: 6.34 mm
- Potencia máxima de operación: 2.0 W
- Rango de medida: 3600°
- Precisión: +/- 5%
- Linealidad: +/- 0.25%

2.3.6.2.2. Encoder

El encoder es un tipo de sensor óptico que se puede utilizar para la obtención de la posición angular de un elemento, o de su desplazamiento.

Para realizar la lectura de la velocidad se implementará un encoder incremental que permita la obtención de la lectura de los desplazamientos angulares realizados por el eje del motor en relación con el tiempo en que los realice.

Los datos del encoder seleccionado son:

- Denominación: Faulhaber IE2-1024
- Tensión de funcionamiento: 4.5 – 5.5 [V]
- Corriente de salida: 5 [mA]
- Pulsos por revolución: 1024 PPR
- Máxima velocidad de giro: ~17000 [RPM]

2.3.6.2.3. Receptor de datos inalámbrico

Debido a las limitaciones físicas se utiliza un método de transmisión de manera inalámbrica para la señal proveniente del potenciómetro.

El dispositivo receptor de radiofrecuencia (receptor RF) es un dispositivo con la capacidad de recibir la información contenida en las ondas de radio y se utiliza para la transmisión de datos sin necesidad de generar una conexión directa o de punto a punto como lo es un dispositivo bluetooth.

Los datos del dispositivo receptor de señal RF a utilizarse son:

- Denominación: Módulo RX RF 433MHZ
- Voltaje de operación: 5 [V]
- Consumo: 4 [mA]
- Sensibilidad de receptor: -105 [dB]
- Frecuencia de recepción: 433 [MHz]

2.3.6.3. Especificaciones de los elementos de salida

El controlador principal debe tener la capacidad de manejar todos los actuadores necesarios para el funcionamiento del equipo, para el dispositivo las salidas principales del controlador son las encargadas de accionar y controlar el motor encargado de la movilización de los componentes.

Debido a la limitación para la toma de la señal del potenciómetro se requiere un emisor para la transmisión de la señal hasta el controlador principal.

2.3.6.3.1. Micromotor DC

El micromotor será el encargado de mover todos los elementos del mecanismo, al ser un motor DC este puede cambiar su sentido de giro al cambiar la polaridad de los pines de alimentación.

El motor debe ser capaz de mover todos los componentes y cuando se encuentre cerca del fin de carrera del potenciómetro cambiar el sentido de giro.

Los datos del micromotor a utilizarse son:

- Denominación: Faulhaber DC-Micromotor 1717T_012_SR
- Voltaje nominal: 12 [V]
- Eficiencia máxima: 70%
- Velocidad máxima: 14000 [RPM]
- Torque máximo de parada: 5.38 [mN.m]
- Inercia del rotor: 0.59 [g.cm²]
- Torque máximo en operación continua: 2.1 [mN.m]
- Velocidad con carga máxima: 6570 [RPM]

2.3.6.3.2. Driver L293D

Debido a que el voltaje de operación del micromotor es mayor que el suministrable, y como medida de protección para el controlador principal se implementa el uso del driver L293D que permite el control del sentido de giro de hasta dos motores DC.

Los datos del driver L293D a utilizarse son:

- Máxima voltaje para los motores: 36 [V]
- Máximo voltaje de entrada para la lógica: 7 [V]
- Corriente pico de salida: 2 [A]

2.3.6.3.3. Emisor de datos inalámbrico

El emisor debe tener la capacidad de transmitir la señal requerida en el rango de operación del dispositivo.

El dispositivo emisor de radiofrecuencia (emisor RF) es un dispositivo que permite transmitir una secuencia de datos mediante ondas de radio siempre y cuando estos datos se encuentren previamente codificados.

Las características del módulo a utilizarse son:

- Denominación: Módulo TX RF 433MHZ
- Voltaje de operación: 3.5 – 12 [V]
- Alcance: 20 – 200 [m] (A mayor voltaje mayor potencia de transmisión)
- Potencia de transmisión: 10 [mW] (5 [V])
- Frecuencia de transmisión: 433 [MHz]
- Tasa de transferencia: 4 [KB/s]
- Baud Rate (Recomendado): 2400

2.3.6.4. Entradas del controlador

Las entradas para el controlador son aquellas que provienen de sensores y receptores, para verificar la validez de la preselección se muestran las entradas a utilizarse en el mecanismo.

Tabla. 2.35. Señales de entrada del sistema de control.

ENTRADAS DEL CONTROLADOR PRINCIPAL				
N	Pin N°	Elemento de entrada	Función que cumple	Tipo de señal
1	2	Receptor RF	Recibir datos del controlador secundario	Digital
2	5	Encoder (Canal A)	Enviar datos de velocidad y desplazamiento al controlador	Digital
3	6	Encoder (Canal B)		Digital
ENTRADAS DEL CONTROLADOR SECUNDARIO				
N	Pin N°	Elemento de entrada	Función que cumple	Tipo de señal
1	A1	Potenciómetro	Definir posición del mecanismo	Análogica

Fuente: (Elaboración propia)

2.3.6.5. Salidas del controlador

Las salidas son las que se encargan de poner en funcionamiento el mecanismo y de responder según la programación a las señales receptadas con los elementos de entrada.

Tabla. 2.36. Señales de salida del sistema de control.

SALIDAS DEL CONTROLADOR PRINCIPAL				
N	Pin N°	Elemento de salida	Función que cumple	Tipo de señal
1	2	Receptor RF	Recibir datos del otro controlador	Digital
2	7	L293D	Protección y control de sentido de giro del servomotor	Digital
3	8	L293D		Digital
4	9	L293D		Digital
SALIDAS DEL CONTROLADOR SECUNDARIO				
N	Pin N°	Elemento de salida	Función que cumple	Tipo de señal
1	D3	Emisor RF	enviar datos de posición al controlador principal	Digital

Fuente: (Elaboración propia)

Diseño definitivo del control automático

La asignación de los puertos de conexión se las realizará según la siguiente tabla:

Tabla. 2.37. Asignación de los conectores

Conectores del motor			Conectores del controlador		
Nº	Designación		Nº	Designación	
1	Motor -	12 V	1	Motor -	12 V
2	Motor +		2	Motor +	
3	GND	Tierra	3	GND	Tierra
4	V DD	5 V	4	V DD	Masa
5	Canal A	Encoder	5	Pin 10	Arduino
6	Canal B	Encoder	6	Pin 11	Arduino

Las conexiones para los puertos del motor se lo realiza de la siguiente manera:

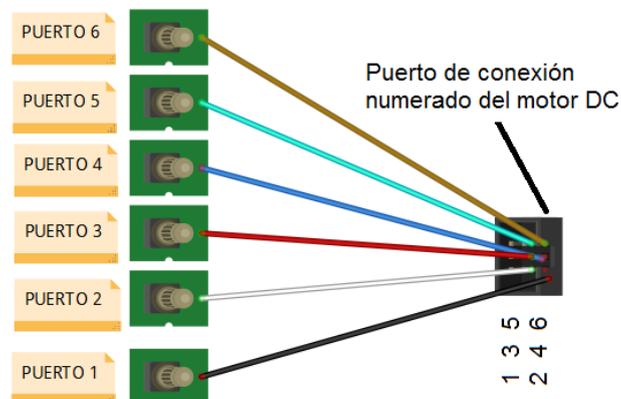


Figura 2.43. Esquema de conexión de los puertos del motor.
(Fuente: Elaboración propia)

Mientras que el esquema de conexión del controlador principal se realizan según la siguiente figura.

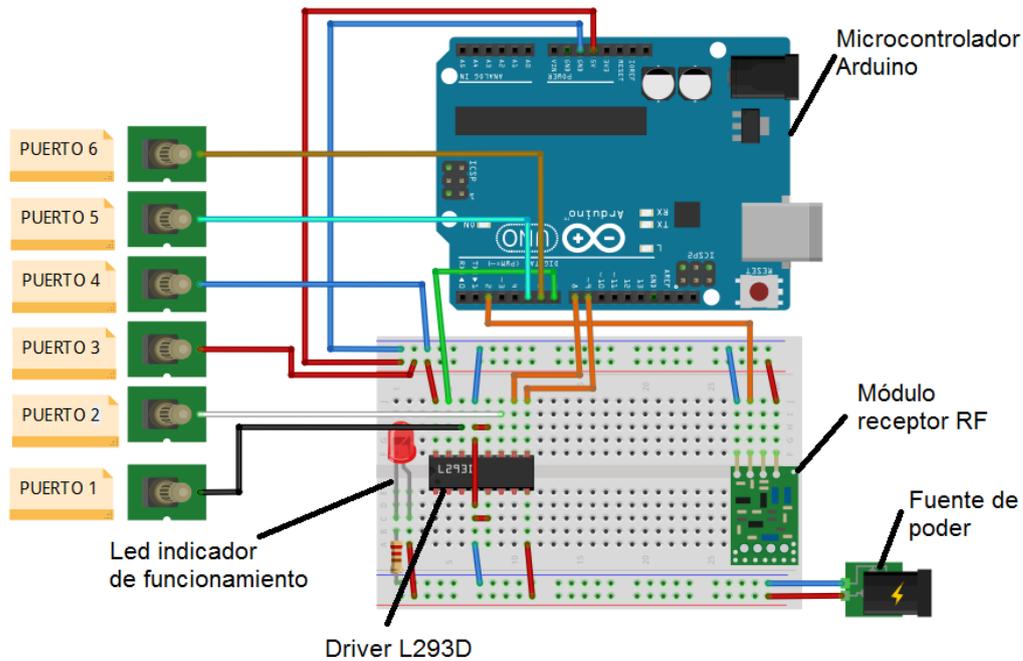


Figura 2.44. Esquema de conexión del controlador principal.
Fuente: Elaboración propia)

Considerando la ubicación física de los elementos para el segundo microcontrolador se define las conexiones entre los distintos elementos según el siguiente esquema.

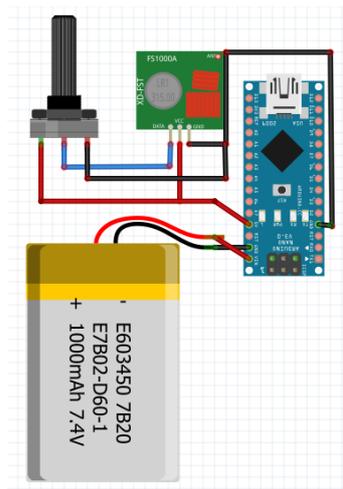


Figura 2.45. Esquema de conexión para el potenciómetro.
(Fuente: Elaboración propia)

La variable perteneciente al potenciómetro se manejará de manera interna ya que esta es transmitida de manera inalámbrica al controlador, para la caracterización de las variables físicas del potenciómetro se debe realizar la conexión directa en los pines ubicados en la parte lateral del potenciómetro.

