

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y  
ELÉCTRICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA  
LA ENSEÑANZA DE TÉCNICAS DE CONTROL AUTOMÁTICO  
PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN**

**TESIS PARA OPTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Autor (es) : Bach. Luis Enrique Torres Segovia.**

**: Bach. Juan Andrade Guerrero Pintado**

**Asesor : Mag. Lenin Franchescoleth Núñez Pintado**


**Línea de Investigación: Automatización y Control Industrial**

**JAÉN – PERÚ**

**2025**

# Luis Enrique Torres Segovia Juan Andrade Guerrer...

## IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE TÉCNICAS DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA ...

 Quick Submit Quick Submit Universidad Nacional de Jaen

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3440677912

Fecha de entrega

10 dic 2025, 11:07 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

10 dic 2025, 11:14 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Luis\_Torres\_-\_Juan\_Guerrero-3\_-\_LUIS\_ENRIQUE\_TORRES\_SEGOVIA.pdf

Tamaño del archivo

9.1 MB

177 páginas

31.171 palabras

145.312 caracteres

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN  
*Dr. Alexander Huamán Mera*  
Responsable de la Unidad de Investigación  
de la Facultad de Ingeniería




# 3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe


- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

## Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**  
282 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN  
*Dr. Alexander Huamán Mera*  
Responsable de la Unidad de Investigación  
de la Facultad de Ingeniería



**ACTA DE SUSTENTACIÓN**

En la ciudad de Jaén, el martes 16 de diciembre del año 2025, siendo las 19:30 horas, se reunieron de manera presencial los integrantes del jurado:

Presidente: Dr. Walter Linder Cabrera Torres

Secretario: Mg. Marco Luis Pérez Silva

Vocal: Mg. Frans Fuentes Maza

Para evaluar la Sustentación del Informe Final:

- ( ) Trabaja de investigación
- () Tesis
- ( ) Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado:

**"IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE TÉCNICAS DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN"** presentado por los bachilleres: **Luis Enrique Torres Segovia y Juan Andrade Guerrero Pintado** de la Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén.


Después de la sustentación y defensa, el jurado acuerda:


- () Aprobar      ( ) Desaprobar      () Unanimidad      ( ) Mayoría


Con la siguiente mención:

- |                |            |               |
|----------------|------------|---------------|
| a) Excelente   | 18, 19, 20 | ( )           |
| b) Muy bueno   | 16, 17     | ( <u>17</u> ) |
| c) Bueno       | 14, 15     | ( )           |
| d) Regular     | 13         | ( )           |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | ( )           |

Siendo las 20:30 horas del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción presente.

  
Mg. Marco Luis Pérez Silva  
Secretario Jurado Evaluador

  
Dr. Walter Linder Cabrera Torres  
Presidente Jurado Evaluador

  
Mg. Frans Fuentes Maza  
Vocal Jurado Evaluador

**“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”**

**ANEXO N°06:**

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO  
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

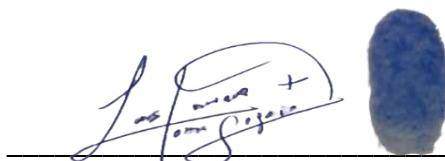
Yo, LUIS ENRIQUE TORRES SEGOVIA, egresado de la carrera Profesional carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI N° 71603071.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado: “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE TÉCNICAS DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN”. Asesorado por Mag. Lenin Franchescoleth Núñez Pintado. El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.
2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 14, enero del 2026.



**Luis Enrique Torres Segovia**

**“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”**

**ANEXO N°06:**

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO  
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Yo, JUAN ANDRADE GUERRERO PINTADO, egresado de la carrera Profesional carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI N° 75425014.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado: “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE TÉCNICAS DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN”. Asesorado por Mag. Lenin Franchescoleth Núñez Pintado. El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.
2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 14, enero del 2026.



**Juan Andrade Guerrero Pintado**

# ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.1.1. Internacionales .....	1
1.1.2. Nacionales.....	4
1.1.3. Locales .....	6
1.2. Problema.....	7
1.2.1. Realidad problemática .....	7
1.2.2. Formulación del problema .....	9
1.3. Justificación.....	10
1.3.1. Justificación técnica .....	10
1.3.2. Justificación tecnológica.....	10
1.3.3. Justificación económica .....	11
1.3.4. Justificación social .....	11
1.4. Objetivos .....	12
1.4.1. Objetivo general.....	12
1.4.2. Objetivos específicos .....	12
<b>II. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
2.1. Materiales.....	13
2.1.1. Motor DC .....	13
2.1.2. Fuente de alimentación DC.....	15
2.1.3. Microcontrolador Mega 2560 R3.....	16
2.1.4. Driver BTS7960.....	18
2.1.5. Sensor de corriente ACS712T 20A.....	19

2.1.6.	Sensor de voltaje 0-25V DC .....	21
2.1.7.	Multímetro digital TTP-299 TESTECHpro.....	22
2.1.8.	Licencias de software.....	23
2.1.9.	Diagrama eléctrico de conexiones. ....	24
2.2.	Métodos.....	25
2.2.1.	VARIABLES DE ESTUDIO.....	25
2.2.2.	Métodos.....	26
<b>III.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
3.1.	Modelamiento matemático.....	31
3.2.	Modelamiento matemático con ecuaciones diferenciales .....	33
3.3.	Modelamiento con funciones transferencia.....	35
3.4.	Medición de parámetros .....	37
3.4.1.	Resistencia a la armadura (R) .....	37
3.4.2.	Inductancia a la armadura (L).....	38
3.4.3.	Voltaje (V) .....	39
3.4.4.	Velocidad angular (W).....	40
3.4.5.	Corriente del motor sin carga (I).....	40
3.4.6.	Constante electromotriz $K_a$ y de torque $K_m$ .....	41
3.4.7.	Constante de tiempo mecánica $t_m$ .....	43
3.4.8.	Momento de inercia J.....	44
3.4.9.	Corriente de arranque $i_{arr}$ .....	44
3.4.10.	Torque de fricción $T_f$ .....	45
3.4.11.	Torque del motor $T_m$ .....	45
3.4.12.	Constante de fricción de coulomb (B) .....	46
3.4.13.	Valores obtenidos de las mediciones .....	47

3.5.	Implementación del sistema teórico en Matlab/Simulink .....	48
3.5.1.	Resultados gráficos del modelo matemático.....	53
3.6.	Implementación del modelo real .....	58
3.6.1.	Construcción de la PRBS .....	61
3.6.2.	Sistema de lazo abierto .....	62
3.6.3.	Sistema de lazo cerrado con PID .....	71
3.6.4.	Resultados gráficos del sistema real. ....	78
3.7.	Comparación entre el modelo matemático(teórico) y modelo real .....	86
<b>IV.</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>93</b>
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>96</b>
5.1.	Conclusiones .....	96
5.2.	Recomendaciones.....	97
<b>VI.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>.....</b>	<b>101</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Especificaciones técnicas del motor 37D 12V/1000RPM con encoder.....</i>	14
<b>Tabla 2</b>	<i>Especificaciones técnicas de fuente DC 12V 5A.....</i>	16
<b>Tabla 3</b>	<i>Especificaciones técnicas de la tarjeta Mega 2560 R3 .....</i>	17
<b>Tabla 4</b>	<i>Especificaciones técnicas del Driver puente H BTS7960 43A .....</i>	19
<b>Tabla 5</b>	<i>Especificaciones técnicas del sensor de corriente ACS712T 20A .....</i>	20
<b>Tabla 6</b>	<i>Especificaciones técnicas del sensor de voltaje de 0-25V DC .....</i>	21
<b>Tabla 7</b>	<i>Especificaciones técnicas del Multímetro digital TTP-299 TESTECHpro.....</i>	23
<b>Tabla 8</b>	<i>Variables comprometidas en el sistema.....</i>	25
<b>Tabla 9</b>	<i>Parámetros del motor DC.....</i>	32
<b>Tabla 10</b>	<i>Resumen de los parámetros obtenidos del motor DC con encoder .....</i>	47
<b>Tabla 11</b>	<i>Leyenda del diagrama de bloques teórico.....</i>	48
<b>Tabla 12</b>	<i>Leyenda del diagrama de bloques real.....</i>	59
<b>Tabla 13</b>	<i>Correlación de Pearson de los datos reales y teóricos.....</i>	92
<b>Tabla 14</b>	<i>Tiempo de asentamiento de acuerdo a los puntos de referencia evaluados.....</i>	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Motor DC 12V/1000RPM con encoder</i> .....	13
<b>Figura 2</b> <i>Encoder de cuadratura de efecto hall</i> .....	15
<b>Figura 3</b> <i>Fuente de alimentación DC 12V 5<sup>a</sup></i> .....	15
<b>Figura 4</b> <i>Arduino Mega 2560 R3</i> .....	17
<b>Figura 5</b> <i>Driver puente H BTS7960 43A</i> .....	18
<b>Figura 6</b> <i>Sensor de corriente ACS712T 20A</i> .....	20
<b>Figura 7</b> <i>Sensor de voltaje 0-25V DC</i> .....	21
<b>Figura 8</b> <i>Multímetro digital TTP-299 TESTECHpro</i> .....	22
<b>Figura 9</b> <i>Diagrama eléctrico de las conexiones del prototipo</i> .....	24
<b>Figura 10</b> <i>Modelo electromecánico del motor DC.</i> .....	31
<b>Figura 11</b> <i>Diagrama de bloques del funcionamiento del motor DC</i> .....	37
<b>Figura 12</b> <i>Resistencia a la armadura R del motor DC</i> .....	37
<b>Figura 13</b> <i>Inductancia del motor DC</i> .....	38
<b>Figura 14</b> <i>Datos de voltaje del motor DC</i> .....	39
<b>Figura 15</b> <i>Velocidad del motor DC obtenido a 255 PWM(8bits)</i> .....	40
<b>Figura 16</b> <i>Corriente del motor sin carga DC obtenida a Máxima velocidad</i> .....	41
<b>Figura 17</b> <i>Circuito equivalente del motor DC</i> .....	42
<b>Figura 18</b> <i>Conexionado del osciloscopio</i> .....	43
<b>Figura 19</b> <i>Corriente de arranque del motor DC</i> .....	44
<b>Figura 20</b> <i>Diagrama de bloques de las Ecuaciones Diferenciales.</i> .....	50
<b>Figura 21</b> <i>Script con los valores de los parámetros del motor DC.</i> .....	51

<b>Figura 22</b> <i>Ventana de PID Tuner</i> .....	52
<b>Figura 23</b> <i>Parámetros PID del modelo matemático</i> . ....	52
<b>Figura 24</b> <i>Diagrama de bloques del modelo matemático en Matlab/Simulink</i> .....	53
<b>Figura 25</b> <i>Comportamiento gráfico de RPM vs tiempo (EDO y FTTeórica)</i> . ....	54
<b>Figura 26</b> <i>Imagen ampliada del sistema teórico – velocidad</i> . ....	54
<b>Figura 27</b> <i>Comportamiento gráfico del voltaje vs tiempo del modelo matemático</i> . ....	55
<b>Figura 28</b> <i>Imagen ampliada del sistema teórico – voltaje</i> .....	56
<b>Figura 29</b> <i>Comportamiento gráfico de la corriente vs tiempo del modelo matemático</i> . ....	56
<b>Figura 30</b> <i>Imagen ampliada del sistema teórico – corriente</i> . ....	57
<b>Figura 31</b> <i>Configuración del Hardware</i> . ....	58
<b>Figura 32</b> <i>Construcción de la PRBS</i> . ....	62
<b>Figura 33</b> <i>Esquema de señales de entrada y salida</i> . ....	62
<b>Figura 34</b> <i>Diagrama de bloques MATLAB/Simulink para Control de PWM y RPM</i> . ...	64
<b>Figura 35</b> <i>Data obtenida del tiempo, pwm y rpm</i> . ....	65
<b>Figura 36</b> <i>Importación de los datos obtenidos a MATLAB</i> . ....	66
<b>Figura 37</b> <i>Archivos cargados al Workspace de MATLAB</i> . ....	66
<b>Figura 38</b> <i>Identificación de Sistemas</i> . ....	67
<b>Figura 39</b> <i>Selección de rango de la muestra</i> .....	68
<b>Figura 40</b> <i>Procesamiento del modelo</i> . ....	69
<b>Figura 41</b> <i>Estimación del modelo – 1 polo</i> . ....	69
<b>Figura 42</b> <i>Estimación del modelo – 2 polos</i> .....	70
<b>Figura 43</b> <i>Modelo de planta del sistema real calculado “P2”</i> .....	70
<b>Figura 44</b> <i>Función transferencia del modelo real</i> . ....	71

<b>Figura 45</b> <i>Configuración del bloque PIDs.</i> .....	73
<b>Figura 46</b> <i>Interfaz del PID Tuner.</i> .....	73
<b>Figura 47</b> <i>Ajuste de los parámetros PID.</i> .....	74
<b>Figura 48</b> <i>Parámetros PID del modelo real.</i> .....	75
<b>Figura 49</b> <i>Sistema de lazo cerrado.</i> .....	75
<b>Figura 50</b> <i>Lazo cerrado implementado con la función transferencia calculada.</i> .....	76
<b>Figura 51</b> <i>Diagrama de bloques para la medición de voltaje.</i> .....	77
<b>Figura 52</b> <i>Diagrama de bloques para la medición de corriente.</i> .....	78
<b>Figura 53</b> <i>Respuesta PWM y RPM del sistema a lazo abierto.</i> .....	79
<b>Figura 54</b> <i>Comportamiento gráfico de RPM vs Tiempo del modelo real.</i> .....	80
<b>Figura 55</b> <i>Imagen ampliada del sistema real – velocidad.</i> .....	81
<b>Figura 56</b> <i>Comportamiento gráfico de voltaje vs tiempo del modelo real.</i> .....	82
<b>Figura 57</b> <i>Imagen ampliada del sistema real – voltaje.</i> .....	83
<b>Figura 58</b> <i>Comportamiento gráfico de voltaje vs tiempo del modelo real.</i> .....	84
<b>Figura 59</b> <i>Imagen ampliada del sistema real – corriente.</i> .....	85
<b>Figura 60</b> <i>Comparación de la velocidad (RPM) del modelo matemático vs real.</i> .....	86
<b>Figura 61</b> <i>Detalle del comportamiento de la figura 60.</i> .....	87
<b>Figura 62</b> <i>Comparación del voltaje del modelo matemático vs real.</i> .....	88
<b>Figura 63</b> <i>Detalle del comportamiento de la figura 62.</i> .....	89
<b>Figura 64</b> <i>Comparación de la corriente del modelo matemático vs real.</i> .....	90
<b>Figura 65</b> <i>Detalle del comportamiento de la figura 64.</i> .....	91

## **RESUMEN**

El presente proyecto desarrolla la implementación de un módulo didáctico para la enseñanza de técnicas de control automático, utilizando un motor DC de 12 V con encoder, un microcontrolador Arduino Mega 2560 y el entorno MATLAB/Simulink. Se modeló el comportamiento electromecánico del motor mediante ecuaciones diferenciales y función de transferencia, logrando una simulación teórica que luego fue contrastada con el modelo real. El sistema incorpora sensores de corriente y voltaje, junto con un controlador PID que regula la velocidad del motor en función de una referencia. Los resultados mostraron un comportamiento estable y coherente entre el modelo teórico y el real, evidenciando pequeñas diferencias por ruido de medición y limitaciones del hardware. En conclusión, se logró implementar de manera exitosa un módulo didáctico funcional, replicable y adecuado para prácticas de laboratorio, permitiendo al estudiante analizar y comparar el comportamiento teórico y experimental de sistemas de control en lazo abierto, cerrado y bajo control PID.

**Palabras claves:** Control PID – Motor DC – Arduino Mega – Simulink – Sistema en lazo abierto y cerrado.

## **ABSTRACT**

This project develops the implementation of a didactic module for teaching automatic control techniques, using a 12V DC motor with an encoder, an Arduino Mega 2560 microcontroller, and the MATLAB/Simulink environment. The electromechanical behavior of the motor was modeled using differential equations and a transfer function, resulting in a theoretical simulation that was then compared with the real-world model. The system incorporates current and voltage sensors, along with a PID controller that regulates the motor speed based on a reference. The results showed stable and consistent behavior between the theoretical and real-world models, with only minor differences due to measurement noise and hardware limitations. In conclusion, a functional, replicable, and suitable didactic module for laboratory practice was successfully implemented, allowing students to analyze and compare the theoretical and experimental behavior of open-loop, closed-loop, and PID-controlled systems.

**Keywords:** PID Control – DC Motor – Arduino Mega – Simulink – Open-loop and Closed-loop System.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

### 1.1.1. Internacionales

En el artículo de Chen (2024), realizado en Shanghai, China “La aplicación del control PID en sistemas de control de motores de CC”, cuyo objetivo es el desarrollo e implementación de una estrategia de control usando software MATLAB/Simulink como herramienta de simulación y prueba, con lo cual se plantea realizar el control preciso en tiempo real de velocidad y par en motores CC, a fin de lograr una mayor eficiencia y rendimiento en las diversas aplicaciones industriales y robóticas. La metodología empleada combina métodos de simulación y experimentales para evaluar la efectividad de un control en motores de corriente continua. La implementación se da utilizando un microcontrolador que va ajustando dinámicamente los parámetros Proporcional-Integral-Derivativo según la retroalimentación de sensores de velocidad y par. Los resultados indican que al usar PID basado en la función transferencia automatizada el sistema se estabiliza en 0.3s, el error y sobre impulsó se reducen a 0. En conclusión, un ajuste adecuado de los parámetros mejora el rendimiento del motor, reduciendo problemas de sobreimpulso, la inestabilidad y tiempos de respuesta lentos, lo que resulta en una mayor precisión y eficiencia en el control.

Esta investigación nos aporta que el control con retroalimentación se puede ajustar mediante sensores que van registrando la data del motor de su eje de salida a fin de lograr en el menor tiempo posible el valor de referencia deseado por medio de un microcontrolador.

En el artículo científico realizado por Pinargote et al. (2023), realizado en Santa Elena, Ecuador “Controlador de posición y velocidad con PID discreto en motor con codificación”, precisan que la posición y velocidad de los motores de corriente continua (DC) puede ser controlada y ajustada en tiempo real. La metodología se basa en un microcontrolador con algoritmo Proporcional-Integral-Derivativo y retroalimentación con codificador acoplado al eje del motor a fin de tener información de posición y velocidad, para simular el controlador se realiza un diagrama de bloques en MATLAB/Simulink. Los resultados muestran señales de control inferiores a 10 segundos con señales de salida entre 0 y 0.3s. En conclusión, las aplicaciones de un microcontrolador con retroalimentación nos permiten mejorar en cuanto a eficiencia y precisión en sistemas industriales automatizados por la información en tiempo real brindada al microcontrolador.

Este artículo se centra en el control de velocidad y posición mediante retroalimentación utilizando un codificador y modelado matemático. Lo que contribuye a nuestro módulo es la posibilidad de emplear un encoder acoplado al motor para medir las RPM y enviar esa información al Mega 2560, teniendo en cuenta que dicho microcontrolador sea compatible con los sensores de medición de voltaje y corriente a fin de lograr la comunicación deseada entre equipos. Además, podemos utilizar el modelado matemático del motor, considerando su parte eléctrica y mecánica, además de adaptarlo a la función transferencia para apoyarnos del software MATLAB para evaluar el comportamiento grafico de velocidad respecto al voltaje.

En la investigación de Guevara y Bautista (2021), ejecutado en san José de Cúcuta, Colombia “Módulo didáctico para entrenamiento del control de velocidad para

motores eléctricos”, este proyecto busca complementar la teoría y la práctica en el área de automatización. Para su desarrollo, se utilizó una metodología basada en la recopilación de información de diversas fuentes, como investigaciones previas, artículos académicos y proyectos de grado, con el fin de seleccionar los componentes más adecuados. Entre los elementos utilizados se encuentran un variador Altivar, un controlador PWM ajustable con pantalla digital y un potenciómetro, motor DC trifásico además de una fuente de alimentación DC. Se empleó el software AutoCAD para el diseño del panel de conexiones frontal, lo que facilita su uso y comprensión. Los resultados muestran que hay que apoyarse de un software para el panel de conexionado de las componentes como también hay que tener cuidado con los niveles de voltaje a usar según equipo ya sea en DC o en AC. En conclusión, el módulo permite a los estudiantes entender y aplicar tanto los conceptos teóricos como prácticos, convirtiéndose en una herramienta útil para su formación en automatización industrial. Como recomendación los autores sugieren consultar siempre el manual de usuario antes de utilizar el módulo, para asegurar el correcto uso del equipo y conocer las especificaciones técnicas.

Esta investigación nos muestra la importancia de orientarse en proyectos similares para que nos sirvan como referencia de nuestro módulo, también nos señala la relevancia de apoyarse en softwares para el panel de conexiones, para nuestro caso podemos hacer uso de Fritzing y KiCad los cuales son softwares gratuitos que nos permite diseñar circuitos, y a que a su vez nos permitirán visualizar el conexionado eléctrico-electrónico. También nos da la noción de que los equipos a utilizar muestren

compatibilidad entre ellos, valido para lograr controlar nuestro motor por medio de nuestro Arduino Mega y actuador.

### **1.1.2. Nacionales**

En la tesis de Valdivia y Alfonso (2021) “Modelamiento y control de velocidad de un motor DC mediante algoritmo Proporcional-Integral-Derivativo basado en reglas de Ziegler - Nichols” ejecutada en Arequipa, Perú. Su metodología se basa en un modelamiento matemático de un motor DC de armadura en tiempo continuo para lo cual se hace uso de la función transferencia en un sistema de lazo cerrado. Dicho sistema cuenta con un disco de madera insertado en el eje del motor, en esa posición se ubica un sensor óptico ranurado el cual se encarga de hacer llegar la velocidad real del eje del motor hacia el ATMEGA 328, este microcontrolador compara la velocidad registrada con el set Point (SP), ajusta la velocidad del motor por medio de una señal PWM (modulación por ancho de pulso). También se logra sintonizar los valores de control con MATLAB/Simulink mediante el diagrama de bloques del sistema lo cual nos permite tener valores más cercanos a los óptimos. Los resultados muestran que la sintonización con MATLAB/Simulink nos proporciona un mejor ajuste de valores haciendo uso de la función transferencia. Se concluye que por medio del modelo matemático se logra tener parámetros excelentes para el controlador y haciendo uso del modelado del motor DC junto al software Simulink se logra una mejor comprensión del modelo de planta y de cómo el control logra ajustar la velocidad cuando se le da un valor de referencia.

Esta tesis nos evidencia que se puede ajustar la velocidad de un motor DC según un valor de referencia en un sistema de lazo cerrado mediante un

microcontrolador, además de simularse el proceso mediante diagrama de bloques en software como MATLAB. También nos señala la importancia de tener data en tiempo real a la salida del sistema para lograr respuestas óptimas ante los cambios de velocidad.

En la investigación de Villa (2021), “Diseño de un control por realimentación de estados para motores de corriente continua” sustentada en Lima, Perú. El objetivo de este trabajo es obtener la función de transferencia de un motor mediante la ficha técnica del motor y el uso de Matlab, con el fin de implementar un control por realimentación de estado y un control PID. Su metodología se basa en el modelamiento de dos motores de corriente continua, obteniendo sus respectivas funciones de transferencia en Matlab. Una se basa en los datos proporcionados por la hoja de especificaciones del motor (datasheet) y la otra en la información obtenida de la tarjeta de control, utilizando un codificador óptico, un controlador y Matlab. En resultados se destaca que ambos métodos logran ajustar la salida, para PID 400 ms sin sobre impulso lo cual no exige la mecánica del motor. Haciendo uso de la función transferencia, PID y la data del codificador aplicado al software Matlab se obtiene un control en 0.452 s. En conclusión, la data obtenida a través de una tarjeta de control que se comunica con el software puede tener variaciones debido al ruido del motor sin embargo Matlab logra una aproximación del 98.67% lo cual es una representación fiel del sistema.

Esta investigación nos da a conocer que se puede obtener un control con retroalimentación en motores DC, obteniendo tiempos de respuesta eficientes, es por ello que en nuestra investigación se hará uso de un modelado matemático del motor teniendo en cuenta sus partes electromecánicas, así como un modelamiento con

identificación por medio de MATLAB aplicando una señal PRBS (Pseudo Random Binari Sequence) al sistema de lazo abierto. Con lo cual se puede hacer una comparativa de modelado teórico y real del sistema.

### **1.1.3. Locales**

En la investigación de Montoya y Rimapa (2024), “Simulación de motor de corriente directa mediante modelo matemático y comparación con mediciones reales” realizada en Jaén, Cajamarca, cuyo objetivo de este estudio fue modelar un motor DC real y desarrollar un prototipo de laboratorio para simularlo utilizando Matlab. La metodología adoptada fue tanto analítica como experimental, basándose en un modelo específico del motor que consideró parámetros electromecánicos. Se plantearon ecuaciones diferenciales que describen el funcionamiento del motor, adaptándolas a funciones de transferencia para facilitar su simulación. El prototipo incluyó una placa Arduino, programación en Python y equipos para medir corriente y voltaje. Los resultados muestran una correlación media entre los valores de corriente y alta entre los de velocidad, lo que se atribuye a las perturbaciones y equipos utilizados para las mediciones. En conclusión, esta investigación fortalece los conocimientos teórico - prácticos en el laboratorio de automatización de IME-UNJ fomentando la simulación y modelado de sistemas electromecánicos en la carrera profesional.

En esta tesis nos aporta la importancia de contar con prototipos y módulos que impulsen aplicaciones en tiempo real de sistemas de control en los laboratorios, el módulo a implementar contará con una PCB para facilitar el conexionado, además el módulo implementado se podrá controlar por medio de la PC mediante Simulink/MATLAB lo que nos permitirá ir visualizando los parámetros de salida e ir

comparándolo con el valor de referencia dado para un control automático del motor en tiempo real. Lo cual será beneficioso para los estudiantes dado que podrán afianzar los conocimientos teóricos adquiridos con aplicaciones prácticas.

## **1.2. Problema**

### **1.2.1. Realidad problemática**

Los módulos didácticos son esenciales en la educación y sobre todo en la formación de los futuros profesionales, ya que ofrecen materiales de aprendizaje bien estructurados y organizados que apoyan a los docentes en su labor de enseñanza y fomentan el aprendizaje de los estudiantes, específicamente de los que necesitan afianzar los conocimientos teóricos con los prácticos. Estos recursos simplifican temas complejos dividiéndolos en secciones más pequeñas y manejables, lo que facilita la comprensión y retención de información por parte de los alumnos, ajustándose a diversos contextos educativos y a sus necesidades específicas. (Catota et al., 2024)

A nivel internacional, investigaciones coinciden en que la enseñanza del control automático presenta dificultades significativas cuando se desarrolla únicamente desde un enfoque teórico o mediante simulaciones sin práctica experimental. Rojas et al., (2024) demostraron que, en un curso de teoría de control con 27 estudiantes, solo el 48.15 % aprobó la parte teórica con un promedio general de 2.59/5.0, pese a que la nota mínima aprobatoria era 3.0. Asimismo, antes de implementar una estrategia práctica, solo el 54.55 % comprendía claramente los conceptos fundamentales y únicamente el 45.45 % podía explicar adecuadamente el trabajo de laboratorio. Tras incorporar actividades didácticas prácticas estructuradas,

estos valores mejoraron significativamente, alcanzando el 81.25 % en comprensión conceptual y el 75 % en capacidad de explicación detallada.

A nivel nacional, estudios como el de Ortiz (2020) han permitido evidenciar el impacto de estrategias didácticas prácticas en la formación técnica de los estudiantes de ingeniería. Su investigación, aplicada a 64 estudiantes distribuidos en un grupo control y uno experimental, mostró que ambos iniciaban con desempeños similares: 12.1 en el grupo control y 12.3 en el grupo experimental. El grupo control, instruido únicamente mediante clases teóricas tradicionales, alcanzó una calificación final de 12.8, equivalente a una mejora de 0.7 puntos (5.8 %). En contraste, el grupo experimental, que recibió instrucción mediante un módulo autoinstructivo, obtuvo un promedio final de 17.7, logrando una mejora de 5.4 puntos (43.9 %) respecto a su calificación inicial.

Según las investigaciones internacionales y nacionales planteadas se evidencia que la falta de herramientas prácticas, actividades experimentales y recursos didácticos adecuados limita la comprensión conceptual y el desempeño académico de los estudiantes de ingeniería en cursos de control automático. Además, cabe señalar que en el país también existen actividades de enseñanza que emplean equipamiento industrial como PLCs, variadores de frecuencia y módulos de automatización profesional. No obstante, estos sistemas presentan una limitación importante: su alto costo, lo que dificulta su implementación, mantenimiento y replicación. Este escenario resalta la necesidad de desarrollar y adoptar módulos didácticos accesibles, replicables y de menor costo, capaces de ofrecer experiencias prácticas de calidad sin requerir infraestructura costosa.

En el contexto local, de la Universidad Nacional de Jaén, esta problemática se vuelve más evidente debido a la carencia de módulos didácticos específicos y sobre todo económicos que permitan fortalecer la formación práctica en control de motores, sensores y sistemas de automatización. Cada año, un aproximado de 100 estudiantes cursan asignaturas relacionadas con control automático, electrónica y programación, pero no cuentan con suficientes recursos experimentales accesibles para aplicar los conocimientos teóricos aprendidos, solo realizan actividades de simulación en softwares, pero no se realizan prácticas experimentales. Por ello, se plantea la necesidad de la implementación de un módulo didáctico que enriquezca la enseñanza de técnicas de control automático en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén.

### **1.2.2. Formulación del problema**

En tal sentido y considerando lo mencionado líneas arriba. ¿cómo implementar un módulo didáctico para la enseñanza de técnicas de control automático como herramienta para mejorar el aprendizaje teórico - práctico en el laboratorio de Automatización y Control de la Universidad Nacional de Jaén?

### **1.3. Justificación**

#### **1.3.1. Justificación técnica**

El módulo didáctico proporcionará un entorno práctico para aplicar técnicas de control automático empleadas en sistemas reales, permitiendo trabajar con lazo abierto y cerrado, control PID, señales PWM, control de motores DC y modelamiento por identificación. Desde el punto de vista ingenieril, la propuesta responde a la necesidad de validar experimentalmente estas técnicas mediante la manipulación de variables, medición de respuestas dinámicas y análisis del comportamiento real del sistema. La investigación se realiza para fortalecer el aprendizaje práctico ante la falta de equipos que permitan evaluar, de manera controlada, el desempeño de estrategias de control utilizadas en entornos industriales.

#### **1.3.2. Justificación tecnológica**

El módulo didáctico propuesto aprovechará tecnologías actuales, accesibles y versátiles, como microcontroladores (por ejemplo, Arduino o ESP32), lenguajes de programación, y software de simulación de sistemas de control (como MATLAB u otras herramientas similares). Desde el enfoque tecnológico, la investigación se realiza porque es necesario incorporar herramientas actuales que permitan interacción en tiempo real, programación de microcontroladores y visualización de variables del proceso. Estas tecnologías facilitan el aprendizaje y la experimentación con sistemas reales, contribuyendo al desarrollo de competencias de automatización y programación alineadas con los requerimientos de automatización actual.

### **1.3.3. Justificación económica**

El proyecto se sustenta en la selección de componentes económicos pero funcionales, como microcontroladores (Arduino o ESP32), sensores y actuadores básicos (Driver), y software con prueba estudiantil de MATLAB, entre otros. Esto permite desarrollar prácticas efectivas en el laboratorio con una inversión inicial moderada en comparación con equipos industriales o módulos especializados que oscilan en valores de 3500 y 15000 soles según se señala en su plataforma web (Motive Hitech, 2024). Mientras que, nuestra propuesta puede desarrollarse por menos de 1500 soles, manteniendo la funcionalidad necesaria para fines formativos.

### **1.3.4. Justificación social**

La investigación se realiza porque es necesario fortalecer el vínculo entre la teoría y la práctica en la enseñanza del control automático, brindando a los estudiantes oportunidades reales de interacción con la tecnología. Asimismo, se realiza para que los estudiantes puedan experimentar directamente con tecnologías de control automático y mejorar su formación, proporcionándoles las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos de la industria actual.

A partir de ello, como beneficiarios directos vamos a tener a los estudiantes a quienes se les facilitará la comprensión de conceptos complejos y los docentes ya que tendrán un medio que optimice sus procesos de enseñanza. Indirectamente, la institución se beneficia al alinear su formación con las demandas del mercado laboral, mientras que la comunidad local y regional obtiene profesionales mejor capacitados para afrontar desafíos industriales y tecnológicos que la región requiere.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Implementar un módulo didáctico basado en tecnologías accesibles para la enseñanza de técnicas de control automático, optimizando el aprendizaje práctico en el laboratorio de automatización y control de la Universidad Nacional de Jaén.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- **OE1:** Diseñar un módulo didáctico funcional que integre microcontroladores y actuadores, para controlar un motor DC de manera eficiente y accesible.
- **OE2:** Poner en funcionamiento el módulo didáctico, realizando pruebas prácticas para garantizar su operatividad y efectividad en la enseñanza de técnicas de control automático.
- **OE3:** Elaborar un manual de usuario y guías de laboratorio detalladas, que incluyan procedimientos de instalación, configuración y operación.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1. Motor DC

El motor DC utilizado es 37D 12V/1000RPM con encoder, el cual se compone de: El motor DC, la caja reductora y el encoder de cuadratura el cual nos permite medir parámetros como la velocidad angular. Se seleccionó este motor porque nos permite realizar un control PWM, nos brinda información de velocidad por medio de su encoder y es ideal para enseñar modelamiento a lazo cerrado y PID. Además de trabajar con voltaje seguro y su compatibilidad para hacer uso de un microcontrolador y driver.

#### Figura 1

*Motor DC 12V/1000RPM con encoder*



*Nota.* Obtenido del fabricante

**Tabla 1**

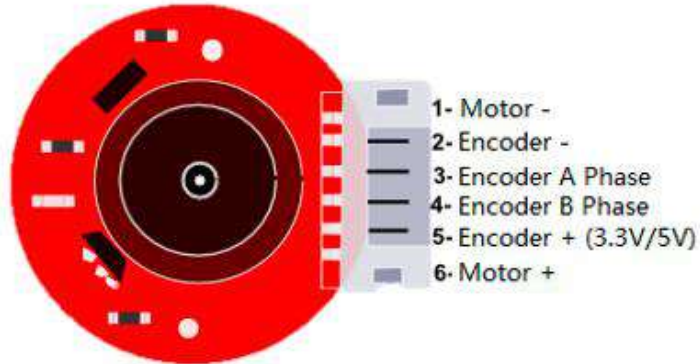
*Especificaciones técnicas del motor 37D 12V/1000RPM con encoder*

<b>Características</b>	<b>Parámetro</b>
Voltaje de alimentación del motor DC (nominal)	12V DC
Voltaje de alimentación del encoder	3.3V - 5V DC
Consumo de corriente sin carga	200mA
Consumo de corriente nominal	1000mA
Consumo de corriente eje detenido	5500mA (Pico)
Velocidad de rotación	1000 RPM (a 12V)
Relación en engranes	1:10
Encoder	Hall de dos fases (cuadratura)
Resolución Encoder	64 PPR
Cuentas por revolución eje salida	640 (ticks/rev)
6 agujeros de montaje roscados	M3
Diámetro exterior	37 mm
Dimensiones	D25mm*L70mm
Peso	165 gramos

*Nota.* En la tabla mostrada se detallan características importantes como los niveles de voltaje en DC, para su conexión. Tomado del fabricante.

**Figura 2**

*Encoder de cuadratura de efecto hall*



*Nota.* En la figura se muestra las conexiones del encoder unido al eje del motor DC.

Tomado del fabricante.

### **2.1.2. Fuente de alimentación DC**

Para alimentar nuestro driver se hizo uso de la fuente DC S-60-12, la cual nos proporciona el voltaje adecuado para que trabaje nuestro actuador. Tal como se aprecia en la figura 3.

**Figura 3**

*Fuente de alimentación DC 12V 5A.*



*Nota.* Tomado del fabricante.

**Tabla 2***Especificaciones técnicas de fuente DC 12V 5A*

<b>Especificación</b>	<b>Parámetro</b>
Voltaje de entrada LN	100-240V AC
Voltaje de salida (GND, +)	12V DC 5A 60W
Protecciones	Sobrecarga/Sobretensión/Cortocircuito
Refrigeración	Por convención de aire libre
Ajuste de voltaje de salida	+V ADJ
Temperatura de trabajo	0 - 40 °C

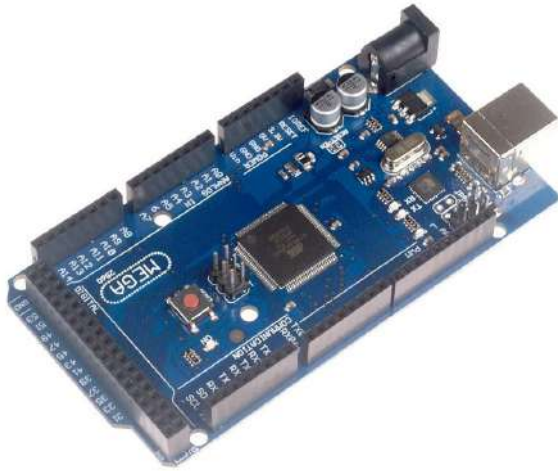
*Nota.* Adaptado del fabricante.

### **2.1.3. Microcontrolador Mega 2560 R3**

Para el control del motor se hizo uso de la tarjeta Arduino Mega 2560 R3 la cual cuenta con entradas analógicas y digitales necesarias para el control del motor DC, además de permitir la comunicación con el driver y computador. Se usó este microcontrolador por su compatibilidad con el software (MATLAB) y porque tiene suficientes pines PWM, analógicos y digitales, lo que permite leer al encoder y sensores en simultaneo.

**Figura 4**

*Arduino Mega 2560 R3*



*Nota.* El microcontrolador se alimenta desde el computador a 5V por medio del conector USB tipo B.

**Tabla 3**

*Especificaciones técnicas de la tarjeta Mega 2560 R3*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valores</b>
Microcontrolador	ATmega2560 (8-bit)
Chip USB	ATmega16U2
Conector USB	Tipo B
Voltaje de operación	5V DC
Voltaje de alimentación	6V - 20V DC (7-12V recomendado)
Pines digitales I/O	54 (15 salidas PWM)
Entradas analógicas	16 (ADC 10-bit)
Corriente entrada/salida por pin	40mA máx

Memoria FLASH	256KB
Memoria SRAM	8KB
Memoria EEPROM	4KB
Dimensiones	108*53*13 mm
Peso	39 gramos

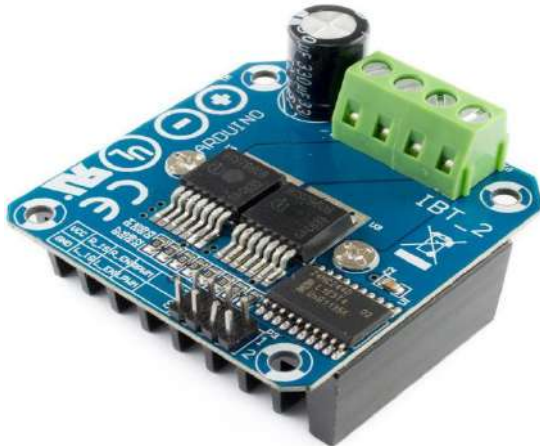
*Nota.* Tomado del fabricante

#### 2.1.4. Driver BTS7960

Este driver se utilizó para alimentar al motor DC a 12 V, así como también nos permite controlar la velocidad por medio de señales PWM por medio del microcontrolador. Cuenta con 8 pines de control y es capaz de controlar 1 motor de hasta 43 A.

#### Figura 5

*Driver puente H BTS7960 43A*



*Nota.* El driver cuenta con capacidad de alimentación de 5.5 hasta 27V en DC para nuestro caso se alimentó con una fuente de 12V en DC lo cual es suficiente para el motor DC.

**Tabla 4**

*Especificaciones técnicas del Driver puente H BTS7960 43A*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valores</b>
Voltaje de alimentación (potencia)	5.5V-27V DC
Voltaje de control	TTL 3.3V/5V
Corriente nominal	43A (picos de hasta 60A)
Corriente recomendada	20A máx.
Máxima frecuencia PWM	25 KHz
Consumo de corriente inactivo	7uA a 25°C
Chip Driver	BTS7960B
Dimensiones	50*50*43 mm
Peso	66 gramos

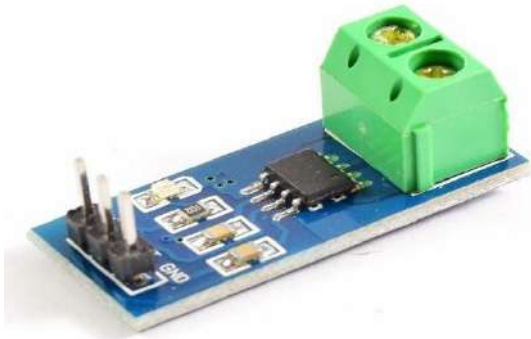
*Nota.* Adicionalmente a las especificaciones mencionadas cuenta con borneras M (salidas para el motor DC) y B (que se alimentan desde la fuente DC). Tomado del fabricante.

#### **2.1.5. Sensor de corriente ACS712T 20A**

Este sensor nos permitió medir la corriente DC que el driver entrega al motor ante las variaciones del valor de referencia (Set Point) a fin de tener un control PID a lazo cerrado. Se escogió este sensor porque su rango de lectura de corriente está dentro de la corriente de operación del motor DC.

## Figura 6

*Sensor de corriente ACS712T 20A*



*Nota.* El sensor en mención cuenta con un pin analógico OUT que se conecta al microcontrolador para la lectura de la corriente medida. Tomado del fabricante.

## Tabla 5

*Especificaciones técnicas del sensor de corriente ACS712T 20A*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valores</b>
Voltaje de alimentación	5 VDC
Rango de sensado de corriente	-20A a +20A
Rango de salida analógica	0.5V a 4.5V (proporcional a la corriente a medir)
Sensibilidad	100 mV/A
Tiempo de respuesta de la salida	5 $\mu$ s
Ancho de banda máximo	80kHz
Dimensiones	32*13*14 mm (l*a*h)
Peso	3.9 gramos

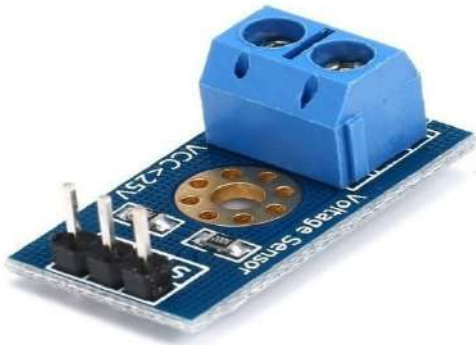
*Nota.* Tomado de la data del fabricante

### 2.1.6. Sensor de voltaje 0-25V DC

Se utilizó este sensor porque está dentro del rango del voltaje de operación, además permite medir en tiempo real la señal de control PWM.

**Figura 7**

*Sensor de voltaje 0-25V DC*



*Nota.* Muestra compatibilidad para alimentarse a 5V DC desde el microcontrolador.

Tomado de la data del fabricante.

**Tabla 6**

*Especificaciones técnicas del sensor de voltaje de 0-25V DC*

Especificaciones	Valores
Tipo	Sensor de Voltaje
Rango de Entrada de Voltaje (VCC)	DC 0-25V
Rango de Detección de Voltaje	DC 0.02445V – 25V
Resolución Analógica de Voltaje	0.00489 V

Tipo de Salida	Analógica
Conector de Medición	Block de dos tornillos para conexión segura
(S) Señal analógica	Conecta al pin analógico del microcontrolador (5V o 3.3V)

*Nota.* Adaptado de la data del fabricante

### 2.1.7. Multímetro digital TTP-299 TESTECHpro

Este instrumento nos permite realizar mediciones en DC y AC en este proyecto se utilizó para medir parámetros como la resistencia a la armadura del motor DC e inductancia.

**Figura 8**

*Multímetro digital TTP-299 TESTECHpro*



*Nota.* Este instrumentó permite realizar mediciones de inductancia. Tomado del fabricante.

**Tabla 7**

*Especificaciones técnicas del Multímetro digital TTP-299 TESTECHpro*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valores</b>
<b>Voltaje DC</b>	200mV – 1000V
<b>Voltaje AC</b>	2 - 750V
<b>Resistencia</b>	0 - 20M $\Omega$
<b>Henrios (H)</b>	20mH ~ 20H
<b>Pantalla (LCD)</b>	2000 cuentas
<b>Alimentación</b>	9V(pila)

*Nota.* Adaptado del fabricante.