La ubicación de los componentes del módulo de control se muestra a continuación:

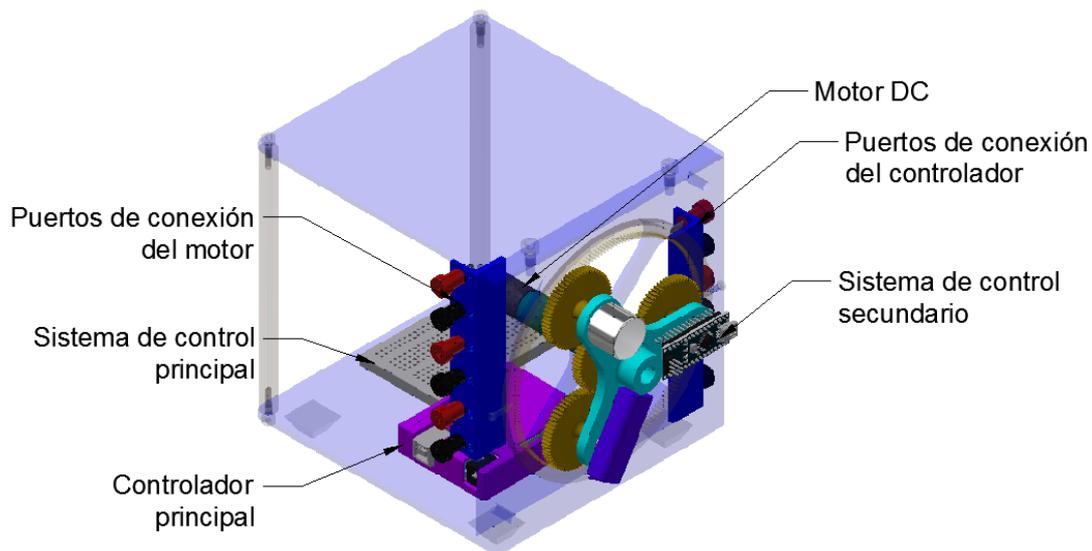


Figura 2.46. Esquema de elementos del sistema de control automático.
(Fuente: Elaboración propia)

2.4. Costos de fabricación

El estudio de costos involucrados para la construcción del mecanismo propuesto se clasifica en cuatro grupos principales que son: materiales y elementos normalizados, elementos electromecánicos, mano de obra y fabricación de componentes 3D; los costos son referenciales y dependientes de los proveedores de materiales y servicios a la fecha de construcción.

2.4.1. Materiales

Tabla. 2.38. Costos de materiales.

Nº	Elemento Electromecánico	Proveedor	Costo unitario (USD)	Cantidad	Costo total (USD)
1	Pata de caucho 19mm x 19mm	Kiwi	0,72	4	2,88
2	Eje de bronce ASTM B455, Ø 3/8in x 150mm	IMPORT COM	8,00	0,35	2,80
3	Perno Allen DIN912 M5 x 12	IMPORT COM	0,23	2	0,46
4	Perno Allen DIN912 M4 x 12	IMPORT COM	0,26	4	1,04
5	Perno Allen DIN912 M4 x 35	IMPORT COM	0,27	2	0,54
6	Tuerca DIN912 M4	IMPORT COM	0,12	2	0,24
7	Tornillo AISI 304 M2 x 5	IMPORT COM	0,3	3	0,90
8	Rodamiento KOYO 604 ZZ	Rulimaster	4,8	2	9,60
9	Rodamiento SKF Bearing 6201RS	Rulimaster	20,4	1	20,4
10	Eje acero A36	IMPORT COM	6	0,25	1,5
11	Aluminio 6061	Tecomecuador	40	1	40
Total					80,36

Fuente: (Elaboración propia)

2.4.2. Mano de obra

Tabla. 2.39. Costos de la mano de obra implicada en la elaboración de partes.

Nº	Elemento Fabricado	Operación	Costo unitario (USD)	Tiempo (Horas)	Costo total (USD)
1	Cortado y roscado barras de bronce	Torneado	10,00	2	20,00
2	Maquinado del eje principal	Torneado	10,00	5	50,00
3	Corte de las barras de aluminio	Oxicorte	15,00	1	15,00
4	Maquinado de las barras de aluminio	Rectificado	15,00	3	45,00
5	Perforado Barras de aluminio	Taladrado	10,00	1	10,00
Total					140,00

Fuente: (Elaboración propia)

2.4.3. Elementos electromecánicos

Tabla. 2.40. Costos de adquisición de elementos electromecánicos.

Nº	Elemento	Proveedor	Costo unitario (USD)	Cantidad	Costo total (USD)
1	Motor DC con caja reductora y encoder 1717T012S RL + 17/1 494:1	Faulhaber	197,20	1	197,20
2	Potenciómetro de precisión Vishay serie 534, 10 vueltas	Nainpa Cia. Ltda	21,80	1	21,80
3	Microcontrolador Arduino Uno	Mgsystem	10,40	1	10,40
4	Microcontrolador Arduino Nano	Mgsystem	12,00	1	12,00
5	Transmisor y receptor Rf 433Mhz	Mgsystem	3,50	1	3,50
6	Batería Lipo 2s 7,4v 300mah	Mgsystem	12,00	1	12,00
7	Conectores	Electrostore	0,60	16	9,60
8	Cables de conexión	Electrostore	1,00	10	10,00
9	Protoboard	Electrostore	8,00	2	16,00
10	Insumos varios	Electrostore	12,00	1	12,00
Total					304,50

Fuente: (Elaboración propia)

2.4.4. Costos indirectos

Los costos indirectos son mencionados pero para la construcción del servomecanismo no son tomados en cuenta.

Tabla. 2.41. Costos indirectos generados.

Nº	Denominación	Costo unitario (USD)	Tiempo (Horas)	Costo total (USD)
1	Diseño mecánico	8,00	60	480,00
2	Diseño del software	8,00	40	320,00
3	Montaje del mecanismo	10,00	4	40,00
4	Transporte	6,00	4	24,00
5	Gastos contables	6,00	1	6,00
Total				870

Fuente: (Elaboración propia)

2.4.5. Elementos impresos en 3D

Los costos de las impresiones en 3D en general son dependientes del tiempo que tarde la impresora en formar el elemento. Para el presente trabajo la impresora utilizada para la fabricación de todos los elementos es la Anycubic i3 Mega, se debe tomar en cuenta que el presente trabajo plantea reproducir el servomecanismo para implementarlo con la asignatura de control automático, por lo que no se toma en cuenta el costo por el tiempo de impresión y solo se toma en cuenta la materia prima utilizada.

Tabla. 2.42. Costos de las partes y elementos impresos en 3D.

Nº	Elemento Fabricado	Material	Masa (g)	Costo por hora (USD)	Tiempo (hh:mm)	Costo del material (USD)
1	Cuerpo Base	PLA	307	3,00	59:43	9,21
2	Tapa superior del mecanismo	PLA	86	3,00	14:52	2,58
3	Soporte del sistema planetario	PLA	62	3,00	7:15	1,86
4	Soporte en Y de los engranes	PLA	22	3,00	3:11	0,66
5	Engrane interior	ABS	16	4,00	5:05	0,48
6	Engrane central	ABS	7	4,00	2:16	0,21
7	Engrane del potenciómetro	ABS	8	4,00	2:21	0,24
8	Engranes de los rodamientos	ABS	7	4,00	2:33	0,21
9	Disco Plástico	PLA	496	3,00	32:28	14,88
10	Caja para Arduino	PLA	31	3,00	3:31	0,93
11	Base para conectores	PLA	24	3,00	2:54	0,72
Total						32,00

Fuente: (Elaboración propia)

2.4.6. Costos totales de fabricación

Los costos totales implicados en la fabricación del mecanismo son la suma de los mencionados anteriormente.

Tabla. 2.43. Costos totales de fabricación del mecanismo.

Nº	Elemento Fabricado	Costo total (USD)
1	Materiales	80,36
2	Elementos electromecánicos	304,50
3	Mano de obra	140,00
4	Elementos impresos en 3D	32,00
5	Costos indirectos	0,00
Total		556,86

2.5. Implementación

Para la implementación del servomecanismo se requiere que sea capaz de cumplir con los requisitos suficientes para la realización de dos prácticas relacionadas con el reconocimiento de servomecanismos.

Para la práctica 1 se cuenta con una interfaz principal que permite acceder a 4 ventanas distintas, cada una permite la medición de un parámetro esencial para la caracterización del motor de corriente continua.

Para la caracterización del motor de corriente continua se estudia el comportamiento de distintos parámetros físicos y eléctricos que determinan la respuesta de un motor en función de su voltaje de entrada. (Faidley, 2009) y (Luecke, 2014).

Para la práctica 2 se cuenta con una interfaz que permite visualizar en tiempo real la posición de un péndulo circular para poder realizar el análisis matemático de su comportamiento. (Luecke, 2014).

2.5.1. Practica 1: Reconocimiento de hardware y software.

OBJETIVOS

- Reconocer las entradas y salidas del servomecanismo.
- Definir la relación entre el desplazamiento real del eje de salida respecto a la rotación del potenciómetro.
- Establecer la función de transferencia del motor de corriente continua.

MARCO TEÓRICO

Un servomecanismo es un tipo de sistema mecánico al cual se le ha implementado un sistema de control en el cual la principal variable a controlar es la posición de la carga respecto a la posición de partida.

Un ejemplo de un servomecanismo es un servomotor, que no es más que un motor de corriente continua al cual se le ha implementado un sistema de control de posición.

Para el análisis dinámico de un motor de corriente continua se deben definir los fenómenos involucrados en su funcionamiento, las ecuaciones que describen el comportamiento eléctrico y mecánico del motor de corriente continua respectivamente son:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + k_e \omega = V$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + Tf + k_T i = T_L$$

Para controlar un servomotor se requiere determinar a partir de las dos ecuaciones anteriores su función de transferencia; la cual debe ser determinada por el estudiante llegando a la siguiente expresión:

$$T(s) = \frac{\theta_o}{V_i} = \frac{\frac{K_T R_2}{R_m R_1}}{s(J_{ef}s + B_{eq})}$$

- En dónde:
- K_T = Constante de torque [N.m/A].
 - R_m = Resistencia de la armadura, [Ω].
 - R_2/R_1 = Relación de transmisión del motor, [Pa].
 - J_{ef} = Inercia efectiva, [N.m].
 - B_{eq} = Coeficiente de amortiguamiento, [N.m].

Cada uno de estos elementos se define de la siguiente manera:

1. **Constante de torque K_T** Permite relacionar valores de intensidad de corriente con la magnitud del par aplicado en el eje de salida.

$$T = k_T \cdot i$$

2. **Resistencia de la armadura R_m** Es la oposición al paso de corriente que presenta el embobinado del motor eléctrico, esta se puede medir con un multímetro

3. **Relación de transmisión del motor R_2/R_1** Es la relación entre las velocidades de rotación del eje de salida y del eje del motor, este valor ya se encuentra determinado y es igual a 1976:1

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1976}{1}$$

4. **Constante de fuerza contra electromotriz k_e** Es aquella que permite relacionar valores de velocidad de giro del eje del motor con la magnitud de la fuerza electromotriz.

$$k_e = \frac{V - i \cdot R_m}{w}$$

5. **Coeficiente de amortiguamiento B_{eq}** Corresponde a la resistencia que presenta el motor al movimiento una vez que se encuentra en estado estable.

$$B_{eq} = \frac{k_t \cdot k_e}{R_m} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$$

6. **Constante mecánica de tiempo t_m** Corresponde al tiempo que tarda el motor en alcanzar el 63.2% del valor de su velocidad de operación.

7. **Inercia efectiva J_{ef}** Es la resistencia que presentan las partes encargadas de transmitir el movimiento rotacional a cambiar su velocidad angular, puede ser calculado mediante la siguiente relación:

$$J_{ef} = \frac{t_m k_T k_e}{R_m} \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$$

EJERCICIO PRÁCTICO

Realizar la caracterización del servomecanismo y encontrar la función de transferencia que describe su comportamiento. Se debe determinar cada uno de los parámetros que influyen en el funcionamiento del motor, para lo cual la interfaz presenta de manera independiente una interfaz optimizada para cada uno de los parámetros necesarios para el modelamiento de la función de transferencia.



Figura 2.47. Interfaz principal de la primera práctica.
(Fuente: Elaboración propia)

1. Resistencia de la armadura R_m

Para obtener el valor de la resistencia de armadura se debe realizar las conexiones del mecanismo con el multímetro como se indica en la Figura 2.47. Una vez realizadas las conexiones se sigue el siguiente procedimiento:

- Verificar que el mecanismo se encuentre desconectado de la fuente de alimentación.

- Posicionar el multímetro en la menor escala de resistencia disponible.
- Registrar el valor obtenido para la resistencia de la armadura.

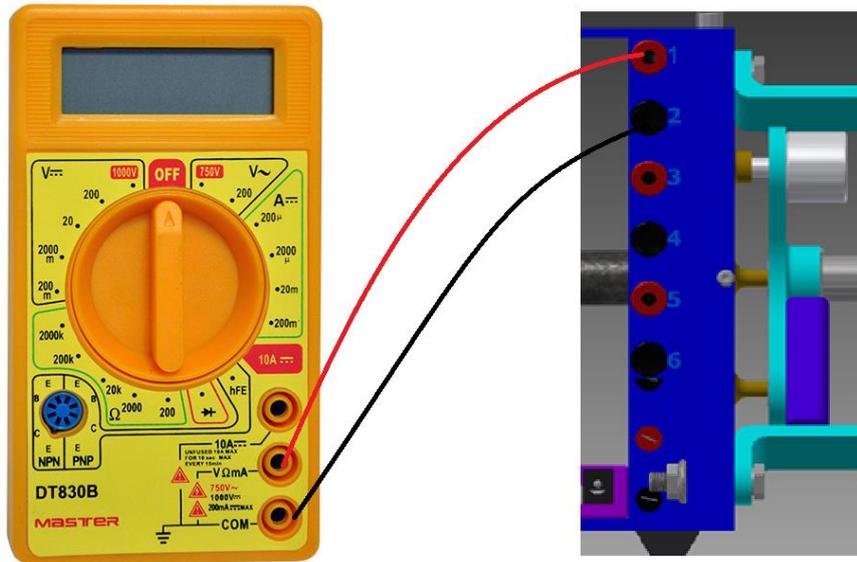


Figura 2.48. Esquema de conexiones para medición de la resistencia de armadura.
(Fuente: Elaboración propia)

Resultado esperado para la resistencia de la armadura

El valor obtenido con el multímetro es: 19.8 [Ω].

2. Constante de torque K_t y torque de fricción T_f

Para realizar la medición de estos parámetros es necesario montar un graduador en el mecanismo como en la figura.

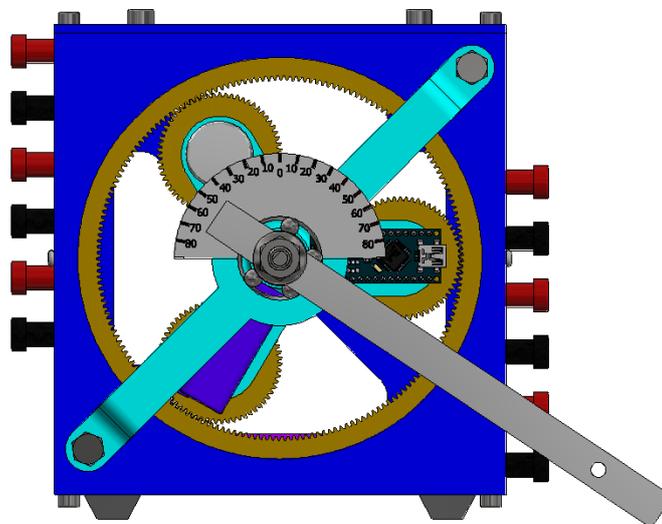


Figura 2.49. Esquema de montaje del graduador y del péndulo.
(Fuente: Elaboración propia)

Para el cálculo de la constante de torque y del torque de fricción se debe realizar el análisis del torque de parada del motor DC en función del voltaje de alimentación según se describe en el siguiente conjunto de actividades.

- Montar el sistema de engranes planetarios en el mecanismo.
- Colocar el graduador en la parte superior del eje de salida.
- Realizar las conexiones según la Figura 2.49.
- Iniciar el software Matlab.
- Conectar el controlador Arduino Uno a la computadora.
- Iniciar la interfaz correspondiente a la práctica 1.
- Seleccionar la opción Practica1_1.
- Conectar el mecanismo a la fuente de alimentación de 12V.
- Montar el péndulo con la barra larga de aluminio y el disco de 490 gramos como se muestra en la figura.

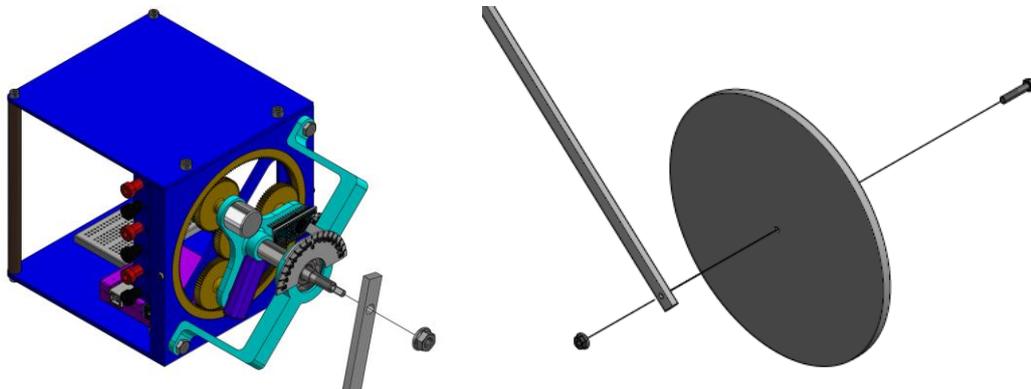


Figura 2.50. Esquema de montaje del péndulo en el servomecanismo.
(Fuente: Elaboración propia)

- Elevar el valor del voltaje hasta que el péndulo se desplace y vuelva a estar estático.
- Anotar los valores de voltaje y del ángulo desplazado.
- Repetir los dos pasos anteriores por lo menos 5 valores distintos de voltaje.
- Desmontar el péndulo y desconectar de la fuente de alimentación.
- Elaborar una matriz en Matlab con los valores obtenidos.
- Para cada conjunto de valores obtenidos se debe aplicar la condición de equilibrio rotación de manera que se determine el torque aplicado en cada una de las mediciones.
- Crear un algoritmo en Matlab que permita calcular mediante la aplicación de una regresión lineal la relación que existe entre el torque proporcionado por el motor y el voltaje suministrado.

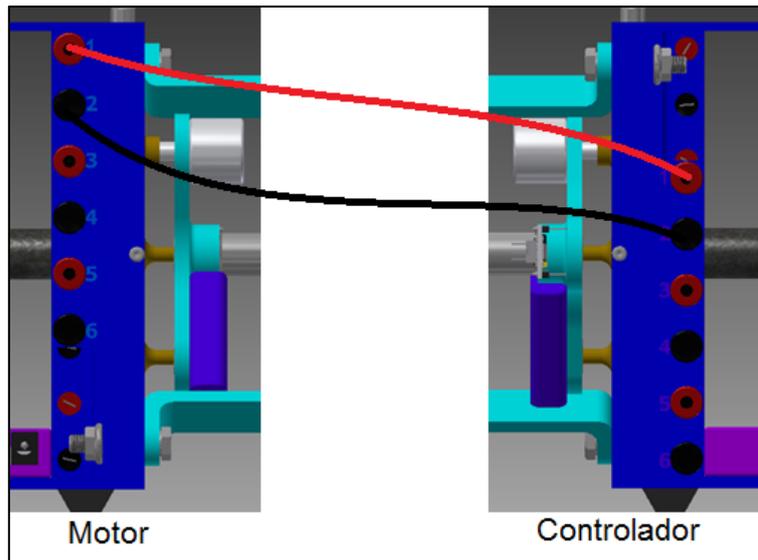


Figura 2.51. Esquema de conexiones a la parte 1 de la primera práctica.
(Fuente: Elaboración propia)

Una vez realizadas las mediciones se debe ingresar los datos tomados, en una matriz en Matlab para obtener una gráfica de torque estático en función del voltaje de alimentación.

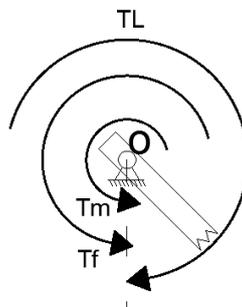


Figura 2.52. Esquema de momentos actuantes sobre el eje de salida.
(Fuente: Elaboración propia)

Tomando como referencia el estado de equilibrio rotacional se establece la siguiente relación tomando en cuenta que la variación de la velocidad respecto al tiempo es igual a cero debido a que el análisis es referente al torque estático.

$$\sum T_O = 0$$

$$T_L - T_m - T_f = 0$$

$$T_L = T_m + T_f$$

En donde: T_L = Torque de la carga
 T_m = Torque del motor
 T_f = Torque de fricción

Aplicando la ley de Ohm en la ecuación 1.8 y multiplicándolo por la relación de transmisión existente entre el eje de salida y el eje del motor se puede establecer la siguiente relación.

$$T_m = \frac{V_i \cdot k_T}{R_m} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

En donde: R_m = Resistencia de la armadura
 k_T = Constante de torque
 T_m = Torque del motor
 V_i = Voltaje de alimentación
 R_2/R_1 = Relación de transmisión del motor

En función de las condiciones anteriores se obtiene la relación entre el torque de la carga y el voltaje.

$$T_L = \frac{R_2 \cdot k_T}{R_1 \cdot R_m} V_i + T_f$$

Comparando esta relación con la conseguida experimentalmente mediante la regresión lineal se pueden establecer dos igualdades que sirven para determinar la constante de torque y el torque de fricción.

$$m = \frac{R_2 \cdot k_T}{R_1 \cdot R_m}$$

$$b = T_f$$

Resultado esperado para la Constante de torque K_t y torque de fricción T_f

Para obtener una mejor aproximación para los parámetros de K_t y T_f se toma una muestra de 7 valores experimentalmente para el análisis.

Tabla. 2.44. Valores de voltaje y posición angular del péndulo.

V [V]	Ángulo [°]
3	12
4	17
5	20
6	23
7	28
8	31
9	34

Para hallar el torque producido por el motor se requiere utilizar las condiciones físicas iniciales del mecanismo y aplicar la condición de equilibrio rotacional para el péndulo.

Tabla. 2.45. Parámetros iniciales para el cálculo del torque.