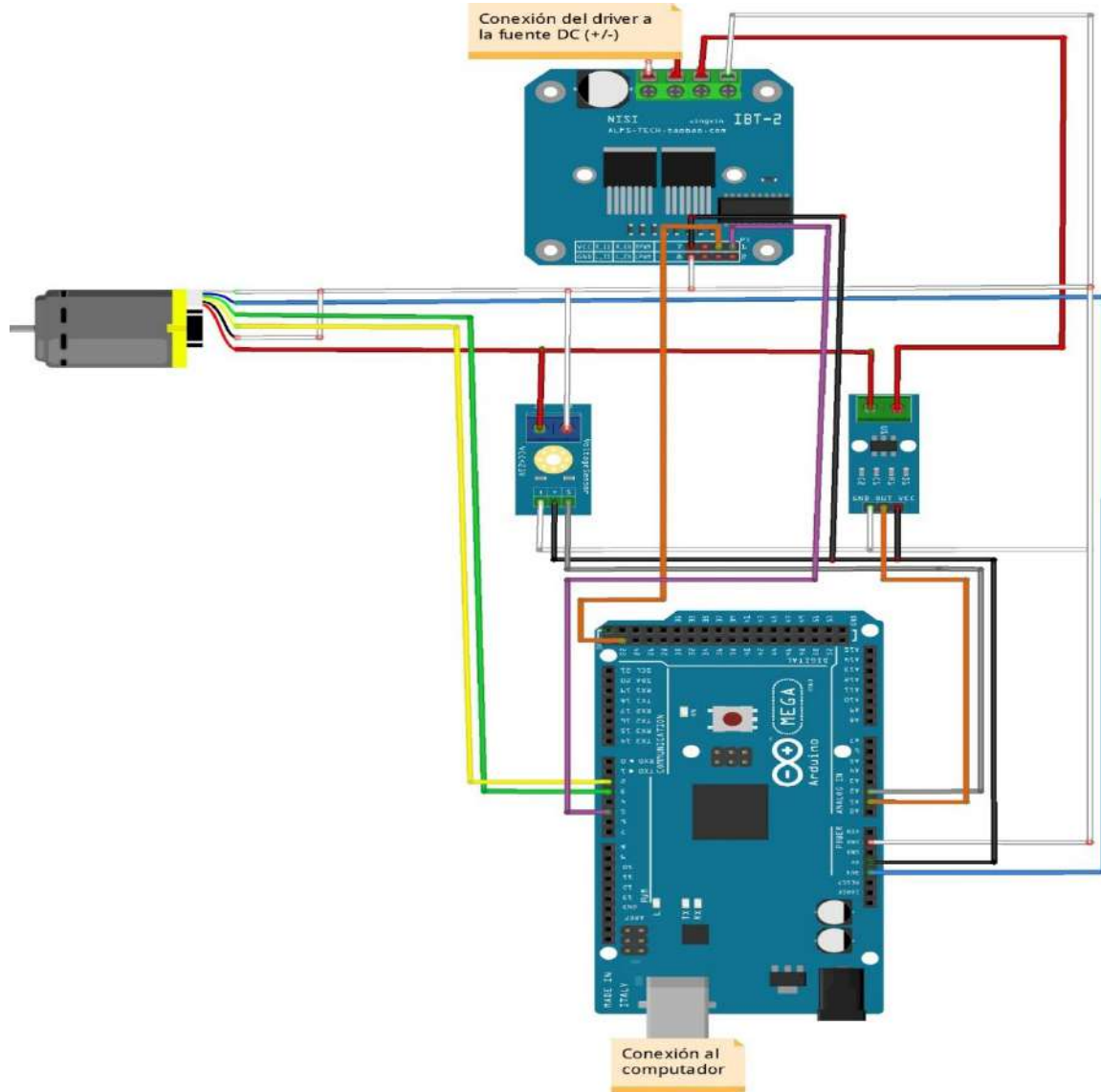
### **2.1.8. Licencias de software**

Para la redacción del informe final se usó el paquete de Microsoft Office de Google Docs. Para el conexionado del circuito eléctrico-electrónico del sistema se utilizó softwares como: Fritzing y KiCad. Por su parte, en el desarrollo del controlador de velocidad del motor DC se usó de Matlab/Simulink con licencia versión prueba estudiantil. Finalmente, para el diseño del módulo se utilizó FreeCad.

### 2.1.9. Diagrama eléctrico de conexiones.

**Figura 9**

*Diagrama eléctrico de las conexiones del prototipo.*



*Nota.* El diagrama eléctrico se presenta en formato ideal para claridad conceptual; sin embargo, en la implementación real se consideraron efectos no ideales como ruido industrial, caídas internas del driver y variaciones en sensores, los cuales fueron incorporados durante la identificación mediante PRBS.

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Variables de estudio

**Tabla 8**

*Variables comprometidas en el sistema.*

<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>
<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>	
<b>RPM</b>	Indica la cantidad de rotaciones que realiza el motor DC por minuto.
<b>Parámetros de rendimiento:</b> $K_p, T_i$ y $T_d$ .	Parámetros ajustables para sintonizar el comportamiento del lazo de control ejecutado. <ul style="list-style-type: none"><li>- <math>K_p</math>: Ganancia proporcional</li><li>- <math>T_i</math>: Integral</li><li>- <math>T_d</math>: Derivativo</li></ul>
<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>	
<b>Set point o punto de ajuste (SP)</b>	Valor deseado de una variable en un sistema de control.
<b>Perturbación externa (N)</b>	Referido a efectos externos que afectan al sistema: ambiente, cortes de energía, entre otros.

*Nota.* Elaboración propia.

### 2.2.2. Métodos

La investigación se llevará a cabo en base a ciertos enfoques por lo que de acuerdo al propósito y finalidad es **aplicada**, según Arias (2020) “este tipo de investigación, a través de la teoría se enfoca en abordar problemas prácticos fundamentándose en los hallazgos, descubrimientos y soluciones que se establecieron en los objetivos del estudio” (p.43), es por ello que se lleva a cabo el desarrollo de un módulo didáctico con el fin de resolver problemas prácticos y brindar soluciones con respecto a los objetivos trazados.

Por consiguiente, de acuerdo a los medios que se utilizará para obtener datos será **experimental**, ya que en esta investigación implica la recolección de datos, manipulación de variables y el análisis de resultados obtenidos a partir de la data de los RPM del motor en cuestión. Tal como señala en su artículo Ramos (2021) “Se distingue por la intervención deliberada en la variable independiente y el estudio de sus efecto sobre una variable dependiente” (p.1)

Por otra parte, tendrá un diseño **cuantitativo**, según Neill y Suárez (2018) “es la que se fundamenta en los aspectos numéricos para investigar, analizar y verificar información y datos” (p.69). Debido a la interacción con datos experimentales por medio de las variables involucradas en el desarrollo del módulo didactico, el diseño se ajusta al mencionado anteriormente.

Para llevar a cabo la implementación del módulo de enseñanza de técnicas de control automático se llevó a cabo los siguientes pasos:

## **OE1: Diseño del módulo didáctico**

### ***a. Información para el diseño del módulo***

- Se realizó la investigación sobre los conceptos y teorías clave relacionados con técnicas de control automático, como el control PID, sistemas de lazo abierto y cerrado, entre otros.
- Se investigó y seleccionó las tecnologías de bajo costo disponibles en Perú, como Arduino u otras alternativas económicas que sean adecuadas para el módulo.
- Se obtuvo información detallada (especificaciones técnicas), sobre los componentes utilizados como sensores, motor dc, driver, entre otros.
- Se buscó ejemplos de proyectos prácticos que involucren el uso de control automático en aplicaciones del mundo real.

Recopilando esta información, se tuvo una base para iniciar el diseño del módulo. También ayudó a definir los objetivos de aprendizaje, los contenidos, las estrategias de enseñanza y los recursos necesarios.

### ***b. Temas del módulo***

- Técnicas de control a lazo abierto y cerrado.
- Señales PWM (Pulse Width Modulation).
- Control de motores DC con Arduino Mega 2560 y drivers.
- Control PID (Proporcional – Integral – Derivativo).
- Modelamiento por identificación con MATLAB.

***c. Componentes a utilizar***

- Motor Ø - DC (12V)
- Arduino Mega 2560.
- Driver para motor DC.
- Sensor de corriente y voltaje.
- Fuente DC
- Estructura Soporte.

***d. Elaboración de diagramas, esquemas y planos.***

Para la elaboración de los diagramas, esquemas y planos del módulo se tuvo en cuenta los siguientes niveles:

▪ **Nivel de Control y Monitoreo:**

- Arduino Mega 2560.
- Simulink – MATLAB.
- Sensor de corriente y voltaje.

▪ **Nivel de Control de Velocidad:**

- Driver para motor DC.
- Encoder.

**OE2: Puesta en funcionamiento**

***a. Compra de equipos.***

La adquisición de los equipos fue realizada con previa investigación de las especificaciones técnicas de cada componente.

***b. Configuración y ajustes.***

Se procedió a la configuración y los ajustes de los equipos previa verificación de la compatibilidad entre los dispositivos, para después dar paso a la programación por medio del software MATLAB.

***c. Realización de pruebas.***

Posterior a ello, se realizó las pruebas necesarias de los equipos que permitieron verificar su buen funcionamiento, y a su vez se logró obtener los datos recopilados de este sistema y se ejecutó en Simulink de MATLAB.

***d. Validación de parámetros experimentales.***

Para reducir la subjetividad en la obtención de parámetros eléctricos del motor en especial la inductancia  $L$ , que presenta variabilidad debido a las limitaciones del instrumento, se realizaron varias mediciones en diferentes condiciones de funcionamiento, verificando que los valores obtenidos fueran consistentes entre sí. Además, dichos valores se contrastaron con la respuesta observada durante la identificación PRBS, asegurando que reflejen adecuadamente el comportamiento real del sistema.

**OE3: Elaboración de manual de usuario y guías de laboratorio**

Para la elaboración del manual de usuario y las guías de laboratorio, se inició con una especificación de los temas tratados en el proceso de formación como ingenieros mecánicos eléctricos donde es necesario el desarrollo teórico – práctico ya que a partir de estos temas se procedió a la selección y puesta en funcionamiento de los circuitos, así como también de la interfaz de Simulink – MATLAB que facilitó un

práctico acceso y medición de las variables de todo el circuito. Además, con el objeto de realizar la implementación de un módulo didáctico para la enseñanza de técnicas de control automático y mejorar las habilidades y destrezas en programación relacionadas al control de velocidad de un motor DC para los estudiantes de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, el manual se desarrolló en función de una secuencia de prácticas a través de los equipos e interconexiones, que a su vez permitió concluir que el módulo didáctico estará conformado por una serie de características para el cumplimiento de actividades teórico - prácticas orientadas al estudio de la automatización industrial, entre otros. El módulo se desarrolló en base a temáticas como: técnicas de control de lazo abierto y cerrado, control de motores DC, programación de Arduino Mega 2560, control PID, modelamiento por identificación.

### III. RESULTADOS

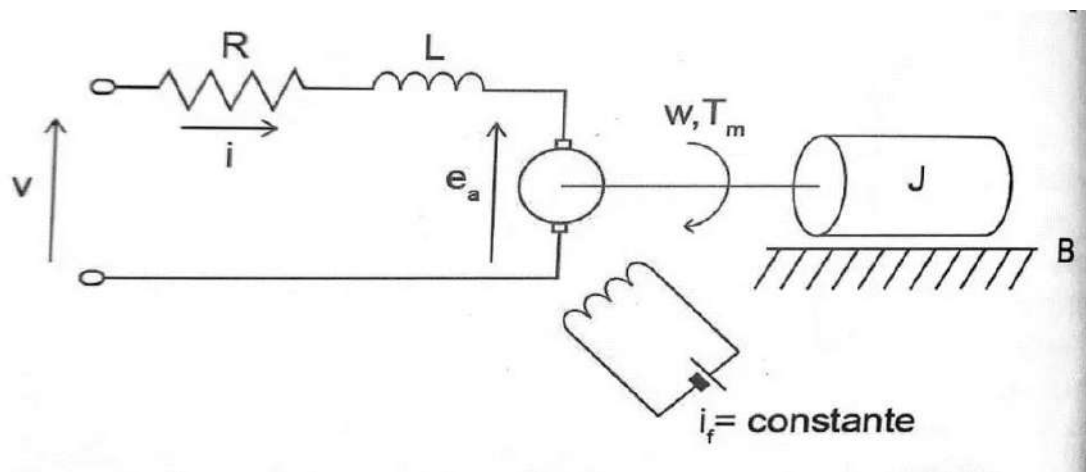
#### 3.1. Modelamiento matemático

El modelamiento matemático es una herramienta muy importante en la ingeniería moderna, pues nos permite representar sistemas físicos reales en expresiones numéricas que describen la dinámica de un sistema. Este enfoque facilita la base para aplicar metodologías de control automático haciendo uso de softwares lo que contribuye a integrar la teoría con la práctica. Los modelos matemáticos permiten a los ingenieros de control desarrollar una teoría de control unificada. En ingeniería de control, se usan ecuaciones diferenciales lineales, invariantes en el tiempo, funciones de transferencia y ecuaciones de estado, para modelos matemáticos de sistemas lineales, invariantes en el tiempo y de tiempo continuo. (Almidon & Julian, 2017, pág. 11)

El modelado del motor de corriente continua (DC) parte de su representación electromecánica como se indica en la figura 10 donde se muestran los principales parámetros descritos en la tabla 9.

**Figura 10**

*Modelo electromecánico del motor DC.*



Nota: La armadura del motor DC se modela como si tuviera una resistencia constante R en serie con una inductancia constante L que representa la inductancia de la bobina de la armadura, y una fuente de alimentación V que representa la tensión generada en la armadura.

**Tabla 9**

*Parámetros del motor DC*

Parámetros	Símbolos	Unidades SI
Voltaje de entrada	V	V
Resistencia del Motor	R	$\Omega$
Inductancia	L	H
Fuerza electromotriz	$E_a$	V
Velocidad angular	$\omega$	$\frac{rad}{s}$
Torque	$T_m$	Nm
Momento de inercia	J	$kg.m^2$
Coeficiente de fricción	B	N.m.s
Constante electromotriz	$K_a$	$\frac{V}{rad.s}$
Constante de torque	$K_m$	$\frac{N.m}{A}$

Nota: Adaptado de “Modelado Matemático, Simulación e Implementación de Pruebas en un Motor DC labvolt”, por (Falcon y otros, 2022)

### 3.2. Modelamiento matemático con ecuaciones diferenciales

Según (Castaño, 2019) se utilizan las siguientes formulas descritas líneas bajo.

Realizando un análisis de mallas al circuito de la figura 10 se obtiene la siguiente ecuación:

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + E_a(t)$$
$$L \frac{di(t)}{dt} = V(t) - Ri(t) - E_a(t) \quad (1)$$

Donde:

$V(t)$  : Voltaje

$R$  : Resistencia

$L$  : Inductancia

$E_a$  : Fuerza electromotriz

$I(t)$  : Corriente

En un motor de corriente directa (CD), la potencia mecánica generada por el rotor se transfiere principalmente a la carga mecánica que está acoplada a su eje. Sin embargo, no toda esa potencia es útil, ya que una porción se pierde debido a varios factores internos del motor: Pérdidas eléctricas, la resistencia del devanado (bobina) del rotor consume energía (pérdidas por efecto Joule). Pérdidas magnéticas la histéresis y las corrientes parásitas (o de Foucault) en el núcleo de hierro del motor disipan energía, Pérdidas mecánicas, La fricción en los cojinetes y el aire (rozamiento) consume potencia. Según ello la ecuación del modelo mecánico estaría dado por la ecuación (2):

$$T_m(t) = J \frac{dw(t)}{dt} + BW(t)$$

$$J \frac{dw(t)}{dt} = T_m(t) - BW(t) \quad (2)$$

Donde:

J : Momento de inercia

$T_m(t)$  : Torque del motor

B : Coeficiente de fricción

$W(t)$  : Velocidad angular

$\frac{dw(t)}{dt}$  : Aceleración angular

Para lograr vincular las ecuaciones antes mencionadas se establece una relación de proporcionalidad  $K_a$  constante electromotriz  $\frac{V}{rad.s}$  la cual establece que la fuerza electromotriz  $E_a(t)$  es directamente proporcional a la velocidad angular  $W(t)$  del eje del motor.

$$E_a(t) = K_a W(t) \quad (3)$$

Y se asume la relación electromecánica de proporcionalidad,  $K_m$  (constante de torque mecánico  $\frac{N.m}{A}$ ), la cual establece que el torque mecánico es directamente proporcional a la corriente eléctrica que circula por el motor DC.

$$T_m(t) = K_m i(t) \quad (4)$$

### 3.3. Modelamiento con funciones transferencia

La función transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal invariante en el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero. (Ogata, 2003)

Las funciones de transferencia son expresiones algebraicas que se caracterizan por relacionar la entrada con la salida de sistemas cuyo comportamiento no cambia en el tiempo, en teoría de control son de vital importancia porque permiten analizar, modelar y diseñar.

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones para las ecuaciones (1), (2), (3), y (4) tenemos:

$$\mathcal{L}\left[L \frac{di(t)}{dt}\right] = \mathcal{L}[V(t) - Ri(t) - E_a(t)] \rightarrow LSi(s) = V(s) - Ri(s) - E_a(s) \quad (5)$$

$$\mathcal{L}\left[J \frac{dw(t)}{dt}\right] = \mathcal{L}[T_m(t) - BW(t)] \rightarrow JSW(s) = T_m(s) - BW(s) \quad (6)$$

$$\mathcal{L}[E_a(t)] = \mathcal{L}[K_m i(t)] \rightarrow E_a(s) = K_a W(s) \quad (7)$$

$$\mathcal{L}[T_m(t)] = \mathcal{L}[K_m i(t)] \rightarrow T_m(s) = K_m i(s) \quad (8)$$

Reemplazamos la ecuación (7) y la ecuación (8) en (5)

$$LS \frac{T_m(s)}{K_m} = V(s) - R \frac{T_m(s)}{K_m} - K_a W(s)$$

$$V(s) = R \frac{T_m(s)}{K_m} + LS \frac{T_m(s)}{K_m} + K_a W(s)$$

$$V(s) = (R + LS) \frac{T_m(s)}{K_m} + K_a W(s) \quad (9)$$

De la ecuación (6) Obtenemos el torque

$$T_m(s) = (JS + B)W(s) \quad (10)$$

Luego la reemplazamos en (9)

$$\begin{aligned} V(s) &= (R + LS) \frac{T_m(s)}{K_m} + K_a W(s) \\ V(s) &= (R + LS) \frac{[(JS + B)W(s)]}{K_m} + K_a W(s) \\ V(s) &= \frac{[LJs^2 + (RJ + LB)S + RB]W(s) + K_m K_a W(s)}{K_m} \\ V(s) &= \frac{[LJs^2 + (RJ + LB)S + RB] + K_m K_a}{K_m} (W(s)) \end{aligned} \quad (11)$$

Luego de despejar la ecuación (11) podemos obtener la función transferencia que relaciona la velocidad angular respecto al voltaje de entrada.

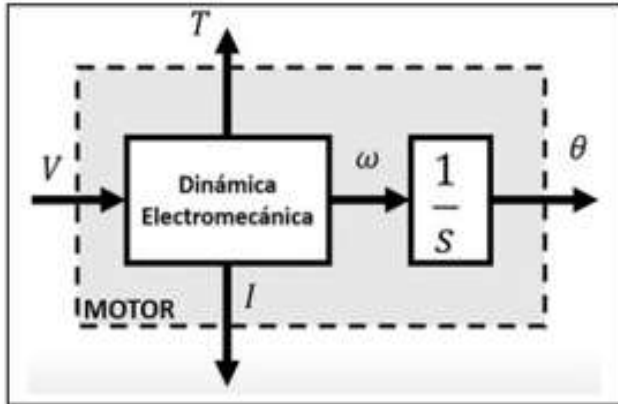
✓ **Función de transferencia de velocidad angular con relación al voltaje**

$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{LJs^2 + (RJ + LB)S + RB + K_a K_m} \quad (12)$$

Es importante señalar que en un sistema de control del motor DC se pueden obtener diferentes salidas como respuesta a una entrada, para este caso ante la entrada de voltaje se obtiene como respuesta las salidas de torque, corriente, velocidad angular y si se integra se puede obtener la posición. Para este caso de estudio solo se va a evaluar la velocidad angular respecto al voltaje.

**Figura 11**

*Diagrama de bloques del funcionamiento del motor DC*



*Nota:* Tomado de “Modelado Matemático, Simulación e Implementación de Pruebas en un Motor DC labvolt” por (Falcon y otros, 2022)

### 3.4. Medición de parámetros

#### 3.4.1. Resistencia a la armadura (R)

Para determinar la medida de resistencia a la armadura R del motor de 12V se tomó en cuenta los devanados (terminales 1y 6) de la figura 2, para lo cual se realizó haciendo uso de las puntas de prueba del multímetro digital.

**Figura 12**

*Resistencia a la armadura R del motor DC*



*Nota:* Para realizar la medición de la resistencia a la armadura no debe estar energizado el motor.

Donde se puede observar que la resistencia a la armadura es:  $R = 5.5\Omega$

### 3.4.2. Inductancia a la armadura (L)

Para realizar la medición de la inductancia L se ubica el selector en unidades de henrios, puede ser medida directamente en los devanados del motor al igual que la medida realizada para la resistencia con el multímetro digital.

**Figura 13**

*Inductancia del motor DC*



*Nota:* Este parámetro suele ser medido con un inductómetro, pero en este caso solo se cuenta con el multímetro digital, el cual también tiene la opción de medir inductancia.

En la imagen mostrada, se puede observar que la inductancia es:  $L = 4.28mH = 0.0043H$

### 3.4.3. Voltaje (V)

Para el voltaje se tomó en cuenta la data obtenida del sistema de control a lazo cerrado donde se observa que durante la velocidad máxima 176 RPM el voltaje alcanzado es de 12.4 hasta estabilizarse llegando a 12.2 V.

**Figura 14**

*Datos de voltaje del motor DC.*

10.45	176	12.30547333
10.5	176	12.30498409
10.55	176	12.30498314
10.6	176	12.3044939
10.65	176	12.30547142
10.7	176	12.30400562
10.75	176	12.3044939
10.8	176	12.21749592
10.85	176	12.46822834
10.9	176	12.21749496
10.95	176	12.21456242
11	176	12.21602917
11.05	176	12.21407318
11.1	176	12.2150507
11.15	176	12.21260738
11.2	176	12.21456242
11.25	176	12.21309662
11.3	176	12.21407509
11.35	176	12.21260929
11.4	176	12.21407509
11.45	176	12.21260929

*Nota:* Data obtenida de voltaje mediante simulación del motor físico.

Considerando la data mostrada y teniendo en cuenta que nuestra fuente entrega 12V aprox. al driver BTS7960 se va a considerar 12.2V, que es donde se logra estabilizar el voltaje del sistema.

### 3.4.4. Velocidad angular (W)

Para la velocidad angular se consideró la data del sistema de lazo abierto donde se observa los PWM máximo a 8 bits para lo cual se obtiene la velocidad máxima aproximada 176 RPM, para considerar valores sin decimales.

#### Figura 15

*Velocidad del motor DC obtenido a 255 PWM(8bits)*

15.6	255	176.25
15.65	255	176.25
15.7	255	176.25
15.75	255	176.25
15.8	255	175.78125
15.85	255	176.25
15.9	255	176.25
15.95	255	176.25
16	255	176.25
16.05	255	176.25
16.1	255	176.25
16.15	255	176.71875
16.2	255	176.25
16.25	255	176.25
16.3	255	176.25
16.35	255	176.71875
16.4	255	176.25
16.45	255	176.25

*Nota:* Data obtenida de RPM mediante simulación del motor físico.

Realizando una conversión de RPM a rad/s tenemos que

$$W = 176 \frac{rev}{min} = 18.4 \frac{rad}{s}$$

### 3.4.5. Corriente del motor sin carga (I)

Para la corriente consumida por el motor se observa que el valor de corriente se estabiliza en 0.15 A aprox.

## Figura 16

*Corriente del motor sin carga DC obtenida a Máxima velocidad*

10.9	176	0.157380104
10.95	176	0.157380104
11	176	0.156402588
11.05	176	0.153470039
11.1	176	0.155425072
11.15	176	0.153470039
11.2	176	0.154447556
11.25	176	0.151515007
11.3	176	0.152492523
11.35	176	0.154447556
11.4	176	0.154447556

*Nota.* Data obtenida de corriente mediante simulación del motor físico.

### 3.4.6. Constante electromotriz $K_a$ y de torque $K_m$

Para el cálculo de  $K_a$  tomamos en cuenta la relación de proporcionalidad de la ecuación (3)

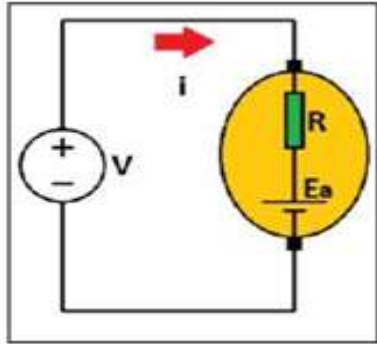
$$E_a(t) = K_a W(t)$$

$$K_a = \frac{E_a(t)}{W(t)}$$

Si consideramos el circuito equivalente donde el motor representado por la resistencia de armadura y la fuerza electromotriz, aplicando la ley de Kirchhoff al circuito mostrado se tiene que:

**Figura 17**

*Circuito equivalente del motor DC*



*Nota.* Adaptado de (Falcon y otros, 2022)

aplicando la ley de Kirchoff al circuito mostrado se tiene que:

$$E_a = V - IR$$

Reemplazamos  $E_a$  en la ecuación (3) donde se despejo la constante electromotriz

$K_a$  se obtiene que:

$$K_a = \frac{V - IR}{W(t)}$$

Donde:

$K_a$  : Constante electromotriz

V : Voltaje

I : Corriente a la armadura consumida por el motor A.

$W(t)$  : Velocidad angular  $\frac{rad}{s}$

$$K_a = \frac{(12.2V) - (0.15A)(5.5\Omega)}{(18.5rad.s)}$$

$$K_a = 0.61 \frac{V}{rad.s}$$

En el sistema internacional (SI)  $K_a = K_m$  son iguales siempre y cuando las unidades sean las especificadas en la tabla 8, valido para motores DC.

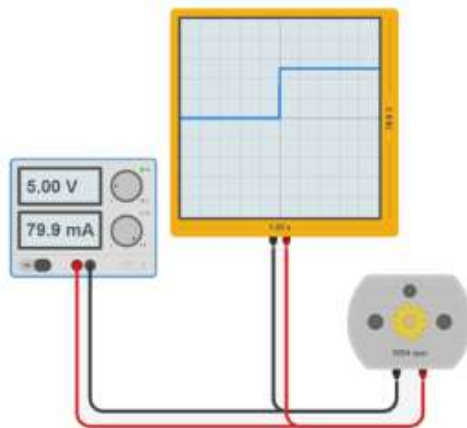
$$K_a = K_m = 0.61 \frac{Nm}{s}$$

### 3.4.7. Constante de tiempo mecánica $t_m$

Debido a la relación directa entre la tensión de armadura y la velocidad del eje del motor, al momento de aplicarle un escalón de voltaje al motor, podemos observar una respuesta transitoria de velocidad para condiciones de carga fija. A partir de esta respuesta podemos encontrar la constante de tiempo, el cual es el 63.2% del crecimiento de la dinámica hasta llegar al estado estable. (Castaño, 2019)

#### Figura 18

*Conexionado del osciloscopio*



*Nota.* Tomado de (Castaño, 2019)

Para este parámetro se va a tomar como referencia la investigación de (Montoya y Rimapa, 2024) el cual es un motor DC de 12V con similares características para ello se va a tomar el 63.2% de 12V en cual seria 7.584V como

cambio de velocidad ante ello se toma un valor de la constante de tiempo mecánica de  $t_m = 0.021s$

### 3.4.8. Momento de inercia J

$$J = \frac{t_m \times K_a \times K_m}{R}$$

Donde:

$t_m$  : Constante de tiempo mecánica (s)

$K_a$  : Constante electromotriz ( $\frac{V}{rad.s}$ )

$K_m$  : Constante de torque  $\frac{Nm}{A}$

$W(t)$  : Velocidad angular  $\frac{rad}{s}$

$$J = \frac{0.021s \times (0.61)^2}{5.5}$$

$$J = 0.001421 \text{ kg}/m^2$$

### 3.4.9. Corriente de arranque $i_{arr}$

Para la corriente de arranque del motor variamos las PWM de entrada hasta que el eje del motor empieza a girar y notamos que alcanza un valor de  $i_{arr} = 0.011 A$

### Figura 19

*Corriente de arranque del motor DC*



*Nota.* Dato obtenido mediante arranque de motor y visualizado en pantalla lcd.

### 3.4.10. Torque de fricción $T_f$

Para el torque de fricción generado por el motor sin carga está dado por:

$$T_f = K_m \times i_{arr}$$

Donde:

$K_m$  : Constante de torque  $\frac{Nm}{A}$

$i_{arr}$  : Corriente de arranque A

$$T_f = 0.61 \times 0.011$$

$$T_f = 0.00671Nm$$

### 3.4.11. Torque del motor $T_m$

Para este parámetro hacemos uso de la ecuación (4) señalada anteriormente.

$$T_m = K_m i$$

Donde:

$K_m$  : Constante de torque  $\frac{Nm}{A}$

$i$  : Corriente del motor sin carga A

$$T_m = 0.61 \times 0.15$$

$$T_m = 0.1Nm$$

### 3.4.12. Constante de fricción de coulomb (B)

Este parámetro se da cuando el motor DC alcanza una velocidad constante, Considerando la ecuación (2) y colocando las ecuaciones derivadas en cero obtenemos que:

$$J \frac{dw(t)}{dt} = T_m(t) - BW(t)$$

$$BW(t) = T_m(t)$$

$$B = \frac{T_m}{W}$$

Dado que estamos considerando la constante de fricción le adicionamos al toque.

$$B = \frac{T_m - t_f}{W}$$

Donde:

$T_m$  : Torque mecánico (Nm)

$t_f$  : Torque de fricción (Nm)

$W(t)$  : Velocidad angular  $\frac{rad}{s}$

$$B = \frac{0.1 - 0.00671}{18.5}$$

$$B = 0.005 \text{ N.m.s}$$

### 3.4.13. Valores obtenidos de las mediciones

Parámetros del motor DC 12V/1000RPM con encoder.

**Tabla 10**

*Resumen de los parámetros obtenidos del motor DC con encoder*

Parámetro	Símbolo	valor
Resistencia a la armadura	R	5.5Ω
Inductancia a la armadura	L	0.0043H
Voltaje	V	12.2V
Velocidad angular	W	18.4 rad/s
Corriente del motor sin carga	I	0.15 A
Constante electromotriz	$K_a$	0.61 V/rad. s
Constante de torque	$K_m$	0.61 Nm/A
Constante de tiempo mecánica	$t_m$	0.021s
Momento de inercia	J	0.001421 $kg/m^2$
Corriente de arranque	$i_{arr}$	0.011 A
Torque de fricción $T_f$	$T_f$	0.00671Nm
Torque del motor	$T_m$	0.1Nm
Constante de fricción de coulomb	B	0.005N. m. s


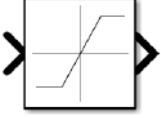
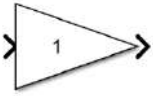
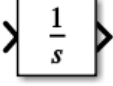
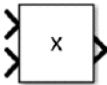
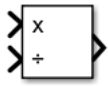
*Nota.* Los parámetros mostrados se calcularon a partir de expresiones algebraicas y algunos instrumentos de medición.





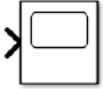



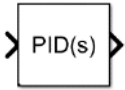
### 3.5. Implementación del sistema teórico en Matlab/Simulink

Para la implementación del sistema teórico (Modelo Matemático) del motor DC, se hizo uso de la lógica de bloques que nos proporciona Simulink/Matlab. En estos bloques, se pueden apreciar la implementación mediante ecuaciones diferenciales y mediante funciones de transferencia. Mediante la siguiente tabla se puede ver la leyenda de los bloques utilizados en este sistema.

**Tabla 11**

*Leyenda del diagrama de bloques teórico.*

Nombre	Descripción	Bloque
<b>Add</b>	Se usa para restar y sumar señales de entrada.	
<b>Saturation</b>	Se usa para limitar una señal a un rango máximo y mínimo.	
<b>Gain</b>	Se usa para multiplicar una señal por una constante.	
<b>Integrator</b>	Se usa para acumular los valores de una señal a lo largo del tiempo.	
<b>Product</b>	Se usa para multiplicar señales o valores.	
<b>Divide</b>	Se usa para dividir señales o valores.	

<b>Outport</b>	Se usa para enviar una señal de salida desde un subsistema o modelo al exterior.	
<b>Inport</b>	Se usa para recibir señales de entrada desde fuera de un subsistema o del modelo principal.	
<b>Mux</b>	Se usa para unir varias señales en una sola línea.	
<b>Display</b>	Sirve para visualizar la señal en tiempo real, mientras corre la simulación.	
<b>Scope</b>	Sirve para visualizar gráficamente las señales durante la simulación.	
<b>Constant</b>	Se usa para dar un valor numérico fijo.	
<b>Sum</b>	Se usa para sumar y restar varias señales de entrada.	
<b>Zero - Order Hold</b>	Permite tomar una señal continua y mantener su valor fijo por un momento hasta leer el siguiente dato.	
<b>PID Controller (s)</b>	Ajusta la salida de un sistema para mantener la variable controlada cerca del valor	

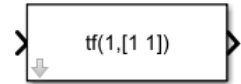
deseado, usando 3 acciones: proporcional

(P), integral (I) y derivativa (D).

En este caso, se usa para cargar una planta

**LTI System**

del sistema simulado.

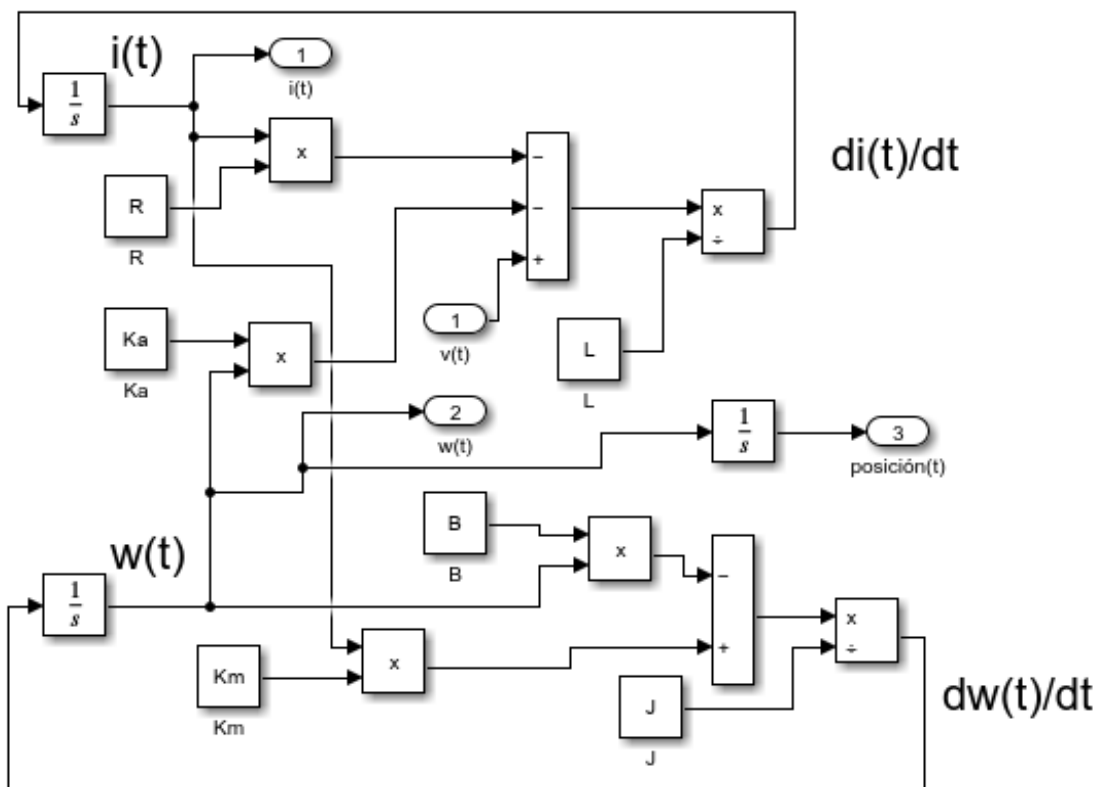


*Nota.* Bloques utilizados en el desarrollo del sistema teórico en Simulink – MATLAB.

Para las ecuaciones diferenciales se realizó en base a la siguiente lógica de bloques que se muestra en la siguiente figura:

**Figura 20**

*Diagrama de bloques de las Ecuaciones Diferenciales.*



*Nota.* Se muestra la lógica de bloques en Simulink/MATLAB a partir de las ecuaciones mencionadas anteriormente.

Cabe señalar que, para cargar los valores de los parámetros mostrados en la imagen anterior, se sube un script a la ventana principal de MATLAB conjuntamente con los valores de la función transferencia calculada en la ecuación (12).

## Figura 21

*Script con los valores de los parámetros del motor DC.*

The image shows a screenshot of a MATLAB script editor window titled "Parametros\_Motor.m". The script contains MATLAB code for defining motor parameters and a transfer function. The code is as follows:

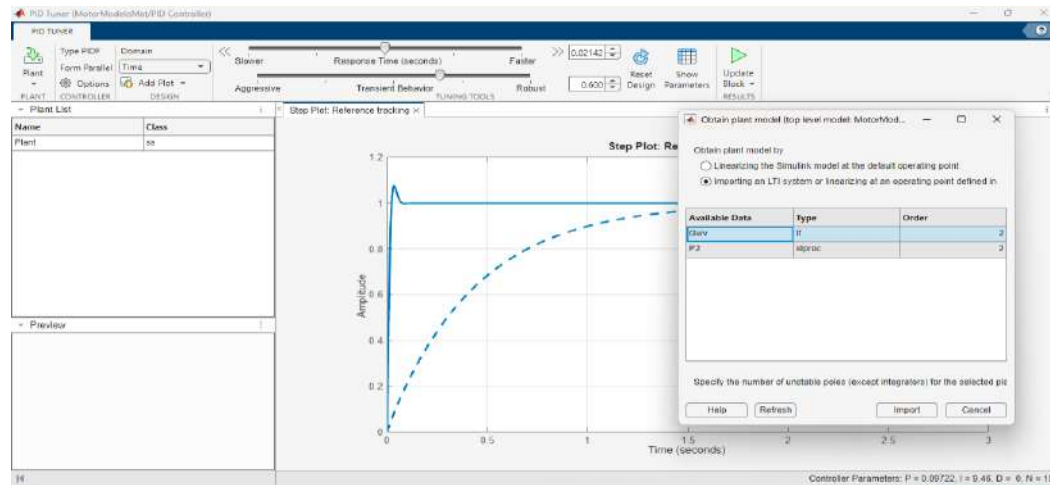
```
1 %% Modelo Matematico de Motor DC
2 clc
3 clear all
4 close all
5
6 % momento de inercia del rotor:
7 J=0.0014544; % Kg.m^2
8 % constante de fricción viscosa del motor:
9 B=0.0046546; % N.m.s
10 % fuerza electromotriz constante:0.001773
11 Ka=0.6171761; %V/rad/s
12 % par motor constante:
13 Km=Ka; % N.m/A
14 % resistencia eléctrica:
15 R=5.5; %Ω
16 % inductancia eléctrica:
17 L=4.3e-3;
18 %Voltaje Leido en los Terminales del motor
19 Vm=12.2;
20
21
22 %% Función de transferencia
23 den = [L*J R*J+L*B R*B+Km*Ka];
24
25 %Velocidad angular
26 Gwv = tf(Km,den);
27
28 sim('MotorModeloMat.slx')
```

*Nota.* Se muestra el script donde se cargan los parámetros calculados y paralelamente la función transferencia bajo la denominación Gwv para cargarse en la pantalla principal de MATLAB.

Una vez cargado el script se agrega en el workspace de MATLAB un archivo que contiene el modelo de la función transferencia “Gwv” en base a esta planta se realizó el hallazgo del sistema de control mediante el PID Tuner.

**Figura 22**

*Ventana de PID Tuner.*

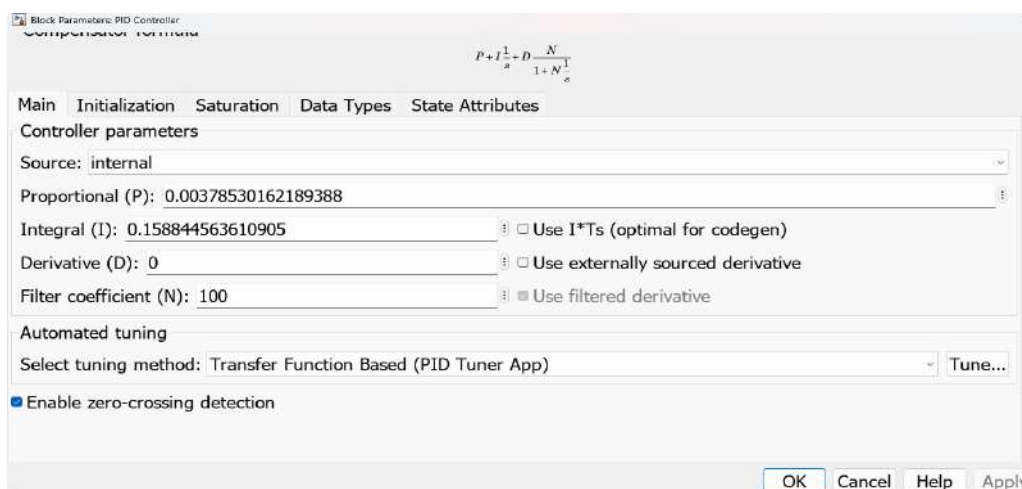


*Nota.* La ventana de PID Tuner donde se ajuste su comportamiento al sistema físico real.

En esta ventana se ajusta el comportamiento de la curva del modelo matemático para que tenga un comportamiento cercano al modelo real. Al ajustar el sistema los parámetros del PID serán los siguientes mostrados:

**Figura 23**

*Parámetros PID del modelo matemático.*

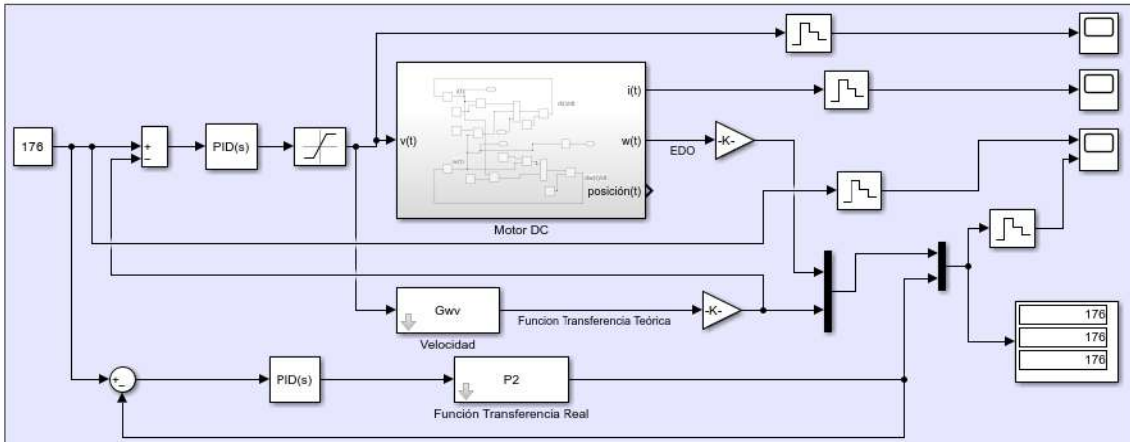


*Nota.* Se muestra los parámetros PID y el filtro coeficiente ajustados del sistema teórico.

Entonces, el modelo matemático del motor DC en función a la lógica de bloques quedó de la siguiente manera:

**Figura 24**

*Diagrama de bloques del modelo matemático en Matlab/Simulink.*



*Nota.* Diagrama de bloques teórico con ecuaciones diferenciales y función transferencia.

### 3.5.1. Resultados gráficos del modelo matemático

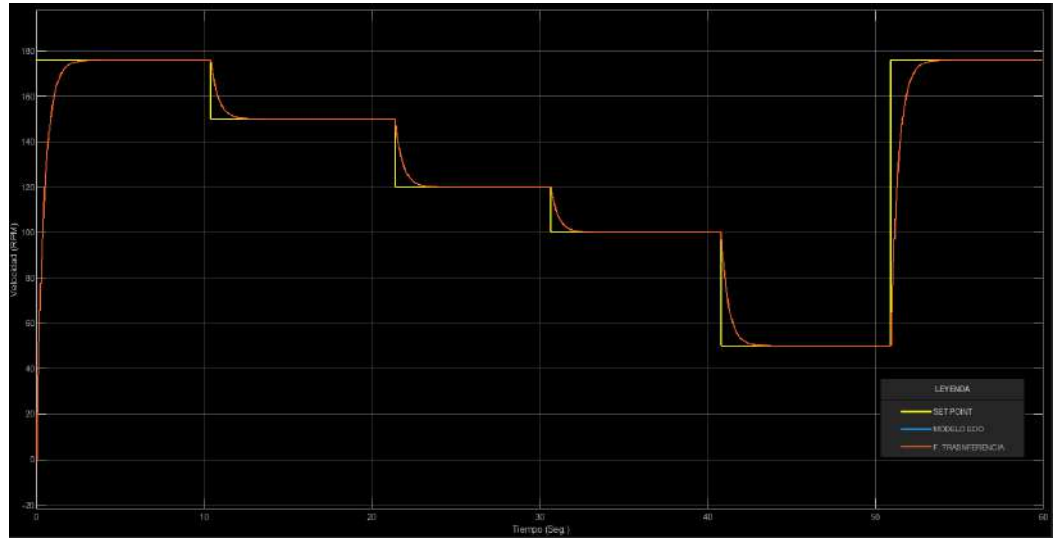
Se realizó una simulación de 60 segundos y durante ese tiempo se efectuó una variación de Set Point para ver numéricamente el comportamiento de los parámetros involucrados (ver anexo 06) y gráficamente la respuesta del sistema (Figura 25). Se tomó valores de referencia como 176, 150, 120; 100, 50, 176.

#### A. RPM

En la imagen se puede apreciar el comportamiento de las RPM respecto al tiempo, la curva color naranja es la función transferencia del modelo matemático. Mientras que, la curva azul que corresponde a las ecuaciones diferenciales no se aprecia porque se encuentra superpuesta por la de color naranja.

## Figura 25

Comportamiento grafico de RPM vs tiempo (EDO y FTTeórica).