PARÁMETRO		VALOR
Longitud desde el eje del motor hasta el centro de gravedad de la barra de aluminio	[m]	0,3683
Longitud desde el eje del motor hasta el disco plástico	[m]	0,7493
Masa de la barra de aluminio	[Kg]	0,152
Masa del disco plástico	[Kg]	0,489

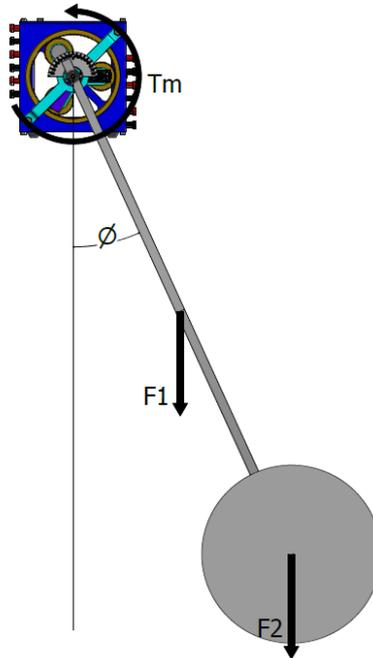


Figura 2.53. Diagrama de fuerzas para cálculo del torque aplicado por el motor.
(Fuente: Elaboración propia)

Para el cálculo del torque se utiliza la siguiente relación con cada uno de los ángulos tomados.

$$T_m = F1 \cdot d1 \cdot \text{sen}(\theta) + F2 \cdot d2 \cdot \text{sen}(\theta)$$

- En donde:
- T_m = Torque aplicado por el motor
 - $F1$ = Peso de la barra de aluminio
 - $F2$ = Peso del disco plástico
 - $d1$ = Distancia desde el eje del motor hasta el centro de gravedad de la barra de aluminio
 - $d2$ = Distancia desde el eje del motor hasta el disco plástico

Se elabora el código de Matlab que presente la ecuación de la recta que se ajuste a la relación de los datos de voltaje y torque. El código de Matlab se presenta en el anexo III.

Se compara los valores de la pendiente y de su ordenada al origen de la ecuación obtenida en Matlab con la Ecuación 2.1.

$$0.24 = \frac{R_2 \cdot k_T}{R_1 \cdot R_m}$$

$$0.2 \text{ [Nm]} = T_f$$

En donde: R_2/R_1 = Relación de transmisión = 1976/1

R_m = Resistencia de armadura = 19.8 [Ω]

De las ecuaciones anteriores se obtiene que la constante de torque es igual a 2.4 [mNm/A] y el torque por fricción es igual a 0.2 [Nm].

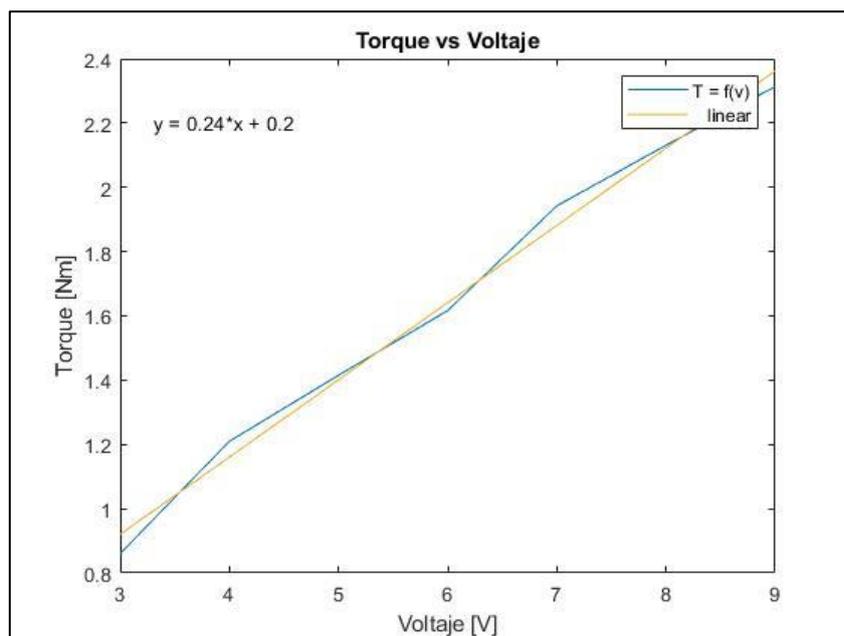


Figura 2.54. Regresión lineal de los datos de torque en función del voltaje.
(Fuente: Elaboración propia)

3. Ganancia del potenciómetro

La ganancia del potenciómetro se refiere a la relación entre la variación del ángulo del péndulo respecto a la variación en la resistividad censada por el controlador. El valor de la variación del potenciómetro se transmite de forma inalámbrica hacia el controlador principal, por lo cual no se necesitan conexiones externas.

Para obtener el valor de la ganancia del potenciómetro se debe encender el módulo controlador colocado en el sistema de engranes planetarios. Una vez encendido el controlador secundario se sigue el siguiente procedimiento:

- Verificar que el mecanismo se encuentre desconectado de la fuente de alimentación.
- Desmontar el engrane central conectado en el eje del motor.
- Montar el sistema de engranes planetarios.
- Colocar el graduador en la parte superior del eje de salida.
- Iniciar el software Matlab.
- Conectar el controlador Arduino Uno a la computadora.
- Iniciar la interfaz correspondiente a la práctica 1.
- Seleccionar la opción Practica1_2.
- Ubicar el péndulo en la posición 0.
- Pulsar el botón de iniciar en la interfaz gráfica.
- Desplazar el péndulo un ángulo determinado por el estudiante.
- Pulsar el botón de parar.
- Variar el valor de la ganancia del potenciómetro hasta que el ángulo mostrado en la pantalla sea el mismo que el desplazado por el estudiante.

Se debe variar el parámetro correspondiente a la ganancia del potenciómetro hasta que el valor del ángulo mostrado en el ordenador sea igual al desplazado por el péndulo

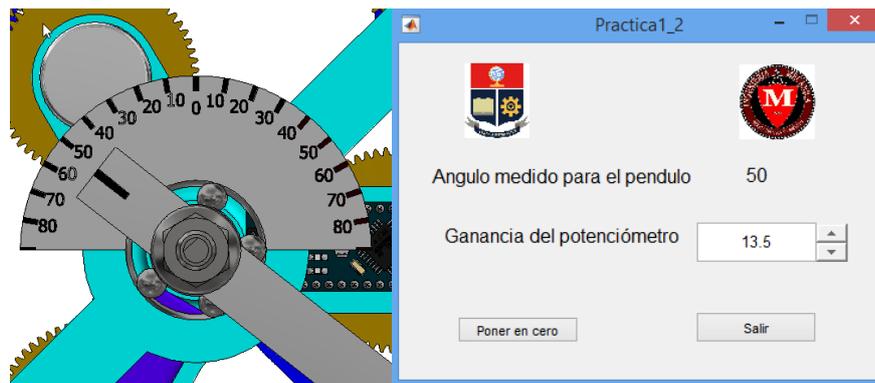


Figura 2.55. Ejemplo de obtención de la ganancia del potenciómetro.
(Fuente: Elaboración propia)

Resultado esperado para la Ganancia del potenciómetro

Se escoge un ángulo de 60° para la determinación de la ganancia del potenciómetro. Con este parámetro el valor obtenido para la ganancia del potenciómetro es: 1.2.

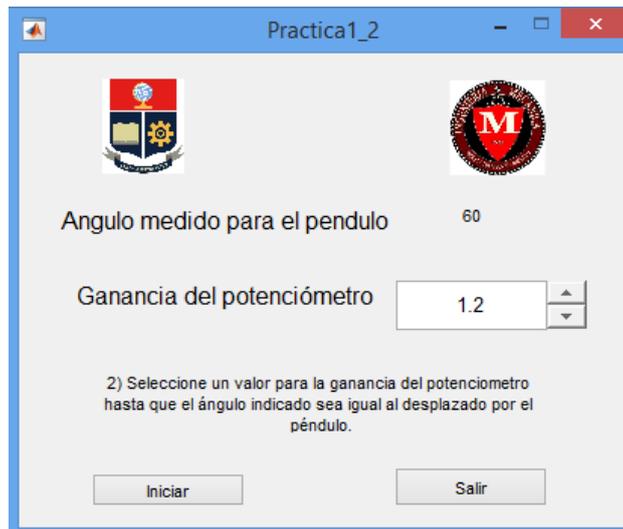


Figura 2.56. Interfaz para la determinación de la ganancia del potenciómetro.
(Fuente: Elaboración propia)

4. Constante de fuerza contra electromotriz K_e

Para la determinación de la fuerza contra electromotriz es necesario obtener para un voltaje determinado condiciones de velocidad de giro e intensidad de corriente que circula por el motor.

Para obtener el valor de la resistencia de armadura se debe realizar las conexiones del mecanismo con el multímetro como se indica en la Figura 2.55. Una vez realizadas las conexiones se sigue el siguiente procedimiento:

- Verificar que el mecanismo se encuentre desconectado de la fuente de alimentación.
- Posicionar el multímetro en la menor escala de intensidad de corriente disponible.
- Montar el sistema de engranes planetarios en el mecanismo.
- Iniciar el software Matlab.
- Conectar el controlador Arduino Uno a la computadora.
- Iniciar la interfaz correspondiente a la práctica 1.
- Seleccionar la opción Practica1_3.
- Conectar el mecanismo a la fuente de alimentación de 12V.
- Seleccionar un voltaje para el inicio de la práctica.
- Anotar los valores de voltaje y de velocidad mostrados en la pantalla.
- Anotar el valor de intensidad de corriente que marca el multímetro.
- Calcular la constante de fuerza contra electromotriz según la ecuación:

$$k_e = \frac{V - i \times R_m}{w}$$

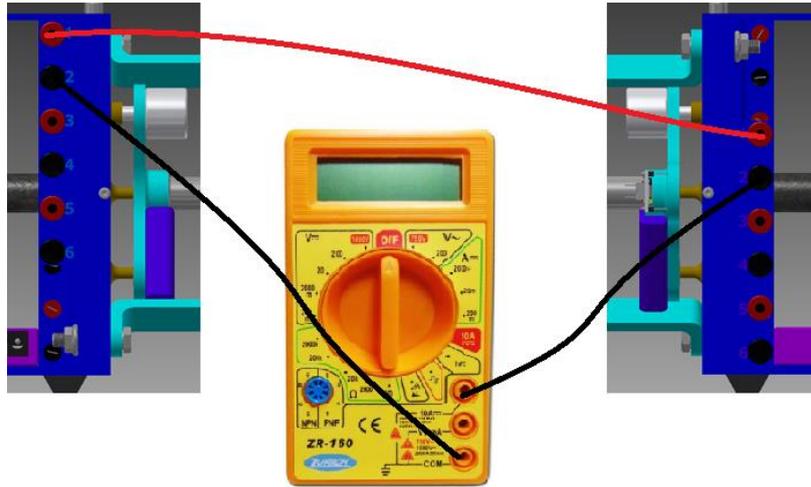


Figura 2.57. Esquema de conexiones para determinación del parámetro K_e .
(Fuente: Elaboración propia)

Resultado esperado para la constante de fuerza contra electromotriz

Se selecciona un voltaje de prueba de 8.4 [V] para el motor, la interfaz permite observar en tiempo real cual es el valor de la velocidad angular en el eje de salida, para el voltaje suministrado es de aproximadamente 3 RPM.