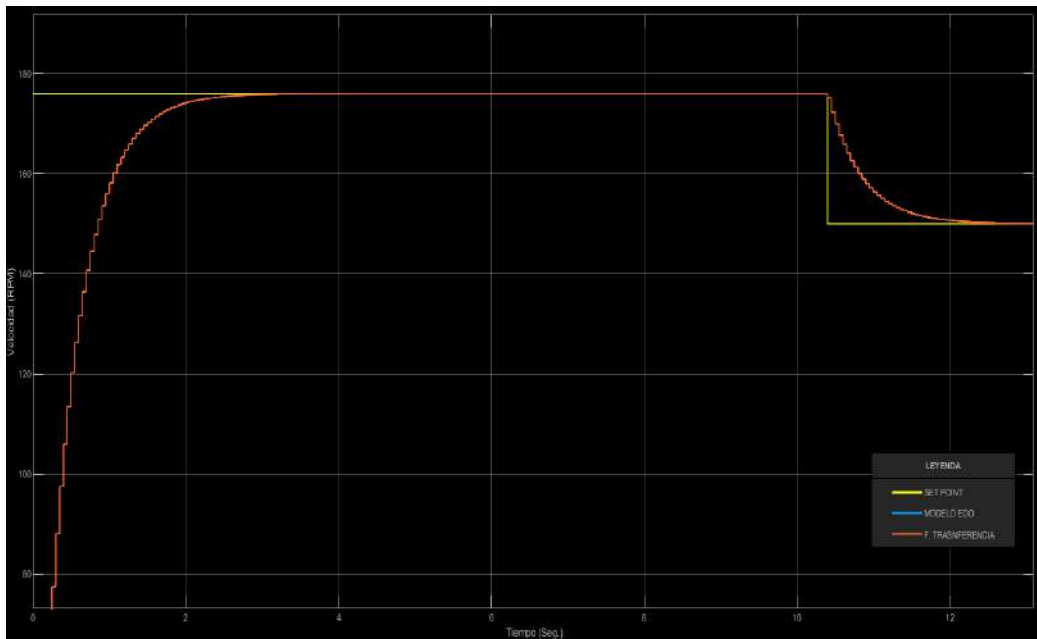


*Nota.* La curva azul se encuentra superpuesta por la curva de color naranja.

Si ampliamos la imagen, se puede ver con más notoriedad la forma de la curva en el transcurso del recorrido del sistema.

## Figura 26

Imagen ampliada del sistema teórico – velocidad.



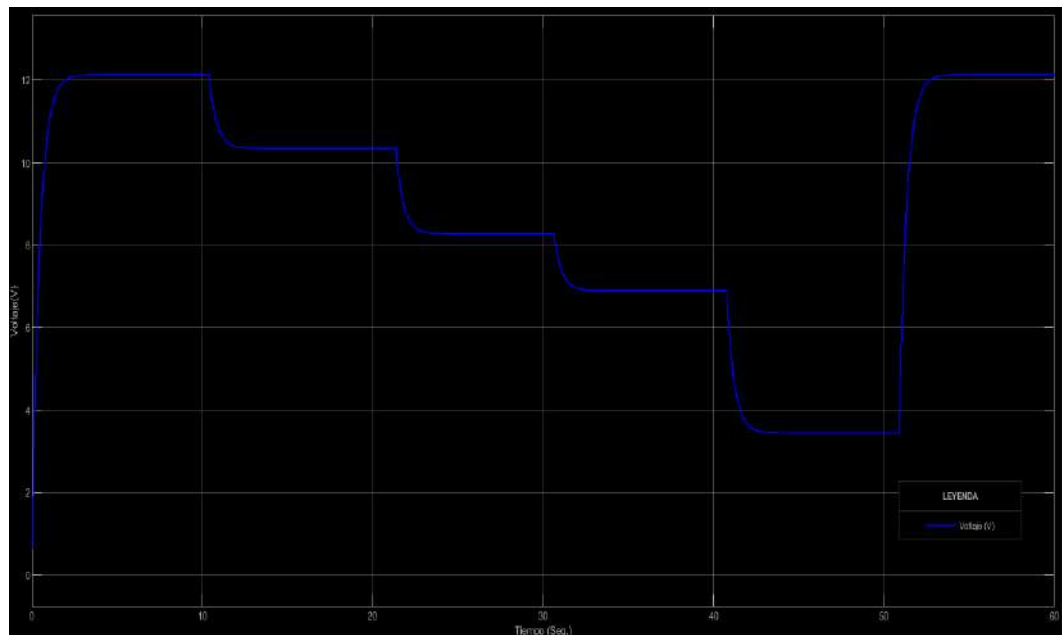
*Nota.* Se puede apreciar cierta perturbación de la curva EDO y F. Transferencia.

## B. Voltaje

En la imagen 27 se visualiza el comportamiento del voltaje frente al diferentes puntos de referencia (Set Point) ya mencionados. Hay que tener en cuenta que en nuestro sistema teórico el voltaje considerado es de 12.2 V.

### Figura 27

*Comportamiento gráfico del voltaje vs tiempo del modelo matemático.*

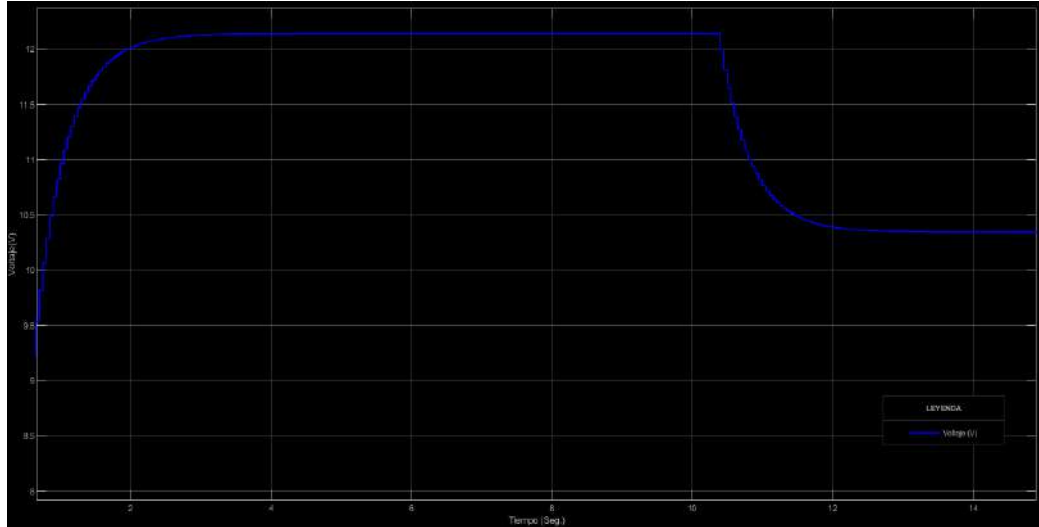


*Nota.* La respuesta del voltaje se alinea a la referencia tal como se observa en la curva azul.

Al ampliar la imagen de la curva de voltaje, se verifica como mediante el controlador PID se varía el nivel de voltaje para ajustarlo al punto de referencia (Set Point).

**Figura 28**

*Imagen ampliada del sistema teórico – voltaje.*



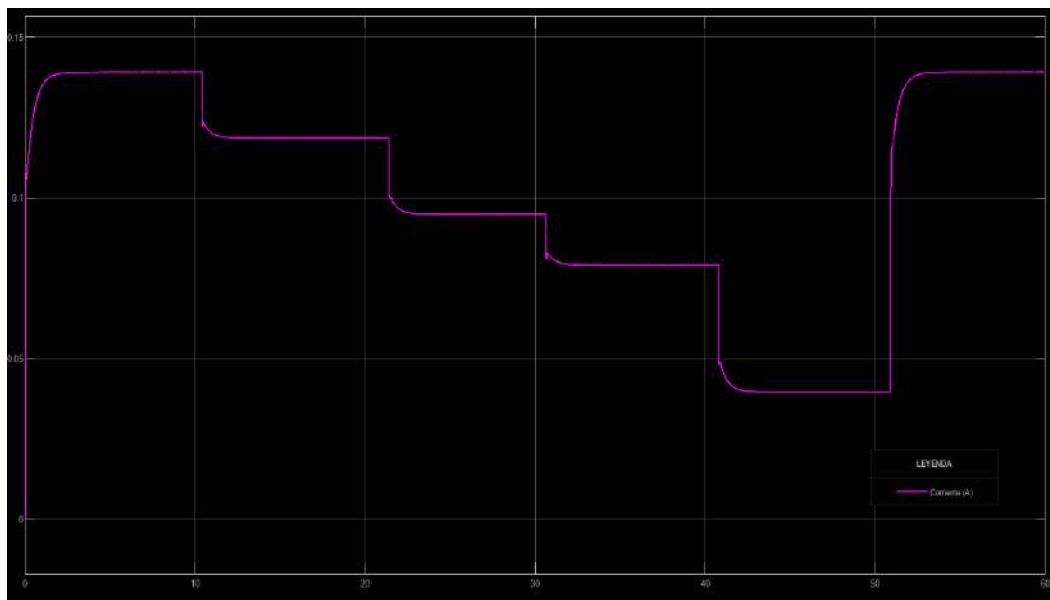
*Nota.* La respuesta del voltaje mostrada es lineal tal como se muestra.

### C. Corriente

En la imagen 29, se observa la respuesta de la corriente del modelo matemático frente a los diversos puntos de referencia.

**Figura 29**

*Comportamiento gráfico de la corriente vs tiempo del modelo matemático.*

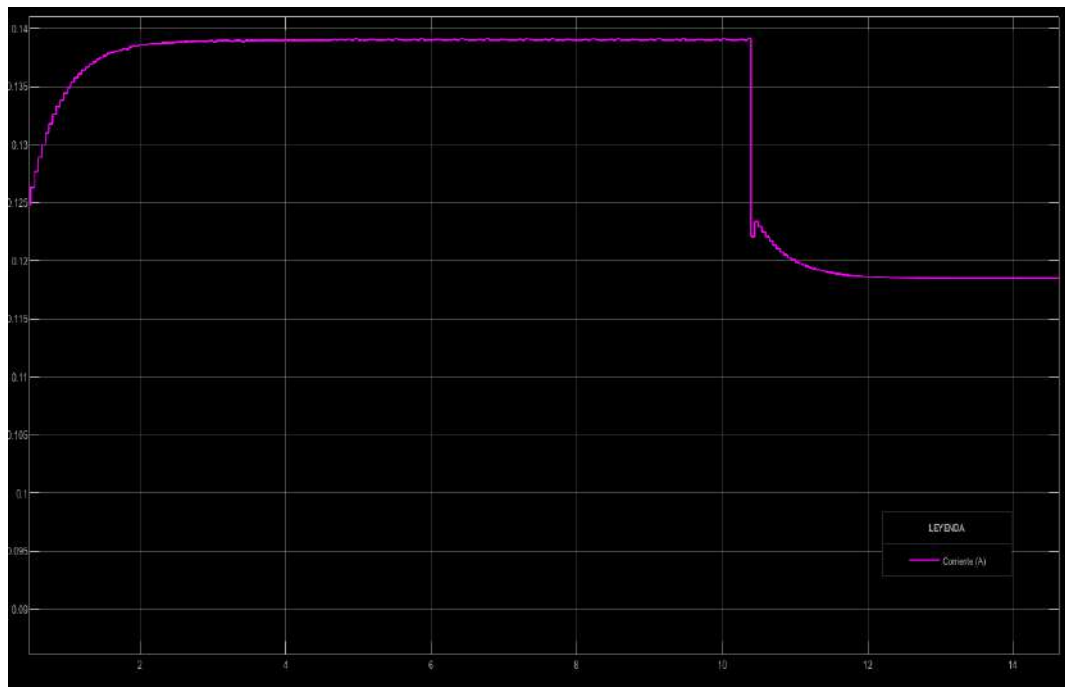


*Nota.* La respuesta del corriente se alinea a la referencia tal como se observa en la curva rosa.

Al realizar zoom a la imagen anterior, se es más notoria la curva de la corriente teórica que se sumista al sistema para lograr ajustarse al punto de referencia (Set Point).

### **Figura 30**

*Imagen ampliada del sistema teórico – corriente.*



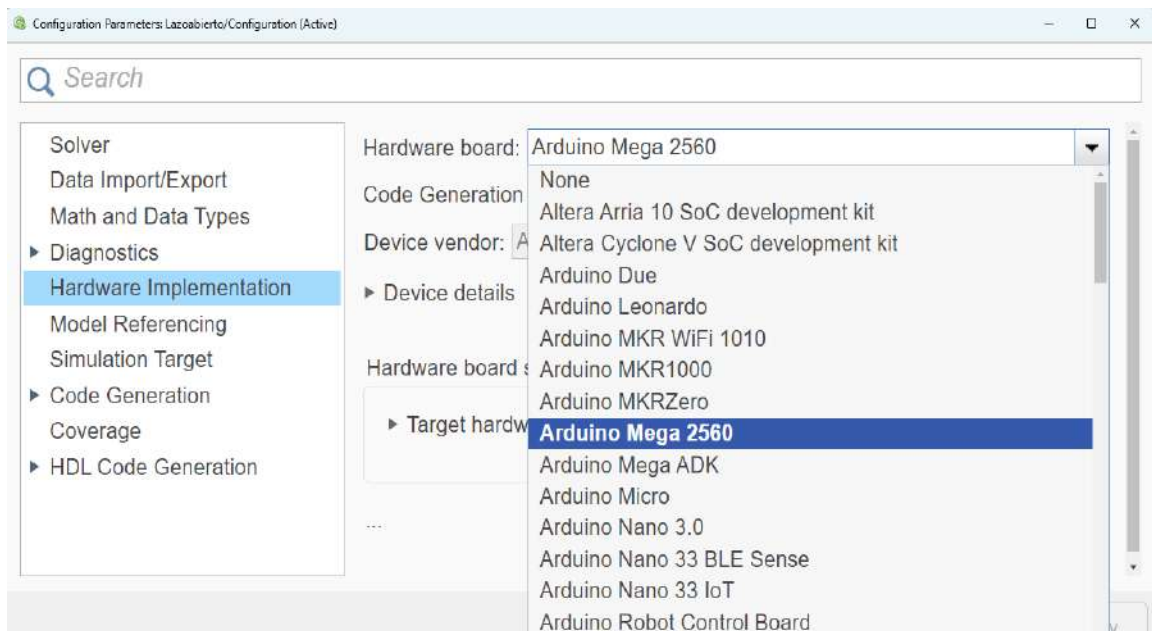
*Nota.* La respuesta de corriente mostrada es lineal tal como se muestra.

### 3.6. Implementación del modelo real

Para el control de velocidad del motor DC se hace uso de Simulink – MATLAB, ya que a partir de la interfaz de este se va a realizar el control. Lo primero es realizar la conexión entre Simulink y el microcontrolador (Arduino Mega 2560). Posterior a ello, se realiza la configuración del hardware, seleccionando el microcontrolador con el que se está trabajando.

**Figura 31**

*Configuración del Hardware.*




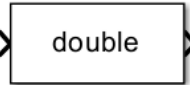
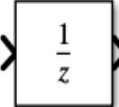



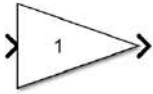

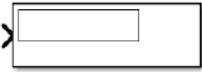

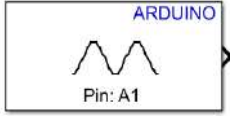
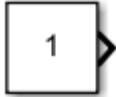

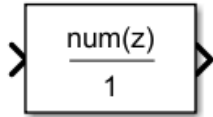
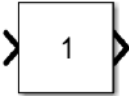
*Nota.* Se elige el microcontrolador con el que se está trabajando para la conectividad Hardware-Software.

A continuación, para tener una noción de para que se utilizó cada bloque representado en el sistema de control de velocidad tanto a lazo abierto como cerrado, se presenta una leyenda de los bloques utilizados en Simulink.


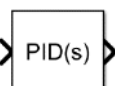
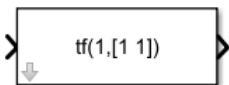
**Tabla 12**

*Leyenda del diagrama de bloques real.*

Nombre	Descripción	Bloque
Signal editor	Se utiliza para crear, editar y gestionar señales de entrada, en este caso para crear las PWM.	
PWM	Sirve para generar la señal modulada en ancho de pulso en un pin digital con capacidad PWM del Arduino.	
Encoder	Se usa para leer la velocidad (pulsos) del eje del motor con encoder incremental.	
Data type conversion	Sirve para cambiar el tipo de dato de una señal a otro compatible.	
Unit delay	Permite almacenar el valor anterior de la señal y entregarla en el siguiente instante, ideal para trabajar con sistemas digitales e idóneo para tomar muestras cada cierto lapso de tiempo.	
Add	Se usa para restar y sumar señales de entrada.	

Gain	Se usa para multiplicar una señal por una constante.	
To Workspace	Guarda una señal simulada en un variable de MATLAB para poder analizarla después de la simulación.	
Display	Sirve para visualizar la señal en tiempo real, mientras corre la simulación.	
Scope	Sirve para visualizar gráficamente las señales durante la simulación.	
Analog Input	Se usa para leer los valores analógicos desde un pin de entrada analógica (A0, A1, etc.)	
Constant	Se usa para dar un valor numérico fijo.	
Sum	Se usa para sumar y restar varias señales de entrada.	
Discrete FIR Filter	Sirve para suavizar o eliminar el ruido en señales digitales.	
Slider Gain	Permite cambiar en tiempo real la ganancia de una señal.	

---

	Permite tomar una señal continua y	
Zero - Order Hold	mantener su valor fijo por un momento hasta leer el siguiente dato.	
PID Controller (s)	Ajusta la salida de un sistema para mantener la variable controlada cerca del valor deseado, usando 3 acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D).	
LTI System	En este caso, se usa para cargar una planta del sistema simulado.	

---

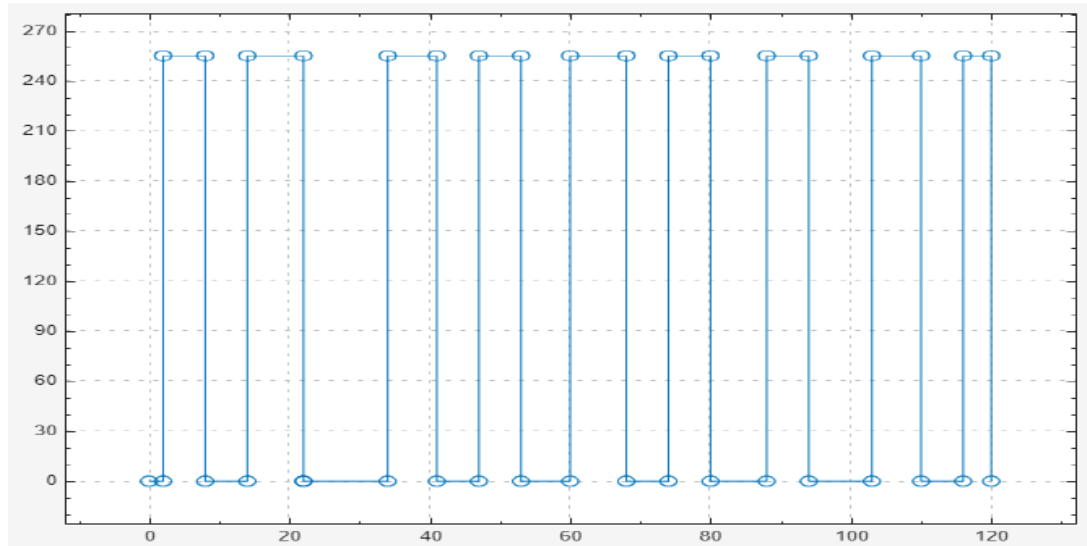
*Nota.* Bloques utilizados en el desarrollo del sistema físico real en Simulink – MATLAB.

### 3.6.1. Construcción de la PRBS

Para la construcción de las PRBS (Pseudo – Random Binary Sequence) se hizo uso del bloque de Simulink, Signal editor. Para nuestro caso se construyó una PRBS de alrededor 121 segundos de 0 a 255 (8 bits). A continuación, se puede apreciar la señal:

**Figura 32**

*Construcción de la PRBS.*



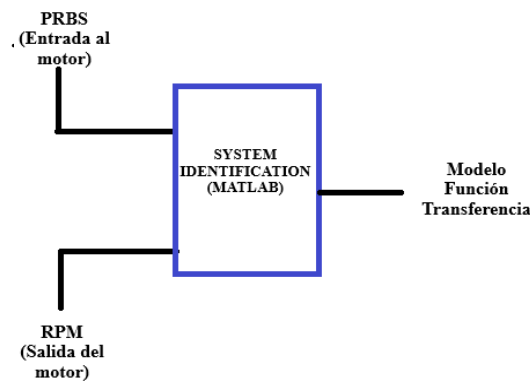
*Nota.* El tiempo de simulación es de 121 segundos de 0 a 255 de acuerdo a los bits del microcontrolador.

### 3.6.2. Sistema de lazo abierto

Se realiza el diagrama de bloques en Simulink – MATLAB a lazo abierto: datos de entrada (PRBS) y de salida (RPM), obteniéndose mediante identificación de sistemas el modelo de la función transferencia.

**Figura 33**

*Esquema de señales de entrada y salida.*



*Nota.* En base a este esquema se realiza la identificación de sistemas.

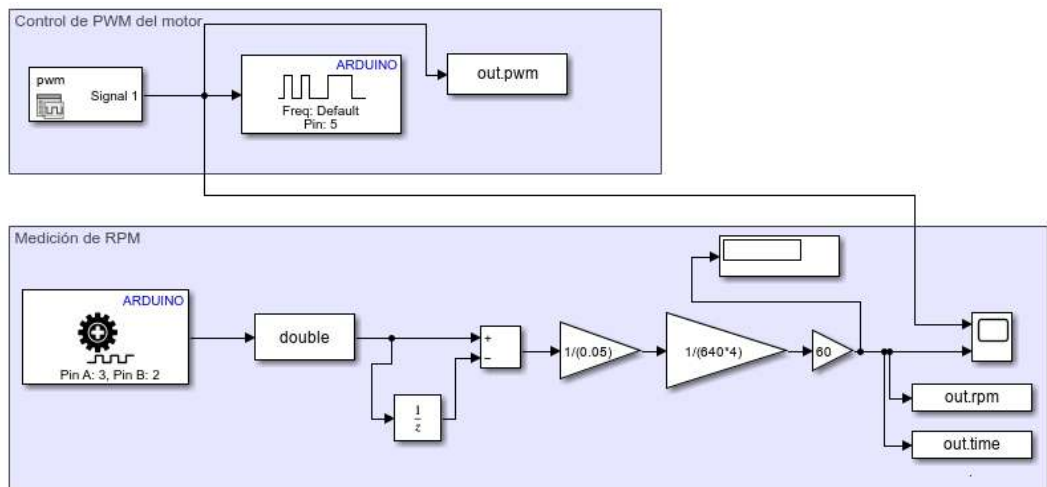
A continuación, se procede a construir el diagrama de bloques en el que se integran los bloques correspondientes para poder tomar los datos necesarios para realizar la identificación de sistemas en la app de MATLAB.

- i. Se empleó el bloque Signal Editor para generar la señal PRBS. Este bloque se conectó al bloque PWM ~ correspondiente al pin 5 del microcontrolador. La salida se envió a un bloque To Workspace para registrar la señal PWM en MATLAB y a un Scope para su visualización gráfica (primer diagrama para control PWM, ver Figura 34).
- ii. Para la lectura de RPM (ver Figura 34), se utilizó el bloque Encoder, configurado con los pines A: 3 y B: 2, destinados a registrar los pulsos emitidos por el sensor.
- iii. La salida del bloque Encoder se conectó a un bloque Data Type Conversion para convertir el dato entero proporcionado por el encoder al tipo de dato double, a fin de mantener compatibilidad con el resto del modelo.
- iv. Posteriormente, se añadió un bloque Unit Delay para obtener el valor anterior de la señal, y un bloque Add (+-) para calcular la diferencia entre el valor actual y el previo.
- v. El bloque add es conectado a un bloque gain.
  - El primero con una ganancia de  $1/0.05$  para convertir pulsos por muestra a pulsos por segundo,
  - El segundo con una ganancia de  $1/(640 \times 4)$  para convertir pulsos a revoluciones.
  - El tercero para convertir revoluciones por segundo a revoluciones por minuto (RPM).

- vi. Finalmente, se realiza la conexión a un bloque display y scope para visualizar los valores numéricos y gráficos respectivamente. Además, se conecta a dos bloques To Workspace para guardar data de RPM y tiempo que va depender del tiempo de la simulación que es de 121 segundos con un muestreo de 0.05 segundos.

**Figura 34**

*Diagrama de bloques Simulink/ MATLAB para Control de PWM y RPM.*




*Nota.* El diagrama de bloques mostrado permite obtener la data para posteriormente realizar la identificación de sistemas.

- vii. Al ejecutar la simulación, los bloques To Workspace generaron tres archivos en la ventana principal de MATLAB: time, rpm y pwm. Con estos archivos fue posible acceder a la aplicación Identificación de Sistemas. Para conservar los datos y evitar la necesidad de repetir las simulaciones al cerrar y abrir Simulink o MATLAB, la información obtenida se almacenó en un archivo Excel denominado “data\_motor\_dc.xlsx”, el cual se utilizó posteriormente para el procesamiento.

**Figura 35**

*Data obtenida del tiempo, pwm y rpm.*

	A	B	C
33	1.6	0	0
34	1.65	0	0
35	1.7	0	0
36	1.75	0	0
37	1.8	0	0
38	1.85	0	0
39	1.9	0	0
40	1.95	0	0
41	2	255	0
42	2.05	255	42.65625
43	2.1	255	102.1875
44	2.15	255	134.0625
45	2.2	255	150.9375
46	2.25	255	160.3125
47	2.3	255	166.875
48	2.35	255	169.6875
49	2.4	255	172.03125
50	2.45	255	173.4375
51	2.5	255	173.90625
52	2.55	255	174.375
53	2.6	255	175.3125
54	2.65	255	174.84375
55	2.7	255	174.84375
56	2.75	255	175.3125
57	2.8	255	175.78125
58	2.85	255	175.3125
59	2.9	255	175.78125
60	2.95	255	175.3125

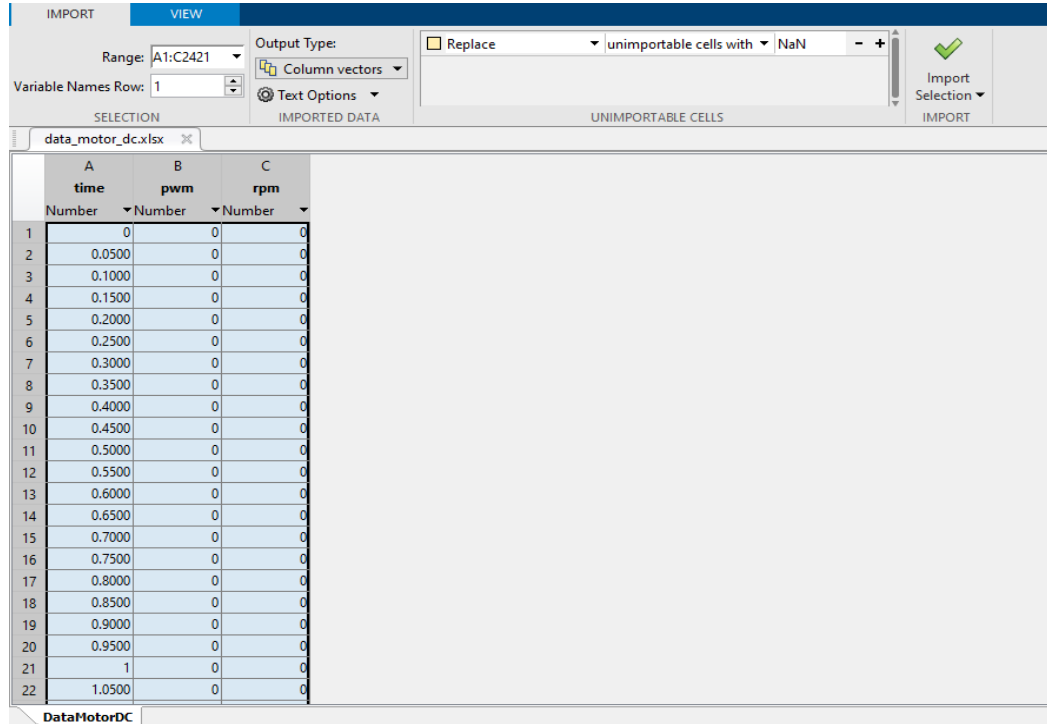


*Nota.* Ver Anexo 06.

- viii. En la data de Excel se obtuvieron 2421 datos, ya con este archivo de Excel se puede trabajar sin necesidad de realizar otras simulaciones a lazo abierto y así poder realizar la identificación de sistemas para hallar la función transferencia del sistema real. Entonces, en MATLAB, nos dirigimos a import data y cargamos el archivo ya mencionado (ver figura 36), luego de esto se carga en la parte de workspace los archivos cargados. (ver figura 37)

### Figura 36

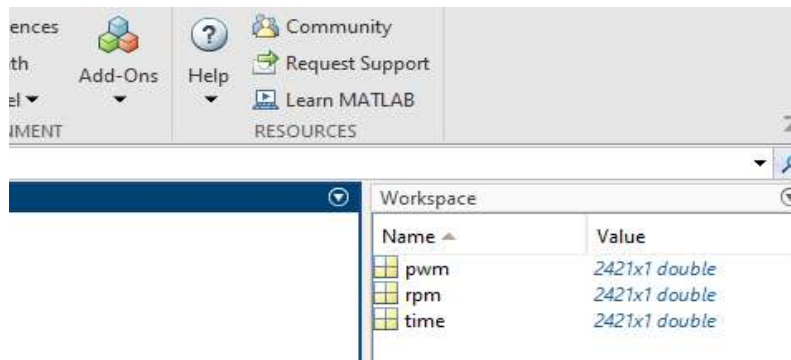
Importación de los datos obtenidos a MATLAB.



Nota. Se carga el archivo Excel en import data de MATLAB y se muestra la ventana que se muestra en la figura 36.

### Figura 37

Archivos cargados al Workspace de MATLAB.



Nota. Hay que señalar que los archivos cargados tienen que tener las mismas dimensiones para no tener inconvenientes.

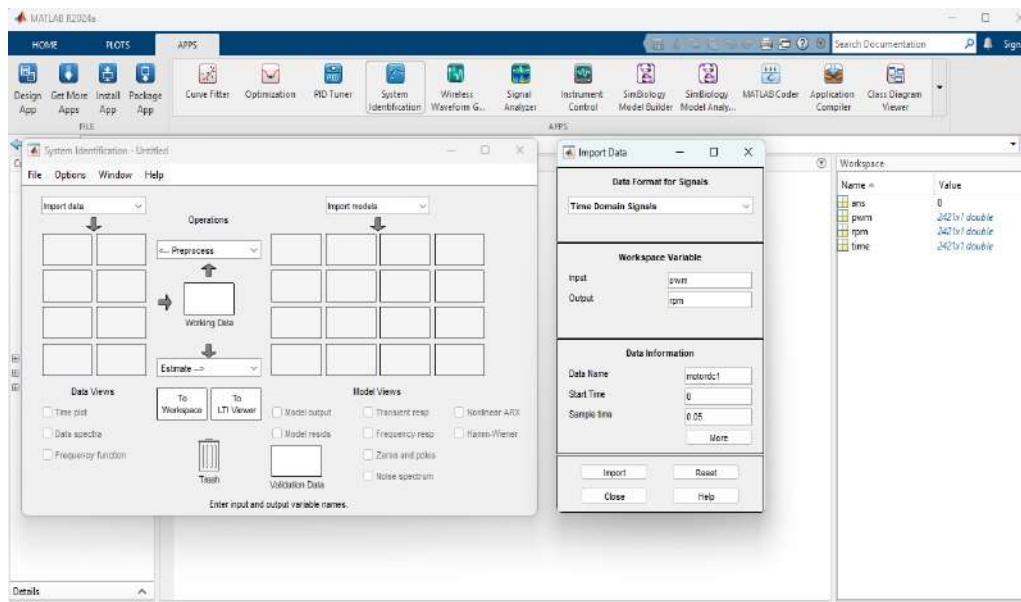
ix. Ahora sí, se abre la app de identificación de sistemas para subir la data al sistema. En la parte de importar data se coloca en Time Domain Signals, se abre una pestaña para editar datos:

- Input: pwm
- Output: rpm.
- Data name: motordc1
- Start Time: 0
- Sample time: 0.05

Para terminar, clic en import.

**Figura 38**

*Identificación de Sistemas.*

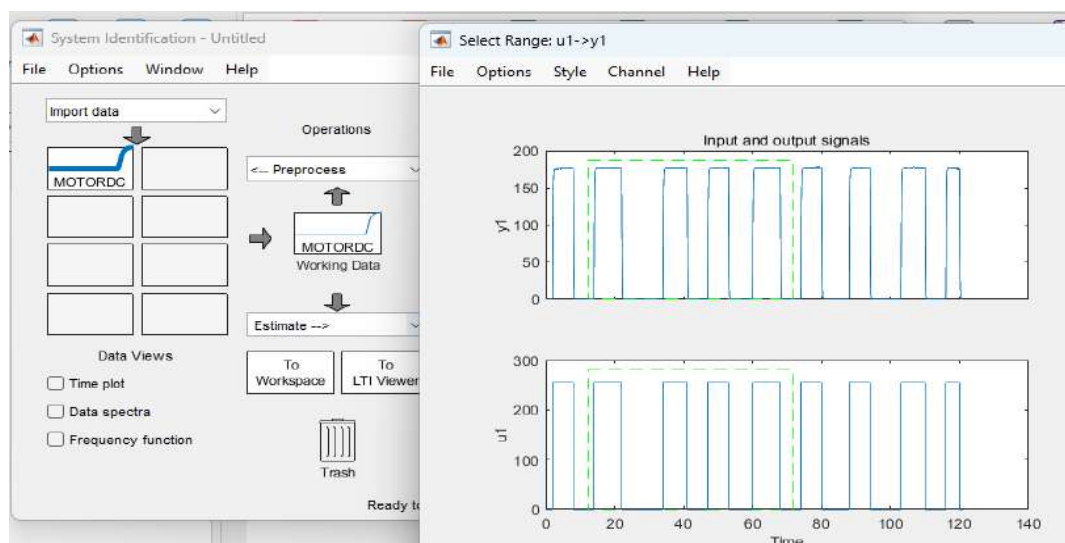


*Nota.* Interfaz de sistema de identificación de sistemas de MATLAB.

- x. Al importar se carga la data al sistema, nos dirigimos a operations -preproces, desplegamos y seleccionamos select range, se abre una pestaña para seleccionar el rango de evaluación de los datos (ver figura 39). Luego se carga una nueva data “motordcle”, con esta data se trabaja, nos dirigimos a estimate y seleccionamos process models y se abre una ventana en donde seleccionamos estimate para 1 polo donde los arroja una estimación de data del 97.23 % (ver figura 40), la cual es bastante aceptable para la validación del sistema. Sin embargo, nos damos cuenta que al trabajar el modelado matemático la función de transferencia es de segundo orden por lo que para el modelado real estimamos la data nuevamente, pero para 2 polos para tener una comparación de las funciones transferencia teórico y real y efectivamente nos da una estimación del 99.15% (ver figura 42) por la que se optó por trabajar con esta data P2. Finalmente, se arrastra P2 al Workspace de MATLAB. (Ver figura 43).

### Figura 39

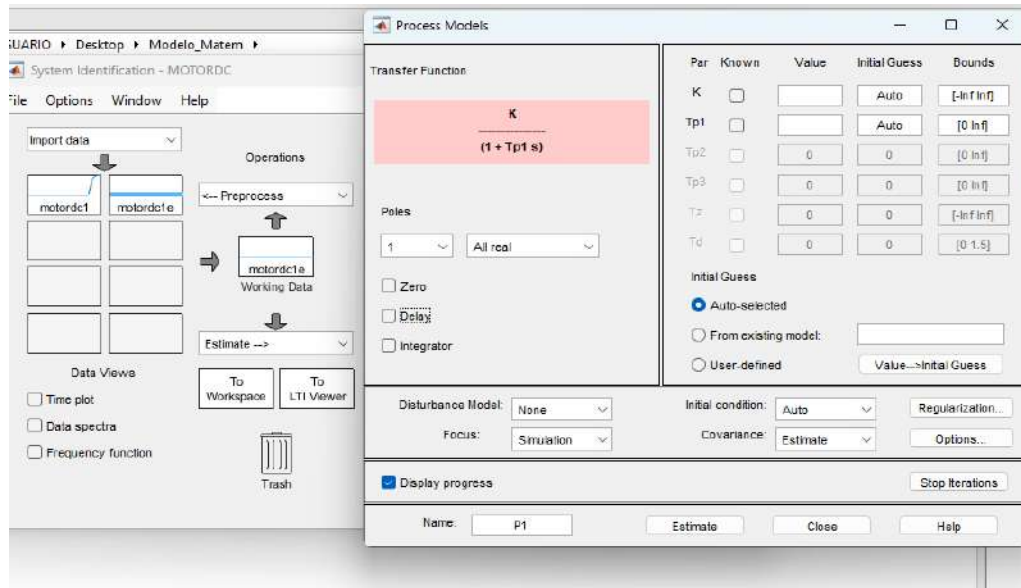
*Selección de rango de la muestra.*



*Nota.* Se considera un rango para que la evaluación.

**Figura 40**

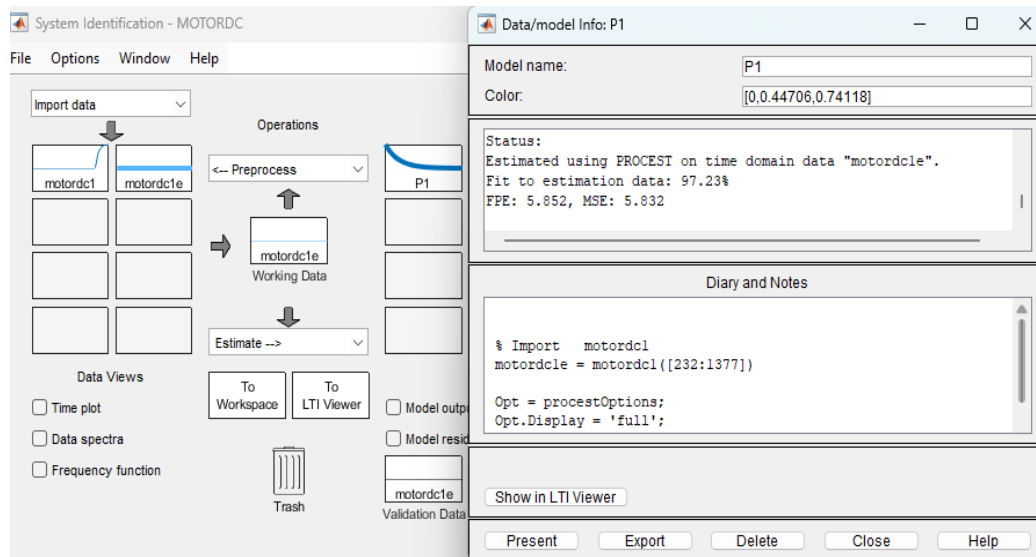
*Procesamiento del modelo.*



*Nota.* Se estima la función transferencia sin marcar zero, delay, ni el integrador.

**Figura 41**

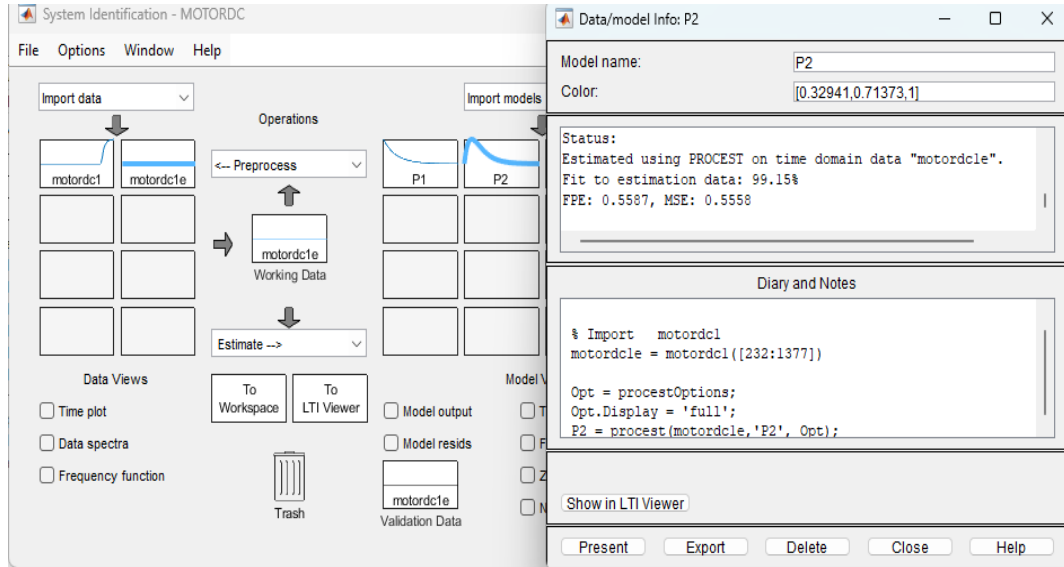
*Estimación del modelo – 1 polo.*



*Nota.* Se estima para 1 polo para observar el porcentaje de la estimación de los datos seleccionados.

**Figura 42**

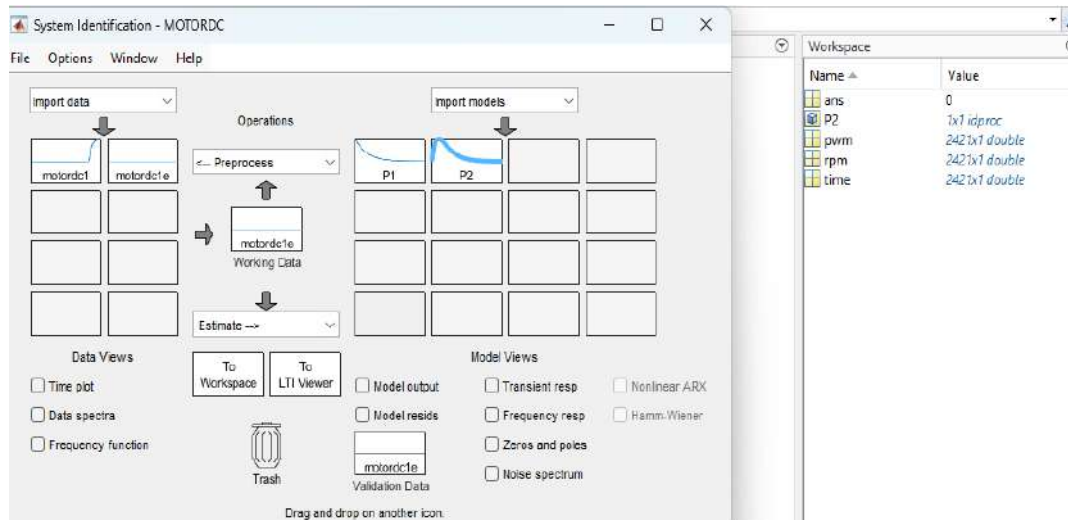
*Estimación del modelo – 2 polos.*



*Nota.* Se estima para 2 polos observándose un porcentaje de estimación más cercano al 100% por lo que es el más óptimo para nuestro sistema.

**Figura 43**

*Modelo de planta del sistema real calculado “P2”.*

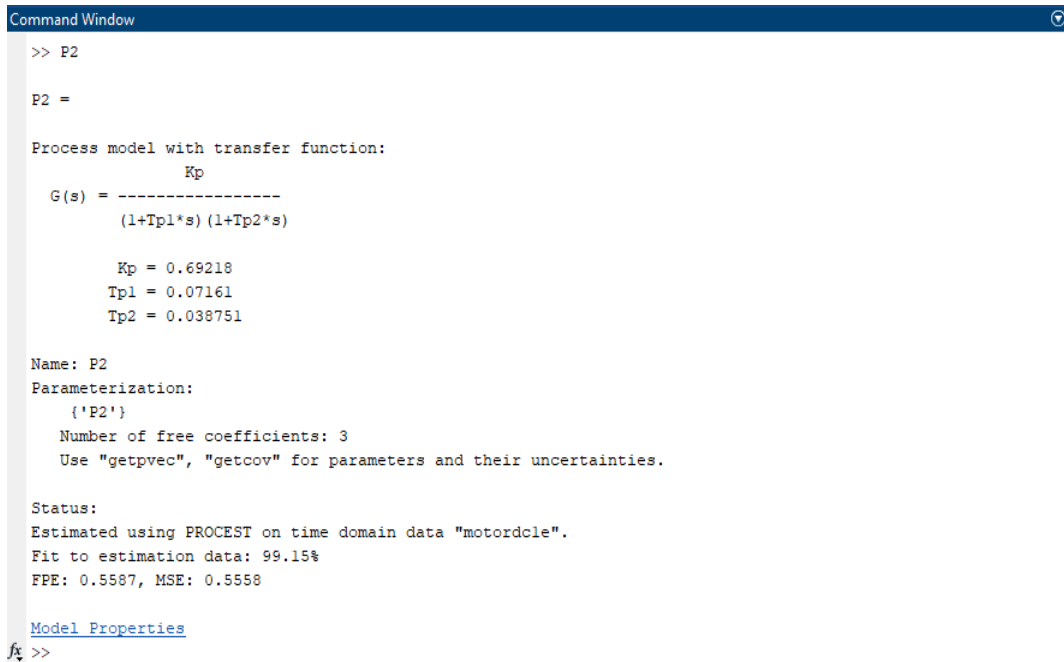


*Nota.* Se carga la planta calculada P2 en la pantalla principal de MATLAB para trabajar el resto del sistema.

- xi. En la ventana principal de MATLAB digitamos “P2” e inmediatamente nos muestra la función transferencia de nuestro sistema. (Ver figura 44)

### Figura 44

*Función transferencia del modelo real.*



```
Command Window
>> P2

P2 =

Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s)(1+Tp2*s)

      Kp = 0.69218
      Tp1 = 0.07161
      Tp2 = 0.038751

Name: P2
Parameterization:
  {'P2'}
Number of free coefficients: 3
Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data "motordcde".
Fit to estimation data: 99.15%
FPE: 0.5587, MSE: 0.5558

Model Properties
fx >>
```

*Nota.* Únicamente con digitar P2 en la ventana de comandos de MATLAB el sistema te arroja la función transferencia.

### 3.6.3. Sistema de lazo cerrado con PID

Se realizó el sistema de lazo cerrado, que en pocas palabras es un sistema con retroalimentación, donde la salida se utiliza para corregir el error y mantener un control estable del sistema; en este caso, el control de la velocidad del motor. Para este tipo de sistemas, la velocidad medida por el encoder se compara con la velocidad de referencia establecida. La diferencia de ambas señales genera el error, el cual es procesado por el controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo).

El controlador se encarga de ajustar la señal de salida enviada al driver puente H - BTS7960, modificando el voltaje aplicado al motor para aumentar o reducir su velocidad hasta alcanzar el valor deseado (Set Point).