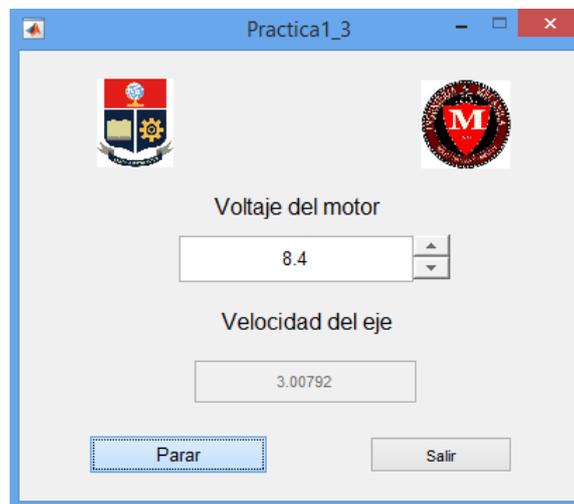


Figura 2.58. Interfaz para la determinación del parámetro K_e .
(Fuente: Elaboración propia)

Bajo estas condiciones la intensidad de corriente medida en el multímetro es de 0.17 [A], con estos datos se aplica la ecuación 1.11.

$$k_e = \frac{V - i \times R_m}{\omega}$$

En donde: ω = Velocidad angular del motor en RPM
 R_m = Resistencia de armadura en [Ω]
 i = Intensidad de corriente en [A]
 V = Voltaje del motor en [V]

La velocidad angular mostrada por el software es la del eje de salida para lo cual se aplica la relación de transmisión para hallar la velocidad angular real del motor, reemplazando los valores se obtiene:

$$k_e = \frac{8.4 - 0.17 \times 19.8}{(3 * 1976/1)}$$

$$k_e = 8.49 \cdot 10^{-4} [V/RPM]$$

El valor obtenido para la constante de fuerza contra electromotriz es de 0.849 [mV/RPM].

5. Inercia efectiva J_{ef} y coeficiente de amortiguamiento B_{eq}

El valor de inercia equivalente para el sistema está relacionado con todos los mecanismos implicados en la transmisión del movimiento desde el motor hasta el eje de salida.

Este parámetro debe determinarse tan solo con los elementos implicados directamente en la transmisión del movimiento, sin cargas externas. Las conexiones entre el motor y el controlador son las mismas indicadas en la figura 2.50. Una vez realizadas las conexiones se sigue el siguiente procedimiento:

- Verificar que el mecanismo se encuentre desconectado de la fuente de alimentación.
- Montar el sistema de engranes planetarios en el mecanismo.
- Iniciar el software Matlab.
- Conectar el controlador Arduino Uno a la computadora.
- Iniciar la interfaz correspondiente a la práctica 1.
- Seleccionar la opción Practica1_4.
- En el cuadro de texto ingresar el valor de voltaje para suministrar un impulso unitario al motor de corriente continua.
- Presionar el botón de iniciar.
- Observar el comportamiento de la velocidad del motor en función del tiempo y presionar el botón de guardar.
- Con los datos guardados realizar un gráfico en Matlab que permita obtener la constante mecánica de tiempo t_m .
- Con el valor de esta constante aplicar las siguientes ecuaciones para hallar el coeficiente de amortiguamiento y la inercia efectiva.

$$Beq = \frac{k_t \cdot k_e}{R_m} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$$

$$Jef = \frac{t_m k_T k_e}{R_m} \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$$

En donde: R_m = Resistencia de la armadura
 k_T = Constante de torque
 k_e = Constante de fuerza contra electromotriz
 t_m = Constante de tiempo mecánica
 R_2/R_1 = Relación de transmisión del motor

Se debe obtener una gráfica que indique el comportamiento de la velocidad en función del tiempo para realizar el cálculo.

La obtención de la constante mecánica de tiempo se realiza a partir de la gráfica de la velocidad en función del tiempo. Se estima el tiempo en que tardó el motor en alcanzar el 63% de su velocidad máxima. El estudiante debe repetir el mismo procedimiento para tres distintos valores en la magnitud de los pasos.

Resultado esperado para Inercia efectiva Jef y coeficiente de amortiguamiento Beq

El coeficiente de amortiguamiento se lo calcula reemplazando los valores obtenidos en los puntos anteriores.

$$Beq = \frac{0.0024 \cdot 8.49 \cdot 10^{-4}}{19.8} \cdot \left(\frac{1976}{1}\right)^2$$

$$Beq = 0.401 \left[\frac{Nm}{min^{-1}} \right]$$

$$Beq = 24.06 \left[\frac{Nm}{s^{-1}} \right]$$

Para la determinación de la constante mecánica de tiempo se escoge una magnitud del impulso de 5[V], se grafica las variables guardadas en un intervalo que permita ver la subida de velocidad del motor.

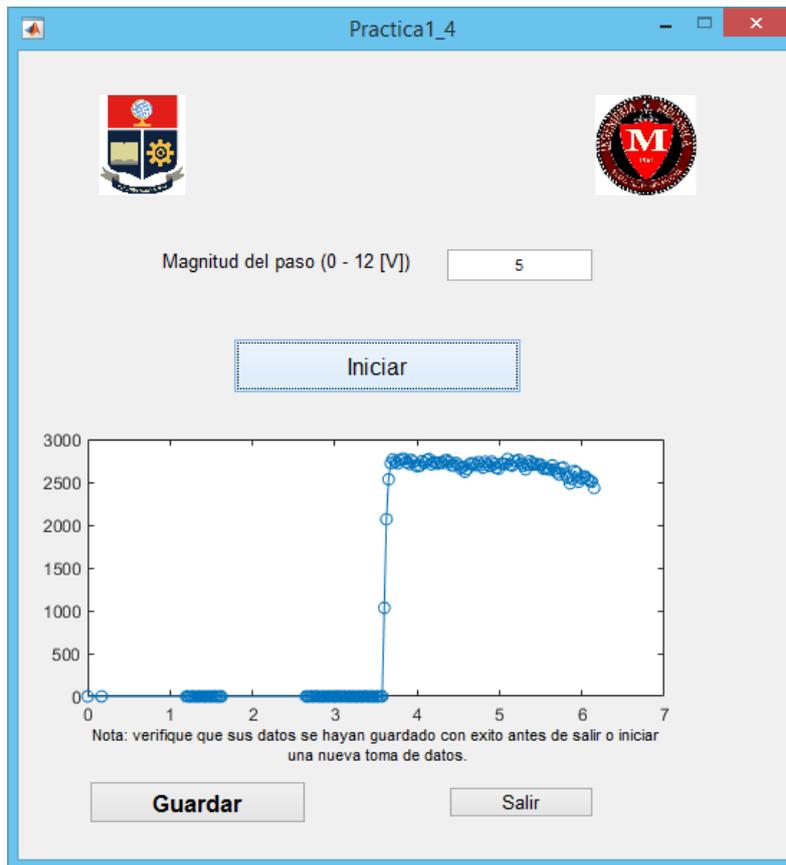


Figura 2.59. Interfaz para la validación del péndulo simple.
(Fuente: Elaboración propia)

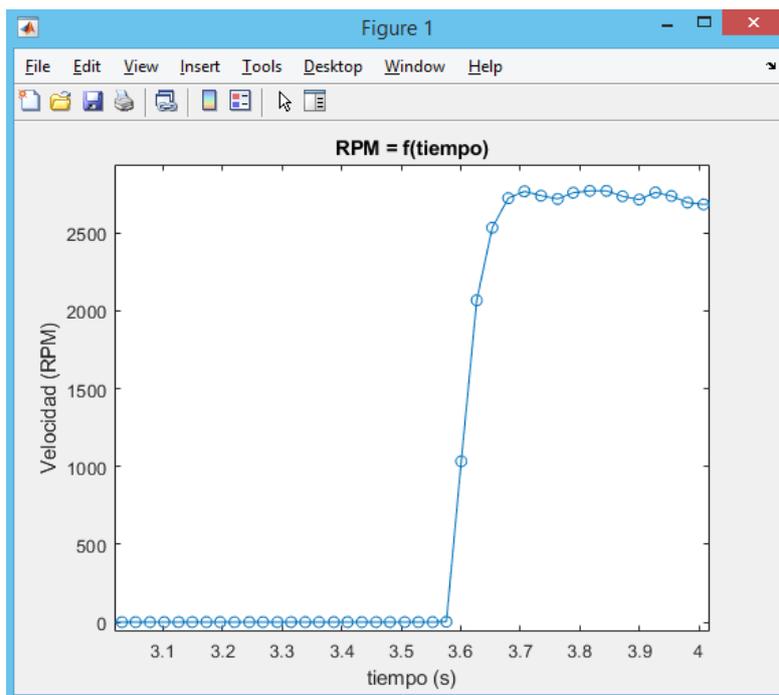


Figura 2.60. Gráfica para determinación de t_m .
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla. 2.46. Puntos importantes para cálculo de tm.

Punto	Tiempo (s)	Velocidad (RPM)
1	3,576	0
2	3,601	1033
3	3,627	2067
4	3,653	2533
Máximo	3,707	2767
63% del máximo	3,618	1743

Se interpola con los datos obtenidos y se obtiene que la constante mecánica de tiempo es igual al 63% del tiempo de subida, de la gráfica se obtiene que el tiempo de subida es igual a 0.042 segundos, por lo que la constante mecánica de tiempo es igual a 0.026 segundos

El coeficiente de amortiguamiento se lo calcula reemplazando los valores obtenidos en los puntos anteriores en la ecuación 1.12.

$$J_{ef} = \frac{0.026 \cdot 0.0024 \cdot 8.49 \cdot 10^{-4}}{19.8} \left(\frac{1976}{1} \right)^2$$

$$J_{ef} = 0.638 \left[\frac{Nm}{s^{-2}} \right]$$

Resultado esperado para la función de transferencia

Reemplazando los resultados obtenidos en el ejercicio práctico en la ecuación mostrada en el marco teórico se tiene:

$$T(s) = \frac{\theta_o}{V_i} = \frac{\frac{K_T R_2}{R_m R_1}}{s(J_{ef}s + B_{eq})}$$

$$T(s) = \frac{\theta_o}{V_i} = \frac{(0.0024)1976}{(19.8)1} \frac{1}{s(0.638s + 24.1)}$$

$$T(s) = \frac{\theta_o}{V_i} = \frac{0.239}{s(0.638s + 24.1)} \left[\frac{rad}{V} \right]$$

2.5.2. Practica 2: Validación del modelo de un péndulo simple.

OBJETIVOS

- Reconocer las características generales del movimiento armónico amortiguado.
- Definir los parámetros y condiciones iniciales para realizar el análisis matemático del péndulo simple.
- Comparar la respuesta analítica con la real para el modelo del péndulo simple amortiguado.

MARCO TEÓRICO

Para el análisis del modelo dinámico se utiliza la siguiente ecuación para modelar un comportamiento lineal.

$$\theta(t) = A \cdot \cos(\omega_N t)$$

En donde: $\theta(t)$ = Posición angular en función del tiempo [Grados]

A = Amplitud de onda [Grados]

ω_N = Frecuencia natural [s^{-1}]

t = Tiempo [s]

Beq = Coeficiente de amortiguamiento [$\frac{Nm}{min^{-1}}$]

Para un comportamiento no lineal se utiliza la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + Beq \frac{d\theta}{dt} + \omega_N^2 \theta = 0$$

El valor de la frecuencia natural se encuentra relacionado con las dimensiones físicas y la masa del péndulo. Dourmashkin (2014) plantea la siguiente relación para el cálculo de la frecuencia natural del péndulo simple compuesto por una barra y una masa puntual en su extremo.

$$\omega_N = \sqrt{\frac{(m_{Disco} l_{Disco} + m_{barra} l_{CGbarra}) \cdot g}{(J_{Disco} + J_{Barra})}}$$

En donde: m_{Disco} = Masa del disco [Kg]

l_{Disco} = Longitud del eje hasta el eje del disco [m]

m_{barra} = Masa de la barra [Kg]

$l_{CGbarra}$ = Longitud del eje hasta el centro de gravedad de la barra [m]

J_{Disco} = Inercia rotacional del disco [$Kg \cdot m^2$]

J_{Barra} = Inercia rotacional de la barra [$Kg \cdot m^2$]

g = Gravedad [m/s^2]

Dourmashkin (2014) también presenta la relación desarrollada para el cálculo de la frecuencia natural, en función de sus variables físicas de masa y longitud de las distintas partes del péndulo.

$$\omega_N = \sqrt{\frac{(m_{Disco}l_{Disco} + m_{barra}l_{CGbarra}) \cdot g}{\left[m_{barra} \left(\frac{1}{12} (l_{barra})^2 + (l_{CGbarra})^2 \right) + m_{Disco} \left((l_{Disco})^2 + \frac{1}{2} (R_{Disco})^2 \right) \right]}}$$

En donde: R_{Disco} = Radio del disco [m]
 l_{barra} = Longitud total de la barra [m]

Para el caso en el que no se coloca el disco plástico se anulan los términos relacionados con su masa. El análisis para hallar el valor de la frecuencia natural se realiza con las siguientes condiciones físicas iniciales del péndulo.

Tabla. 2.47. Parámetros iniciales para el cálculo de la frecuencia natural.

PARÁMETRO		VARIABLE	VALOR
Longitud del eje hasta el eje del disco	[m]	l_{Disco}	0.74
Longitud del eje hasta el centro de gravedad de la barra	[m]	$l_{CGbarra}$	0.36
Longitud total de la barra	[m]	l_{barra}	0.78
Masa de la barra de aluminio	[Kg]	m_{Disco}	0.152
Gravedad	[m/s ²]	g	9.81

EJERCICIO PRÁCTICO

Una vez establecida la conexión serial entre el controlador del servomecanismo y el ordenador la aplicación del software correspondiente a la práctica 2 toma mediciones de posición provenientes del potenciómetro. No se requieren conexiones externas ya que la transmisión de los datos provenientes del potenciómetro hacia el controlador principal es inalámbrica.

Para verificar la validez del modelo dinámico del péndulo simple se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Verificar que el mecanismo se encuentre desconectado de la fuente de alimentación.
- Desmontar el engrane central conectado en el eje del motor.
- Montar el sistema de engranes planetarios en el mecanismo.
- Colocar el graduador en la parte superior del eje de salida.

- Iniciar el software Matlab.
- Conectar el controlador Arduino Uno a la computadora.
- Iniciar la interfaz correspondiente a la práctica 2.
- Colocar el péndulo en el eje de salida.
- Ingresar el ángulo inicial para el análisis.
- Ingresar en el cuadro de texto de la interfaz de Matlab el tiempo que se requiere registrar las posiciones del péndulo para realizar en el análisis.
- Ingresar la ganancia del potenciómetro obtenida anteriormente.
- Ubicar el péndulo en una posición inicial seleccionada.
- Pulsar el botón de iniciar en la interfaz gráfica para comenzar el registro de datos de la posición del pendulo.
- Guardar los resultados.
- Desarrollar un programa en Matlab que permita comparar los valores reales obtenidos experimentalmente con los teóricos.

El estudiante debe realizar un programa para el cálculo de la respuesta del modelo matemático del péndulo simple y compararlo con los valores tomados experimentalmente.

El estudiante debe repetir el mismo procedimiento y análisis para cuatros distintas disposiciones para el péndulo:

- Barra de aluminio larga sin pesa al extremo
- Barra de aluminio larga con pesa al extremo.
- Barra de aluminio corta sin pesa al extremo.
- Barra de aluminio corta con pesa al extremo

Resultado esperado para el modelo dinámico del péndulo simple

Se escoge un ángulo de 45° y un tiempo de 10 segundos para el análisis del modelo dinámico del péndulo simple, la ganancia del potenciómetro obtenida en la práctica 1 es de 1.2.

Para verificar el funcionamiento del mecanismo se muestra la respuesta que presenta cuando se coloca la barra larga sin el disco plástico, el estudiante debe realizar el procedimiento para cada una de las disposiciones mencionadas. La respuesta obtenida es la mostrada en la figura 3.9:

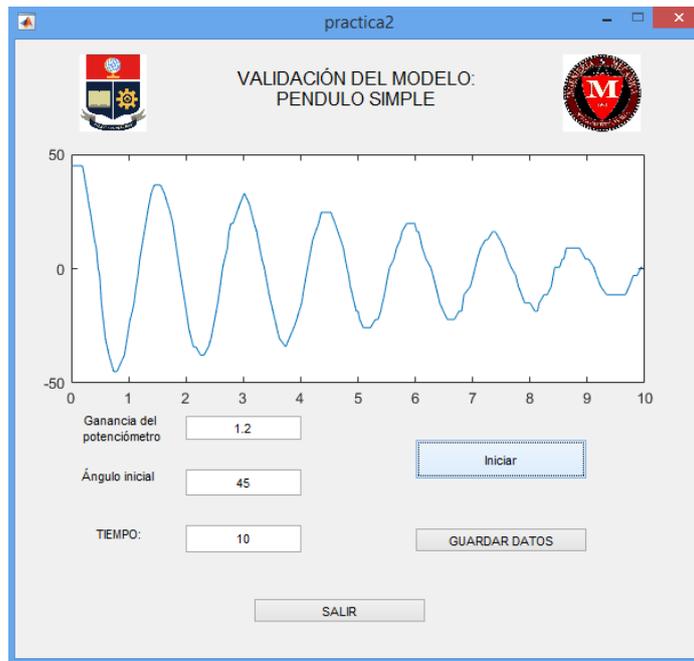


Figura 2.61. Interfaz para la validación del péndulo simple.
(Fuente: Elaboración propia)

Se elabora el código de Matlab que permita apreciar la diferencia entre la respuesta experimental y analítica del péndulo simple. El código de Matlab se presenta en el anexo IV.

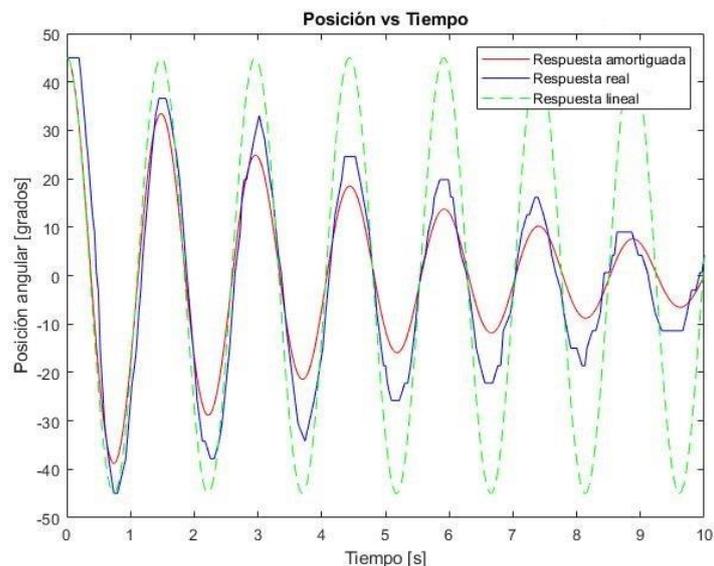


Figura 2.62. Interfaz para la determinación del parámetro t_m .
(Fuente: Elaboración propia)

El servomecanismo permite la lectura de la posición en tiempo real del eje de salida en el cual se encuentra colocado el péndulo. Mediante una conexión serial entre el mecanismo y Matlab se puede apreciar las similitudes y diferencias para la respuesta dinámica del péndulo simple para el análisis matemático en comparación con el real.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Construcción del mecanismo

Como resultado del diseño mecánico conceptual se tiene el mecanismo construido con polímero PLA en su cuerpo principal, con polímero ABS las partes que pueden presentar desgaste debido a fricción y con acero A36 y bronce las partes que requieren soportar elevados esfuerzos de tracción y flexión.

Para las prácticas se cuenta con dos barras de aluminio Serie 1000 de distintas longitudes y con una masa plástica de polímero PLA.

Como resultado del diseño del control automático se implementa dos módulos controladores. El controlador principal es un Arduino Uno y como controlador secundario un Arduino Nano.

Para la operación del sistema eléctrico y electrónico se cuenta con un motor DC, un potenciómetro lineal de precisión, un módulo emisor y un módulo receptor de radiofrecuencia y una batería de 7.4 V.

El mecanismo una vez ensamblado posee conectores laterales tipo banana para la realización de las distintas prácticas. El servomecanismo para la enseñanza de teorías de control se presenta en la Figura 3.1.

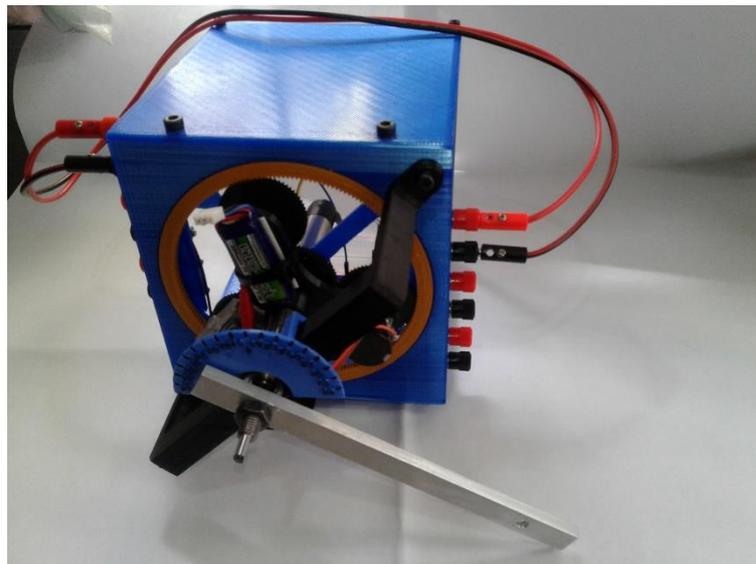


Figura 3.1. Servomecanismo para la enseñanza de teorías de control.
(Fuente: Elaboración propia)

Debido a su estructura modular el mecanismo puede separarse en sus distintos módulos de ser necesario, como se presenta en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Partes del servomecanismo para la enseñanza de teorías de control.
(Fuente: Elaboración propia)

3.1.2. Presupuesto total

El presupuesto para la construcción servomecanismo para la enseñanza de teorías de control mecanismo una vez ensamblado es de 556.21 USD según la Tabla 2.42.

3.1.3. Resultados de la Implementación

Como Como resultado de la implementación del servomecanismo se tiene las distintas interfaces en Matlab que se encuentran enfocadas cada una específicamente en la caracterización del motor y desarrollo de las prácticas.

Para la práctica 1 se cuenta con una interfaz principal que permiten la medición de los parámetros de un motor de corriente continua.



Figura 3.3. Interfaz principal de la primera práctica.
(Fuente: Elaboración propia)

Para la práctica 2 se desarrolló la interfaz de manera que permite la obtención de la posición del péndulo en tiempo real.