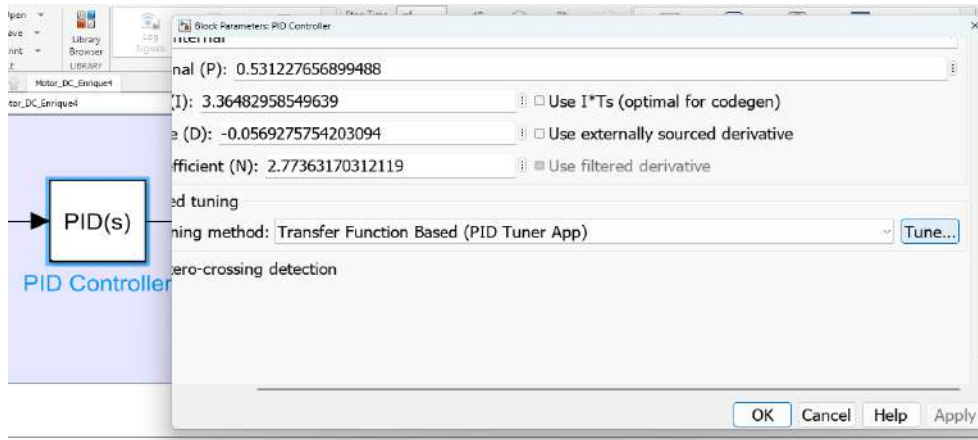
- i. Para realizar el diagrama de bloques del lazo cerrado con el controlador PID que va a complementar al bloque de lazo abierto donde se hace la lectura de rpm, lo primero que se realizó es añadir una constante 1 que es mi referencia del motor funcionando al 100 % y conectado al bloque slider gain me va a permitir ajustar la velocidad de referencia sin cambiar el valor del bloque constant.
- ii. Por consiguiente, se conecta a un bloque data type conversion, hay que señalar que Arduino trabaja con valores enteros cuando se hace lectura de señal PWM. Este bloque permitió convertir la señal de Simulink double a entero int16.
- iii. Posterior a ello, se realiza la conexión a un bloque sum, aquí es donde se resta la retroalimentación (velocidad real) de la referencia (velocidad deseada).

$$error = referencia - velocidad\ real$$

- iv. Luego, se conecta al bloque Zero-Order Hold que me permite que se reciba la señal en cada paso de muestreo que es cada 0.05 segundos.
- v. Después del bloque anterior, se le conecta el bloque PIDs que me permite realizar el control de velocidad del motor de manera más precisa. Pero, aquí se tiene que ajustar las constantes correspondientes de acuerdo al modelo de la planta ya calculado, es decir la función transferencia hallada "P2". Mediante PID tuner o simplemente dando doble clic en el bloque de PIDs se puede acceder a la configuración de este. (ver figura 44). Una vez aquí se hace clic en Tuner.

**Figura 45**

*Configuración del bloque PID.*

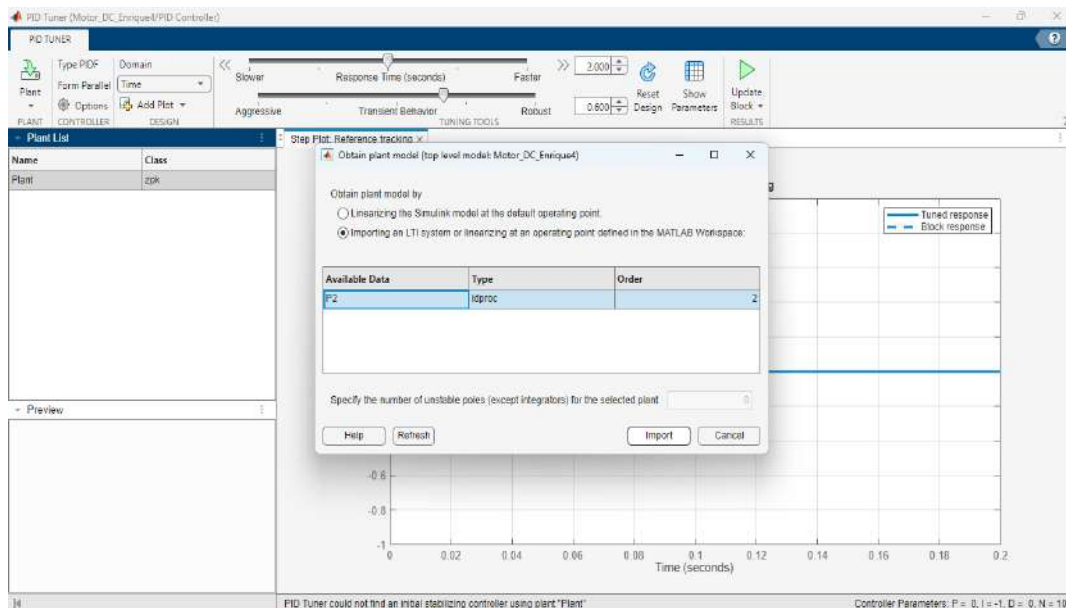


*Nota.* Al dar clic en el bloque de PID(s) se abre la ventana para modificar los parámetros PID.

- vi. Aparece la siguiente pestaña, donde se da clic en import planta, seleccionamos nuestra planta “P2” y de nuevo en importar.

**Figura 46**

*Interfaz del PID Tuner.*

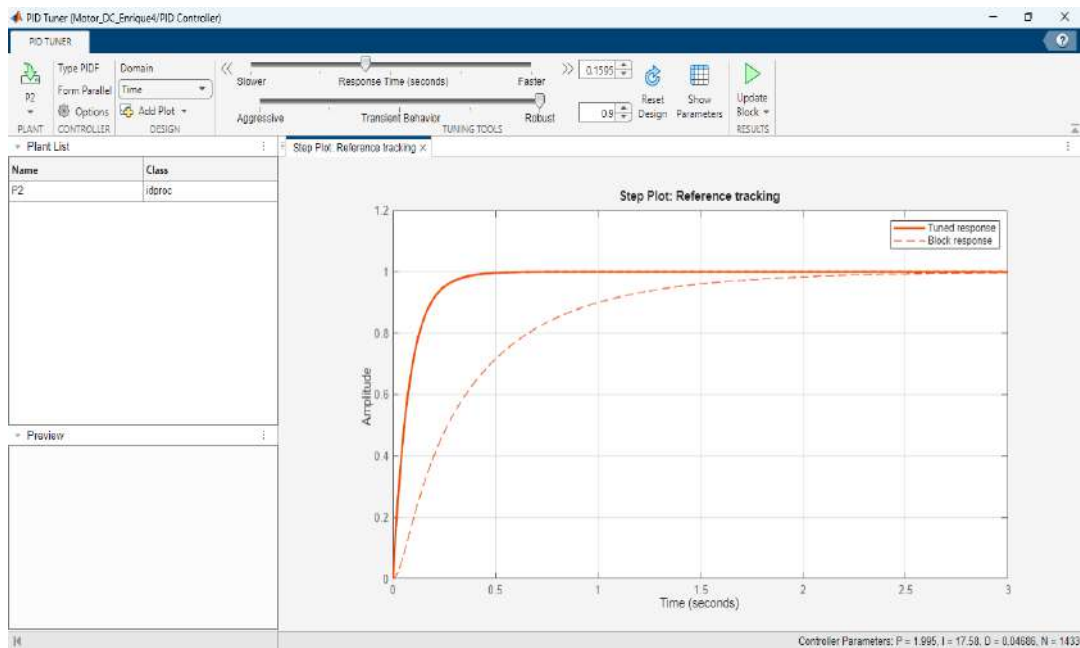


*Nota.* Se importa la planta P2 para poder realizar el tuneo de los parámetros PID.

- vii. Al importarse la planta aparece un step plot que me permite visualizar la curva de respuesta del sistema (Ver figura 46). Sin embargo, para ajustar los parámetros PID vamos a la parte superior donde dice slower y aggressive ahí se va modificando respecto a cómo se desea que sea la respuesta del sistema de control. Para finalizar se da clic en la parte de update block, automáticamente se cargan los valores de las constantes del PID (kp-ki-kd) y N (Filter coefficient). (Ver figura 47)

### Figura 47

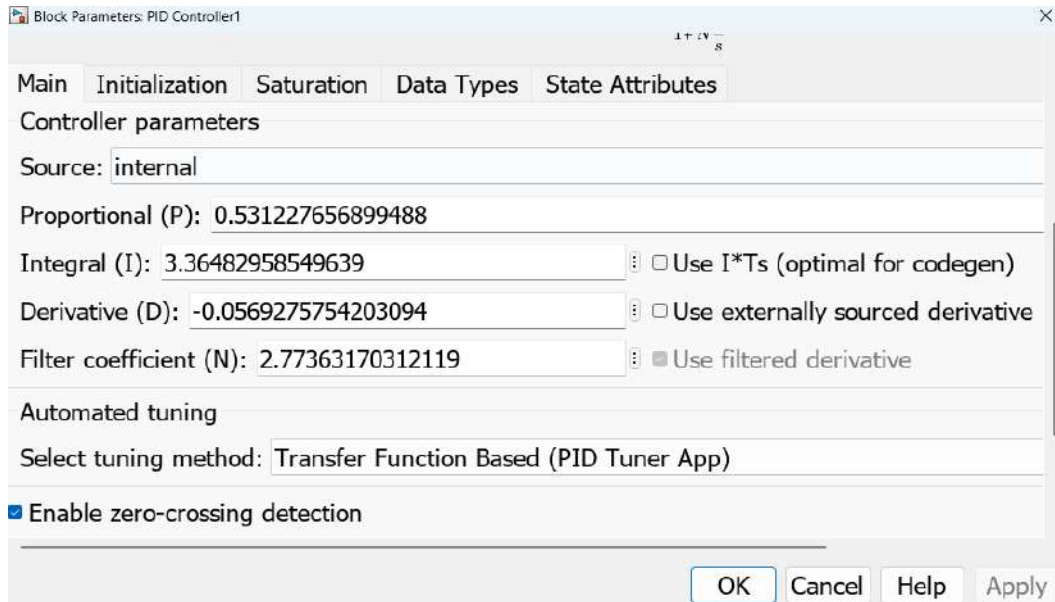
#### Ajuste de los parámetros PID.



*Nota.* En esta sección se tunea la curva de respuesta del sistema si se desea que sea más rápida más lenta, más robusta o más agresiva y evitar sobre impulsos y retardos.

**Figura 48**

*Parámetros PID del modelo real.*

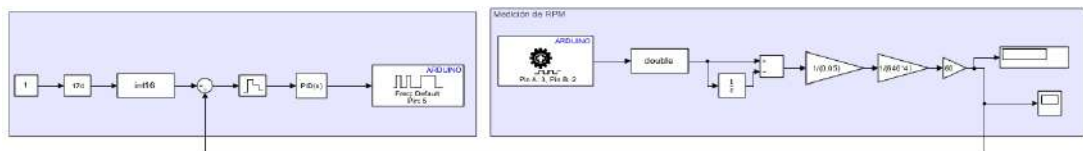


*Nota.* Parámetros PID a partir del PID Tuner.

- viii. Como último punto se conecta al bloque PWM del Arduino, que genera una señal modulación por ancho de pulso en el pin 5, esta señal controla el driver que a su vez regula el voltaje del motor, lo que permite acelerar o desacelerar según ordene el PID. Por tanto, el sistema con lazo cerrado con controlador PID sale con se muestra en la imagen siguiente:

**Figura 49**

*Sistema de lazo cerrado.*

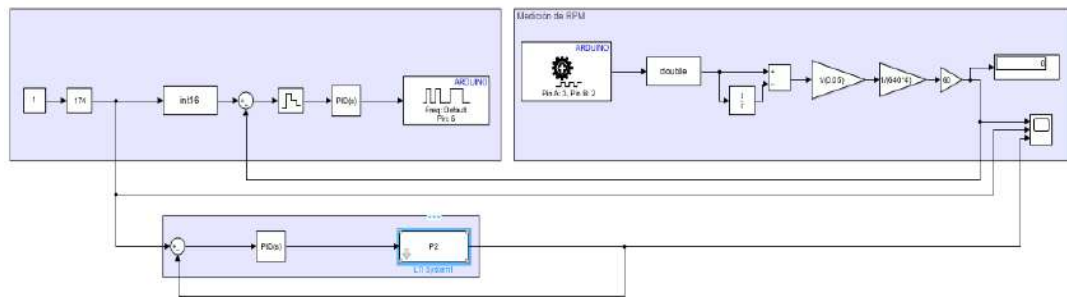


*Nota.* El sistema de lazo cerrado implementado con PID permite tener ya el control del motor DC en base a los puntos de referencia.

- ix. No obstante, también se logró hacer una comparación entre el motor real que responde mediante el bloque PWM del Arduino – Pin 5 y añadido a ello se pudo realizar la respuesta al sistema mediante la función transferencia hallada, tal como se muestra en la siguiente imagen, lo único que se añadió fue un bloque LTI System que me permite cargar mi función transferencia o modelo de planta (P2).

**Figura 50**

*Lazo cerrado implementado con la función transferencia calculada.*



*Nota.* Se añade la función transferencia mediante un bloque LTI System para poder visualizar el comportamiento de ambos sistemas.

Ahora bien, a partir de esto ya tenemos el sistema de control listo, pero hay variables involucradas (voltaje y corriente) que podemos leer numéricamente y gráficamente.

Para el voltaje:

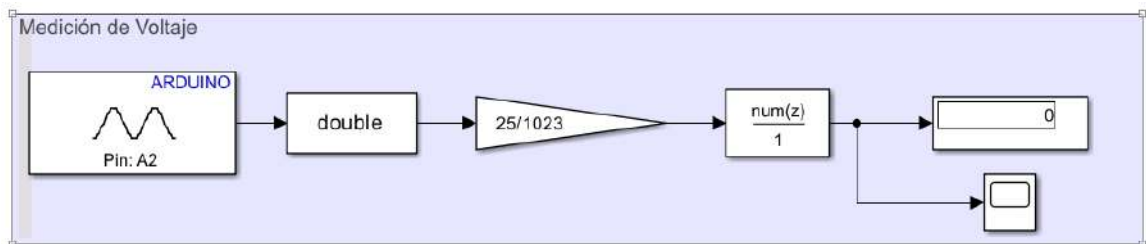
- i. Se coloca un bloque Analog Input A2. Este bloque convierte el voltaje (0 – 5 V) en un número digital entre 0 y 1023 (resolución de 10 bits). Es decir, lo que sale del bloque no es voltaje directamente, sino un valor digital proporcional.
- ii. Luego se pasa por un bloque Data type conversion, porque el valor entregado del

Analog Input es entero (int16), entonces para la lectura de valores reales se le convierte a double y así evitar errores de compatibilidad.

- iii. Posteriormente, se conecta un bloque gain  $25/1023$ , el 25 es según los datos del sensor de voltaje. Este bloque convierte el numero digital (0-1023) al valor real de voltaje medido.
- iv. El bloque Filter FIR Filter se conecta para suavizar la lectura del voltaje eliminando ruido o fluctuaciones rápidas. Por tanto, el sistema de bloques para medir el voltaje del sistema será tal como se muestra en la siguiente imagen:

**Figura 51**

*Diagrama de bloques para la medición de voltaje.*



*Nota.* Es importante colocar un filtro para que la respuesta de voltaje no sea brusca.

Para la corriente:

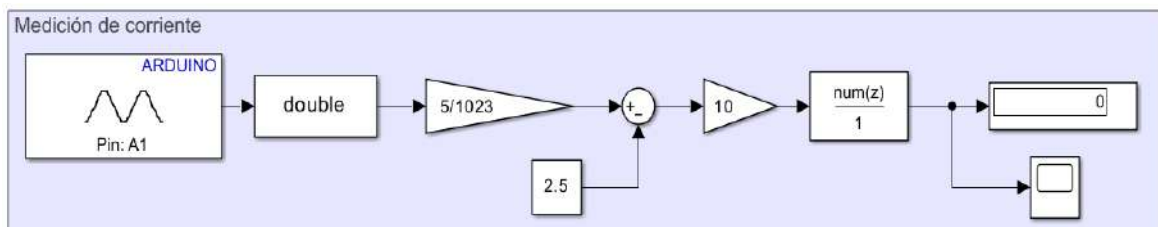
- i. Se le coloca un bloque Analog Input A1, que lee una señal analógica (0 – 1023) que proviene en este caso del señor de corriente de ACS712 de 20 A.
- ii. Posteriormente pasa por un bloque Data type conversion, que convierte el valor entero en valor real double.
- iii. Luego se conecta un bloque gain ( $5/1023$ ), se realiza esta operación ya que 5 representa el valor del voltaje real y 1023 la señal analógica, entonces se realiza la división para obtener el voltaje exacto. Se resta mediante un bloque sum -2.5 ya

que el sensor no empieza en 0V cuando la corriente es 0V sino 2.5 V. Por lo que, restando 2.5 hacemos que el 0 de corriente quede en 0V. Añadido a ello, se le multiplica por un bloque gain de 10 que representa la sensibilidad del sensor de corriente de 20 A (según especificaciones técnicas del sensor).

- iv. El bloque Filter FIR Filter se conecta para suavizar la lectura de corriente eliminando ruido o pequeñas variaciones. Por tanto, el sistema de bloques para medir la corriente del sistema será tal como se muestra en la siguiente imagen:

**Figura 52**

*Diagrama de bloques para la medición de corriente.*



*Nota.* Es importante colocar un filtro para que la respuesta de corriente no sea brusca.

### 3.6.4. Resultados gráficos del sistema real.

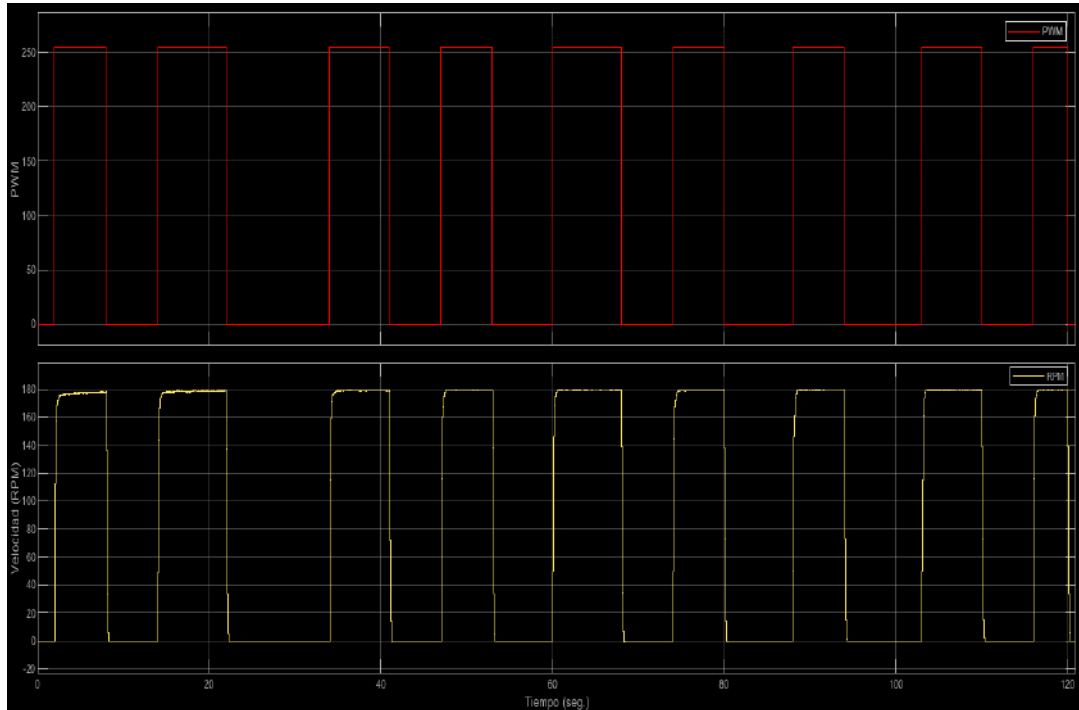
#### A lazo abierto

##### A. PWM – RPM

En la siguiente gráfica mostrada a continuación, se puede observar la respuesta de la señal PWM y en paralelo la respuesta de la velocidad (RPM). Para visualizar los datos numéricos ver anexo 06.

**Figura 53**

*Respuesta PWM y RPM del sistema a lazo abierto.*



*Nota.* Para visualizar los datos numéricos ver anexo 06.

### **A lazo cerrado con PID**

La simulación se realizó durante 60 segundos y durante ese tiempo se realizó el cambio de set point para ver numéricamente el comportamiento de los parámetros involucrados (ver anexo 07) y gráficamente la respuesta del sistema (Figura 53). Teniendo en cuenta que la velocidad máxima del sistema es de 176 RPM aproximadamente, se tomó valores de referencia como 176, 150, 120; 100, 50, 176.

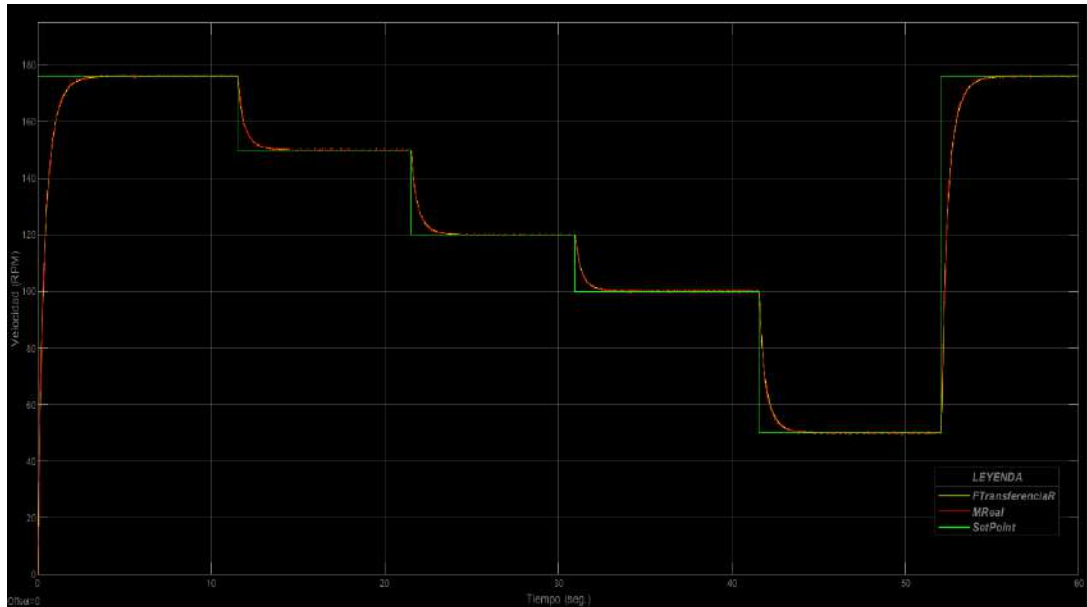
#### **A. RPM**

En la figura 53 se observa el control del sistema con PID ( $K_p = 0.531227656899488$ ,  $K_i = 3.36482958549639$ ,  $K_d = -0.0569275754203094$  y  $N = 2.77363170312119$ ). La línea verde representa el punto de referencia (Set point), la

línea roja, la respuesta del modelo real y la línea amarilla la respuesta de la función transferencia del modelo real.

### Figura 54

*Comportamiento gráfico de RPM vs Tiempo del modelo real.*

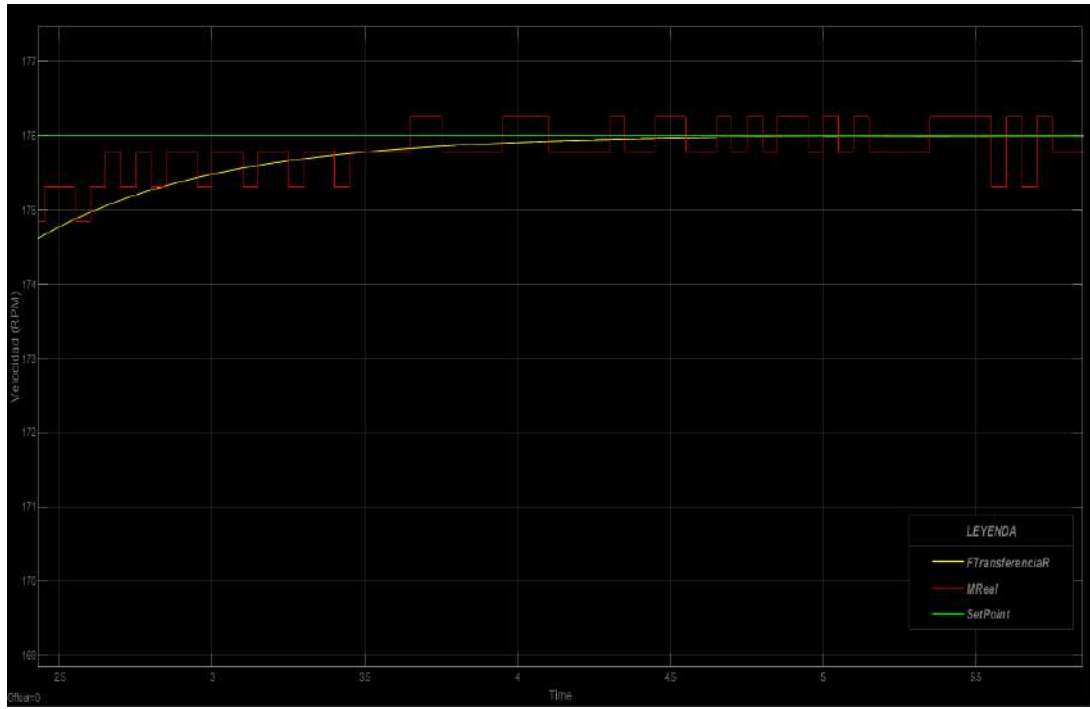


*Nota.* Ver anexo 07 para ver el comportamiento numérico de RPM.

Al ampliar la imagen anterior se puede notar el comportamiento de las 3 señales involucradas. Podemos notar, que la señal roja que corresponde al modelo real existe un mínimo ruido del sistema, pero que no afecta la estabilidad respecto al punto de referencia (Set Point).

## Figura 55

*Imagen ampliada del sistema real – velocidad.*



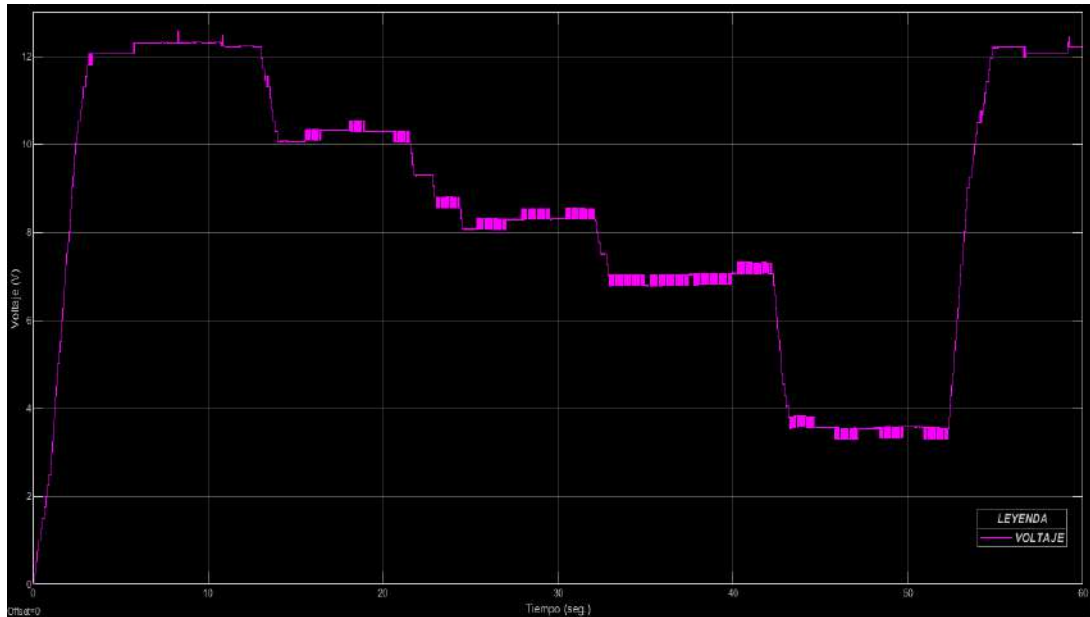
*Nota.* La señal roja muestra pequeñas fluctuaciones, a diferencia de la linealidad del resto del sistema.

### B. Voltaje

En la figura 55 se visualiza el comportamiento del voltaje frente al diferentes puntos de referencia (Set Point) ya mencionados. Hay que tener en cuenta que nuestro sistema real esta alimentado por una fuente DC de 12V aproximadamente.

**Figura 56**

*Comportamiento gráfico de voltaje vs tiempo del modelo real.*

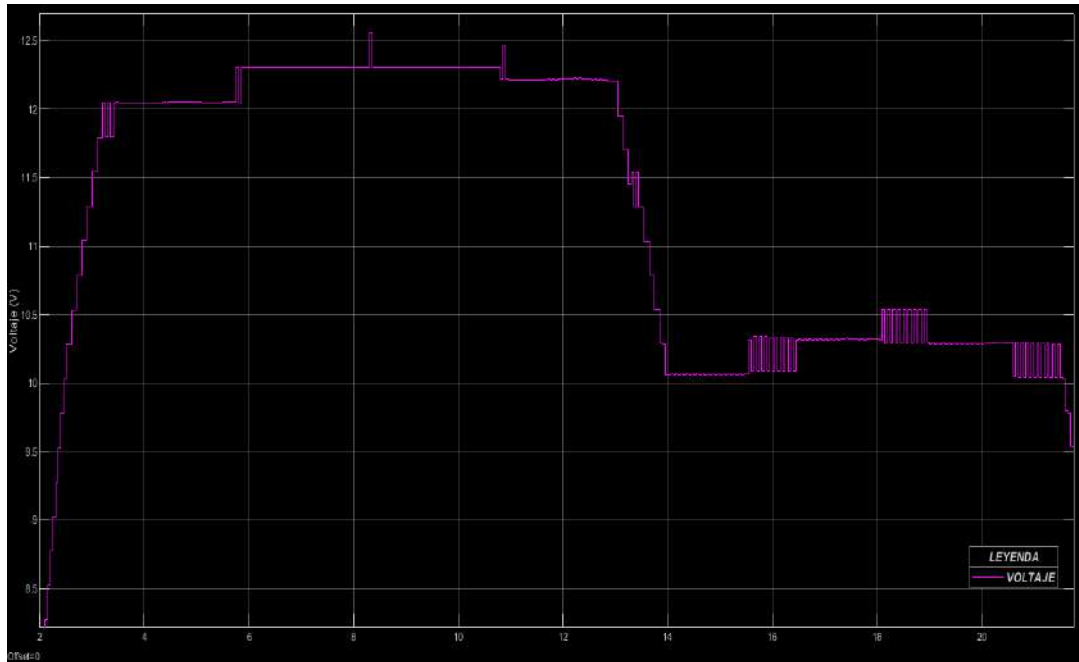


*Nota.* Ver anexo 07 para ver el comportamiento numérico de Voltaje.

Ampliamos la imagen anterior y según la data numérica, el voltaje llega a alcanzar niveles de 12.4 y 12.5V. Sin embargo, son únicamente picos de lectura que tiene el sensor de voltaje, no exactamente valores máximos óptimos.

**Figura 57**

*Imagen ampliada del sistema real – voltaje.*



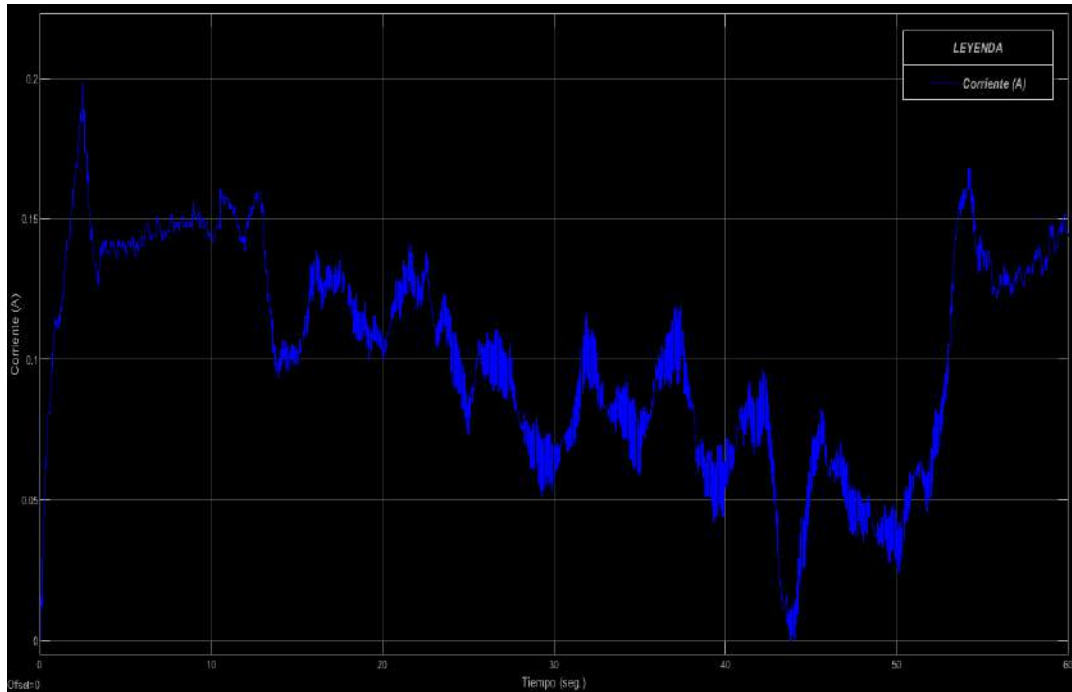
*Nota.* Existen fluctuaciones en la señal rosa referidas al voltaje.

### **C. Corriente**

En la figura 58, se observa la respuesta de corriente del sistema.

**Figura 58**

*Comportamiento gráfico de voltaje vs tiempo del modelo real.*

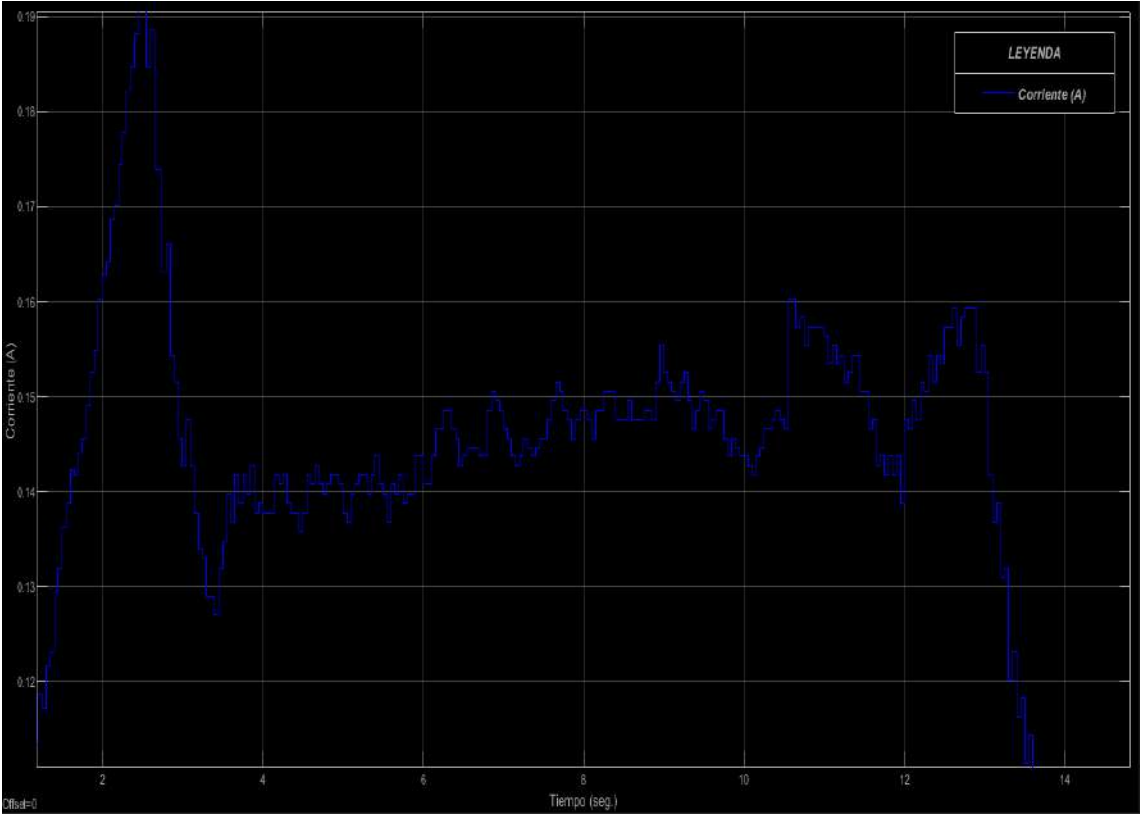


*Nota.* Ver anexo 07 para ver el comportamiento numérico de corriente.

Al realizar zoom a la imagen anterior, se puede notar los picos de corriente que se suministra al sistema para lograr ajustarse al punto de referencia (Set Point). No obstante, es solo una de las muchas lecturas de datos que se puede realizar, cabe señalar que puede diferir los valores de acuerdo a otras simulaciones, pero con la misma tendencia del sistema, lo que indica que el controlador es idóneo.

**Figura 59**

*Imagen ampliada del sistema real – corriente.*



*Nota.* La corriente alcanza valores de 0.19 A debido al arranque brusco del sistema, pero luego se estabiliza entre 0.12 y 0.15 A, según los datos numéricos. Anexo 07.

### 3.7. Comparación entre el modelo matemático(teórico) y modelo real

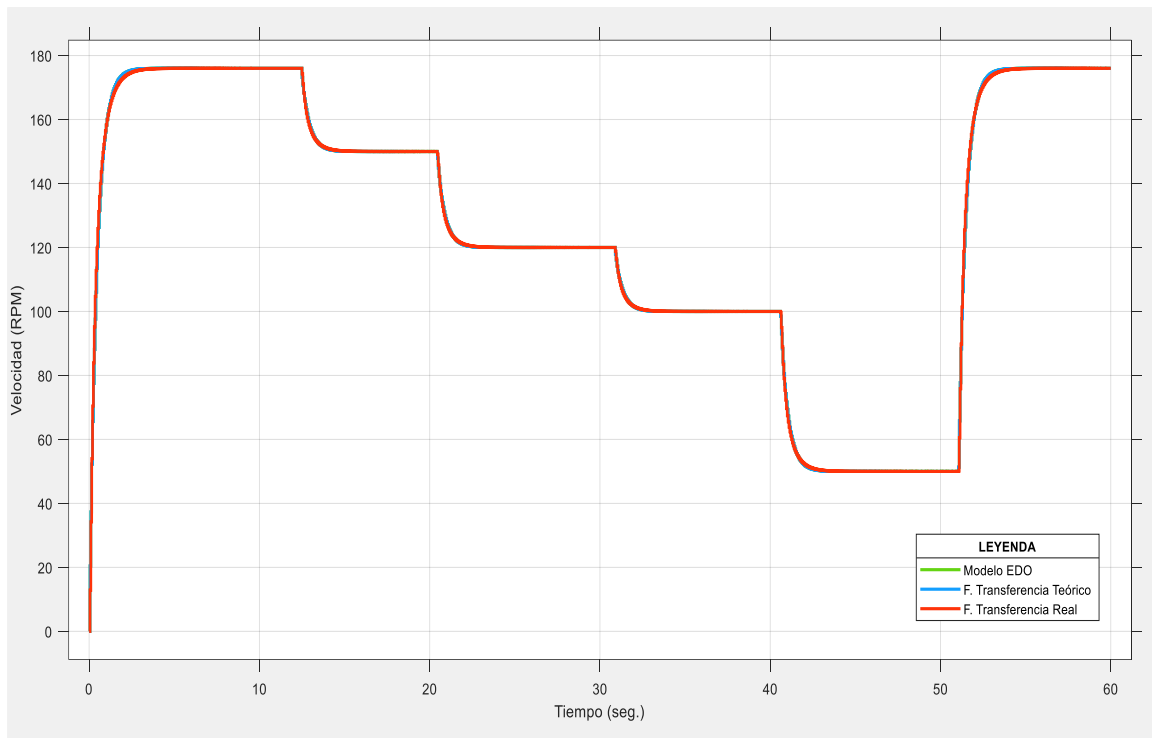
En esta sección, se muestra la comparación graficas de los dos sistemas involucrados, el sistema de control implementado para cada modelo y su respuesta.

- **Velocidad vs Tiempo (Modelo matemático – Modelo Real)**

Se ha logrado realizar la comparación de estas dos graficas de velocidad mediante el Data Inspector de Simulink/Matlab (Log Signals).

**Figura 60**

*Comparación de la velocidad (RPM) del modelo matemático vs real.*

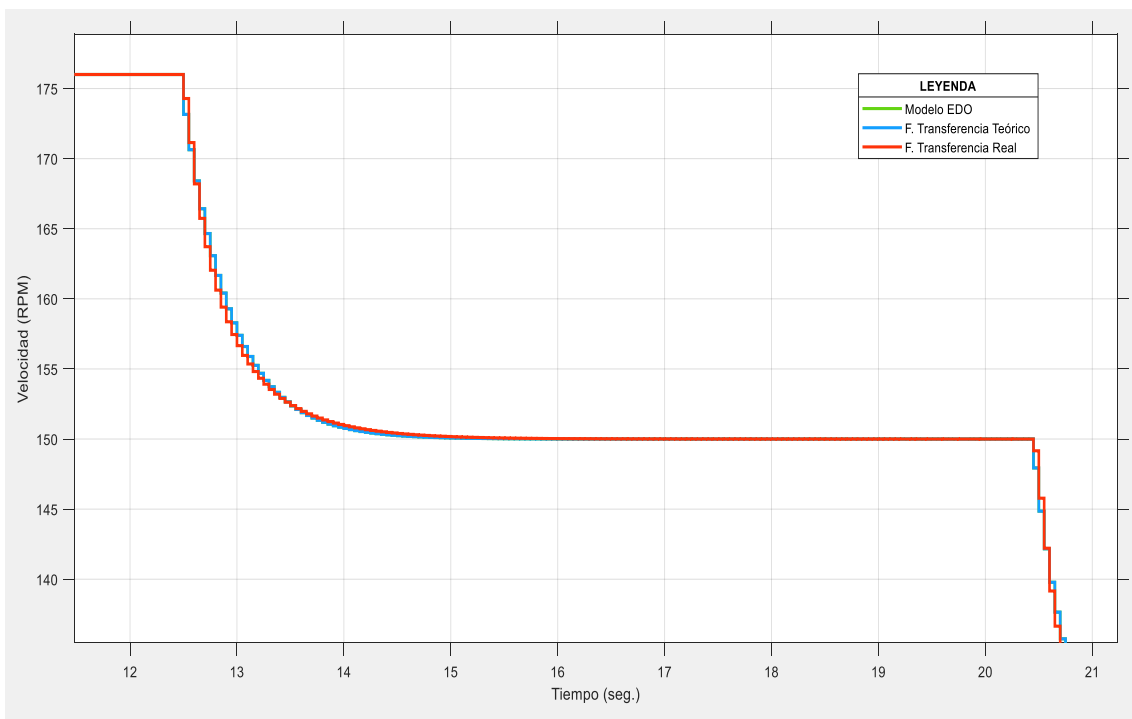


*Nota.* Ver anexo 07.

Se observa que la tendencia de la curva en base a las funciones de transferencia calculadas tanto del modelo matemático y real no se encuentra muy desfasada y responde al sistema de control PID con precisión. Cabe señalar que la curva verde se encuentra superpuesta por la de color azul que corresponde a la función transferencia teórica.

### Figura 61

*Detalle del comportamiento de la figura 60.*



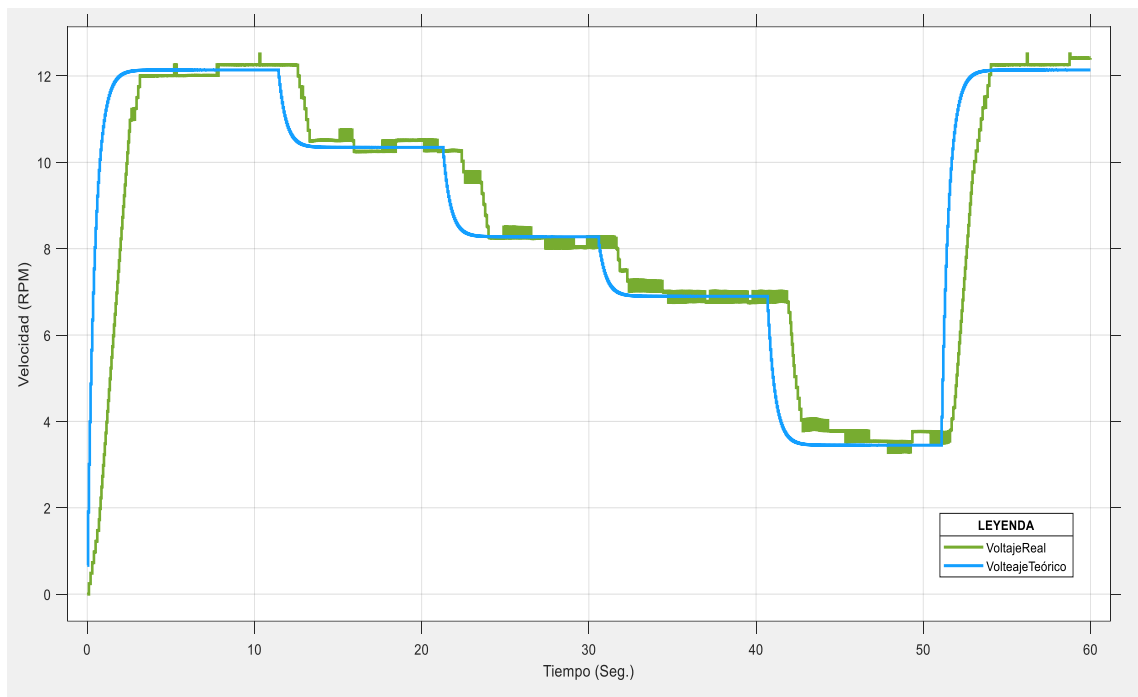
*Nota.* Existe una ligera variación en la curva de las dos funciones de transferencia, ya que los medios por la que fueron calculadas ambas son distintos, pero que no difieren por mucho ya que ambas responden al punto de referencia con precisión.