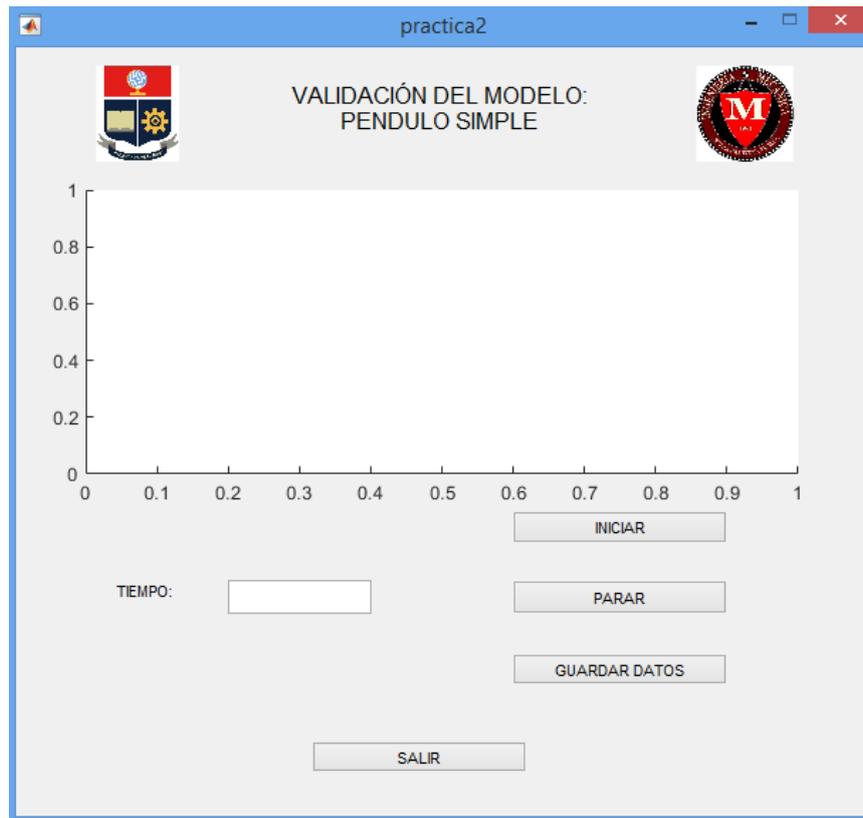


Figura 3.4. Interfaz correspondiente a la segunda práctica.
(Fuente: Elaboración propia)

También se obtiene como resultado de la implementación una guía para cada una de las prácticas propuestas, estas guías detallan los pasos a seguir para el desarrollo y de las prácticas y muestran los resultados esperados para cada parte.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El servomecanismo construido cumple con el requerimiento de permitir visualizar mediante una interfaz de Matlab variables de posición y velocidad para el estudio de teorías de control.
- El diseño del código de programación del controlador permite el manejo del servomecanismo desde el software Matlab mediante el manejo y transmisión de variables a través de una conexión serial.
- El uso de Inventor mediante modelado 3D permitió obtener un modelo virtual que permitió validar la resistencia y funcionamiento de los elementos mecánicos mediante el módulo de análisis de tensiones.
- Se diseñó el servomecanismo de manera que su parte estructural pueda ser fácilmente reproducible mediante impresión 3D.
- El eje de salida del dispositivo presenta un extremo biselado que mediante una junta permite la conexión con otros servomecanismos que posteriormente serán diseñados para el estudio de teorías de control.
- El servomecanismo es capaz de cumplir con las prácticas propuestas y presentar en tiempo real las variables necesarias para la ejecución de cada práctica.
- Las prácticas propuestas permiten al estudiante la visualización de aplicaciones reales de las teorías de control y de su relación con el comportamiento de sistemas electromecánicos.
- El diseño de la interfaz gráfica en Matlab se encuentra enfocado a la interacción con el estudiante de manera que el comportamiento del servomecanismo es observable en tiempo real.

4.2. Recomendaciones

- No sobrepasar las condiciones críticas de carga del servomecanismo ya que puede causar rotura en los dientes de los engranes.
- De ser necesario para futuras aplicaciones se puede diseñar y ensamblar sistemas de engranes planetarios con distinta relación de transmisión al implementado.
- Para el diseño de nuevos módulos que se acoplen al servomecanismo se debe verificar si la potencia del servomecanismo es la necesaria y validar la resistencia de las partes mediante un software de modelado 3D
- Para la reproducción del servomecanismo en la fabricación del sistema de engranes planetarios se debe utilizar de material polímero ABS, debido a que presenta una mayor resistencia mecánica.

Referencias Bibliográficas

- [1] Shigley J. (2002). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. (Sexta ed.) México: McGraw Hill.
- [2] Riba C. (2002). *Diseño Concurrente*. España: Ediciones UPC.
- [3] Becerra Ferreiro, A.M., Moya Rodríguez, J. L., (Mayo 2015). Geometría y cinemática de los engranajes cilíndricos de dientes rectos interiores con mínima diferencia entre los números de dientes. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/266135297>
- [4] Avia, F., & Cruz, I. (2009). *Sistema electromecánicos de acumulación de energía para aplicación en plantas eólicas aislados*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [5] Ávila, B. (2000). *Sistema de sujeción y soporte mecánico*. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [6] Cano, R., & otros. (2015). Teorías y modelos de control y aprendizaje motor. Aplicaciones clínicas en neurorrehabilitación. *Neurología*, 30(1), 32 - 41.
- [7] Carletti, E. (2017). *Manejo de potencia para motores con el integrado L293D*. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de Robots Argentina: http://robots-argentina.com.ar/MotorCC_L293D.htm
- [8] Carrasco, A. (2015). Cómo obtener los parámetros de un motor de corriente continua e imán. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de Tecnológico Nacional de México: http://www.itsteziutlan.edu.mx/pdfs/revistatec/2015/09/como_obtener_los_parametros_de_un_motor_conclusion.pdf
- [9] Díaz, J. (2016). *Placa Arduino Uno*. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de <http://www.iescamp.es/miarduino/2016/01/21/placa-arduino-uno/>
- [10] Franco, E. (2007). *Sistemas electromecánicos*. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de Universidad de Buenos Aires: <http://materias.fi.uba.ar/6509/Sistemas%20electromec%20nicos%2026-03-07.pdf>
- [11] Franz, K. (2008). *Teoría de los servomecanismos lineales de alta precisión*. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de Instituto de Matemática de Bahía Blanca: <http://inmabb.criba.edu.ar/revuma/pdf/v15n3/p128-148.pdf>
- [12] García, J. (2011). *Desarrollo de un controlador para motores DC brushless basado en CompactRIO y LabVIEW de National Instruments para el estudio de nuevos algoritmos de control*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- [13] Gutiérrez, M., & Iturralde, S. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. Santa Elena: Ediciones UPSE.
- [14] Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático*. Boston: Prentice-Hall.
- [15] Leantec Robotics & Electronics. (2018). *Controlador de motores L293D*. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de <https://leantec.es/todos-los-productos/101-controlador-de-motores-l293d.html>
- [16] López, E. (2011). *La programación de controladores lógicos PLC'S en el desarrollo de competencias laborales*. Milagro: Universidad Estatal de Milagro.
- [17] Martínez, J., & Jiménez, M. (2010). *Programación Gráfica para ingenieros*. Barcelona: Marcombo.

- [18] Ollero, A. (2011). *Robótica. Manipuladores y robot móviles*. Barcelona: Marcombo, Boixareu Editores.
- [19] Orué, J. (2009). *Servomecanismos o servosistemas*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/83287229/Servomecanismos-o-servosistemas>
- [20] Peña, A., & otros. (2015). *Sistema electromecánico*. Piura: Universidad Nacional de Piura.
- [21] Pérez, M., & Readman, M. (2015). *Sistemas de Servo Control 2: Servomecanismos Digitales*. Recuperado el 23 de agosto de 2018, de https://www.researchgate.net/publication/268434971_Sistemas_de_Servo_Control_2_Servomecanismos_Digitales
- [22] Pérez, M., Pérez, A., & Pérez, E. (2008). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. San Juan: Universidad Nacional de San Juan.
- [23] Placas Arduino Chile. (2017). *Placas Arduino Nano*. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de <http://arduino.cl/arduino-nano/>
- [22] Ramos, R. (2017). *Sistema de control de la iluminación de un hogar a través de Android gobernado por la plataforma Arduino*. Cataluña: Universidad Abierta de Cataluña.
- [23] Ríos, J. (2000). *Prácticas del Laboratorio de Teoría de Control*. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [23] Salinas, S. (2005). *Fundamentos de la ingeniería de control*. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de Escuela Superior Politécnica del Litoral: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/14620/10/10%20CAPITULO%203%20%283.3%29.pdf>
- [24] SmartMotorDevices. (2012). *Controladores de motor DC*. Recuperado el 24 de agosto de 2018, de <http://stepmotor.biz/es/dc-drivers-overview.htm>
- [25] Werner, H. (2007). *Domótica para viviendas y edificios*. Heidelberg: Marcombo.
- [26] Apkarian, J., Astrom, K. (2004). A laptop servo for control education. *IEEE Control Systems Magazine*, 24 (5), pp. 70-73. doi: [10.1109/MCS.2004.1337864](https://doi.org/10.1109/MCS.2004.1337864)
- [27] Becerra, A., Moya, J. (2012). Perfeccionamiento del diseño de transmisiones por engranajes cilíndricos de dientes rectos interiores. *Revista científica*, (1), pp. 105-113. doi: <https://doi.org/10.14483/23448350.3948>
- [28] Becerra, A., Moya, J. (2015). Geometría y cinemática de los engranajes cilíndricos de dientes rectos interiores con mínima diferencia entre los números de dientes. Recuperado de
- [29] Bravo, G. (2012). Diseño y simulación de una máquina automatizada con PLC para dividir planchas de cartón de hasta 1300 mm de ancho y 2200 mm de longitud, mediante cortes longitudinales y transversales (Trabajo fin de tercer nivel). Recuperada de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4554>
- [30] Chandrasekara, C., Davari, A.(2004). Experiments for the undergraduate control laboratory. *Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory 2004. Proceedings of the* . IEEE, (3F), pp. 488-491. doi: [10.1109/SSST.2004.1295705](https://doi.org/10.1109/SSST.2004.1295705)

- [31] Corzo, D. (2011). Diseño de una máquina semiautomática para la fabricación de adoquines y bloques (Trabajo fin de tercer nivel). Recuperada de <http://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=10607>
- [32] Farah, S., Anderson, Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *ScienceDirectnce*, (107), pp.367-392. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
- [33] Giurgiutiu, V., Lyons, J., Rocheleau, D., Liu, W.(2005). Mechatronics/microcontroller education for mechanical engineering students at the University of South Carolina. *ScienceDirect*. 15(9), pp. 1025-1036. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2005.06.002>
- [34] Lee, J.,Huang, J.(1995). Motor drive control system for education and research. *Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE*,(1), pp. 502 – 508.doi: [10.1109/PEDS.1995.404871](https://doi.org/10.1109/PEDS.1995.404871)
- [35] Mehrl, D., Parten, D., Vins, D. (1997). Robots enhance engineering education. *Proceedings Frontiers in Education 1997 27th Annual Conference. Teaching and Learning in an Era of Change. IEEE*, (3), pp. 613-618. doi: [10.1109/FIE.1997.635876](https://doi.org/10.1109/FIE.1997.635876)
- [36] SKF. (2006). Catálogo General. Recuperado de http://www.skf.com/binary/89-121486/10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf
- [37] Suntaxi, V., Haro, R. (2010). Diseño y construcción de un prototipo didáctico del sistema de transmisión de un vehículo híbrido (Trabajo fin de tercer nivel). Recuperada de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/2868?locale-attribute=en>
- [38] Tomizuka, M. (2001). Mechatronics: from the 20th to 21st century. *Pergamon*, (1), pp. 877-886. doi: [10.1016/S1474-6670\(17\)39114-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)39114-0)
- [40] Ward, J. (1962). An Instructional Servomechanisms Laboratory. *IRE Transactions on Education*. IEEE, E-5(1), pp. 6-9. doi: [10.1109/TE.1962.4322228](https://doi.org/10.1109/TE.1962.4322228)
- [41] Miles, L. D. (2015). Techniques of value analysis and engineering. Miles Value Foundation.
- [42] Ramírez, R., Castañeda, C. (2017). Control de velocidad de un motor de CD basado en mediciones de la corriente de armadura. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIX (número 4)*, FI-UNAM. doi: [10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.040](https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.040)
- [43] Del Castillo, J.M. (2002) Análisis de las expresiones de la eficiencia de los trenes de engranajes planetario.
- [44] Chasi, G. (2012). *Proyecto de diseño de prototipo de mecanismos didácticos tipo diferencial y planetario. Cuenca. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1988/13/UPS-CT002357.pdf*
- [45] Dourmashkin, P. A. (2014). *Classical Mechanics: MIT 8.01 Course Notes. Recuperado de: http://www.lehman.edu/faculty/anchordoqui/chapter24.pdf*
- [46] Faidley L. (2009). *Benchmarking Manual: Parameter Identification for an Electromechanical System, ME421 - Lab 3, Iowa State University, Department of Mechanical Engineering.*

- [47] Luecke G. (2014). *Laboratory Exercise: Pendulum Dynamics, ME421 - Lab 2, Iowa State University, Department of Mechanical Engineering.*
- [48] Luecke G. (2014). *Laboratory Exercise: Parameter Identification for an Electromechanical System, ME421 - Lab 3, Iowa State University, Department of Mechanical Engineering.*

ANEXO I.

Desarrollo de la Casa de la Calidad

compromisos

B = Básico
o = Unidimensional
E = Estimulante

Muy positiva ●
Positiva ○
Negativa ×
Muy Negativa ✖

voz del usuario necesidades y deseos usuario	Voz del ingeniero características técnicas	Eficiencia de diseño	Ergonomía	Nivel de ruido	Modularidad	Confiabilidad	Mantenibilidad	Torque	Evaluación usuario									
									A	B	C	E	F	G	H	I	J	
									Propia empresa	Competencia 1	Competencia 2	Objetivos	Índice de mejora	Factor de venta	Importancia	Ponderación	Ponderación %	
Bajo costo	E	⊙						○	1	1	1	3	3	●	5	23	19.8	
Facil uso	B		○		○				1	3	3	4	4	•	3	14	12.7	
Bajo ruido al funcionar	E			⊙				▽	1	4	4	4	4	•	3	14	12.7	
facilidad de acoplamiento	o	▽	▽		⊙		○		1	4	3	4	4	●	5	30	26.4	
Fabricado con material resistente	o	▽				⊙			1	4	4	4	4	•	3	14	12.7	
Facil mantenimiento y reparación	o		⊙		▽	○	⊙		1	4	3	4	4		2	8	7.04	
Buen dimensionamiento del motor	B	⊙	▽				▽	⊙	1	5	5	5	5		2	10	8.8	
																114	100	
propia empresa		1	1	1	1	1	1	1										
competencia 1		4	4	4	4	4	4	5										
compreteencia 2		3	4	4	3	4	4	5										
incidencia		337	155	130	321	154	172	172	1440									
incidencia %		23.4	10.8	9	22.3	10.7	11.9	11.9	100									
Evaluación Técnica	Valores de referencia	menor a \$ 500.00						80 oz-in										
Factor de Incidencia																		
Fuerte = 9	⊙																	
Medio = 3	○																	
Bajo = 1	▽																	
Factor de venta																		
Fuerte = 1.5	●																	
Posible = 1.2	•																	
Ninguno = 1.0																		

Análisis de la competencia

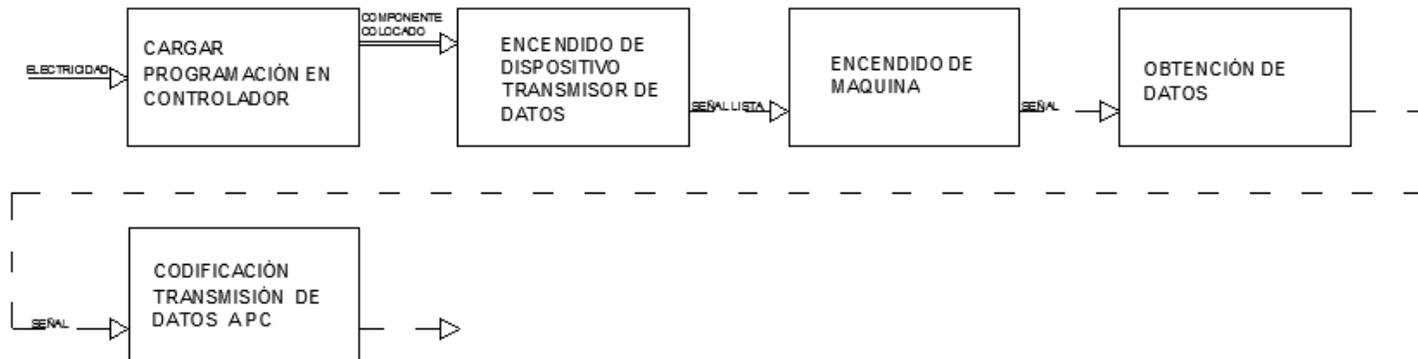
ANEXO II.

Desarrollo de diagramas funcionales

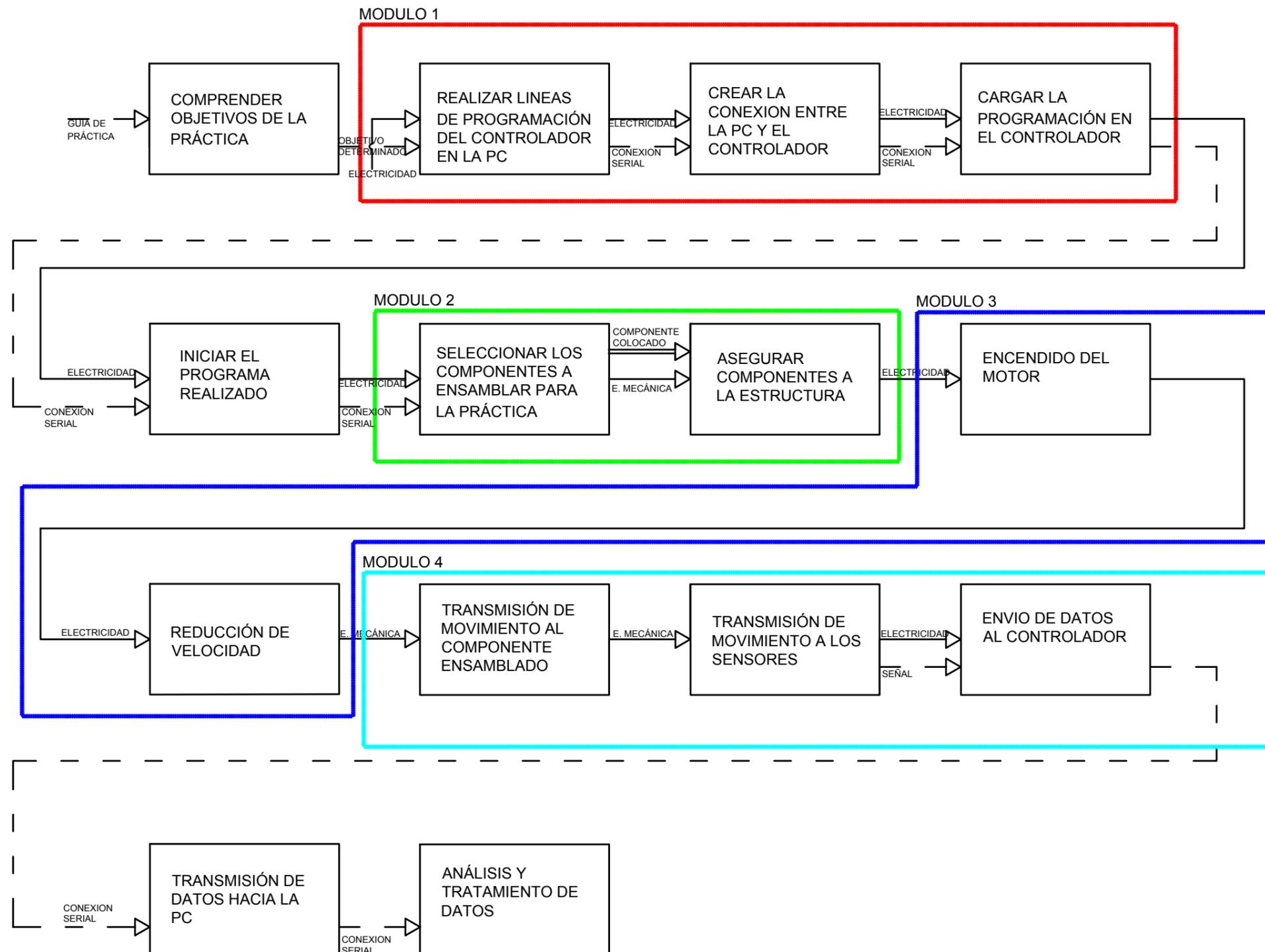
NIVEL 0



NIVEL 1



ANEXO III.
Definición de los módulos



ANEXO IV.

Códigos de programación

Código para determinar los parámetros Kt y tf

```
close all, clear all, clc
d1=0.368;
d2=0.749;
F1=0.152*9.8;
F2=0.489*9.8;
v=[3 4 5 6 7 8 9];
teta=[12 17 20 23 28 31 34];
for i=1:7
T(i)=F1*d1*sin(teta(i)*pi()/180)+F2*d2*sin(teta(i)*pi()/180);
end
plot(v,T)
xlabel('Voltaje [V]');
ylabel('Torque [Nm]');
title('Torque vs Voltaje');
legend('T = f(v)');
```

Código para análisis dinámico del péndulo simple

```
close all, clear all, clc
load('Variables.mat')
ldisco=0.74;
lcgbarra=0.36;
lbarra=0.78;
rdisco=0;
mdisco=0;
mbarra=0.152;
g=9.81;
A=45;
jsis=0.037
wn=sqrt(((mdisco*ldisco+mbarra*lbarra)*g)/(jsis+(mbarra*((1/12)*((lbarra)^2))+((lcgbarra)^2)))+(mdisco*((ldisco)^2)+((1/2)*((rdisco)^2))))
tt=linspace(0,10,1000)
ll=length(tt)

for i=1:ll
    ang(i)=A*cos(wn*tt(i));
end
plot(tt,ang,'r',tiempo,teta,'b')
xlim([0 10]);
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Posición angular [grados]');
title('Posición vs Tiempo');
legend('teta(t) = A*cos(wn.t)');
```

ORDEN DE EMPASTADO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ORDEN DE EMPASTADO

De acuerdo a lo estipulado en el artículo 27 del Instructivo para la Implementación de la Unidad de Titulación en las Carreras y Programas vigentes de la Escuela Politécnica Nacional, aprobado por Consejo de Docencia en sesión extraordinaria del 29 de abril de 2015 y una vez verificado el cumplimiento del formato de presentación establecido, se autoriza la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por el señor/ita:

ERICK PATRICIO TIPAN POZO

Fecha de autorización: Quito, D.M., 29 de mayo de 2020.

ING. FAUSTO OVIEDO
Decano

Mildred PM