### ▪ Voltaje vs Tiempo (Modelo Matemático – Modelo Real)

Se puede apreciar en la figura 62 que el seguimiento entre el voltaje teórico y real es bueno, lo que indica que el controlador está correctamente sintonizado. Se aprecia ligeros retardos en el modelo real que se le atribuyen a la dinámica física del motor y a la discretización del control para la toma de datos.

**Figura 62**

*Comparación del voltaje del modelo matemático vs real.*

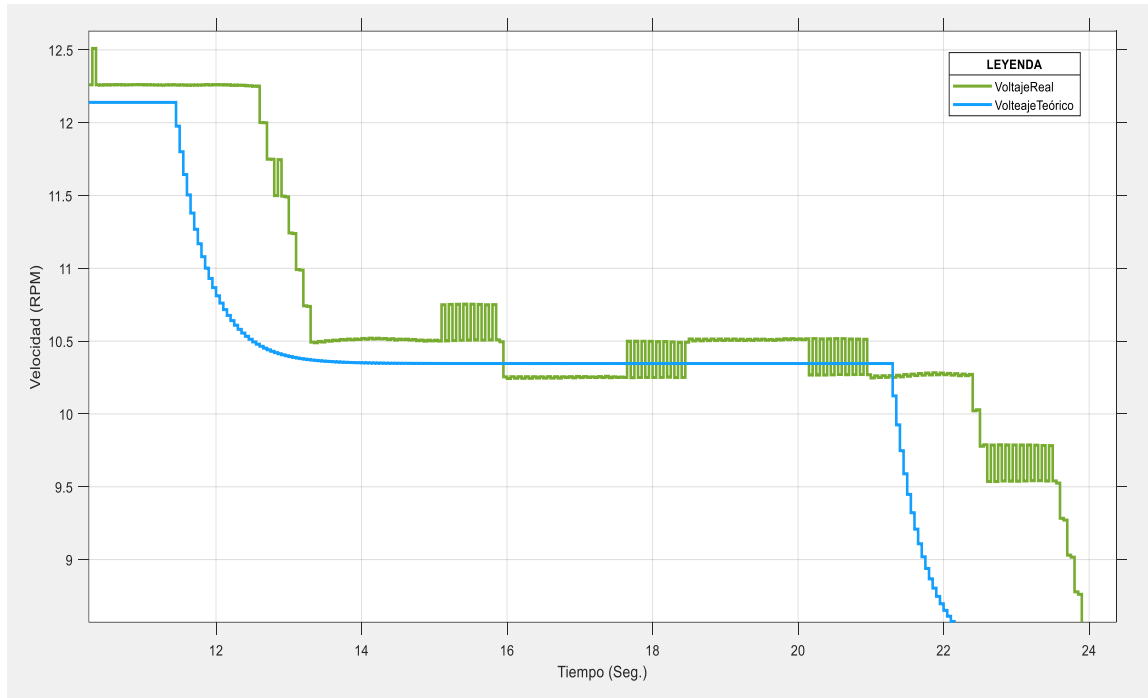


*Nota.* Ver anexo 07.

Al hacer zoom (Figura 63), se aprecian con mayor claridad las características dinámicas del sistema. La diferencia entre la respuesta teórica y la real se debe principalmente a los efectos de la inercia del motor, el retardo asociado al proceso de muestreo y la cuantización de las señales medidas por el sensor de voltaje en este caso.

**Figura 63**

*Detalle del comportamiento de la figura 62.*



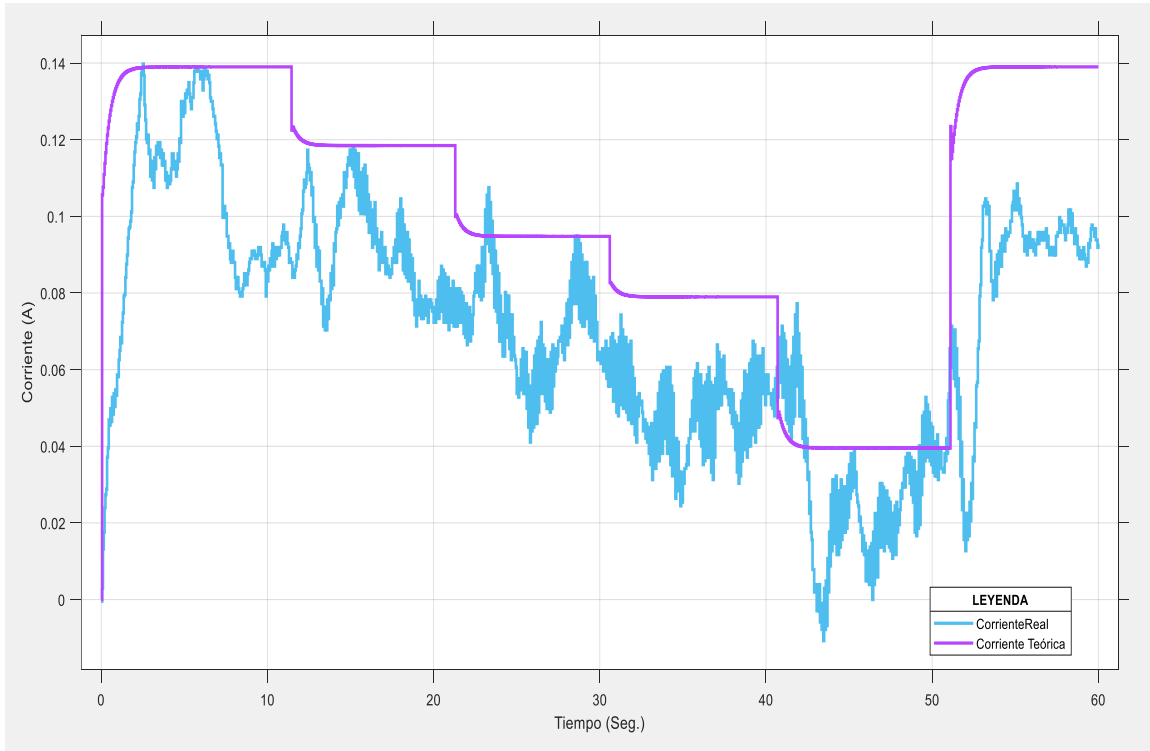
*Nota.* Existen diferencias en la respuesta ya que el sistema teórico es ideal y no se consideran factores que intervienen en sistema físico real.

▪ **Corriente vs Tiempo (Modelo Matemático – Modelo Real)**

En la figura 64, se muestra la variación de la corriente teórica y la corriente real del motor en función del tiempo. La curva morada representa la corriente que el modelo teórico espera que circule por el motor según las condiciones ideales del control. La curva celeste, en cambio, representa la corriente medida realmente en el sistema (la señal proveniente del sensor de corriente).

**Figura 64**

*Comparación de la corriente del modelo matemático vs real.*

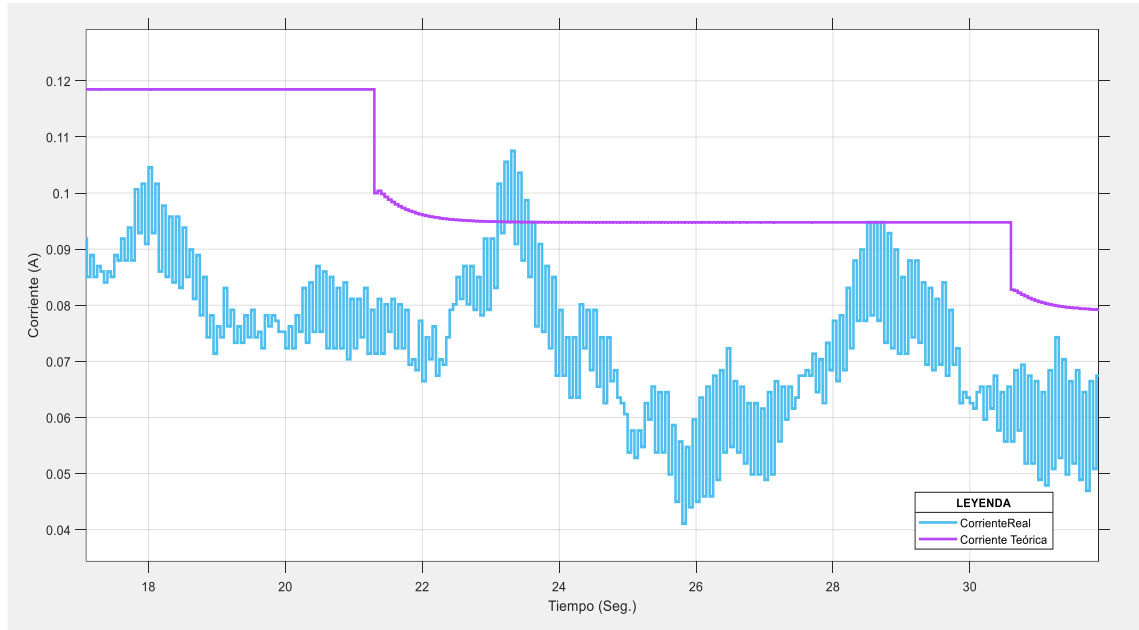


*Nota.* Ver anexo 07.

En la figura 65, la corriente real sigue la misma forma que la corriente teórica, con pequeñas diferencias debidas a: el ruido de medición del sensor, la inercia del motor, y el retardo entre la acción de control y la respuesta eléctrica real.

**Figura 65**

*Detalle del comportamiento de la figura 64.*



*Nota.* La corriente es más variante que el voltaje ya que se va ajustando la corriente necesaria para ajustar al Set Point lo que genera las señales mostradas en la señal celeste.

Se realizó un análisis estadístico de las señales involucradas (velocidad, voltaje y corriente) según la data del anexo 07. Para las señales en cuestión se calculó la correlación de Pearson con el fin de validar los datos obtenidos y cuantificar el proceso.

Según (Hernández et.al, 2014, p.305) se utiliza la siguiente formula:

$$r = \frac{\Sigma [(x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{[\Sigma (x_i - \bar{x})^2 * \Sigma (y_i - \bar{y})^2]}}$$

**Tabla 13**

*Correlación de Pearson de los datos reales y teóricos.*

<b>Variables</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>
<b>Correlación de Pearson</b>	0.96	0.82	0.73

Nota. El análisis permite validar el sistema implementado. Mientras más se acerque al 1 la relación de variables es más fuerte. Ver anexo 08.

**Tabla 14**

*Tiempo de asentamiento de acuerdo a los puntos de referencia evaluados.*

<b>Ref. Inicial (RPM)</b>	<b>Ref. Final (RPM)</b>	<b>Tiempo de asentamiento (Ts)</b>
176	150	1.9
150	120	1.85
120	100	1.8
100	50	2.3
50	176	3.15
Promedio		2.2

Nota. Los tiempos de estabilidad o asentamiento se determinan a partir de la data numérica. (Anexo 07).

## IV. DISCUSIÓN

En los **antecedentes internacionales**, Chen (2024) concluyó que un control PID correctamente ajustado permite eliminar el sobreimpulso y reducir el error a cero, logrando una respuesta estable y rápida. En este proyecto se observa una coincidencia directa: la velocidad real del motor sigue fielmente la señal teórica sin presentar oscilaciones notables, lo que indica una adecuada sintonización del controlador. La diferencia radica en el tiempo de estabilización: mientras que Chen reporta una estabilización en 0.3 s, en este trabajo se observa un tiempo promedio de estabilización de 2.2 s, explicado por las limitaciones de procesamiento del microcontrolador Arduino Mega 2560 y la inercia del motor físico, factores que no afectan la estabilidad general del sistema.

Por otro lado, Pinargote et al. (2023) demostraron que el uso del codificador para retroalimentar la posición y la velocidad permite un control más preciso. Esta afirmación coincide con los resultados del presente trabajo, donde el encoder acoplado al eje del motor permitió cerrar el lazo de control con lecturas confiables y en tiempo real, logrando un seguimiento estable de la velocidad de referencia. No obstante, a diferencia de dicho estudio que se centró solo en la simulación, este proyecto integra tanto la simulación en MATLAB/Simulink como la implementación física, lo que añade valor didáctico y práctico.

Guevara y Bautista (2021) destacaron la relevancia de los módulos didácticos para combinar teoría y práctica en la enseñanza del control automático, lo cual coincide plenamente con el propósito de este proyecto. Sin embargo, a diferencia de su propuesta basada en variadores comerciales y potenciómetros, el módulo desarrollado aquí

implementa control digital mediante PID programado, con medición de variables reales (voltaje, corriente y velocidad), lo que amplía su aplicabilidad y nivel de comprensión para el estudiante.

En cuanto a los **antecedentes nacionales**, Valdivia y Alfonso (2021) demostraron que la sintonización del PID mediante herramientas de MATLAB permite obtener parámetros óptimos y facilita la comprensión del modelo dinámico del motor. Este proyecto coincide con tales hallazgos, ya que la simulación fue utilizada como etapa previa para validar y ajustar los parámetros antes de su implementación física.

Villa (2021), por su parte, reportó una aproximación del 98.67 % entre la respuesta del modelo y la experimental; los resultados del presente trabajo, con un 99.15 %, se alinean con su conclusión de que la inclusión de sensores y la modelación previa mejoran significativamente la fidelidad del sistema. La diferencia radica en que Villa empleó un tipo de sensor óptico y otro esquema de controlador, mientras que aquí se utilizó un encoder y un controlador PID clásico.

Respecto a los **antecedentes locales**, Montoya y Rimapa (2024) indicaron que la velocidad del motor presenta alta correlación entre la simulación y la medición real, al igual que en el voltaje, mientras que la corriente presenta variabilidad moderada debido a interferencias en el entorno experimental con un  $r = 0.542$ . Esta tendencia también se observó en el presente trabajo: la corriente real mostró pequeñas fluctuaciones respecto a la teórica y en base a los datos del anexo 07 se obtuvo un  $r = 0.73$  lo que explica que la corriente sufre ruido por interferencias del sensor ACS712 y del entorno experimental. A pesar de ello, la forma general de la señal se mantuvo consistente para cada variación de

velocidad, lo que refuerza la confiabilidad del sistema y la validez de las mediciones realizadas.

En el desarrollo del presente trabajo no se incorporó un análisis de sensibilidad, debido a que el enfoque principal del estudio estuvo orientado a la implementación práctica del módulo didáctico, la adquisición de datos reales y la validación funcional del sistema de control en condiciones experimentales. Bajo esta perspectiva aplicada, la prioridad se centró en verificar el correcto funcionamiento del motor, el lazo cerrado y la implementación del control PID dentro del entorno Arduino - MATLAB, más que en la evaluación paramétrica detallada del modelo matemático. Aun así, este tipo de análisis constituye una línea clara de mejora para trabajos futuros, ya que permitiría identificar con mayor precisión qué parámetros influyen más en las discrepancias entre el modelo teórico y la respuesta real del sistema.

Si bien el módulo desarrollado fue implementado utilizando un motor DC de baja potencia (12 V), su estructura de control resulta escalable a sistemas de mayor capacidad industrial. En escenarios reales, la misma estrategia de lazo cerrado con encoder, control PID y adquisición de datos puede aplicarse a motores de mayor torque mediante el uso de drivers industriales (variadores DC/AC). Asimismo, la arquitectura Arduino–MATLAB puede migrarse a plataformas más robustas como PLCs, permitiendo soportar mayores exigencias de procesamiento, ruido y carga mecánica. Esta potencial escalabilidad constituye una extensión natural del proyecto hacia aplicaciones de automatización industrial, especialmente en líneas de producción, posición, robótica o control de velocidad en maquinaria de potencia superior.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- Se diseñó un módulo didáctico funcional que integra un microcontrolador Arduino Mega 2560, un motor DC con encoder, un driver BTS7960 y sensores de voltaje y corriente, logrando representar su comportamiento mediante funciones de transferencia obtenidas a partir del modelo electromecánico. El módulo cumple con el objetivo de ser accesible, replicable y adecuado para uso educativo, permitiendo comparar directamente el modelo teórico con el sistema real, demostrando coherencia entre diseño y comportamiento dinámico.
- El módulo didáctico fue implementado mediante pruebas en lazo cerrado, demostrando un control estable y operativo en el rango de 0 a 176 RPM. El controlador PID permitió alcanzar cada referencia con tiempos de estabilización promedio de 2.2 s. La corriente presentó valores pico de 0.19 A en arranque, estabilizándose entre 0.12 – 0.15 A, con una correlación real–teórica en corriente del 73%, evidenciando la presencia de ruido experimental propio del sensor ACS712. El voltaje alcanzó máximos de 12.2 V y correlación del 82 % y la velocidad de un 96 %.
- Se elaboró un manual de usuario y guías de laboratorio detalladas, que incluyen procedimientos de instalación, conexión, configuración del sistema en MATLAB/Simulink, lectura de datos y ejecución de prácticas en lazo abierto, cerrado y control PID. Las guías presentan rangos de voltaje, corriente, RPM y resultados esperados, permitiendo al estudiante comparar sus mediciones con valores de referencia. Esto garantiza una utilización pedagógica consistente del

módulo y facilita el aprendizaje autónomo y práctico en cursos de control automático.

## 5.2. Recomendaciones

- Se recomienda continuar el desarrollo del módulo incorporando otros tipos de controladores, como el PI, PD o difuso, con el propósito de ampliar las experiencias de aprendizaje y permitir la comparación entre diferentes técnicas de control aplicadas al mismo sistema físico.
- Es aconsejable implementar una interfaz HMI o un sistema de comunicación inalámbrica (Bluetooth o Wi-Fi) como el ESP32 u otro compatible con MATLAB/Simulink o simplemente con otro tipo de Software como por ejemplo LabView que permita monitorear y ajustar las variables del sistema en tiempo real desde una computadora o dispositivo móvil.
- Se sugiere mantener el módulo operativo dentro del laboratorio de automatización y control como material para cursos y prácticas experimentales. Asimismo, se recomienda promover su uso en proyectos de investigación y tesis, fomentando la innovación, la mejora continua y la formación práctica de los futuros ingenieros en control automático ya que es fundamental en el ámbito laboral.
- Se recomienda, la adquisición de la licencia de softwares como MATLAB (fundamental en el desarrollo de este proyecto) ya que para nuestro caso se usó una prueba estudiantil. También, se puede hacer la adquisición del Software LabView, que tiene una interfaz gráfica parecida a MATLAB y con funciones que permiten desarrollar diagrama de bloques y por ende controladores como PID.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almidon Elescano, A. y Julian Rafael, E. (2017). *Sistemas de control automático I*. Huancavelica, Perú: AIT-ENERGÍA VERDE.
- Arias Gonzales, J. (2020). *Proyecto de tesis - Guía para la elaboración*. Arequipa: Universo Abierto.
- Castaño Giraldo, S. (2019). *Control automático educación*. Obtenido de <https://controlautomaticoeducacion.com/analisis-de-sistemas/modelo-de-motor-dc/>
- Catota, P., Tasiguano, C. P., Portero, P., Chamba, E. y Tituaña, W. (2024). Diseño e implementación de un módulo didáctico para la enseñanza de los parámetros de incidencia en el desempeño de un aerogenerador. *Innovation & Development in Engineering and Applied Science*, 6(1), 1-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.53358/ideas.v6i1.990>
- Chen, J. (2024). *La aplicación del control PID en sistemas de control de motores de CC.*, [https://www.researchgate.net/publication/385709678\\_The\\_Application\\_of\\_PID\\_Control\\_in\\_DC\\_Motor\\_Control\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/385709678_The_Application_of_PID_Control_in_DC_Motor_Control_Systems)
- Falcon Mendoza, B. A., Velásquez Benavidez, Á. S., Ñacato Estrella, D. R. y Santacruz Sulca, F. J. (2022). Modelado Matemático, Simulación e Implementación de Pruebas en un Motor DC labvolt. *Polo del conocimiento*, 7(7), 999-1017. <https://doi.org/https://doi.org/10.23857/pc.v7i7.4270>
- Guevara Lidueñez, J. y Bautista Contreras, J. (2021). *Módulo didáctico para entrenamiento del control de velocidad para motores eléctricos*. [Tesis de grado, Universidad Francisco de

Paula Santander] <https://repositorio.ufps.edu.co/entities/publication/a37d669f-6060-4d6e-ac7d-4f1047700f8f>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico DF: Mc Graw Hill Education.

Montoya Pintado, E. y Rimapa Roncal, J. (2024). *Simulación de motor de corriente directa mediante modelo matemático y comparación con mediciones reales*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Jaén] <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/762>

Motive Hitech, B. (2024). *Sistemas de automatización*.

<https://motiveautomation.com/motive-training-kit-trainer-board-for-university-and-polytechnic/>

Neill Alan, D. y Suárez Contreras, L. (2018). *Procesos y Fundamentos de la Investigación Científica*. Machala, Ecuador: UTMACH.

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de Control Moderna*. México: PEARSON.

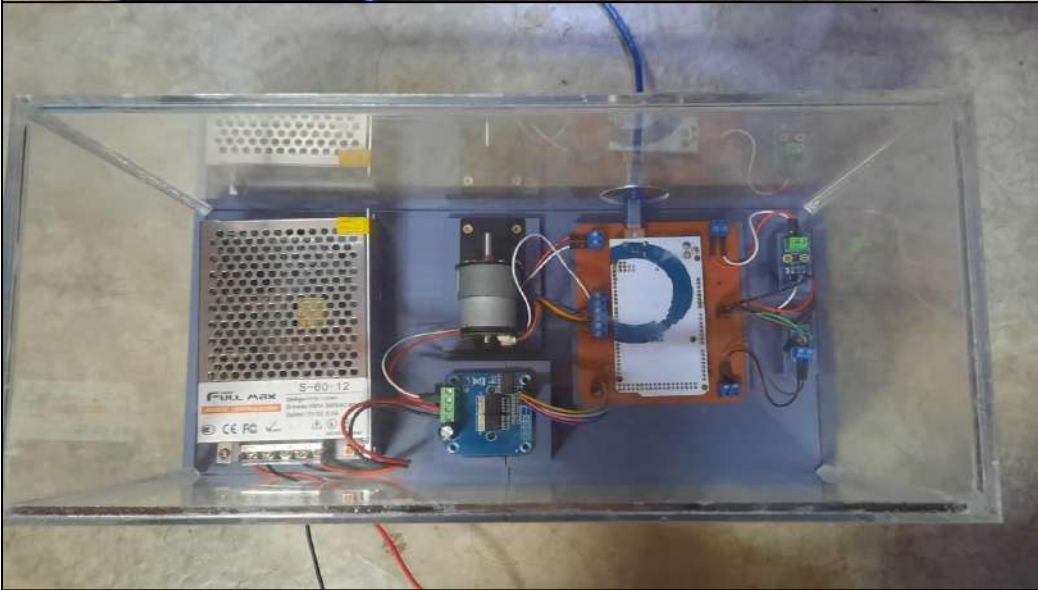
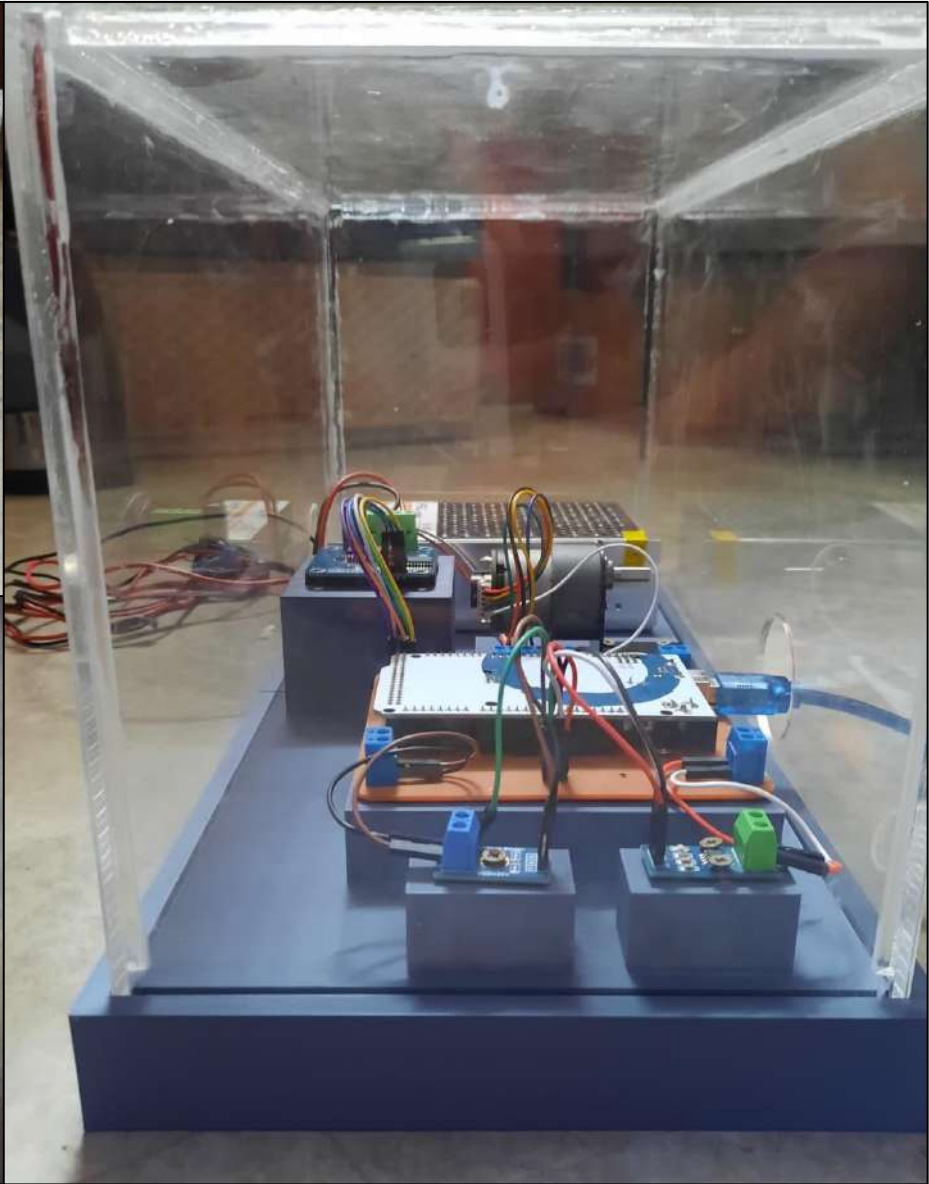
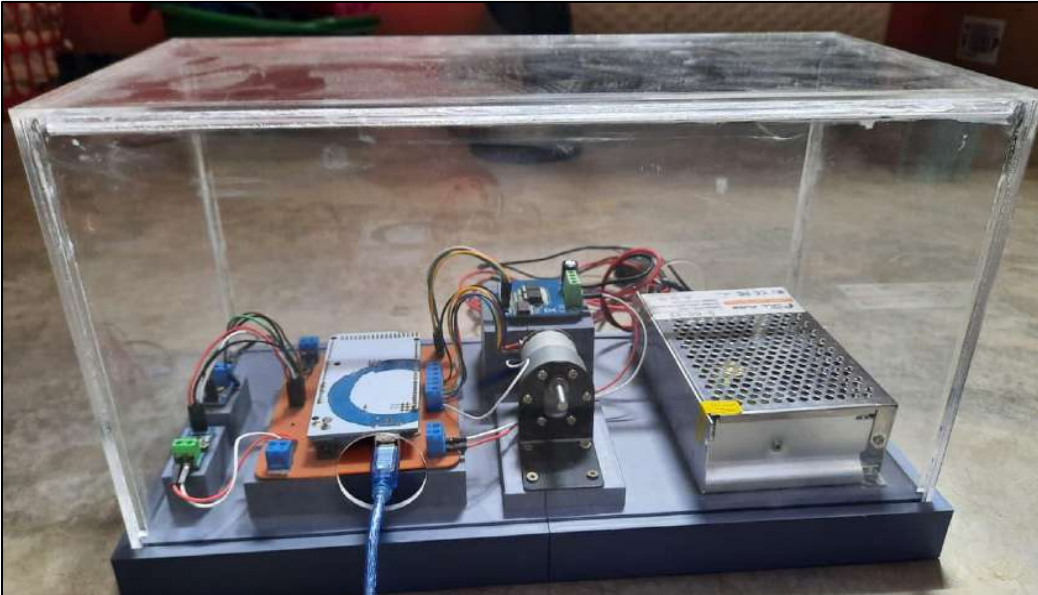
Ortiz Vergara, M. W. (2020). *Aplicación de módulos autoinstructivos en el aprendizaje colaborativo de control electrónico de motores industriales en los estudiantes del cuarto semestre de la Especialidad de Electrónica Industrial del Instituto de Educación Superior Tecnológico Huaycá*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Educación] <https://repositorio.une.edu.pe/entities/publication/7aecc9d8-25f2-4961-be04-441d2bd68323>

Pinargote, A., Sánchez, B., Orrala, J., Ramírez, J., Buenaño, A. y Vasconez, L. (2023). CONTROLADOR DE POSICION Y VELOCIDAD CON PID DISCRETO EN MOTOR

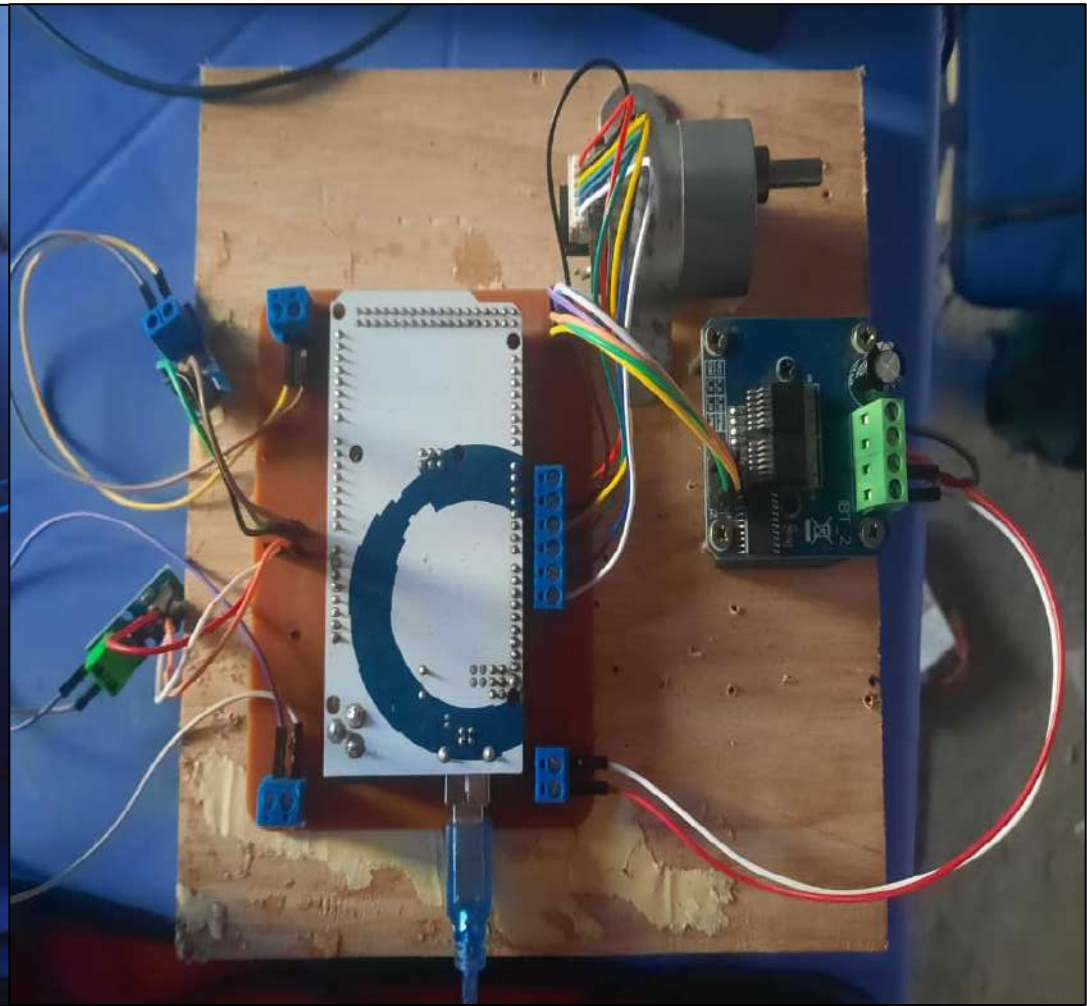
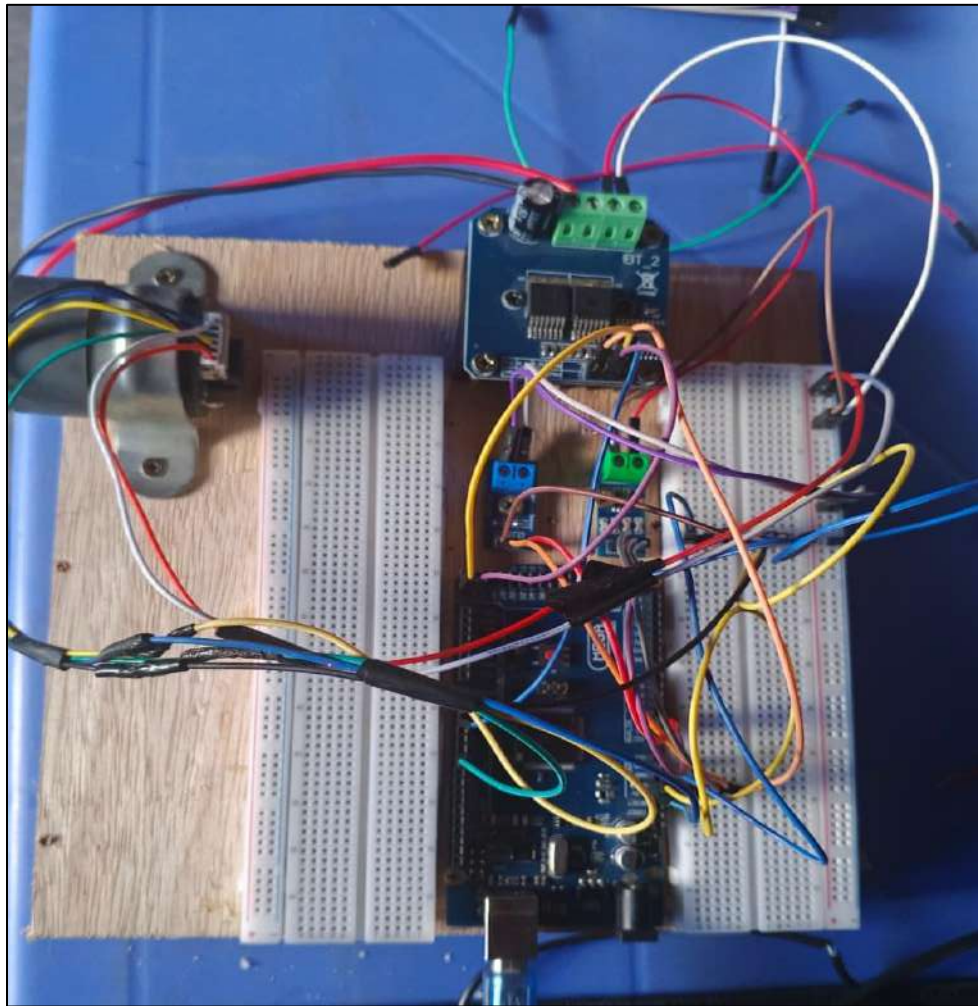
- DC CON CODIFICACION. *EcoSur - Innovación, Tecnología y Desarrollo Sostenible de América Latina*, 3(1), 1-12. <https://doi.org/10.61582/ebk5aj59>
- Ramos Galarza, C. (2021). Diseños de Investigación Experimental. *CienciAmérica*, 10(1), 1-7. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>.
- Rojas Palacio, C. V., Arango Zuluaga, E. I. y Botero Castro, H. A. (2024). DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A NOVEL DIDACTIC STRATEGY. *Journal of Technology and Science Education*, 14(4), 1025-1040. <https://doi.org/https://www.jotse.org/index.php/jotse/article/view/2564>
- Valdivia , C. y Alfonso, R. (2021). *Modelamiento y control de velocidad de motor DC mediante algoritmo PID basado en reglas de Ziegler - Nichols*. [Tesis de grado, Universidad Católica Santa María] <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/76b485d6-5a46-4a35-9ea8-24c7b315569e>
- Villa Rene, I. (2021). *Diseño de un control por realimentación de estados para motores de corriente continua*. [Tesis de grado, Universidad Tecnológica del Perú] <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/5176>

## **ANEXOS**

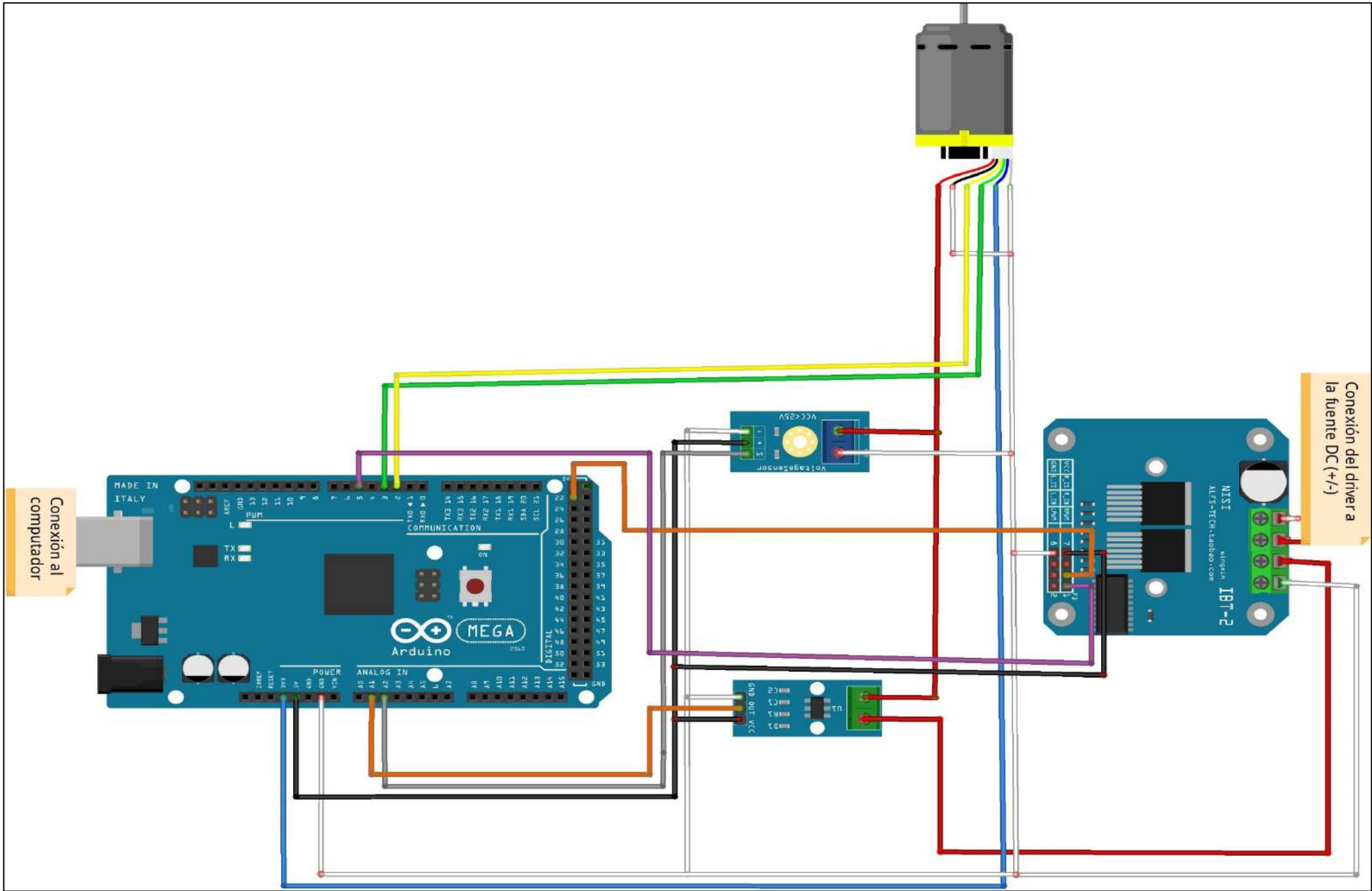
# ANEXO 01: MÓDULO VERSIÓN FINAL



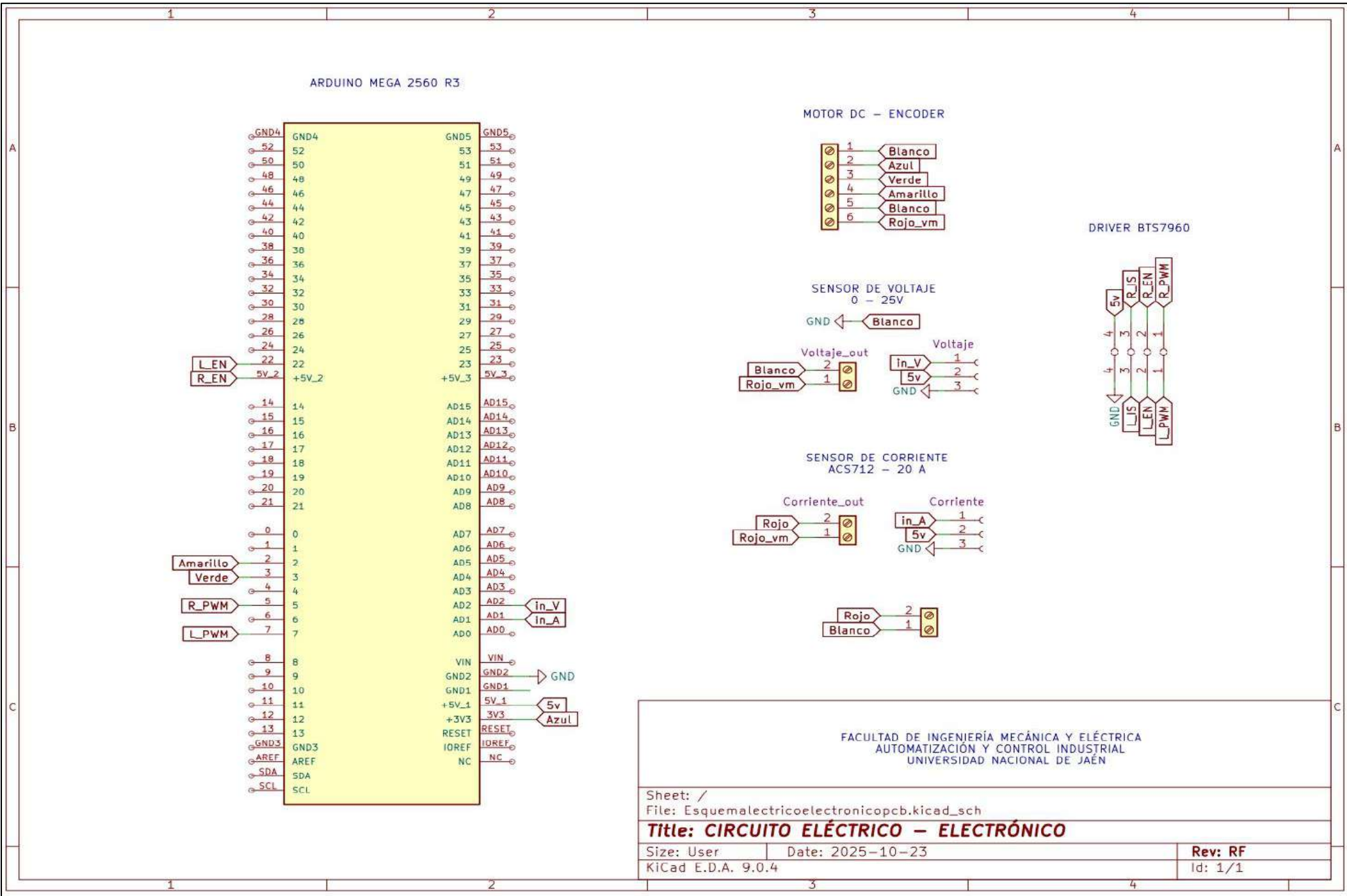
## ANEXO 02: MÓDULO VERSIÓN PROTOTIPO



# ANEXO 03: DIAGRAMA DE CONEXIONES - FRITZING



# ANEXO 04: DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA PCB - KICAD



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Sheet: /  
File: Esquemalectricoelectronicopcb.kicad\_sch

**Title: CIRCUITO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO**

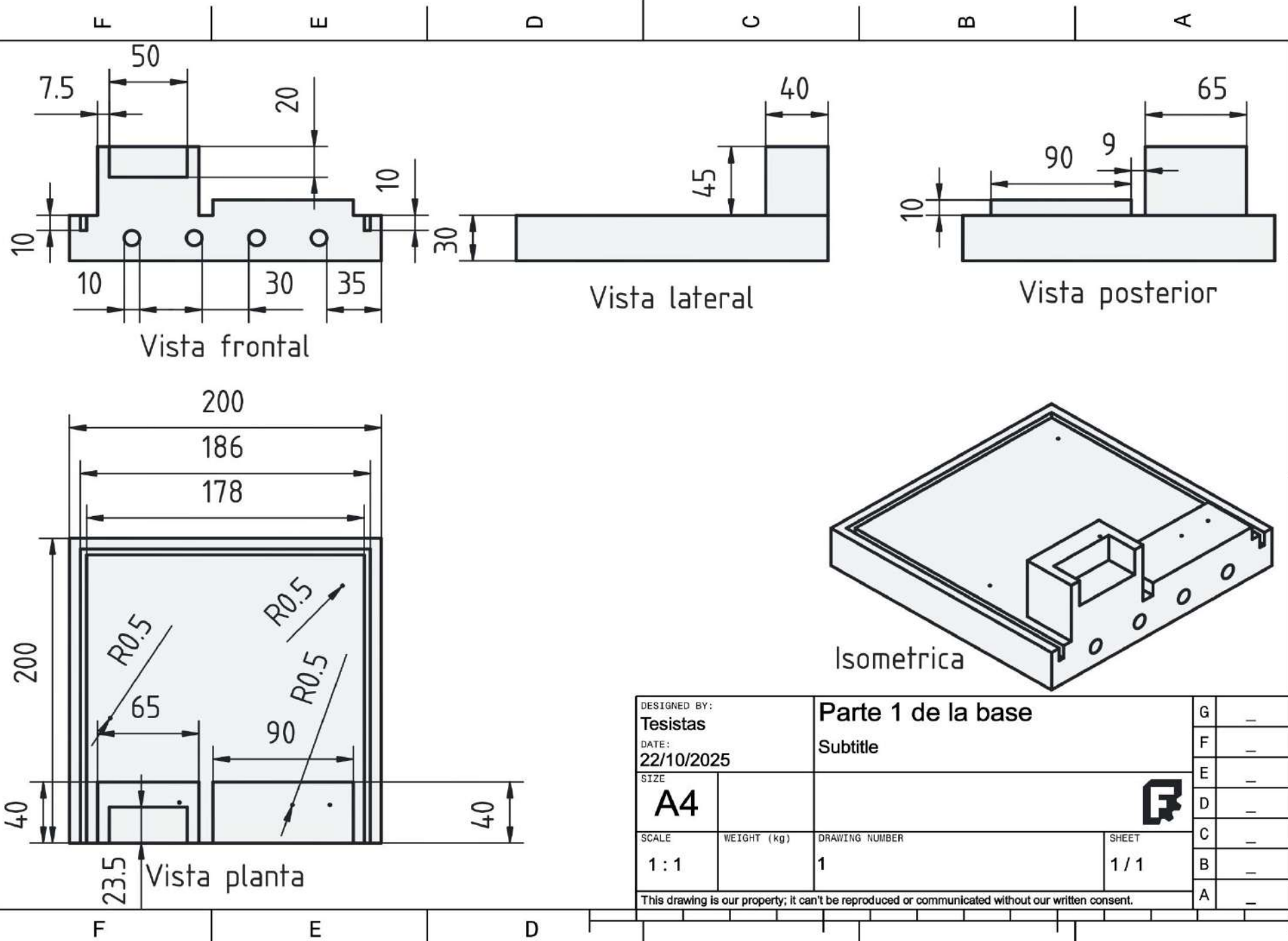
Size: User Date: 2025-10-23

Rev: RF

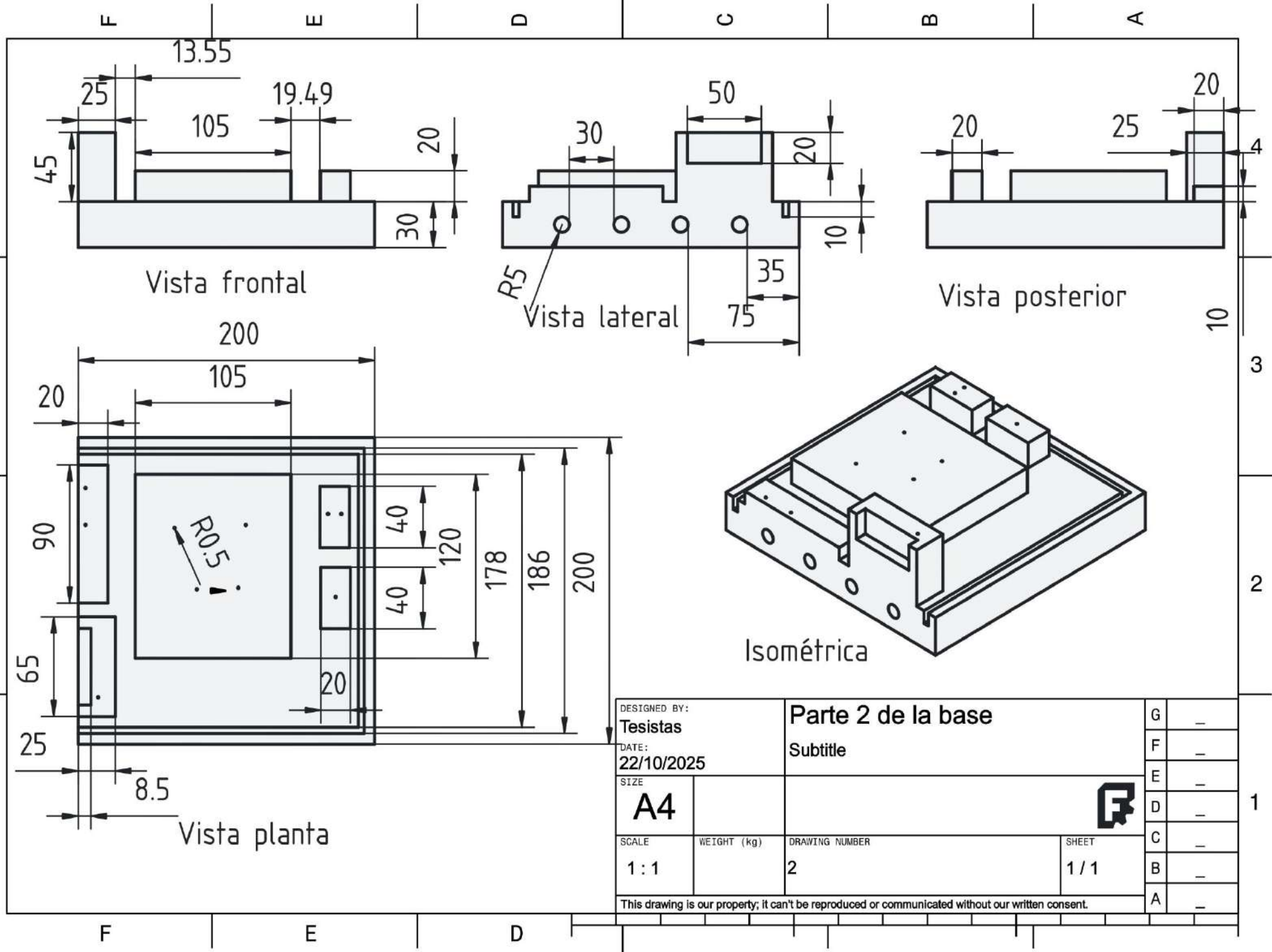
KiCad E.D.A. 9.0.4

Id: 1/1

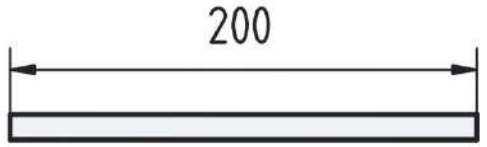
# ANEXO 05: PLANOS DE DISEÑO DEL MÓDULO - FREECAD



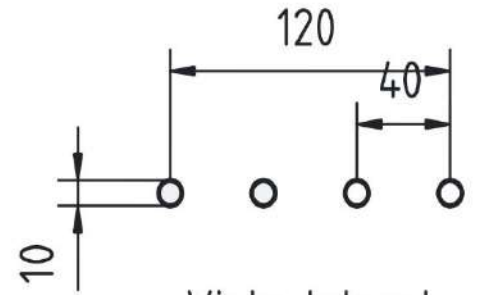
DESIGNED BY: <b>Tesistas</b>		<b>Parte 1 de la base</b>		G	-
DATE: <b>22/10/2025</b>		Subtitle		F	-
SIZE <b>A4</b>				E	-
SCALE <b>1:1</b>	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER <b>1</b>	SHEET <b>1/1</b>	D	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.				C	-
				B	-
				A	-



DESIGNED BY: <b>Tesistas</b>		<b>Parte 2 de la base</b>		G	-
DATE: <b>22/10/2025</b>		Subtitle		F	-
SIZE: <b>A4</b>				E	-
SCALE: <b>1 : 1</b>	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER: <b>2</b>	SHEET: <b>1 / 1</b>	D	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.				C	-
				B	-
				A	-



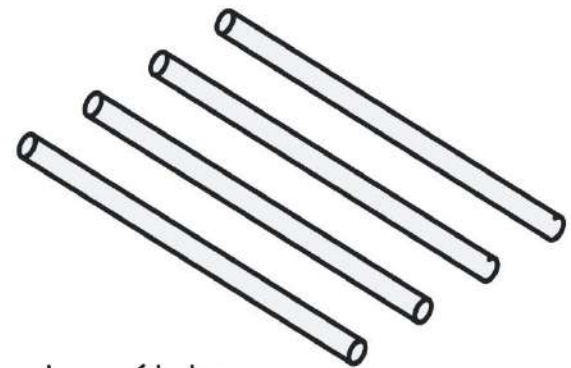
Vista frontal



Vista lateral

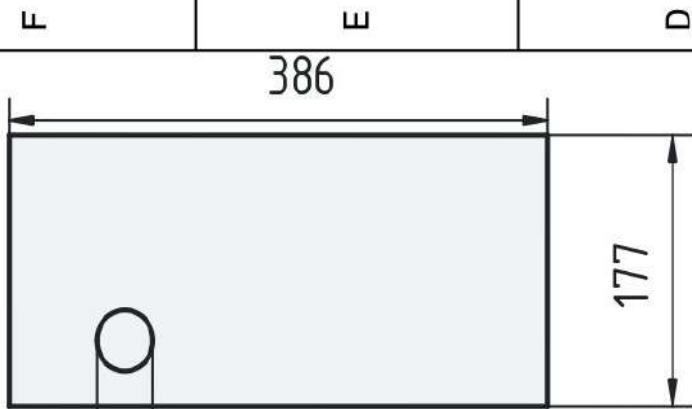


Vista de planta

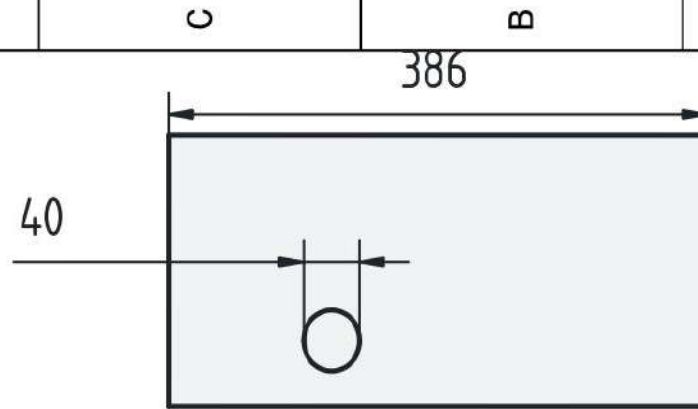


Isométrica

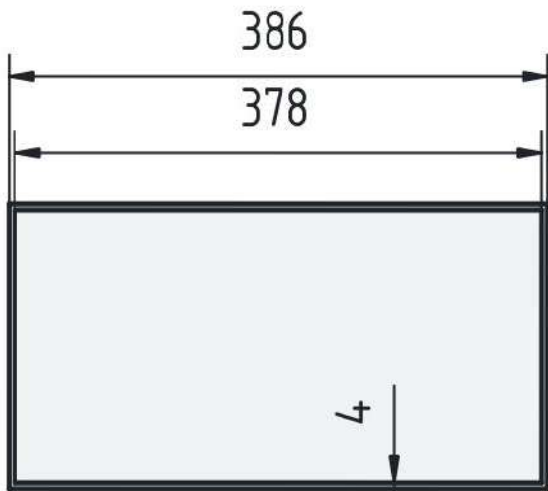
DESIGNED BY: <b>Tesistas</b>		<b>Parte 3 tarugos</b>		G	-
DATE: <b>23/10/2025</b>		Subtitle		F	-
SIZE <b>A4</b>				E	-
				D	-
SCALE <b>1 : 1</b>	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER <b>3</b>	SHEET <b>1 / 1</b>	C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.				B	-
				A	-



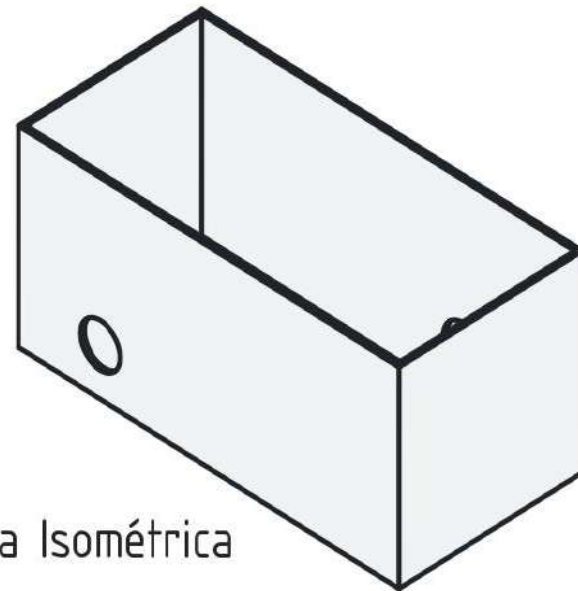
Vista frontal



Vista posterior



Vista planta



vista Isométrica

DESIGNED BY: <b>Tesistas</b>		<b>Parte 4 Laterales</b>		G	-
DATE: <b>23/10/2025</b>		Subtitle		F	-
SIZE <b>A4</b>				E	-
SCALE <b>1:1</b>	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER <b>4</b>	SHEET <b>1/1</b>	D	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.				C	-
				B	-
				A	-

F

E

D

C

B

A

4

Vista frontal

3

4

3

386

3

2

186

2

Isométrica

1

Vista Planta

1

F

E

D

DESIGNED BY: <b>Tesistas</b>		<b>parte 5 techo</b>		G	-
DATE: <b>23/10/2025</b>		Subtitle		F	-
SIZE <b>A4</b>				E	-
SCALE <b>1:1</b>	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER <b>5</b>	SHEET <b>1/1</b>	D	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.				C	-
				B	-
				A	-



F

E

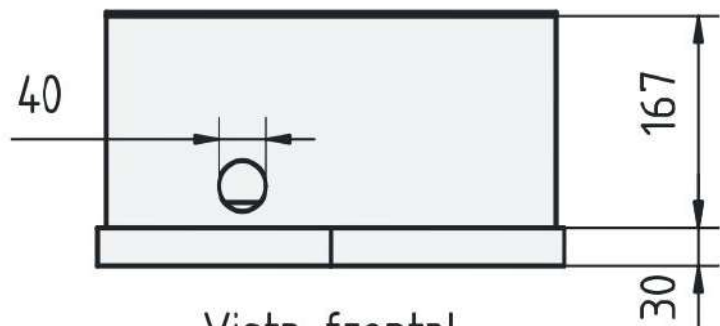
D

C

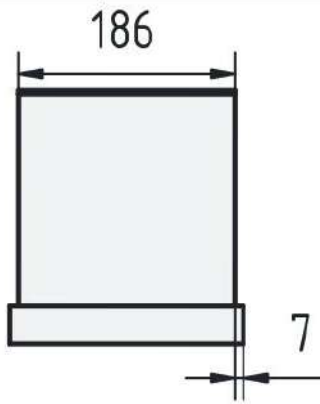
B

A

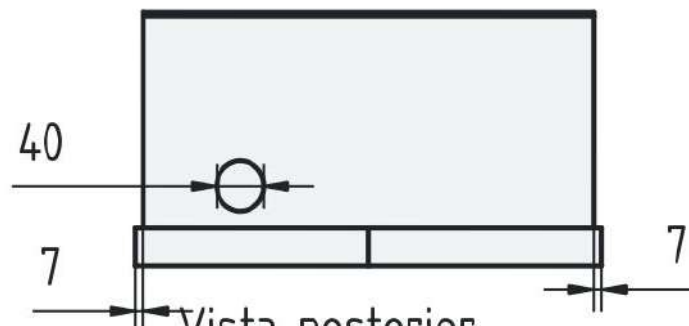
4



Vista frontal

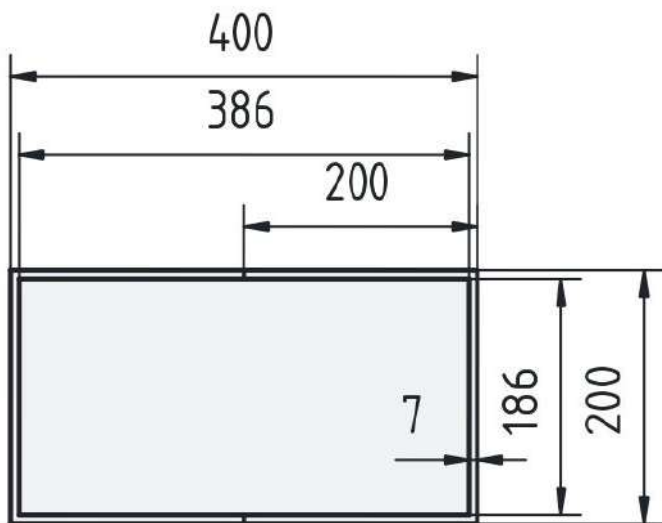


Vista lateral

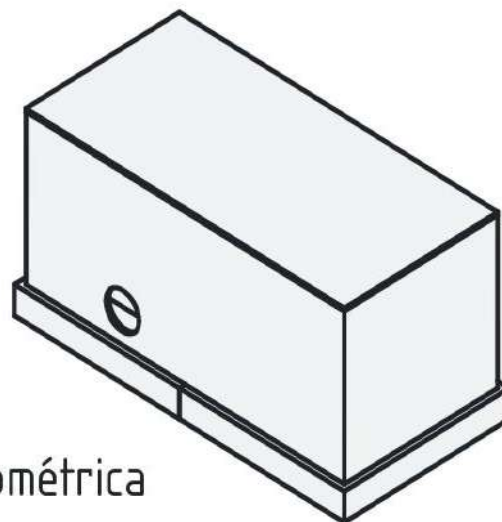


Vista posterior

3



Vista de planta



Isométrica

2

1

DESIGNED BY: <b>Tesistas</b>		<b>Emsablado</b>		G	-
DATE: <b>23/10/2025</b>		Subtitle		F	-
SIZE <b>A4</b>				E	-
SCALE <b>1:1</b>	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER <b>COMPLETO</b>	SHEET <b>1</b>	D	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.				C	-
				B	-
				A	-

F

E

D

4

3

2

1

## ANEXO 06: DATOS NÚMERICOS DEL LAZO ABIERTO - PRBS.

**Tabla A1**

*Datos registrados del sistema en lazo abierto.*

Tiempo	PWM	Velocidad (RPM)	Tiempo	PWM	Velocidad (RPM)	Tiempo	PWM	Velocidad (RPM)	Tiempo	PWM	Velocidad (RPM)
0	0	0	15.05	255	176.25	30.1	0	0	45.15	0	0
0.05	0	0	15.1	255	176.25	30.15	0	0	45.2	0	0
0.1	0	0	15.15	255	176.25	30.2	0	0	45.25	0	0
0.15	0	0	15.2	255	176.25	30.25	0	0	45.3	0	0
0.2	0	0	15.25	255	176.25	30.3	0	0	45.35	0	0
0.25	0	0	15.3	255	176.25	30.35	0	0	45.4	0	0
0.3	0	0	15.35	255	176.25	30.4	0	0	45.45	0	0
0.35	0	0	15.4	255	176.25	30.45	0	0	45.5	0	0
0.4	0	0	15.45	255	176.25	30.5	0	0	45.55	0	0
0.45	0	0	15.5	255	176.25	30.55	0	0	45.6	0	0
0.5	0	0	15.55	255	176.25	30.6	0	0	45.65	0	0
0.55	0	0	15.6	255	176.25	30.65	0	0	45.7	0	0
0.6	0	0	15.65	255	176.25	30.7	0	0	45.75	0	0
0.65	0	0	15.7	255	176.25	30.75	0	0	45.8	0	0
0.7	0	0	15.75	255	176.25	30.8	0	0	45.85	0	0
0.75	0	0	15.8	255	175.78	30.85	0	0	45.9	0	0
0.8	0	0	15.85	255	176.25	30.9	0	0	45.95	0	0
0.85	0	0	15.9	255	176.25	30.95	0	0	46	0	0
0.9	0	0	15.95	255	176.25	31	0	0	46.05	0	0
0.95	0	0	16	255	176.25	31.05	0	0	46.1	0	0
1	0	0	16.05	255	176.25	31.1	0	0	46.15	0	0
1.05	0	0	16.1	255	176.25	31.15	0	0	46.2	0	0
1.1	0	0	16.15	255	176.72	31.2	0	0	46.25	0	0
1.15	0	0	16.2	255	176.25	31.25	0	0	46.3	0	0
1.2	0	0	16.25	255	176.25	31.3	0	0	46.35	0	0
1.25	0	0	16.3	255	176.25	31.35	0	0	46.4	0	0
1.3	0	0	16.35	255	176.72	31.4	0	0	46.45	0	0
1.35	0	0	16.4	255	176.25	31.45	0	0	46.5	0	0
1.4	0	0	16.45	255	176.25	31.5	0	0	46.55	0	0
1.45	0	0	16.5	255	176.25	31.55	0	0	46.6	0	0
1.5	0	0	16.55	255	176.25	31.6	0	0	46.65	0	0
1.55	0	0	16.6	255	176.25	31.65	0	0	46.7	0	0
1.6	0	0	16.65	255	176.25	31.7	0	0	46.75	0	0
1.65	0	0	16.7	255	176.25	31.75	0	0	46.8	0	0
1.7	0	0	16.75	255	176.25	31.8	0	0	46.85	0	0
1.75	0	0	16.8	255	176.72	31.85	0	0	46.9	0	0
1.8	0	0	16.85	255	176.25	31.9	0	0	46.95	0	0

1.85	0	0	16.9	255	176.25	31.95	0	0	47	255	0
1.9	0	0	16.95	255	176.25	32	0	0	47.05	255	43.13
1.95	0	0	17	255	176.25	32.05	0	0	47.1	255	103.59
2	255	0	17.05	255	176.25	32.1	0	0	47.15	255	134.53
2.05	255	42.66	17.1	255	176.72	32.15	0	0	47.2	255	151.88
2.1	255	102.19	17.15	255	176.25	32.2	0	0	47.25	255	162.19
2.15	255	134.06	17.2	255	176.25	32.25	0	0	47.3	255	167.34
2.2	255	150.94	17.25	255	176.72	32.3	0	0	47.35	255	171.09
2.25	255	160.31	17.3	255	176.72	32.35	0	0	47.4	255	173.44
2.3	255	166.88	17.35	255	176.25	32.4	0	0	47.45	255	174.84
2.35	255	169.69	17.4	255	176.72	32.45	0	0	47.5	255	175.31
2.4	255	172.03	17.45	255	176.72	32.5	0	0	47.55	255	175.78
2.45	255	173.44	17.5	255	176.25	32.55	0	0	47.6	255	176.25
2.5	255	173.91	17.55	255	176.25	32.6	0	0	47.65	255	176.25
2.55	255	174.38	17.6	255	176.72	32.65	0	0	47.7	255	176.72
2.6	255	175.31	17.65	255	176.72	32.7	0	0	47.75	255	176.25
2.65	255	174.84	17.7	255	176.25	32.75	0	0	47.8	255	176.72
2.7	255	174.84	17.75	255	176.25	32.8	0	0	47.85	255	176.25
2.75	255	175.31	17.8	255	176.72	32.85	0	0	47.9	255	176.25
2.8	255	175.78	17.85	255	176.25	32.9	0	0	47.95	255	176.25
2.85	255	175.31	17.9	255	176.72	32.95	0	0	48	255	176.25
2.9	255	175.78	17.95	255	176.25	33	0	0	48.05	255	176.25
2.95	255	175.31	18	255	176.25	33.05	0	0	48.1	255	176.72
3	255	175.78	18.05	255	176.72	33.1	0	0	48.15	255	176.25
3.05	255	175.78	18.1	255	176.72	33.15	0	0	48.2	255	176.25
3.1	255	175.31	18.15	255	176.25	33.2	0	0	48.25	255	176.72
3.15	255	175.78	18.2	255	176.25	33.25	0	0	48.3	255	176.25
3.2	255	175.78	18.25	255	176.72	33.3	0	0	48.35	255	176.25
3.25	255	175.78	18.3	255	176.72	33.35	0	0	48.4	255	176.25
3.3	255	175.31	18.35	255	176.25	33.4	0	0	48.45	255	176.25
3.35	255	175.78	18.4	255	176.72	33.45	0	0	48.5	255	176.25
3.4	255	175.31	18.45	255	176.72	33.5	0	0	48.55	255	176.72
3.45	255	175.78	18.5	255	176.25	33.55	0	0	48.6	255	176.25
3.5	255	175.78	18.55	255	176.25	33.6	0	0	48.65	255	176.72
3.55	255	175.31	18.6	255	177.19	33.65	0	0	48.7	255	176.25
3.6	255	175.78	18.65	255	176.25	33.7	0	0	48.75	255	176.25
3.65	255	175.78	18.7	255	177.19	33.75	0	0	48.8	255	176.72
3.7	255	175.31	18.75	255	176.72	33.8	0	0	48.85	255	176.72
3.75	255	175.78	18.8	255	176.72	33.85	0	0	48.9	255	176.25
3.8	255	175.78	18.85	255	176.72	33.9	0	0	48.95	255	176.72
3.85	255	175.31	18.9	255	176.72	33.95	0	0	49	255	176.72
3.9	255	175.78	18.95	255	176.72	34	255	0	49.05	255	176.25
3.95	255	175.78	19	255	176.72	34.05	255	42.66	49.1	255	176.25
4	255	175.78	19.05	255	176.25	34.1	255	103.13	49.15	255	176.72

4.05	255	175.78	19.1	255	177.19	34.15	255	134.53	49.2	255	176.25
4.1	255	175.78	19.15	255	176.72	34.2	255	151.88	49.25	255	176.72
4.15	255	175.78	19.2	255	176.72	34.25	255	161.72	49.3	255	176.25
4.2	255	175.78	19.25	255	176.72	34.3	255	167.34	49.35	255	176.25
4.25	255	175.78	19.3	255	176.72	34.35	255	170.63	49.4	255	176.25
4.3	255	175.31	19.35	255	176.25	34.4	255	173.44	49.45	255	176.72
4.35	255	176.25	19.4	255	177.19	34.45	255	173.91	49.5	255	176.25
4.4	255	175.31	19.45	255	176.25	34.5	255	174.84	49.55	255	176.72
4.45	255	175.78	19.5	255	176.72	34.55	255	175.78	49.6	255	176.25
4.5	255	175.78	19.55	255	176.72	34.6	255	175.78	49.65	255	176.25
4.55	255	175.78	19.6	255	176.72	34.65	255	176.25	49.7	255	176.25
4.6	255	175.78	19.65	255	176.72	34.7	255	176.25	49.75	255	176.25
4.65	255	176.25	19.7	255	176.25	34.75	255	176.25	49.8	255	176.25
4.7	255	175.78	19.75	255	176.72	34.8	255	176.25	49.85	255	176.72
4.75	255	175.78	19.8	255	176.72	34.85	255	176.25	49.9	255	176.72
4.8	255	176.25	19.85	255	176.72	34.9	255	176.25	49.95	255	176.25
4.85	255	175.78	19.9	255	176.72	34.95	255	176.25	50	255	176.72
4.9	255	176.25	19.95	255	176.25	35	255	176.25	50.05	255	176.72
4.95	255	175.78	20	255	176.72	35.05	255	176.25	50.1	255	176.72
5	255	176.25	20.05	255	176.72	35.1	255	176.25	50.15	255	176.72
5.05	255	176.25	20.1	255	176.72	35.15	255	176.25	50.2	255	176.72
5.1	255	175.78	20.15	255	176.72	35.2	255	175.78	50.25	255	176.72
5.15	255	176.25	20.2	255	176.25	35.25	255	176.25	50.3	255	176.72
5.2	255	175.78	20.25	255	176.72	35.3	255	176.25	50.35	255	176.72
5.25	255	176.25	20.3	255	176.72	35.35	255	176.72	50.4	255	176.72
5.3	255	176.25	20.35	255	176.25	35.4	255	176.25	50.45	255	176.72
5.35	255	176.25	20.4	255	176.72	35.45	255	176.25	50.5	255	176.25
5.4	255	176.25	20.45	255	176.72	35.5	255	176.25	50.55	255	176.72
5.45	255	176.25	20.5	255	176.25	35.55	255	176.25	50.6	255	176.72
5.5	255	176.25	20.55	255	176.72	35.6	255	176.25	50.65	255	176.25
5.55	255	176.25	20.6	255	176.72	35.65	255	176.25	50.7	255	176.72
5.6	255	176.25	20.65	255	176.72	35.7	255	176.25	50.75	255	176.72
5.65	255	175.78	20.7	255	176.72	35.75	255	176.72	50.8	255	176.25
5.7	255	176.72	20.75	255	176.25	35.8	255	176.25	50.85	255	176.72
5.75	255	176.25	20.8	255	176.72	35.85	255	176.25	50.9	255	176.72
5.8	255	176.25	20.85	255	176.72	35.9	255	176.72	50.95	255	176.25
5.85	255	176.25	20.9	255	176.72	35.95	255	176.25	51	255	176.25
5.9	255	176.25	20.95	255	176.72	36	255	176.25	51.05	255	176.72
5.95	255	176.72	21	255	176.72	36.05	255	176.25	51.1	255	176.72
6	255	176.25	21.05	255	176.72	36.1	255	176.72	51.15	255	176.25
6.05	255	176.25	21.1	255	176.72	36.15	255	176.25	51.2	255	176.25
6.1	255	176.25	21.15	255	176.72	36.2	255	176.25	51.25	255	176.72
6.15	255	176.25	21.2	255	176.72	36.25	255	176.25	51.3	255	176.72
6.2	255	176.25	21.25	255	176.72	36.3	255	176.25	51.35	255	176.25

6.25	255	176.25	21.3	255	176.72	36.35	255	176.72	51.4	255	176.25
6.3	255	176.25	21.35	255	176.72	36.4	255	176.25	51.45	255	176.72
6.35	255	176.25	21.4	255	176.72	36.45	255	176.72	51.5	255	176.72
6.4	255	176.25	21.45	255	176.72	36.5	255	176.25	51.55	255	176.25
6.45	255	176.25	21.5	255	176.72	36.55	255	176.72	51.6	255	176.72
6.5	255	175.78	21.55	255	176.72	36.6	255	176.25	51.65	255	176.72
6.55	255	176.25	21.6	255	176.72	36.65	255	176.72	51.7	255	176.25
6.6	255	176.25	21.65	255	176.72	36.7	255	176.72	51.75	255	176.72
6.65	255	176.25	21.7	255	176.72	36.75	255	176.25	51.8	255	176.72
6.7	255	176.72	21.75	255	176.72	36.8	255	176.25	51.85	255	176.72
6.75	255	176.25	21.8	255	176.72	36.85	255	176.72	51.9	255	176.72
6.8	255	176.72	21.85	255	176.72	36.9	255	176.72	51.95	255	176.25
6.85	255	176.25	21.9	255	176.72	36.95	255	176.25	52	255	176.72
6.9	255	176.72	21.95	255	176.72	37	255	176.25	52.05	255	176.72
6.95	255	176.72	22	0	176.25	37.05	255	176.25	52.1	255	177.19
7	255	176.25	22.05	0	140.63	37.1	255	176.72	52.15	255	176.72
7.05	255	176.25	22.1	0	80.63	37.15	255	176.72	52.2	255	176.72
7.1	255	176.72	22.15	0	43.13	37.2	255	176.25	52.25	255	176.72
7.15	255	176.25	22.2	0	21.56	37.25	255	176.25	52.3	255	176.72
7.2	255	176.25	22.25	0	9.84	37.3	255	176.72	52.35	255	177.19
7.25	255	176.72	22.3	0	3.75	37.35	255	176.72	52.4	255	176.72
7.3	255	176.25	22.35	0	0.47	37.4	255	176.25	52.45	255	176.72
7.35	255	176.25	22.4	0	0	37.45	255	176.72	52.5	255	177.19
7.4	255	176.25	22.45	0	0	37.5	255	176.72	52.55	255	176.72
7.45	255	176.25	22.5	0	0	37.55	255	176.25	52.6	255	176.72
7.5	255	176.25	22.55	0	0	37.6	255	176.72	52.65	255	177.19
7.55	255	176.25	22.6	0	0	37.65	255	176.25	52.7	255	176.72
7.6	255	176.25	22.65	0	0	37.7	255	176.72	52.75	255	176.72
7.65	255	176.25	22.7	0	0	37.75	255	176.25	52.8	255	177.19
7.7	255	176.25	22.75	0	0	37.8	255	176.25	52.85	255	176.72
7.75	255	176.72	22.8	0	0	37.85	255	176.72	52.9	255	176.72
7.8	255	176.25	22.85	0	0	37.9	255	176.72	52.95	255	177.19
7.85	255	176.25	22.9	0	0	37.95	255	176.25	53	0	176.72
7.9	255	176.72	22.95	0	0	38	255	176.72	53.05	0	140.63
7.95	255	176.25	23	0	0	38.05	255	176.72	53.1	0	80.63
8	0	176.25	23.05	0	0	38.1	255	176.25	53.15	0	43.13
8.05	0	140.16	23.1	0	0	38.15	255	176.72	53.2	0	21.09
8.1	0	80.63	23.15	0	0	38.2	255	176.72	53.25	0	10.31
8.15	0	42.66	23.2	0	0	38.25	255	176.25	53.3	0	3.28
8.2	0	22.03	23.25	0	0	38.3	255	176.72	53.35	0	-1.41
8.25	0	9.84	23.3	0	0	38.35	255	176.72	53.4	0	0
8.3	0	4.22	23.35	0	0	38.4	255	176.25	53.45	0	0
8.35	0	0.47	23.4	0	0	38.45	255	176.72	53.5	0	0
8.4	0	0	23.45	0	0	38.5	255	176.72	53.55	0	0

8.45	0	0	23.5	0	0	38.55	255	176.25	53.6	0	0
8.5	0	0	23.55	0	0	38.6	255	176.25	53.65	0	0
8.55	0	0	23.6	0	0	38.65	255	176.72	53.7	0	0
8.6	0	0	23.65	0	0	38.7	255	176.72	53.75	0	0
8.65	0	0	23.7	0	0	38.75	255	176.25	53.8	0	0
8.7	0	0	23.75	0	0	38.8	255	176.72	53.85	0	0
8.75	0	0	23.8	0	0	38.85	255	176.25	53.9	0	0
8.8	0	0	23.85	0	0	38.9	255	176.72	53.95	0	0
8.85	0	0	23.9	0	0	38.95	255	176.25	54	0	0
8.9	0	0	23.95	0	0	39	255	176.72	54.05	0	0
8.95	0	0	24	0	0	39.05	255	176.72	54.1	0	0
9	0	0	24.05	0	0	39.1	255	176.25	54.15	0	0
9.05	0	0	24.1	0	0	39.15	255	177.19	54.2	0	0
9.1	0	0	24.15	0	0	39.2	255	176.72	54.25	0	0
9.15	0	0	24.2	0	0	39.25	255	176.72	54.3	0	0
9.2	0	0	24.25	0	0	39.3	255	177.19	54.35	0	0
9.25	0	0	24.3	0	0	39.35	255	176.72	54.4	0	0
9.3	0	0	24.35	0	0	39.4	255	176.72	54.45	0	0
9.35	0	0	24.4	0	0	39.45	255	177.19	54.5	0	0
9.4	0	0	24.45	0	0	39.5	255	176.72	54.55	0	0
9.45	0	0	24.5	0	0	39.55	255	176.72	54.6	0	0
9.5	0	0	24.55	0	0	39.6	255	176.72	54.65	0	0
9.55	0	0	24.6	0	0	39.65	255	176.72	54.7	0	0
9.6	0	0	24.65	0	0	39.7	255	176.72	54.75	0	0
9.65	0	0	24.7	0	0	39.75	255	176.72	54.8	0	0
9.7	0	0	24.75	0	0	39.8	255	176.72	54.85	0	0
9.75	0	0	24.8	0	0	39.85	255	176.72	54.9	0	0
9.8	0	0	24.85	0	0	39.9	255	176.72	54.95	0	0
9.85	0	0	24.9	0	0	39.95	255	176.72	55	0	0
9.9	0	0	24.95	0	0	40	255	176.25	55.05	0	0
9.95	0	0	25	0	0	40.05	255	177.19	55.1	0	0
10	0	0	25.05	0	0	40.1	255	176.25	55.15	0	0
10.05	0	0	25.1	0	0	40.15	255	177.19	55.2	0	0
10.1	0	0	25.15	0	0	40.2	255	176.72	55.25	0	0
10.15	0	0	25.2	0	0	40.25	255	176.72	55.3	0	0
10.2	0	0	25.25	0	0	40.3	255	176.72	55.35	0	0
10.25	0	0	25.3	0	0	40.35	255	176.72	55.4	0	0
10.3	0	0	25.35	0	0	40.4	255	176.72	55.45	0	0
10.35	0	0	25.4	0	0	40.45	255	176.72	55.5	0	0
10.4	0	0	25.45	0	0	40.5	255	177.19	55.55	0	0
10.45	0	0	25.5	0	0	40.55	255	176.72	55.6	0	0
10.5	0	0	25.55	0	0	40.6	255	176.72	55.65	0	0
10.55	0	0	25.6	0	0	40.65	255	177.19	55.7	0	0
10.6	0	0	25.65	0	0	40.7	255	176.72	55.75	0	0

10.65	0	0	25.7	0	0	40.75	255	176.72	55.8	0	0
10.7	0	0	25.75	0	0	40.8	255	177.19	55.85	0	0
10.75	0	0	25.8	0	0	40.85	255	176.72	55.9	0	0
10.8	0	0	25.85	0	0	40.9	255	177.19	55.95	0	0
10.85	0	0	25.9	0	0	40.95	255	176.72	56	0	0
10.9	0	0	25.95	0	0	41	0	177.19	56.05	0	0
10.95	0	0	26	0	0	41.05	0	140.16	56.1	0	0
11	0	0	26.05	0	0	41.1	0	81.09	56.15	0	0
11.05	0	0	26.1	0	0	41.15	0	43.13	56.2	0	0
11.1	0	0	26.15	0	0	41.2	0	21.56	56.25	0	0
11.15	0	0	26.2	0	0	41.25	0	10.31	56.3	0	0
11.2	0	0	26.25	0	0	41.3	0	3.75	56.35	0	0
11.25	0	0	26.3	0	0	41.35	0	-0.94	56.4	0	0
11.3	0	0	26.35	0	0	41.4	0	-0.94	56.45	0	0
11.35	0	0	26.4	0	0	41.45	0	0	56.5	0	0
11.4	0	0	26.45	0	0	41.5	0	0	56.55	0	0
11.45	0	0	26.5	0	0	41.55	0	0	56.6	0	0
11.5	0	0	26.55	0	0	41.6	0	0	56.65	0	0
11.55	0	0	26.6	0	0	41.65	0	0	56.7	0	0
11.6	0	0	26.65	0	0	41.7	0	0	56.75	0	0
11.65	0	0	26.7	0	0	41.75	0	0	56.8	0	0
11.7	0	0	26.75	0	0	41.8	0	0	56.85	0	0
11.75	0	0	26.8	0	0	41.85	0	0	56.9	0	0
11.8	0	0	26.85	0	0	41.9	0	0	56.95	0	0
11.85	0	0	26.9	0	0	41.95	0	0	57	0	0
11.9	0	0	26.95	0	0	42	0	0	57.05	0	0
11.95	0	0	27	0	0	42.05	0	0	57.1	0	0
12	0	0	27.05	0	0	42.1	0	0	57.15	0	0
12.05	0	0	27.1	0	0	42.15	0	0	57.2	0	0
12.1	0	0	27.15	0	0	42.2	0	0	57.25	0	0
12.15	0	0	27.2	0	0	42.25	0	0	57.3	0	0
12.2	0	0	27.25	0	0	42.3	0	0	57.35	0	0
12.25	0	0	27.3	0	0	42.35	0	0	57.4	0	0
12.3	0	0	27.35	0	0	42.4	0	0	57.45	0	0
12.35	0	0	27.4	0	0	42.45	0	0	57.5	0	0
12.4	0	0	27.45	0	0	42.5	0	0	57.55	0	0
12.45	0	0	27.5	0	0	42.55	0	0	57.6	0	0
12.5	0	0	27.55	0	0	42.6	0	0	57.65	0	0
12.55	0	0	27.6	0	0	42.65	0	0	57.7	0	0
12.6	0	0	27.65	0	0	42.7	0	0	57.75	0	0
12.65	0	0	27.7	0	0	42.75	0	0	57.8	0	0
12.7	0	0	27.75	0	0	42.8	0	0	57.85	0	0
12.75	0	0	27.8	0	0	42.85	0	0	57.9	0	0
12.8	0	0	27.85	0	0	42.9	0	0	57.95	0	0

12.85	0	0	27.9	0	0	42.95	0	0	58	0	0
12.9	0	0	27.95	0	0	43	0	0	58.05	0	0
12.95	0	0	28	0	0	43.05	0	0	58.1	0	0
13	0	0	28.05	0	0	43.1	0	0	58.15	0	0
13.05	0	0	28.1	0	0	43.15	0	0	58.2	0	0
13.1	0	0	28.15	0	0	43.2	0	0	58.25	0	0
13.15	0	0	28.2	0	0	43.25	0	0	58.3	0	0
13.2	0	0	28.25	0	0	43.3	0	0	58.35	0	0
13.25	0	0	28.3	0	0	43.35	0	0	58.4	0	0
13.3	0	0	28.35	0	0	43.4	0	0	58.45	0	0
13.35	0	0	28.4	0	0	43.45	0	0	58.5	0	0
13.4	0	0	28.45	0	0	43.5	0	0	58.55	0	0
13.45	0	0	28.5	0	0	43.55	0	0	58.6	0	0
13.5	0	0	28.55	0	0	43.6	0	0	58.65	0	0
13.55	0	0	28.6	0	0	43.65	0	0	58.7	0	0
13.6	0	0	28.65	0	0	43.7	0	0	58.75	0	0
13.65	0	0	28.7	0	0	43.75	0	0	58.8	0	0
13.7	0	0	28.75	0	0	43.8	0	0	58.85	0	0
13.75	0	0	28.8	0	0	43.85	0	0	58.9	0	0
13.8	0	0	28.85	0	0	43.9	0	0	58.95	0	0
13.85	0	0	28.9	0	0	43.95	0	0	59	0	0
13.9	0	0	28.95	0	0	44	0	0	59.05	0	0
13.95	0	0	29	0	0	44.05	0	0	59.1	0	0
14	255	0	29.05	0	0	44.1	0	0	59.15	0	0
14.05	255	42.66	29.1	0	0	44.15	0	0	59.2	0	0
14.1	255	103.13	29.15	0	0	44.2	0	0	59.25	0	0
14.15	255	134.53	29.2	0	0	44.25	0	0	59.3	0	0
14.2	255	151.88	29.25	0	0	44.3	0	0	59.35	0	0
14.25	255	161.25	29.3	0	0	44.35	0	0	59.4	0	0
14.3	255	166.88	29.35	0	0	44.4	0	0	59.45	0	0
14.35	255	171.09	29.4	0	0	44.45	0	0	59.5	0	0
14.4	255	172.97	29.45	0	0	44.5	0	0	59.55	0	0
14.45	255	174.38	29.5	0	0	44.55	0	0	59.6	0	0
14.5	255	174.84	29.55	0	0	44.6	0	0	59.65	0	0
14.55	255	175.31	29.6	0	0	44.65	0	0	59.7	0	0
14.6	255	175.78	29.65	0	0	44.7	0	0	59.75	0	0
14.65	255	175.78	29.7	0	0	44.75	0	0	59.8	0	0
14.7	255	176.25	29.75	0	0	44.8	0	0	59.85	0	0
14.75	255	175.78	29.8	0	0	44.85	0	0	59.9	0	0
14.8	255	176.25	29.85	0	0	44.9	0	0	59.95	0	0
14.85	255	176.25	29.9	0	0	44.95	0	0	60	255	0
14.9	255	176.25	29.95	0	0	45	0	0			
14.95	255	176.25	30	0	0	45.05	0	0			
15	255	175.78	30.05	0	0	45.1	0	0			

**ANEXO 07: DATOS NÚMERICOS DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO Y REAL.**

**Tabla A2**

*Datos registrados del sistema en lazo cerrado bajo PID – Modelo real y matemático.*

Tiempo (Seg.)	Set Point	Modelo Real (RPM)	FTReal (RPM)	FTTeórica (RPM)	EDO (RPM)	Voltaje Real (V)	Voltaje Teórico (V)	Corriente Real (A)	Corriente Teórica (A)
0	176	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.666	0.0005	0.0000
0.25	176	90.94	83.98	77.09	77.09	0.7483	5.685	0.0450	0.1277
0.5	176	130.31	125.93	120.36	120.36	1.2488	8.508	0.0806	0.1325
0.75	176	149.06	146.86	144.69	144.69	1.9941	10.097	0.1026	0.1354
1	176	159.84	158.32	158.39	158.39	2.7502	10.990	0.1139	0.1370
1.25	176	165.94	164.97	166.09	166.09	4.0093	11.493	0.1173	0.1379
1.5	176	169.69	169.00	170.43	170.43	5.2659	11.776	0.1364	0.1382
1.75	176	172.50	171.50	172.86	172.86	6.5186	11.935	0.1456	0.1386
2	176	173.44	173.09	174.24	174.24	7.7722	12.024	0.1628	0.1388
2.25	176	174.84	174.12	175.01	175.01	9.0235	12.075	0.1779	0.1389
2.5	176	175.31	174.77	175.44	175.44	10.2805	12.103	0.1984	0.1389
2.75	176	175.78	175.20	175.69	175.69	10.7864	12.119	0.1632	0.1390
3	176	175.78	175.48	175.82	175.82	11.5411	12.128	0.1427	0.1390
3.25	176	175.31	175.66	175.90	175.90	11.7972	12.133	0.1329	0.1390
3.5	176	175.78	175.78	175.94	175.94	12.0474	12.136	0.1349	0.1390
3.75	176	175.78	175.86	175.97	175.97	12.0469	12.137	0.1417	0.1390
4	176	176.25	175.91	175.98	175.98	12.0469	12.138	0.1378	0.1390
4.25	176	175.78	175.94	175.99	175.99	12.0503	12.139	0.1417	0.1390
4.5	176	176.25	175.96	175.99	175.99	12.0513	12.139	0.1378	0.1390
4.75	176	176.25	175.97	176.00	176.00	12.0552	12.139	0.1398	0.1390
5	176	176.25	175.98	176.00	176.00	12.0518	12.139	0.1378	0.1390
5.25	176	175.78	175.99	176.00	176.00	12.0508	12.139	0.1417	0.1390
5.5	176	176.25	175.99	176.00	176.00	12.0513	12.139	0.1398	0.1390
5.75	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3021	12.139	0.1388	0.1390
6	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3016	12.139	0.1408	0.1390
6.25	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3006	12.139	0.1486	0.1390
6.5	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3025	12.139	0.1437	0.1390
6.75	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3001	12.139	0.1437	0.1390
7	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3016	12.139	0.1466	0.1390
7.25	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3025	12.139	0.1456	0.1390
7.5	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3030	12.139	0.1456	0.1390
7.75	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3035	12.139	0.1486	0.1390
8	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3025	12.139	0.1486	0.1390

8.25	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3035	12.139	0.1505	0.1390
8.5	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3030	12.139	0.1476	0.1390
8.75	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3040	12.139	0.1486	0.1390
9	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3030	12.139	0.1525	0.1390
9.25	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3045	12.139	0.1525	0.1390
9.5	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3050	12.139	0.1496	0.1390
9.75	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3035	12.139	0.1456	0.1390
10	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.3040	12.139	0.1437	0.1390
10.25	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3040	12.139	0.1466	0.1390
10.5	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.3050	12.139	0.1466	0.1390
10.75	176	176.25	176.00	168.65	168.65	12.3045	11.563	0.1554	0.1206
11	176	175.78	176.00	160.49	160.49	12.2160	11.031	0.1564	0.1197
11.25	176	175.78	176.00	155.90	155.90	12.2131	10.731	0.1515	0.1191
11.5	150	176.25	176.00	153.32	153.32	12.2141	10.563	0.1505	0.1189
11.75	150	164.06	163.59	151.87	151.87	12.2160	10.468	0.1417	0.1187
12	150	157.03	157.40	151.05	151.05	12.2209	10.415	0.1476	0.1186
12.25	150	154.22	154.31	150.59	150.59	12.2219	10.385	0.1505	0.1185
12.5	150	152.81	152.61	150.33	150.33	12.2195	10.368	0.1574	0.1185
12.75	150	151.88	151.63	150.19	150.19	12.2111	10.358	0.1593	0.1185
13	150	150.94	151.03	150.11	150.11	12.2014	10.353	0.1525	0.1185
13.25	150	150.94	150.66	150.06	150.06	11.4511	10.350	0.1320	0.1185
13.5	150	150.47	150.43	150.03	150.03	11.2849	10.348	0.1114	0.1185
13.75	150	150.47	150.28	150.02	150.02	10.5386	10.347	0.1046	0.1185
14	150	150.47	150.18	150.01	150.01	10.0562	10.347	0.0958	0.1185
14.25	150	150.00	150.12	150.01	150.01	10.0665	10.347	0.1036	0.1185
14.5	150	150.47	150.08	150.00	150.00	10.0601	10.346	0.0958	0.1185
14.75	150	150.00	150.05	150.00	150.00	10.0621	10.346	0.1056	0.1185
15	150	150.47	150.03	150.00	150.00	10.0587	10.346	0.0987	0.1185
15.25	150	150.00	150.02	150.00	150.00	10.0645	10.346	0.1046	0.1185
15.5	150	150.00	150.01	150.00	150.00	10.0635	10.346	0.1153	0.1185
15.75	150	149.53	150.01	150.00	150.00	10.3407	10.346	0.1202	0.1185
16	150	150.00	150.01	150.00	150.00	10.0890	10.346	0.1349	0.1185
16.25	150	150.47	150.00	150.00	150.00	10.3309	10.346	0.1241	0.1185
16.5	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.3206	10.346	0.1271	0.1185
16.75	150	149.53	150.00	150.00	150.00	10.3123	10.346	0.1261	0.1185
17	150	150.47	150.00	150.00	150.00	10.3226	10.346	0.1320	0.1185
17.25	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.3162	10.346	0.1241	0.1185
17.5	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.3236	10.346	0.1349	0.1185
17.75	150	150.47	150.00	150.00	150.00	10.3162	10.346	0.1290	0.1185
18	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.3206	10.346	0.1193	0.1185
18.25	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.2889	10.346	0.1212	0.1185
18.5	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.5411	10.346	0.1075	0.1185

18.75	150	150.47	150.00	150.00	150.00	10.2957	10.346	0.1173	0.1185
19	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.2840	10.346	0.1085	0.1185
19.25	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.2947	10.346	0.1105	0.1185
19.5	150	150.47	150.00	150.00	150.00	10.2849	10.346	0.1065	0.1185
19.75	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.2937	10.346	0.1105	0.1185
20	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.2854	10.346	0.0997	0.1185
20.25	150	149.53	150.00	150.00	150.00	10.2957	10.346	0.1095	0.1185
20.5	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.2913	10.346	0.1193	0.1185
20.75	150	150.00	150.00	150.00	150.00	10.2947	10.346	0.1173	0.1185
21	150	150.47	150.00	145.84	145.84	10.0440	9.963	0.1281	0.0977
21.25	150	150.00	150.00	134.53	134.53	10.2879	9.225	0.1241	0.0965
21.5	120	149.53	150.00	128.18	128.18	10.0440	8.811	0.1378	0.0957
21.75	120	135.00	135.68	124.60	124.60	9.5318	8.577	0.1232	0.0954
22	120	127.50	128.53	122.59	122.59	9.2981	8.446	0.1300	0.0951
22.25	120	124.69	124.97	121.46	121.46	9.2908	8.372	0.1193	0.0950
22.5	120	122.34	123.01	120.82	120.82	9.3006	8.330	0.1378	0.0949
22.75	120	121.88	121.88	120.46	120.46	9.2830	8.307	0.1212	0.0948
23	120	121.41	121.19	120.26	120.26	8.8006	8.294	0.1124	0.0948
23.25	120	120.47	120.77	120.15	120.15	8.5513	8.286	0.1134	0.0948
23.5	120	120.47	120.50	120.08	120.08	8.8040	8.282	0.1105	0.0948
23.75	120	120.47	120.32	120.05	120.05	8.5591	8.280	0.1183	0.0948
24	120	120.47	120.21	120.03	120.03	8.8025	8.279	0.0958	0.0948
24.25	120	120.47	120.14	120.01	120.01	8.5557	8.278	0.1095	0.0948
24.5	120	120.00	120.09	120.01	120.01	8.2830	8.277	0.0880	0.0948
24.75	120	120.00	120.06	120.00	120.00	8.0748	8.277	0.0948	0.0948
25	120	120.00	120.04	120.00	120.00	8.0626	8.277	0.0733	0.0948
25.25	120	120.00	120.02	120.00	120.00	8.0772	8.277	0.0899	0.0948
25.5	120	120.00	120.02	120.00	120.00	8.0670	8.277	0.0997	0.0948
25.75	120	120.47	120.01	120.00	120.00	8.3187	8.277	0.0978	0.0948
26	120	120.47	120.01	120.00	120.00	8.0679	8.277	0.1056	0.0948
26.25	120	120.47	120.00	120.00	120.00	8.3099	8.277	0.0919	0.0948
26.5	120	119.53	120.00	120.00	120.00	8.0635	8.277	0.1085	0.0948
26.75	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.2981	8.277	0.0890	0.0948
27	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.0601	8.277	0.1036	0.0948
27.25	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.2713	8.277	0.0860	0.0948
27.5	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.2869	8.277	0.1007	0.0948
27.75	120	119.53	120.00	120.00	120.00	8.2786	8.277	0.0821	0.0948
28	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.5308	8.277	0.0762	0.0948
28.25	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.2869	8.277	0.0811	0.0948
28.5	120	120.47	120.00	120.00	120.00	8.5347	8.277	0.0665	0.0948
28.75	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.2913	8.277	0.0772	0.0948
29	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.5327	8.277	0.0635	0.0948

29.25	120	120.47	120.00	120.00	120.00	8.2972	8.277	0.0714	0.0948
29.5	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.5342	8.277	0.0557	0.0948
29.75	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.3123	8.277	0.0733	0.0948
30	120	119.53	120.00	120.00	120.00	8.3016	8.277	0.0567	0.0948
30.25	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.3089	8.277	0.0684	0.0948
30.5	120	120.00	120.00	120.00	120.00	8.3001	8.201	0.0723	0.0948
30.75	120	120.00	120.00	111.24	111.24	8.5445	7.631	0.0674	0.0803
31	100	118.13	118.82	106.32	106.32	8.3006	7.310	0.0792	0.0797
31.25	100	108.28	109.18	103.56	103.56	8.5484	7.130	0.0723	0.0794
31.5	100	105.00	105.09	102.00	102.00	8.2996	7.028	0.0958	0.0792
31.75	100	102.66	102.99	101.13	101.13	8.5323	6.971	0.0919	0.0791
32	100	102.19	101.82	100.63	100.63	8.2889	6.939	0.1105	0.0791
32.25	100	101.25	101.14	100.36	100.36	7.9976	6.921	0.0899	0.0790
32.5	100	100.31	100.73	100.20	100.20	7.5068	6.911	0.1026	0.0790
32.75	100	100.31	100.47	100.11	100.11	7.2571	6.905	0.0831	0.0790
33	100	100.31	100.30	100.06	100.06	7.0318	6.902	0.0831	0.0790
33.25	100	99.84	100.20	100.04	100.04	6.7835	6.900	0.0850	0.0790
33.5	100	100.31	100.13	100.02	100.02	7.0352	6.899	0.0782	0.0790
33.75	100	100.31	100.08	100.01	100.01	6.7845	6.898	0.0909	0.0790
34	100	100.31	100.05	100.01	100.01	7.0298	6.898	0.0723	0.0790
34.25	100	99.84	100.04	100.00	100.00	6.7908	6.898	0.0919	0.0790
34.5	100	99.84	100.02	100.00	100.00	7.0293	6.898	0.0645	0.0790
34.75	100	100.31	100.02	100.00	100.00	6.7937	6.898	0.0831	0.0790
35	100	99.84	100.01	100.00	100.00	6.7737	6.897	0.0596	0.0790
35.25	100	99.84	100.01	100.00	100.00	7.0362	6.897	0.0831	0.0790
35.5	100	99.84	100.00	100.00	100.00	6.7791	6.897	0.0782	0.0790
35.75	100	99.38	100.00	100.00	100.00	7.0362	6.897	0.0831	0.0790
36	100	100.31	100.00	100.00	100.00	6.7849	6.897	0.0968	0.0790
36.25	100	100.31	100.00	100.00	100.00	7.0313	6.897	0.0899	0.0790
36.5	100	99.84	100.00	100.00	100.00	6.7884	6.897	0.1085	0.0790
36.75	100	99.84	100.00	100.00	100.00	7.0303	6.897	0.0899	0.0790
37	100	100.31	100.00	100.00	100.00	6.7928	6.897	0.1183	0.0790
37.25	100	99.84	100.00	100.00	100.00	7.0269	6.897	0.0919	0.0790
37.5	100	100.31	100.00	100.00	100.00	7.0616	6.897	0.1105	0.0790
37.75	100	100.31	100.00	100.00	100.00	6.7991	6.897	0.0860	0.0790
38	100	99.84	100.00	100.00	100.00	7.0601	6.897	0.0850	0.0790
38.25	100	100.31	100.00	100.00	100.00	6.8074	6.897	0.0714	0.0790
38.5	100	99.84	100.00	100.00	100.00	7.0577	6.897	0.0626	0.0790
38.75	100	99.38	100.00	100.00	100.00	6.8138	6.897	0.0655	0.0790
39	100	100.31	100.00	100.00	100.00	7.0591	6.897	0.0518	0.0790
39.25	100	100.31	100.00	100.00	100.00	6.8182	6.897	0.0635	0.0790
39.5	100	99.38	100.00	100.00	100.00	7.0547	6.897	0.0450	0.0790

39.75	100	100.31	100.00	100.00	100.00	6.8216	6.897	0.0694	0.0790
40	100	100.31	100.00	100.00	100.00	7.0582	6.897	0.0547	0.0790
40.25	100	99.84	100.00	100.00	100.00	7.3211	6.897	0.0694	0.0790
40.5	100	100.31	100.00	100.00	100.00	7.0572	6.897	0.0635	0.0790
40.75	100	99.84	100.00	100.00	100.00	7.3118	6.897	0.0782	0.0790
41	100	99.84	100.00	81.76	81.76	7.0587	5.521	0.0802	0.0432
41.25	100	99.84	100.00	67.87	67.87	7.3040	4.615	0.0762	0.0415
41.5	100	99.84	100.00	60.05	60.05	7.0582	4.105	0.0870	0.0407
41.75	50	76.88	80.02	55.66	55.66	7.3055	3.818	0.0694	0.0401
42	50	63.75	65.95	53.18	53.18	7.0606	3.656	0.0929	0.0399
42.25	50	58.13	59.19	51.79	51.79	7.0435	3.566	0.0762	0.0397
42.5	50	54.84	55.54	51.01	51.01	6.0455	3.514	0.0841	0.0396
42.75	50	52.97	53.44	50.57	50.57	4.7903	3.486	0.0557	0.0395
43	50	51.56	52.18	50.32	50.32	4.2957	3.470	0.0459	0.0395
43.25	50	51.09	51.39	50.18	50.18	3.5411	3.460	0.0147	0.0395
43.5	50	50.63	50.90	50.10	50.10	3.8084	3.455	0.0137	0.0395
43.75	50	50.63	50.58	50.06	50.06	3.5660	3.452	0.0117	0.0395
44	50	50.63	50.38	50.03	50.03	3.8157	3.451	0.0010	0.0395
44.25	50	50.16	50.25	50.02	50.02	3.5557	3.450	0.0293	0.0395
44.5	50	50.63	50.16	50.01	50.01	3.7923	3.449	0.0254	0.0395
44.75	50	50.16	50.10	50.01	50.01	3.5523	3.449	0.0547	0.0395
45	50	50.16	50.07	50.00	50.00	3.5464	3.449	0.0538	0.0395
45.25	50	50.16	50.04	50.00	50.00	3.5508	3.449	0.0723	0.0395
45.5	50	50.16	50.03	50.00	50.00	3.5445	3.449	0.0674	0.0395
45.75	50	50.16	50.02	50.00	50.00	3.5484	3.449	0.0782	0.0395
46	50	50.16	50.01	50.00	50.00	3.2908	3.449	0.0596	0.0395
46.25	50	50.16	50.01	50.00	50.00	3.5415	3.449	0.0606	0.0395
46.5	50	49.69	50.01	50.00	50.00	3.2884	3.449	0.0674	0.0395
46.75	50	49.22	50.00	50.00	50.00	3.5415	3.449	0.0547	0.0395
47	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.3035	3.449	0.0616	0.0395
47.25	50	49.69	50.00	50.00	50.00	3.5401	3.449	0.0391	0.0395
47.5	50	49.69	50.00	50.00	50.00	3.5430	3.449	0.0538	0.0395
47.75	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.5381	3.449	0.0430	0.0395
48	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.5435	3.449	0.0489	0.0395
48.25	50	49.69	50.00	50.00	50.00	3.5391	3.449	0.0381	0.0395
48.5	50	49.69	50.00	50.00	50.00	3.5650	3.449	0.0440	0.0395
48.75	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.3167	3.449	0.0381	0.0395
49	50	49.69	50.00	50.00	50.00	3.5670	3.449	0.0352	0.0395
49.25	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.3187	3.449	0.0479	0.0395
49.5	50	49.69	50.00	50.00	50.00	3.5655	3.449	0.0283	0.0395
49.75	50	49.22	50.00	50.00	50.00	3.5714	3.449	0.0479	0.0395
50	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.5670	3.449	0.0264	0.0395

50.25	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.5704	3.449	0.0401	0.0395
50.5	50	49.69	50.00	50.00	50.00	3.5645	3.449	0.0420	0.0395
50.75	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.5709	3.449	0.0596	0.0395
51	50	50.16	50.00	50.00	50.00	3.2933	3.449	0.0596	0.0395
51.25	50	49.69	50.00	80.46	80.46	3.5474	5.905	0.0606	0.1281
51.5	50	49.69	50.00	122.25	122.25	3.3016	8.632	0.0606	0.1329
51.75	50	50.16	50.00	145.76	145.76	3.5445	10.166	0.0459	0.1355
52	50	49.69	50.00	158.99	158.99	3.2977	11.029	0.0684	0.1371
52.25	176	107.81	100.35	166.43	166.43	3.5386	11.515	0.0645	0.1379
52.5	176	139.22	135.79	170.62	170.62	4.5430	11.788	0.0821	0.1384
52.75	176	155.16	152.84	172.97	172.97	5.7835	11.942	0.0841	0.1386
53	176	163.59	162.05	174.30	174.30	7.0279	12.028	0.1056	0.1388
53.25	176	168.75	167.34	175.04	175.04	8.2610	12.077	0.0919	0.1389
53.5	176	171.56	170.51	175.46	175.46	9.2527	12.104	0.0967	0.1389
53.75	176	172.97	172.48	175.70	175.70	9.7405	12.120	0.0977	0.1390
54	176	174.38	173.73	175.83	175.83	10.4907	12.128	0.1007	0.1390
54.25	176	174.84	174.53	175.90	175.90	10.6579	12.133	0.0811	0.1390
54.5	176	175.31	175.04	175.95	175.95	11.4208	12.136	0.0987	0.1390
54.75	176	175.31	175.38	175.97	175.97	11.9467	12.137	0.0816	0.1390
55	176	175.78	175.59	175.98	175.98	12.1931	12.138	0.0911	0.1390
55.25	176	175.31	175.74	175.99	175.99	12.1994	12.139	0.1039	0.1390
55.5	176	175.78	175.83	175.99	175.99	12.1999	12.139	0.1010	0.1390
55.75	176	175.78	175.89	176.00	176.00	12.2048	12.139	0.1056	0.1390
56	176	175.78	175.93	176.00	176.00	12.2063	12.139	0.1006	0.1390
56.25	176	176.25	175.95	176.00	176.00	12.2102	12.139	0.0933	0.1390
56.5	176	176.25	175.97	176.00	176.00	12.2092	12.139	0.0910	0.1390
56.75	176	175.78	175.98	176.00	176.00	12.0533	12.139	0.1163	0.1390
57	176	176.25	175.99	176.00	176.00	12.0557	12.139	0.1080	0.1390
57.25	176	176.25	175.99	176.00	176.00	12.0513	12.139	0.1025	0.1390
57.5	176	175.78	175.99	176.00	176.00	12.0508	12.139	0.1193	0.1390
57.75	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.0494	12.139	0.0946	0.1390
58	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.0533	12.139	0.1043	0.1390
58.25	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.0528	12.139	0.1002	0.1390
58.5	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.0543	12.139	0.1034	0.1390
58.75	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.0538	12.139	0.1001	0.1390
59	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.0547	12.139	0.0923	0.1390
59.25	176	175.78	176.00	176.00	176.00	12.2058	12.139	0.0944	0.1390
59.5	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.2033	12.139	0.1056	0.1390
59.75	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.2063	12.139	0.1005	0.1390
60	176	176.25	176.00	176.00	176.00	12.2077	12.139	0.1037	0.1390

## ANEXO 08: COSTO DE IMPLEMENTACIÓN

**Tabla A3**

*Presupuesto de Implementación del módulo.*

N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (S/.)	Precio Parcial (S/.)
1	Arduino Mega 2560	und	1	S/150.00	S/150.00
2	Motor DC 12V con encoder	und	1	S/70.00	S/70.00
3	Bracket para motor	und	1	S/10.00	S/10.00
4	Fuente DC	und	1	S/45.00	S/45.00
5	Driver Puente H BTS7960	und	1	S/45.00	S/45.00
6	Sensor de corriente ACS712 - 20 A	und	1	S/10.00	S/10.00
7	Sensor de voltaje 0-25V DC	und	1	S/4.00	S/4.00
8	Jumpers	-	-	S/20.00	S/20.00
9	Cable para fuente	-	-	S/12.00	S/12.00
10	Enchufe	und	1	S/3.00	S/3.00
11	Multímetro Digital AC-DC	und	1	S/200.00	S/200.00
12	Placa PCB	-	-	S/80.00	S/80.00
13	Estructura soporte	-	-	S/510.00	S/510.00
14	Tapa del soporte (acrílico)	-	-	S/150.00	S/150.00
15	Costos de envío	-	-	S/50.00	S/50.00
<b>TOTAL</b>					<b>S/1,359.00</b>

## ANEXO 09: TABLA DE CORRELACIÓN DE PEARSON

**Tabla A4**

*Coefficiente de correlación de Pearson “r”*

Valores del coeficiente de correlación de Pearson	
-0.90	Correlación negativa muy fuerte.
-0.75	Correlación negativa considerable.
-0.50	Correlación negativa media.
-0.25	Correlación negativa débil.
-0.10	Correlación negativa muy débil.
0.00	No existe correlación alguna entre las variables.
0.10	Correlación positiva muy débil.
0.25	Correlación positiva débil.
0.50	Correlación positiva media.
0.75	Correlación positiva considerable.
0.90	Correlación positiva muy fuerte.
1	Correlación positiva perfecta.

Nota. *Adaptada de* (Hernández et.al, 2014, pág. 305)

## ANEXO 10: TERMINOLOGÍA

- **(CC) Corriente continua ó corriente directa (DC):** Carga eléctrica que va en una sola dirección. Se usa en la electrónica, baterías, paneles solares.
- **(AC) Corriente alterna:** Flujo de carga eléctrica que invierte su dirección periódicamente. Es la forma en que la electricidad se genera y distribuye a hogares y empresas.
- **RPM (Revoluciones por minuto):** Es una unidad de medida utilizada para expresar la frecuencia de rotación de un cuerpo, indicando el número de veces que el eje completa un giro completo en un lapso de un minuto.
- **Proporcional, Integral, Derivativo (PID):** Algoritmo de control utilizado en la industria para regular o mantener una variable en un valor deseado, conocido como punto de ajuste (Setpoint).
- **Control a lazo abierto o control de bucle abierto:** Tipo de sistema de control donde la acción de control se aplica sin ninguna medición o retroalimentación a la salida del sistema.
- **Control a lazo cerrado o control con retroalimentación:** Tipo de sistema donde la salida del proceso es medida y esa información se usa para ajustar la acción de control.
- **Arduino mega 2560:** Placa de desarrollo de microcontrolador diseñada para gobernar funciones específicas, utilizado en proyectos de electrónica o prototipos. Conocido por su variedad de entradas y salidas, lo que lo hace óptimo para sistemas de control complejos y proyectos con múltiples sensores y actuadores.
- **PWM (Pulse Width Modulation) ó Modulación por Ancho de Pulso:** señal modulada en el tiempo que permite regular la velocidad del motor DC cambiando el voltaje promedio aplicado mediante variaciones de ancho de pulso.
- **PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) o prueba de secuencia binaria pseudoaleatoria:** Señal binaria pseudoaleatoria utilizada para excitar el motor DC y obtener datos de entrada – salida necesarios para identificar el modelo dinámico del sistema.
- **Fritzing:** Software de uso gratuito usado para pasar de un prototipo de protoboard (placa de pruebas) a un producto final (placa de circuito impreso o PCB).
- **KiCad:** Software libre y de código abierto para la Automatización de Diseño Electrónico. Es utilizado para crear y editar esquemáticos de circuitos y diseñar el trazado de las Placas de Circuito Impreso (PCB).
- **Encoder (codificador):** Es un tipo de sensor electromecánico que se utiliza para convertir el movimiento angular (rotación) o lineal de un objeto en una señal eléctrica digital. Su principal función es proporcionar realimentación, en el caso del proyecto respecto a la velocidad del motor.
- **Correlación de Pearson:** Prueba estadística que mide la relación entre dos variables continuas. En el caso del proyecto se usó para evaluar la relación de velocidad, voltaje y corriente teórica respecto a la real medida.

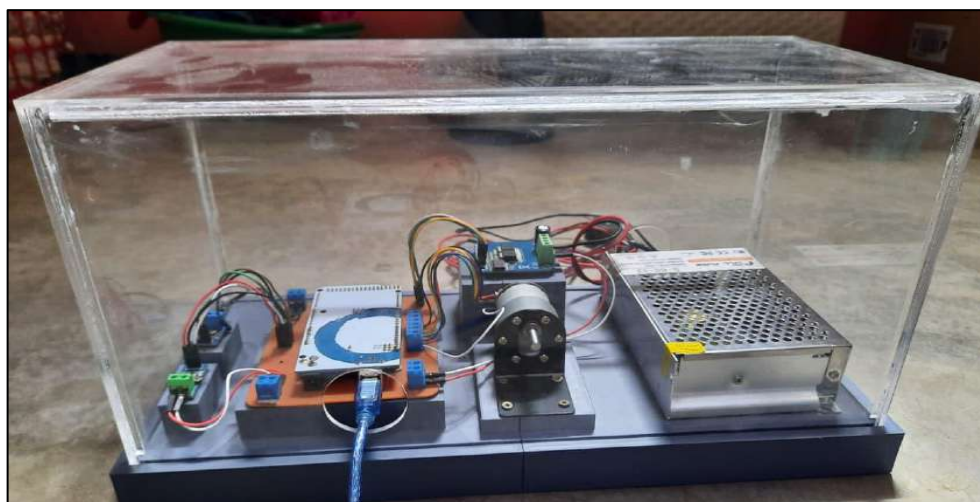
**ANEXO 11:**  
**MANUAL DEL USUARIO**



**MANUAL DE USUARIO:**



**INSTALACIÓN, CONFIGURACIÓN, OPERACIÓN Y  
MANTENIMIENTO.**



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA  
ENSEÑANZA DE TÉCNICAS DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA EL  
LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN”**

**AUTORES:**

*Bach. Luis Enrique Torres Segovia.*

*Bach. Juan Andrade Guerrero Pintado*

**ASESOR:**

*Mag. Lenin Franchescoletth Núñez Pintado*

*Automatización y Control Industrial*

*JAÉN – PERÚ, diciembre, 2025*

## *ÍNDICE*

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. COMPONENTES DEL SISTEMA</b> .....	2
2.1. Hardware principal.....	2
2.2. Software y herramientas.....	2
<b>3. INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN Y CONEXIONADO</b> .....	2
3.1. Requisitos previos .....	2
3.2. Conexionado.....	2
<b>4. CONFIGURACIÓN EN MATLAB</b> .....	5
4.1. Instalación de librerías. ....	5
4.2. Configuración.....	5
4.3. Creación del modelo Simulink.....	12
<b>5. OPERACIÓN DEL SISTEMA</b> .....	17
<b>6. SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO.</b> .....	17
<b>7. POSIBLES FALLAS Y SOLUCIONES</b> .....	17
<b>8. RECOMENDACIONES FINALES</b> .....	18

## 1. INTRODUCCIÓN

*El presente manual de usuario tiene como propósito orientar al estudiante o docente del laboratorio de Automatización y Control de la Universidad Nacional de Jaén sobre la correcta instalación, configuración, operación y mantenimiento del módulo diseñado para un control de velocidad de un motor DC mediante MATLAB/Simulink. Este módulo es una herramienta educativa que permite la experimentación y análisis práctico de técnicas de control tanto a lazo abierto como a lazo cerrado con PID.*

*El sistema permite controlar la velocidad de un motor DC en tiempo real mediante señales generadas desde la plataforma de Simulink, utilizando el microcontrolador Mega 2560, también se incorpora sensores de corriente y voltaje los cuales permiten medir y monitorear variables eléctricas, en base al punto de referencia (Set Point) dado.*

*Para la creación del diagrama de bloques únicamente se da un panorama general de los bloques que se debe utilizar y configurar, además de las pautas que se debe seguir. Sin embargo, si se muestra el diagrama completo para que se tenga una noción del sistema.*

## 2. COMPONENTES DEL SISTEMA.

### 2.1. Hardware principal.

- ✓ *Arduino Mega 2560 R3.*
- ✓ *Driver BTS7960.*
- ✓ *Motor DC con encoder 12V.*
- ✓ *Sensor de voltaje 0-25V DC.*
- ✓ *Sensor de corriente ACS712 -20A.*
- ✓ *Fuente de alimentación de 12 V.*
- ✓ *Placa PCB.*

### 2.2. Software y herramientas.

- ✓ *MATLAB/Simulink.*
- ✓ *Librería Simulink Support Package for Arduino hardware.*
- ✓ *Laptop.*

## 3. INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN Y CONEXIONADO

### 3.1. Requisitos previos

- ✓ *Computadora con MATLAB y Simulink instalados.*
- ✓ *Cable USB tipo A-B(Arduino).*
- ✓ *Fuente de 12V correctamente polarizada.*

### 3.2. Conexionado

#### a. Fuente de alimentación.

- *Fuente DC de 12V (+) Polo positivo, (-) polo negativo conectado con (B+), (B-) del driver BTS7960.*
- *Desde el GND del driver sale un cable hacia el Arduino Mega, creando un atierra en común.*

**b. Driver BTS7960.**

- Salidas del driver BT7960 (M+), (M-) al motor DC 12V
- Vcc del driver conectado a la alimentación lógica de 5V del Arduino Mega.
- GND del driver a la tierra común.
- R\_PWM conectado al pin 5 del Arduino Mega.
- R\_EN conectado al pin 22 del Arduino Mega.

**c. Motor DC 12V con encoder.**

- N1(Rojo) Terminal positivo conectado al M+ del driver.
- GND(Negro) Encoder conectado al GND común.
- C1(Amarillo) Salida encoder fase A conectado al pin 2 PWM del Arduino Mega.
- C2(Verde) Salida encoder fase B conectado al pin 3 PWM del Arduino Mega.
- VCC(Azul) Encoder VCC 3.3 o 5V conectado al pin 3V3 del Arduino Mega.
- N2(Blanco) Terminal negativo conectado a la tierra común.

**d. Sensor de voltaje 0-25V – DC.**

- Pin VCC conectado al cable rojo que va del driver hacia el motor.
- Pin GND conectado a la tierra común.
- Señal analógica S conectado al pin analógico A2 del Arduino Mega.
- Pin de salida + conectado a 5V del Arduino Mega.
- Pin de salida - conectado a la tierra común.

**e. Sensor de corriente ACS712 -20 A.**

- Bornera 1 conectado al cable rojo que va del Driver hacia el motor.
- Bornera 2 sale cable rojo que va hacia el motor.
- VCC del sensor de corriente conectado a 5V del Arduino Mega.
- GND conectado a la tierra común.
- Salida analógica OUT conectado al pin A1 DEL Arduino Mega.



## 4. CONFIGURACIÓN EN MATLAB

### 4.1. Instalación de librerías.

- i. Abrir MATLAB.
- ii. En la sección entorno, deslizar y clic en Add – ons o complementos.
- iii. En la barra de búsqueda del explorador de complementos, busque MATLAB Support Package for Arduino Hardware y luego haga clic en descargar.



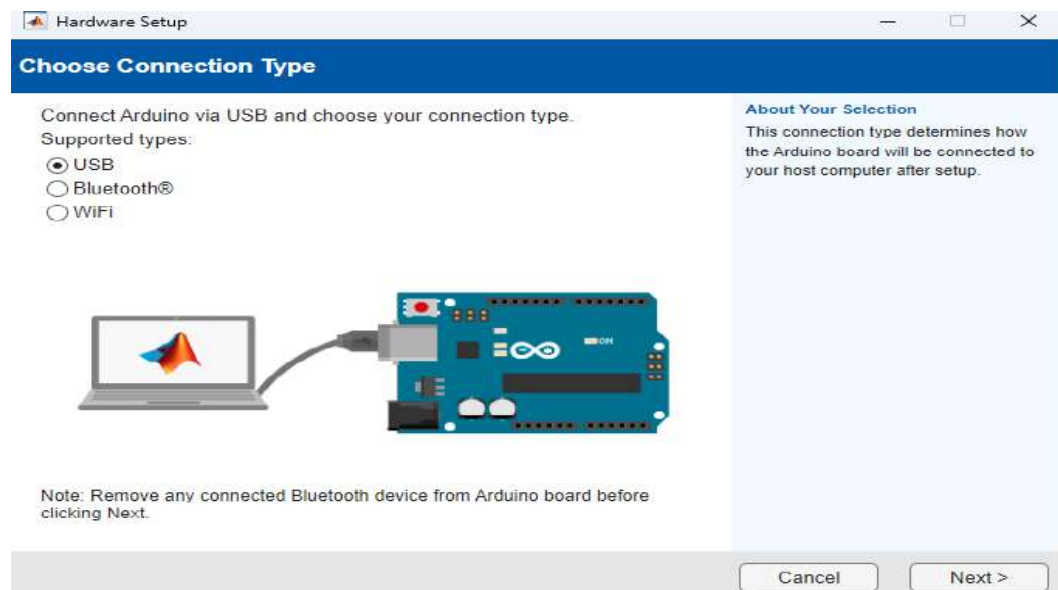
- iv. De igual manera busque, Simulink Support Package for Arduino Hardware y luego en descargar, se agrega automáticamente a los complementos de MATLAB.



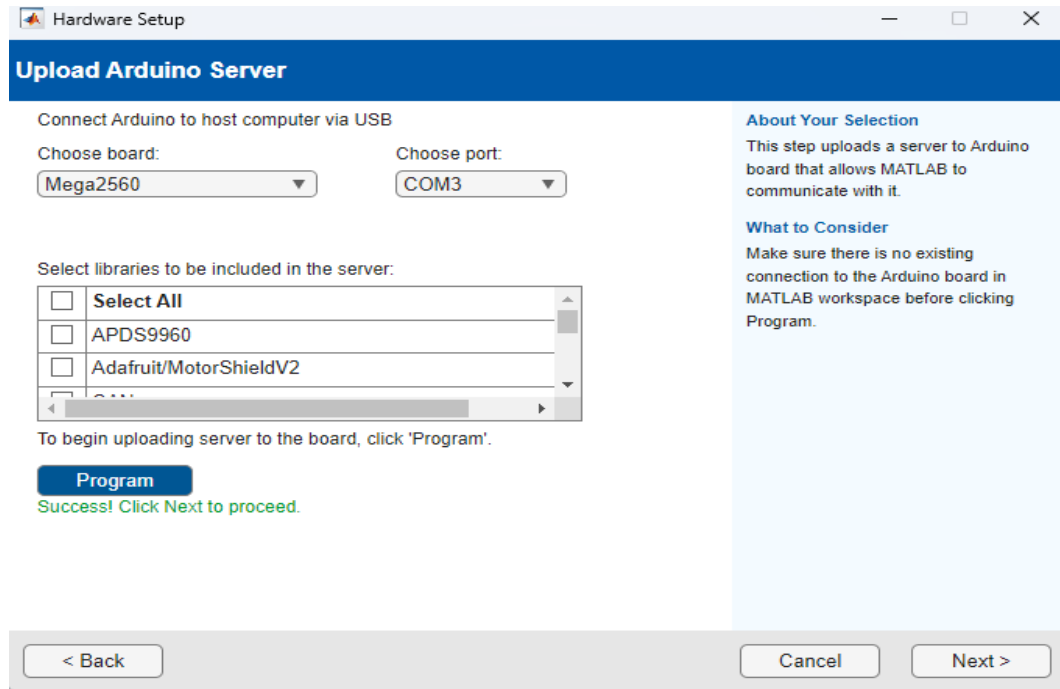
### 4.2. Configuración

- *Para MATLAB Support Package for Arduino Hardware*

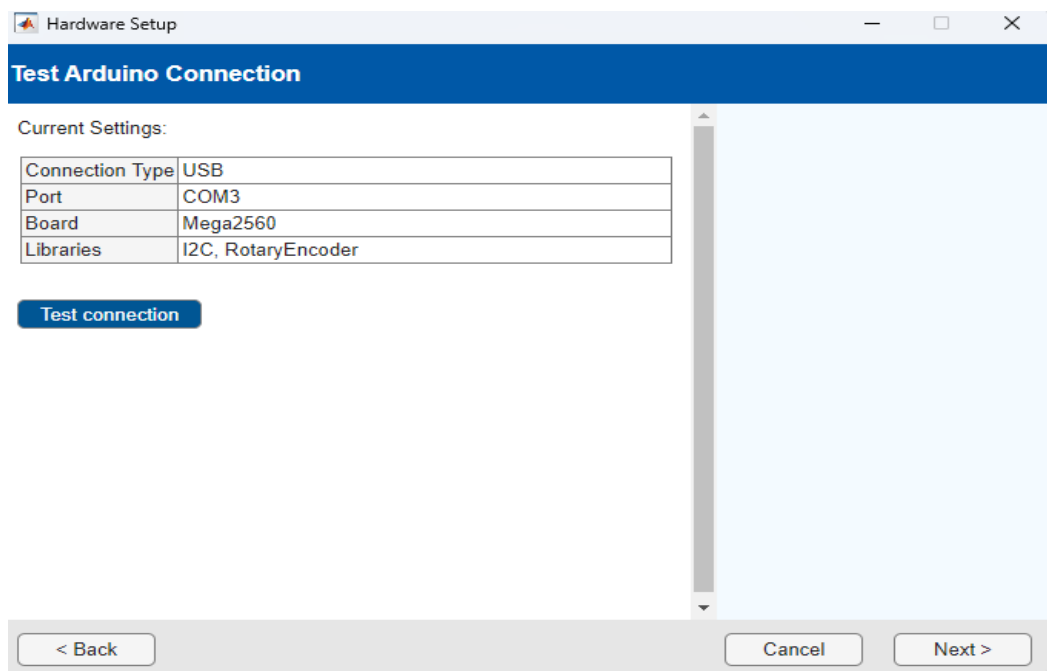
- i. *Ir a la configuración de MATLAB Support Package for Arduino Hardware*



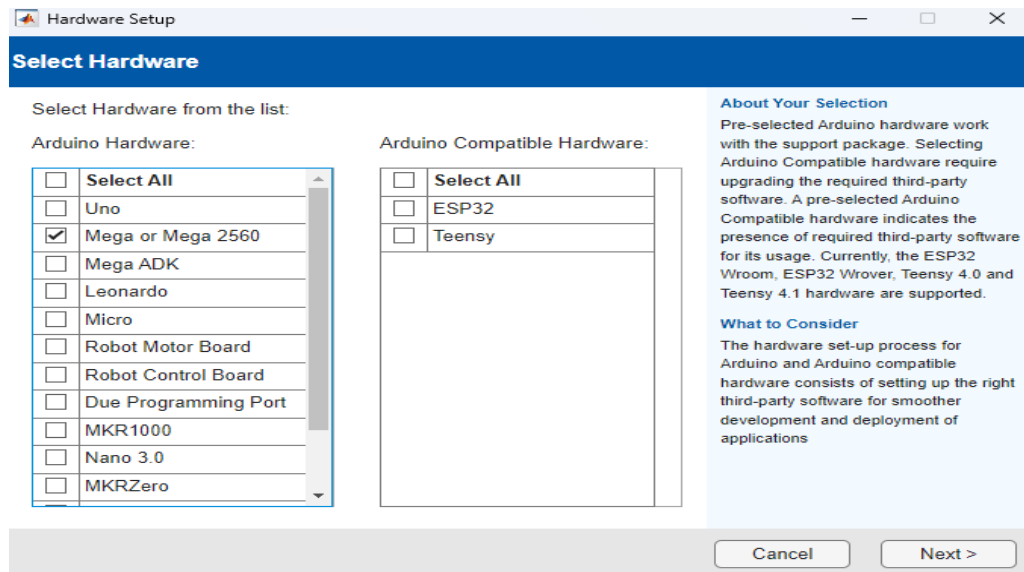
- ii. *Seleccionar en USB y clic en siguiente.*
- iii. *En la siguiente pestaña, seleccionar el microcontrolador que se está usando y el puerto que se detecta automáticamente, en la parte de librerías seleccionar por lo general Rotary Encoder y los que considere importantes para su sistema, dar clic n program (se espera unos minutos) y clic en siguiente.*



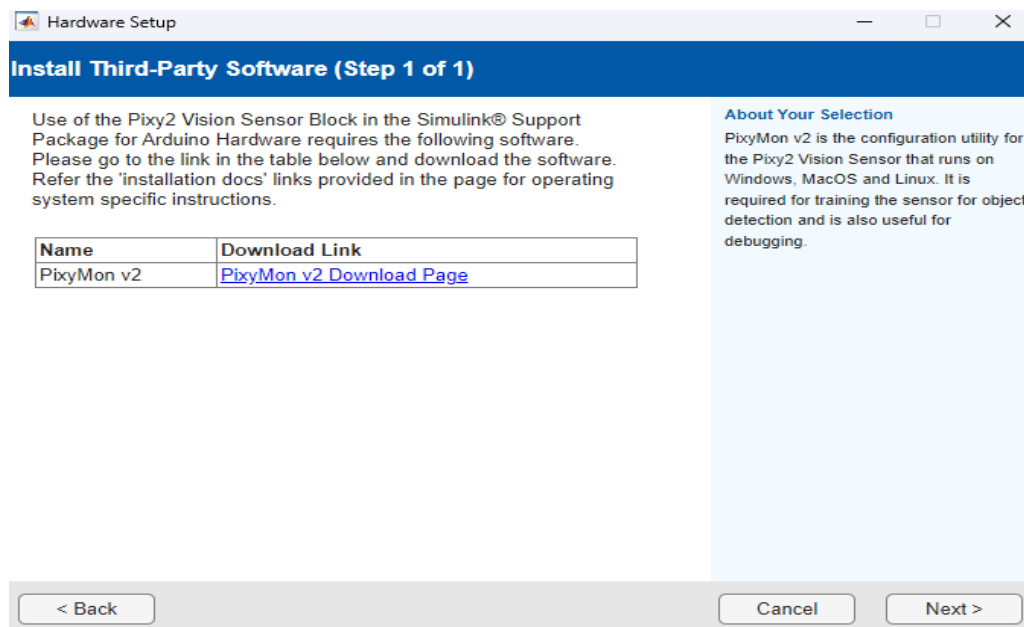
- iv. *En la pestaña siguiente se realiza un test de conexión y luego en siguiente.*



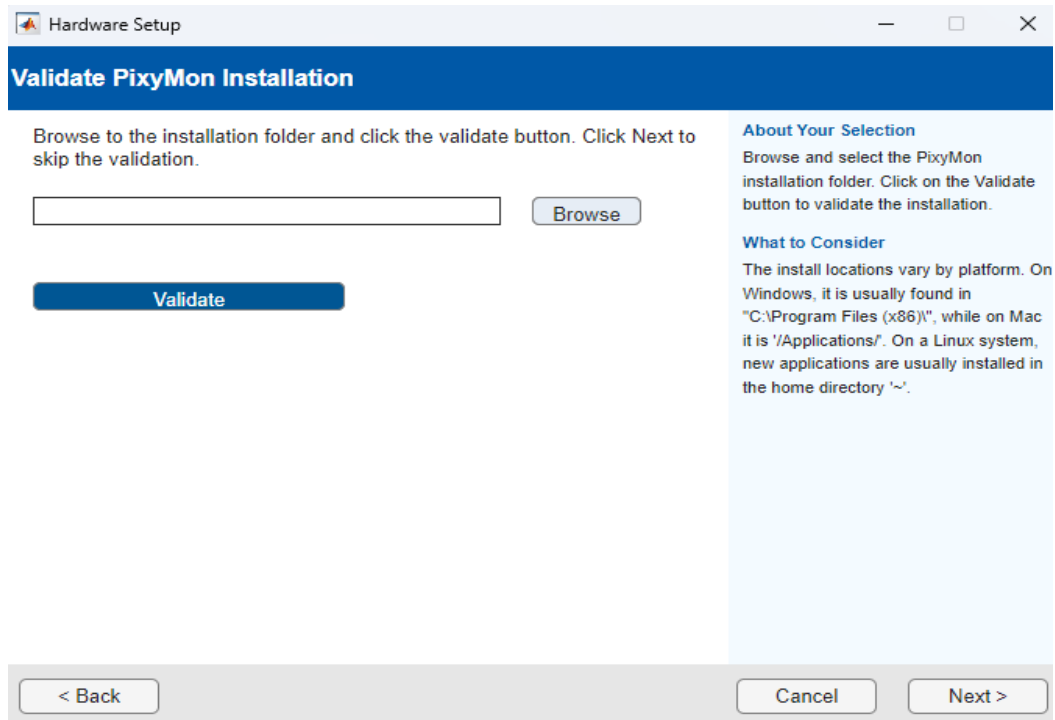
- v. *Una vez el test de conexión sale correcto, dar clic en finalizar.*
- ***Para Simulink Support Package for Arduino Hardware***
  - i. *De la misma manera con el Simulink Support Package for Arduino Hardware, clic en configuración.*
  - ii. *Abre una pestaña que muestra los microcontroladores que deseas instalar y clic en siguiente.*



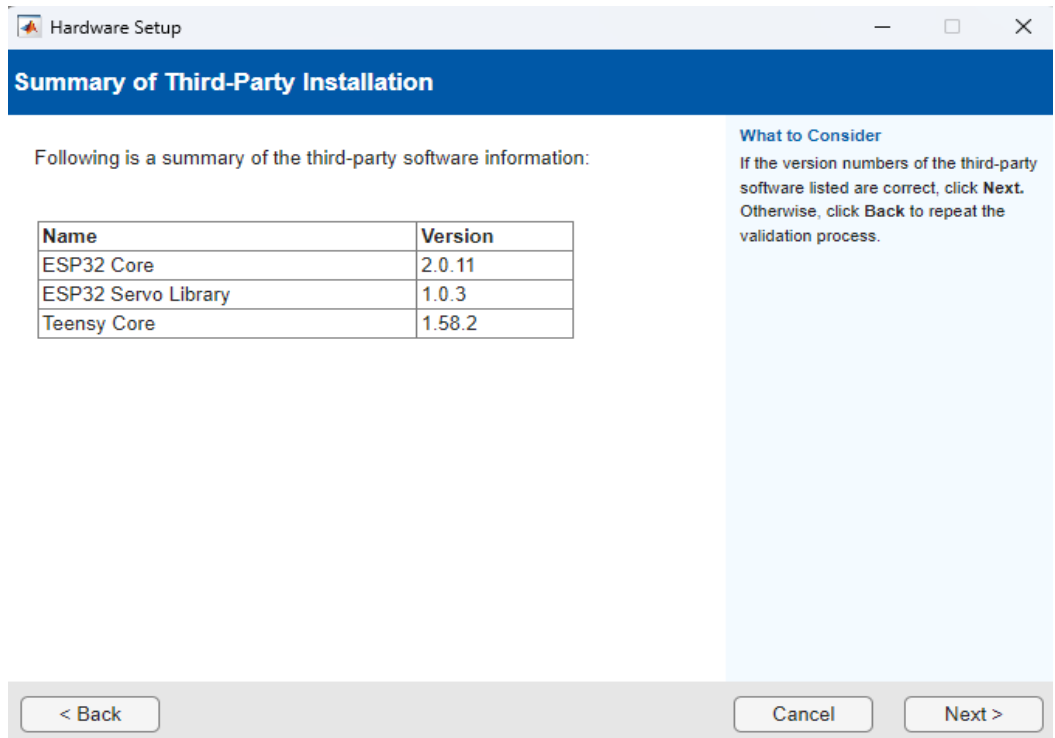
- iii. *En pestaña siguiente, saldrá para instalar un PixyMon v2, solo dar clic en siguiente.*

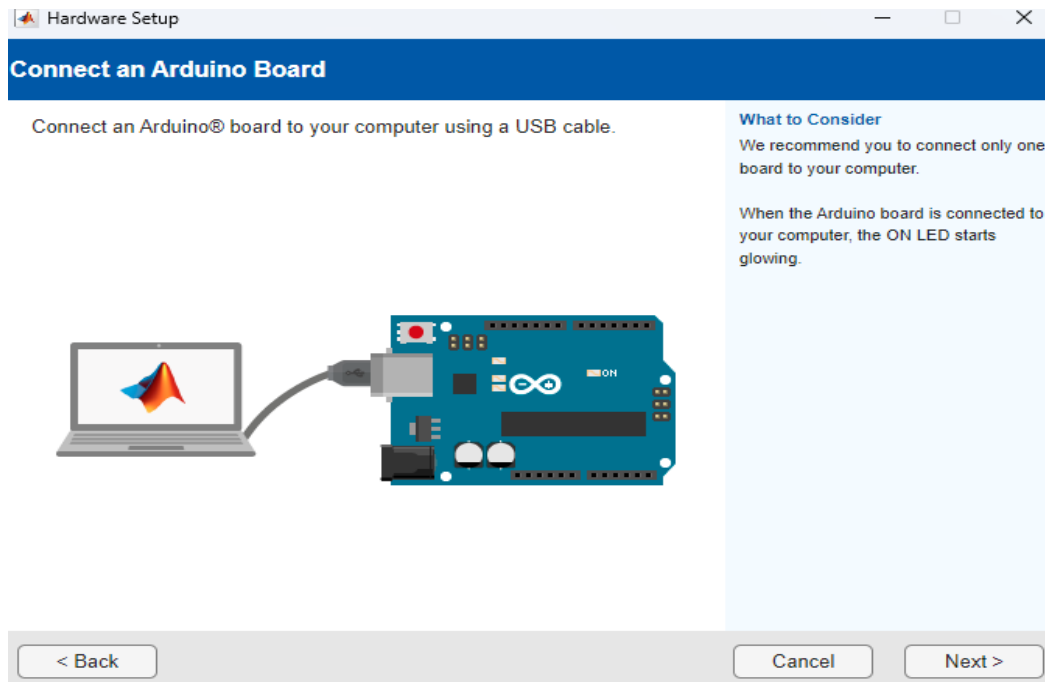


- iv. De la misma manera, en la pestaña que prosigue donde aparece Validate PixyMon Installation, solo dar en siguiente.

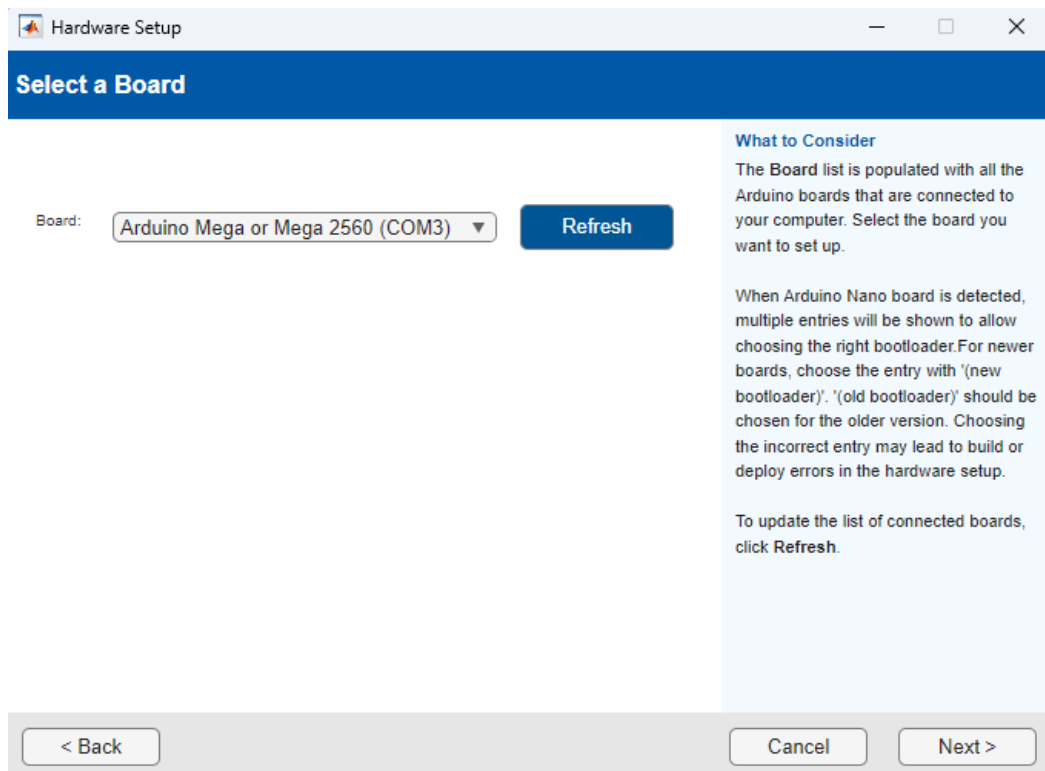


- v. Luego, en la siguiente pestaña se añaden las librerías seleccionadas, dar clic en siguiente.

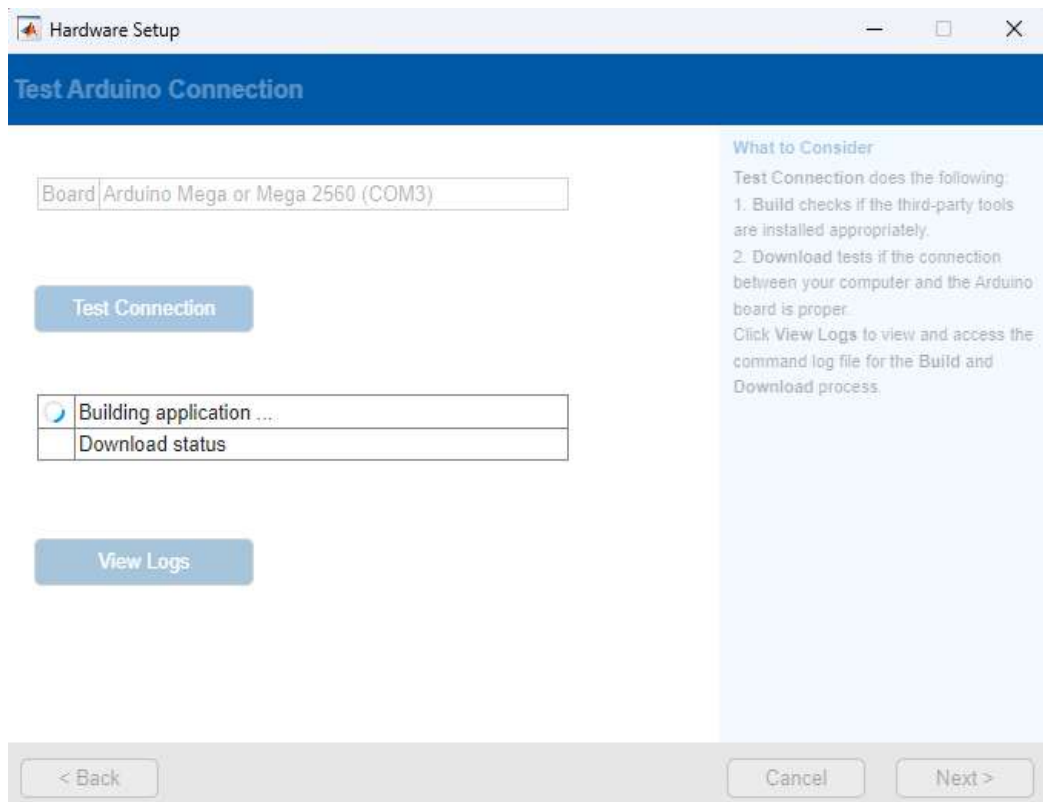
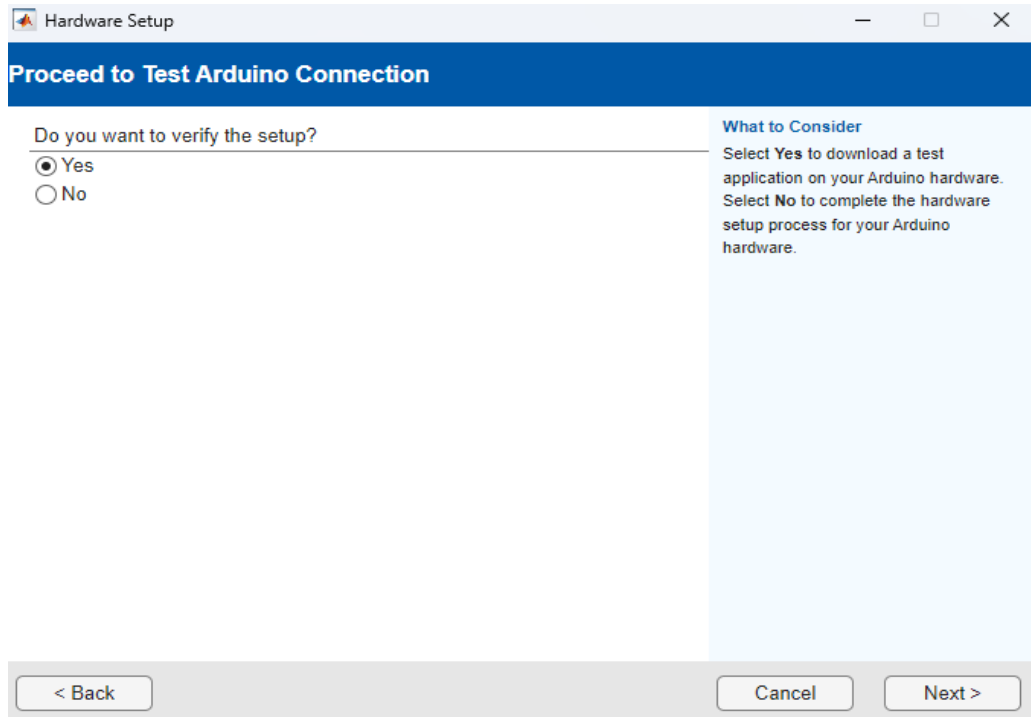




vi. *Clic en siguiente, y se selecciona el microcontrolador y puerto automáticamente.*



- vii. Aparece una pestaña para test de conexión, se selecciona en yes y siguiente. Donde aparece una pestaña para hacer el test de conexión.

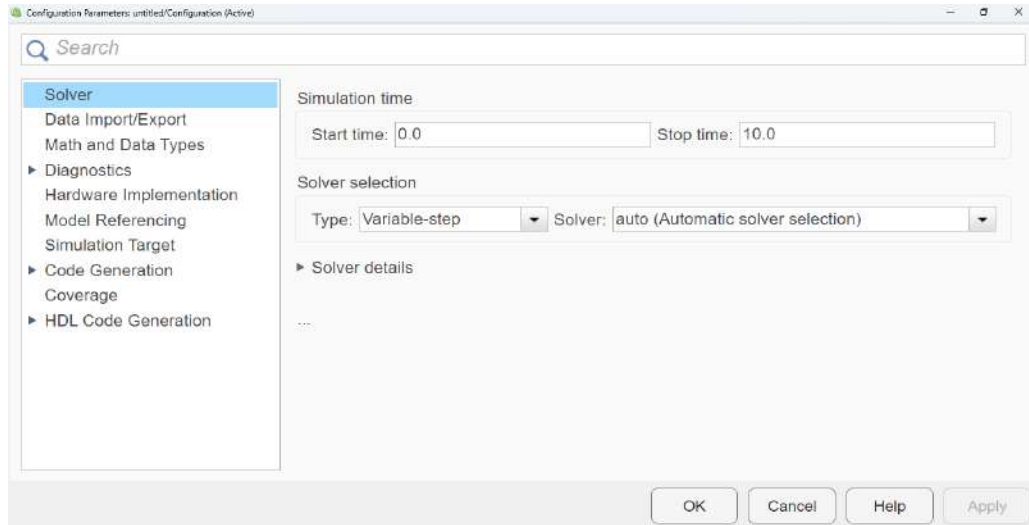


viii. Una vez cargado y completado el test con dos check, clic en siguiente y finalizar.

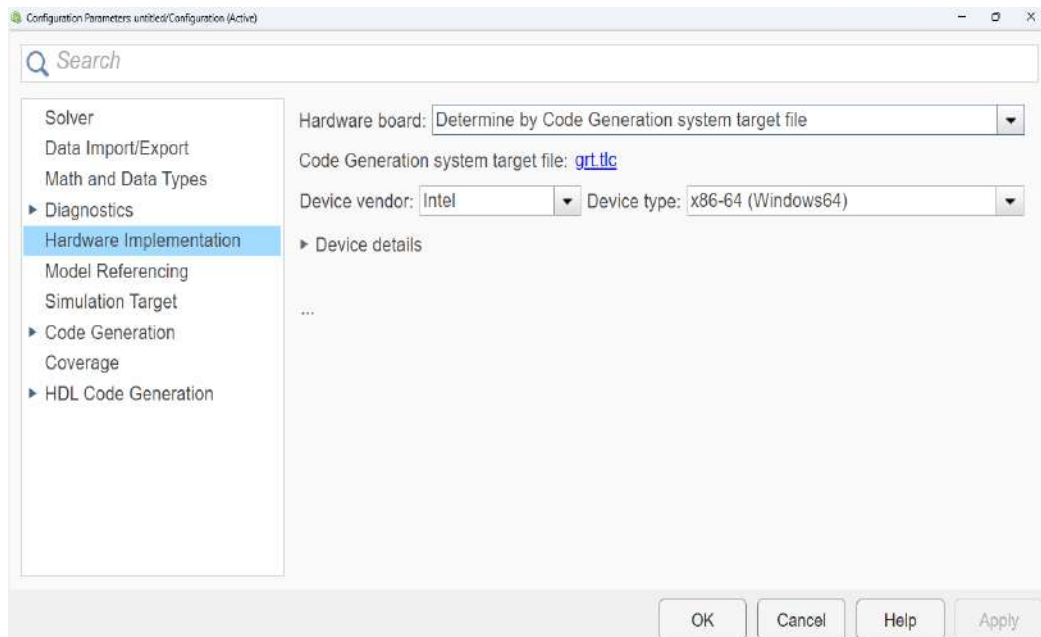
▪ **Para la configuración del Model Setting de Simulink**

i. Abrir Simulink y dirigirse a Model Setting desplegar y clic en la opción del mismo nombre.

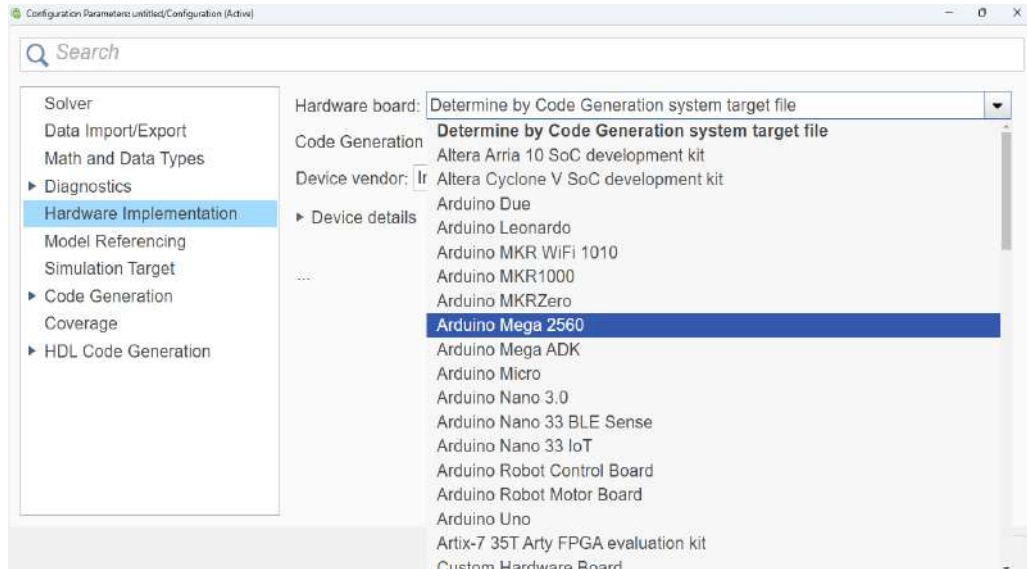
ii. Se abre una pestaña para la configuración de los parámetros.



iii. Nos dirigimos a Hardware Implementation.




- iv. *Aquí seleccionamos el microcontrolador que se está utilizando, lo resto se deja por defecto, salvo una configuración adicional en el desarrollo del diagrama de bloques.*

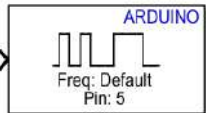

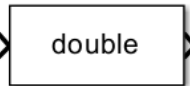
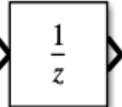
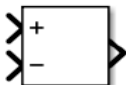
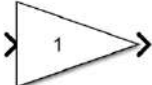
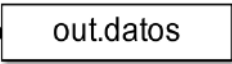


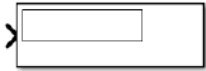

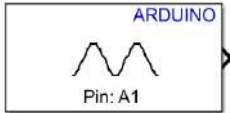
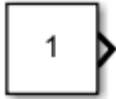

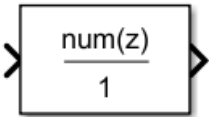
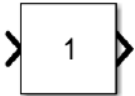

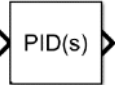
- v. *Clic en aplicar y todo queda listo para iniciar con la creación del modelo de Simulink.*

### 4.3. Creación del modelo Simulink.

- i. *Abre Simulink y crea un nuevo modelo.*
- ii. *Arrastra los bloques básicos para la creación del modelo.*

Nombre	Descripción	Bloque
Signal editor	Se utiliza para crear, editar y gestionar señales de entrada, en este caso para crear las PWM.	

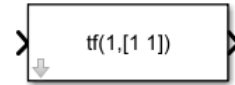
PWM	Sirve para generar la señal modulada en ancho de pulso en un pin digital con capacidad PWM del Arduino.	
Encoder	Se usa para leer la velocidad (pulsos) del eje del motor con encoder incremental.	
Data type conversion	Sirve para cambiar el tipo de dato de una señal a otro compatible.	
Unit delay	Permite almacenar el valor anterior de la señal y entregarla en el siguiente instante, ideal para trabajar con sistemas digitales e idóneo para tomar muestras cada cierto lapso de tiempo.	
Add	Se usa para restar y sumar señales de entrada.	
Gain	Se usa para multiplicar una señal por una constante.	
To Workspace	Guarda una señal simulada en un variable de MATLAB para poder analizarla después de la simulación.	

Display	Sirve para visualizar la señal en tiempo real, mientras corre la simulación.	
Scope	Sirve para visualizar gráficamente las señales durante la simulación.	
Analog Input	Se usa para leer los valores analógicos desde un pin de entrada analógica (A0, A1, etc.)	
Constant	Se usa para dar un valor numérico fijo.	
Sum	Se usa para sumar y restar varias señales de entrada.	
Discrete FIR Filter	Sirve para suavizar o eliminar el ruido en señales digitales.	
Slider Gain	Permite cambiar en tiempo real la ganancia de una señal.	
Zero - Order Hold	Permite tomar una señal continua y mantener su valor fijo por un momento hasta leer el siguiente dato.	
PID Controller (s)	Ajusta la salida de un sistema para mantener la variable controlada cerca del valor	

---

deseado, usando 3 acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D).

LTI System      En este caso, se usa para cargar una planta del sistema simulado.



---

iii. *Configuración de los bloques de lectura de datos.*

- *PWM Output. Se le asigna un pin conectado al control del driver (por ejemplo, Pin 5)*
- *Encoder Input: Se le asigna un pin para contar los pulsos (por ejemplo, Pin 2 y 3).*
- *Analog Input: Se asigna un pin analógico para el sensor de voltaje (ejemplo A2) y el sensor de corriente (ejemplo A1).*

iv. *Implementación del control PID.*

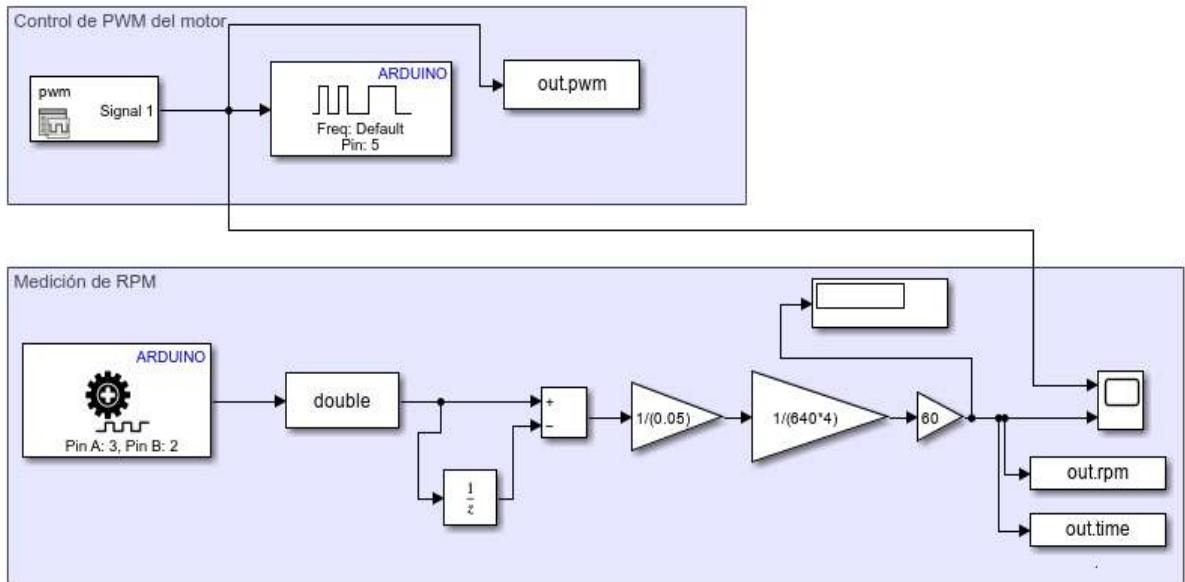
- *Coloca el bloque PID Controller de la biblioteca de Simulink.*
- *Configura los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  o tunea los parámetros conforme a como lo creas conveniente.*
- *Agrega una referencia de velocidad (Set Point) usando un bloque Slider Gain o constant.*

v. *Ejecución del modelo.*

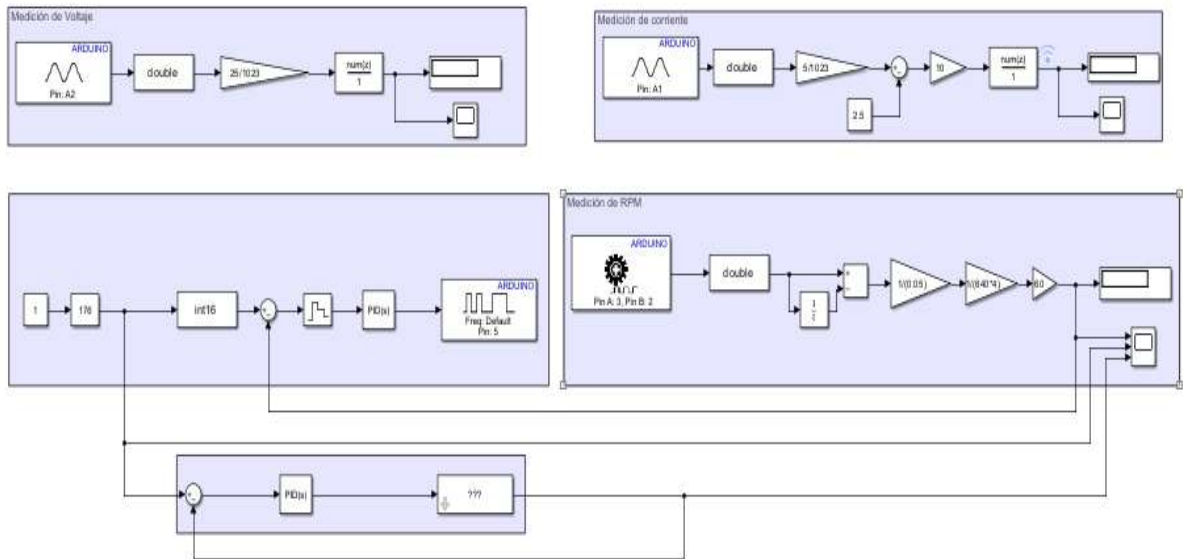
- *Cambia el modo de simulación a External.*
- *Clic en run y observa el comportamiento de las graficas en los scopes y displays.*

vi. *Tener en cuenta que, para la creación del modelo se debe tener en cuenta las especificaciones técnicas de los componentes utilizados, ya que para el desarrollo del diagrama de bloques va a ser necesario realizar operaciones matemáticas para que la simulación se ejecute correctamente.*

vii. Para el sistema de lazo abierto el diagrama de bloques será como se muestra en la siguiente imagen.



viii. Mientras que, para el sistema de lazo cerrado con el controlador PID del sistema el diagrama de bloques se vera como en la imagen presentada a continuación.



## 5. OPERACIÓN DEL SISTEMA

- *Asegúrate de que todas las conexiones eléctricas estén firmes y correctas.*
- *Encienda la fuente de 12 V.*
- *Conecte el microcontrolador a la PC mediante cable USB.*
- *Abrir el modelo Simulink creado y configurado.*
- *Ejecute la simulación en modo External.*
- *Defina la referencia de velocidad deseada (Set Point) entre 0 a 176 RPM.*
- *Observa las respuestas de velocidad, voltaje y corriente.*
- *Finalizada la prueba, detén la simulación y desconecta la fuente.*

## 6. SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO.

- *Verifica periódicamente las conexiones de los cables, bornes y terminales.*
- *Mantén el módulo libre de polvo y humedad.*
- *No sobrepasar el voltaje y corriente máxima del motor y equipos.*
- *Revisar que las aletas o disipadores del driver estén funcionando.*
- *Guarda el módulo en lugar seco y ventilado.*

## 7. POSIBLES FALLAS Y SOLUCIONES

<i>Problema</i>	<i>Causa probable</i>	<i>Solución recomendada</i>
<i>El motor no gira</i>	<i>Falta de alimentación o mala conexión.</i>	<i>Revisar la polaridad y conexiones del driver y fuente.</i>
<i>Sin lectura de velocidad</i>	<i>Encoder mal conectado o pin incorrecto.</i>	<i>Verificar pines en el bloque de lectura de datos.</i>
<i>Lecturas de voltaje y corriente inestable</i>	<i>Ruido eléctrico o mal conectado.</i>	<i>Revisar cables y colocar bloques de filtrado en el diagrama de bloques.</i>

<i>Comunicación fallida con MATLAB.</i>	<i>Puerto COM ocupado o mal configurado.</i>	<i>Cambiar puerto COM o reinstalar soporte Arduino.</i>
<i>Oscilaciones en velocidad</i>	<i>Parámetros PID mal ajustados.</i>	<i>Modificar <math>K_p</math>, <math>K_i</math> Y <math>K_d</math> hasta lograr estabilidad.</i>

---

## **8. RECOMENDACIONES FINALES.**

- *Documentar cada configuración y valor PID utilizado.*
- *Guardar los datos de pwm, velocidad, voltaje y corriente para posteriores comparaciones en de Excel u otro formato conveniente.*
- *Puedes cargar los datos calculados para la identificación de sistemas lo que facilitará encontrar los parámetros PID mediante PID Tuner.*
- *Este modulo puede extenderse a control de posición y giro si se desea implementar a futuro.*

**ANEXO 12:**  
**GUÍAS DE LABORATORIO**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE JAÉN**



## **GUÍA DE LABORATORIO**

***CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC EN SIMULINK/ MATLAB  
MEDIANTE UN CONTROLADOR PID – MODELAMIENTO MATEMÁTICO***

**AUTORES: BACH. LUIS ENRIQUE TORRES SEGOVIA.**

**BACH. JUAN ANDRADE GUERRERO PINTADO.**

**ASESOR: LENIN FRANCHESCOLETH NÚÑEZ PINTADO.**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL**

**Jaén – Perú, diciembre 2025**

<b><u>GUIA DE LABORATORIO</u></b>	
<b>DATOS GENERALES</b>	
<b>Curso: Automatización Industrial</b>	<b>N° de Práctica:</b>
<b>Asesor: Lenin Franchescoeth Núñez Pintado</b>	<b>Fecha:</b>
<b>Autores: Bach. Luis Enrique Torres Segovia. Bach. Juan Andrade Guerrero Pintado.</b>	
<i><b>CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC EN SIMULINK/ MATLAB MEDIANTE UN CONTROLADOR PID – MODELAMIENTO MATEMÁTICO</b></i>	
<b>I. OBJETIVOS</b>	
<p><b>General:</b> Implementar un modelo matemático de sistema electromecánico en Simulink/MATLAB.</p> <p><b>Específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Obtener el modelo electromecánico de un motor DC.</li> <li>▪ Implementar el modelo en software de simulación.</li> </ul>	
<b>II. FUNDAMENTO TEORICO</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Motor DC:</b> Dispositivo de corriente continua utilizado para proyectos dependiendo de su potencia.</li> <li>▪ <b>Transformada de Laplace:</b> Es una herramienta matemática que convierte una función del tiempo <math>f(t)</math> en una función del dominio complejo <math>F(s)</math>, para facilitar el análisis de sistemas y ecuaciones diferenciales.</li> <li>▪ <b>Función transferencia:</b> Es la relación entre la salida y la entrada de un sistema lineal en el dominio de Laplace, suponiendo condiciones iniciales nulas.</li> <li>▪ <b>Inductancia:</b> Es la propiedad de un conductor o bobina que se opone a los cambios de corriente que pasan por él, almacenando energía en forma de campo magnético.</li> <li>▪ <b>Fuerza Contraelectromotriz:</b> Es el voltaje que se genera en un motor o bobina cuando cambia el flujo magnético, oponiéndose al voltaje que la produce según la ley de Lenz.</li> </ul>	

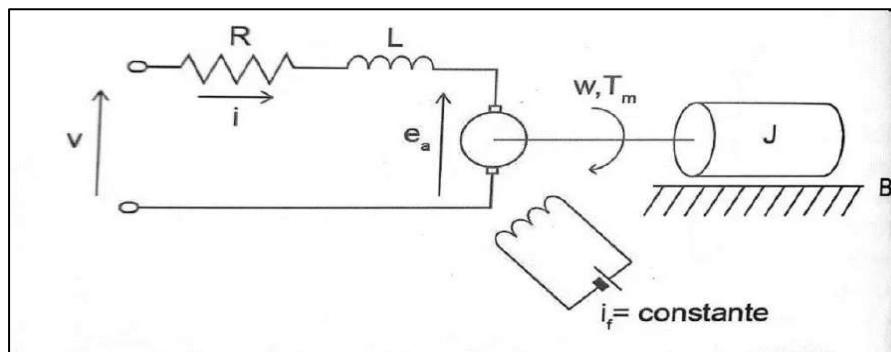
### III. EQUIPOS Y MATERIALES

- 01 computadora:
- Software para modelamiento de sistemas físicos (MATLAB-Scilab-Labview).
- Módulo del motor DC.
- Multímetro.

### IV. PROCEDIMIENTO Y TOMA DE DATOS

#### 4.1 Modelización electromecánica de un motor DC

A continuación, se muestra el circuito de la armadura de un motor DC:



#### a) Modelo eléctrico

En el circuito eléctrico de la figura se obtiene la siguiente ecuación aplicando ley de mallas.

$$\begin{aligned}v(t) &= R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + E_a(t) \\L \frac{di(t)}{dt} &= V(t) - Ri(t) - E_a(t)\end{aligned}\quad (1)$$

Donde:

*R*: Resistencia eléctrica de armadura

*L*: Inductancia de armadura

*v(t)*: Tensión de entrada de motor

*i(t)*: Corriente de armadura

*E<sub>a</sub>(t)*: Fuerza contraelectromotriz

La fuerza contraelectromotriz se relaciona con la velocidad angular, a través de la siguiente relación de proporcionalidad:

$$E_a(t) = K_a \cdot \omega(t) \quad (2)$$

Donde:

$K_a$ : Constante de voltaje

$\omega(t)$ : Velocidad angular

### b) Modelo mecánico

Aplicando la segunda ley de Newton para movimiento rotacional:

$Torque_{neto} = (Momento\_de\_inercia) \cdot (aceleración\_angular)$

Para la armadura del motor DC tendremos:

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)$$
$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_m(t) - B\omega(t) \quad (3)$$

Donde:

$T_m(t)$ : Torque del motor

$B$ : Coeficiente de fricción viscosa

$J$ : Momento de inercia de armadura

El torque y la corriente de armadura se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$T_m(t) = K_m i(t) \quad (4)$$

Donde:

$K_m$ : Constante de torque mecánico

#### 4.2 Obtención del modelo electromecánico de motor DC

- A partir de las ecuaciones anteriores del modelo electromecánico para un motor DC obtener la función transferencia de velocidad angular con respecto al voltaje.
- Describir las fórmulas y deducción de las mismas

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones para las ecuaciones (1), (2), (3), y (4) tenemos:

$$\mathcal{L}\left[L\frac{di(t)}{dt}\right] = \mathcal{L}[V(t) - Ri(t) - E_a(t)] \rightarrow LSi(s) = V(s) - Ri(s) - E_a(s) \quad (5)$$

$$\mathcal{L}[E_a(t)] = \mathcal{L}[K_m i(t)] \rightarrow E_a(s) = K_a \omega(s) \quad (6)$$

$$\mathcal{L}\left[J\frac{d\omega(t)}{dt}\right] = \mathcal{L}[T_m(t) - B\omega(t)] \rightarrow JS\omega(s) = T_m(s) - B\omega(s) \quad (7)$$

$$\mathcal{L}[T_m(t)] = \mathcal{L}[K_m i(t)] \rightarrow T_m(s) = K_m i(s) \quad (8)$$

Reemplazamos la ecuación (6) y (8) en (5) obteniendo:

$$V(s) = (R + LS)\frac{T_m(s)}{K_m} + K_a \omega(s) \quad (9)$$

De la ecuación (7) Obtenemos el torque.

$$T_m(s) = (JS + B)W(s) \quad (10)$$

Luego la reemplazamos (10) en (9) con lo cual se obtiene:

#### ✓ Función de transferencia de velocidad angular con relación al voltaje

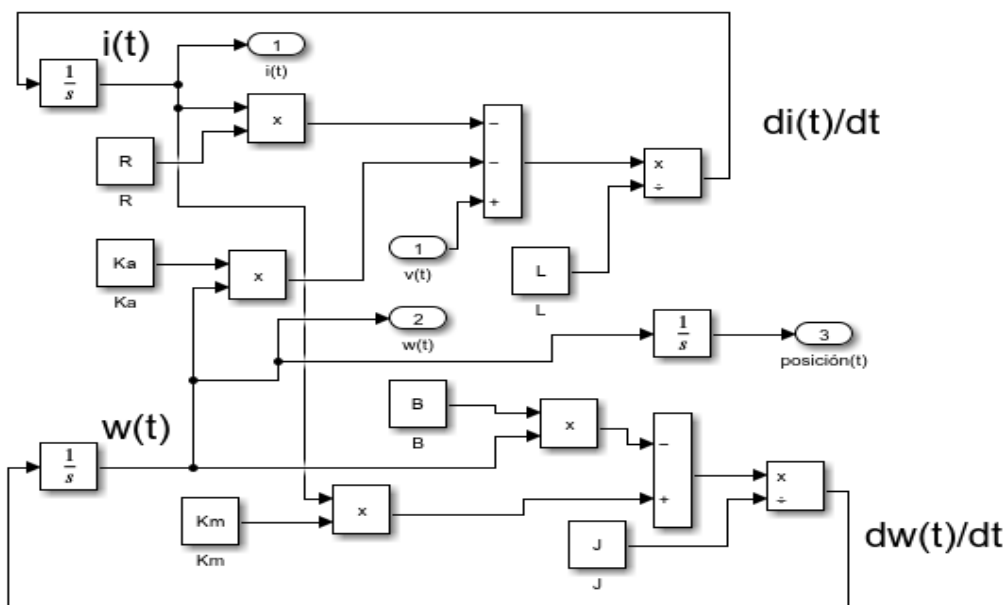
$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{LJS^2 + (RJ + LB)S + RB + K_a K_m}$$

- Considerar los parámetros medidos y calculados de un motor DC con encoder.
  - Resistencia a la armadura  $R = 5.5\Omega$
  - Inductancia a la armadura  $L = 0.0043H$
  - Voltaje  $V = 12.2V$
  - Velocidad angular  $\omega = 18.4 \text{ rad/s}$
  - Corriente del motor sin carga  $I = 0.15A$
  - Constante electromotriz  $K_a = 0.61 \text{ V/rad.s}$
  - Constante de torque  $K_m = 0.61 \text{ Nm/A}$
  - Constante de tiempo mecánica  $t_m = 0.021s$

- Momento de inercia  $J = 0.001421 \text{ kg/m}^2$
- Corriente de arranque  $i_{\text{arr}} = 0.011 \text{ A}$
- Torque de fricción  $T_f = 0.00671 \text{ Nm}$
- Torque del motor  $T_m = 0.1 \text{ Nm}$
- Constante de fricción de coulomb  $B = 0.005 \text{ N. m. s}$

#### 4.3 Implementación de modelo electromecánico

- a. Implementación de las ecuaciones diferenciales ordinarias (1) y (3) del sistema electromecánico teniendo en cuenta las relaciones de proporcionalidad (2) y (4).



#### Comentario del funcionamiento

En la parte superior, se observa el modelo eléctrico, donde la corriente  $i(t)$  depende del voltaje aplicado  $v(t)$ , de la resistencia ( $R$ ), la inductancia ( $L$ ) y de la fuerza contraelectromotriz proporcional a la velocidad del motor  $K_a w(t)$ . Este bloque muestra cómo el voltaje de entrada genera corriente, y cómo la f.c.e.m. se opone a los cambios en la misma.

En la parte inferior, se encuentra el modelo mecánico, donde la velocidad angular  $w(t)$  resulta entre la constante de torque  $K_m i(t)$ , la constante de fricción de coulomb  $B w(t)$  y la inercia del motor ( $J$ ). El bloque de integración ( $1/s$ ) permite obtener la posición  $\theta(t)$  a partir de la velocidad.

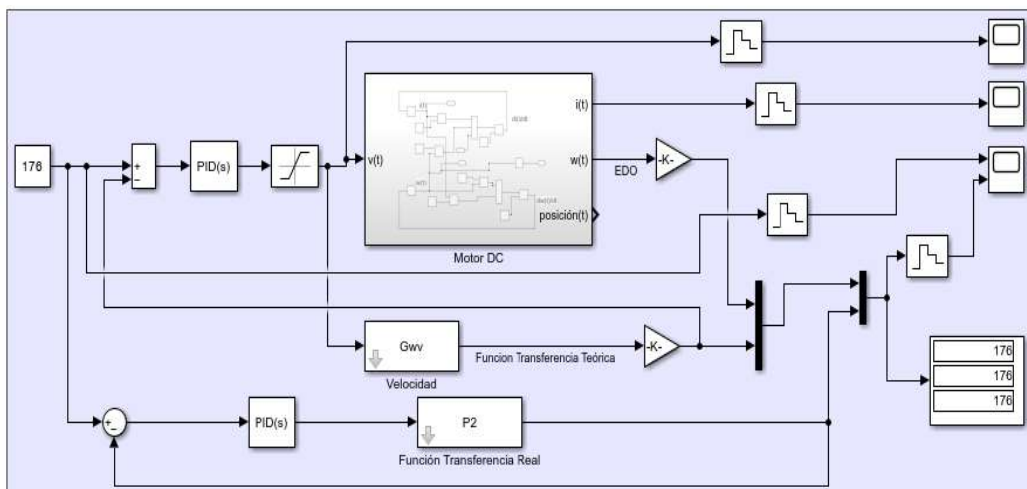
2.- Crear un script para cargar los parámetros del motor DC y subirlo en la ventana principal de MATLAB conjuntamente con la función transferencia calculada. En base a esa planta realizar el ajuste del sistema de control con PID Tuner.

```

Parametros_Motor.m
1  %% Modelo Matematico de Motor DC
2  clc
3  clear all
4  close all
5
6  % momento de inercia del rotor:
7  J=0.0014544; % Kg.m^2
8  % constante de fricción viscosa del motor:
9  B=0.0046546; % N.m.s
10 % fuerza electromotriz constante:0.001773
11 Ka=0.6171761; %V/rad/s
12 % par motor constante:
13 Km=Ka; % N.m/A
14 % resistencia eléctrica:
15 R=5.5; %Ω
16 % inductancia eléctrica:
17 L=4.3e-3;
18 %Voltaje Leido en los Terminales del motor
19 Vm=12.2;
20
21
22 %% Función de transferencia
23 den = [L*J R*J+L*B R*B+Km*Ka];
24
25 %Velocidad angular
26 Gwv = tf(Km,den);
27
28 sim('MotorModeloMat.slx')

```

3.- Crear el diagrama de bloques a partir de las ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO), incluir el PID calculado (tunear), luego representar la función transferencia(FT) de velocidad angular respecto al voltaje. Mediante un scope se observa de forma gráfica el comportamiento del sistema. Durante la simulación variar el Set Point.



### **Comentario del funcionamiento**

El sistema inicia con una entrada de referencia que representa la velocidad deseada del motor. Esta señal se compara con la velocidad real del motor en el bloque sumador, generando el error que alimenta al controlador PID(s). El PID calcula la señal de control que busca minimizar ese error.

La salida del PID pasa por un bloque de saturación, que limita el voltaje dentro de un rango permitido, evitando que se apliquen valores excesivos al motor. Posteriormente, la señal entra al bloque Motor DC (Ecuaciones diferenciales), donde se simula el comportamiento dinámico del motor de corriente continua mediante ecuaciones diferenciales, obteniendo como salidas la corriente ( $i(t)$ ), la velocidad angular ( $w(t)$ ) y la posición angular ( $\theta(t)$ ).

La velocidad del motor también alimenta una función de transferencia teórica ( $G_{wv}$ ) que representa un modelo simplificado del motor.

Finalmente, mediante los bloques scopes se puede observar el comportamiento del sistema.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### ▪ Conclusiones

- Se logró modelar correctamente el comportamiento electromecánico de un motor DC a partir de sus ecuaciones diferenciales, obteniendo una función de transferencia que describe la relación entre el voltaje aplicado y la velocidad angular.
- La implementación del modelo en Simulink permitió visualizar la respuesta dinámica del motor ante variaciones del Set Point y analizar el efecto de los parámetros eléctricos y mecánicos en su desempeño.
- La incorporación del controlador PID permitió regular eficazmente la velocidad del motor.

### ▪ Recomendaciones

- Verificar cuidadosamente los parámetros eléctricos y mecánicos del motor antes de la simulación, ya que influyen directamente en la precisión del modelo.
- Complementar la simulación con pruebas experimentales reales para validar el modelo matemático implementado en Simulink.
- Durante el ajuste del controlador PID, utilizar herramientas como el PID Tuner de MATLAB para optimizar los valores de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , buscando una respuesta rápida, estable y con mínimo error en estado estacionario.



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE JAÉN**



## **GUÍA DE LABORATORIO**

**CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC EN SIMULINK/  
MATLAB MEDIANTE UN CONTROLADOR PID –  
MODELAMIENTO FÍSICO REAL**

**AUTORES: BACH. LUIS ENRIQUE TORRES SEGOVIA  
BACH. JUAN ANDRADE GUERRERO PINTADO  
ASESOR: LENIN FRANCHESCOLETH NÚÑEZ PINTADO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL**

**Jaén – Perú, diciembre 2025**

<b><u>GUÍA DE LABORATORIO</u></b>	
<b>DATOS GENERALES</b>	
<b>Automatización y Control Industrial</b>	<b>N° de Practica:</b>
<b>Asesor: Lenin Franchescoeth Núñez Pintado</b>	<b>Fecha:</b>
<b>Autores: Bach. Luis Enrique Torres Segovia Bach. Juan Andrade Guerrero Pintado</b>	
<b>CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC EN SIMULINK/ MATLAB MEDIANTE UN CONTROLADOR PID – MODELAMIENTO REAL.</b>	
<b>I. OBJETIVOS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>General:</b> Implementar un módulo didáctico para el control de velocidad de un motor dc en Simulink/MATLAB mediante un controlador PID.</li> </ul> <p><b>Específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Implementar un circuito eléctrico – electrónico del sistema mediante controladores, actuadores y sensores accesibles.</li> <li>▪ Implementar un diagrama de bloques en Simulink/Matlab que proporcione el control de velocidad, voltaje y corriente.</li> </ul>	
<b>II. FUNDAMENTO TEÓRICO</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Motor DC:</b> Dispositivo de corriente continua utilizado para proyectos dependiendo de su potencia.</li> <li>▪ <b>Driver:</b> Dispositivo que permite encender, apagar, cambiar velocidad y sentido de giro.</li> <li>▪ <b>Encoder:</b> Sensor que mide velocidad y posición de un motor.</li> <li>▪ <b>PID:</b> Es un tipo de control automático que ajusta una variable (velocidad o posición) usando tres acciones: P(Proporcional), I(Integral) y D(Derivativo).</li> <li>▪ <b>Lazo abierto:</b> Sistema que no se corrige solo.</li> <li>▪ <b>Lazo cerrado:</b> El sistema se autocorrige.</li> <li>▪ <b>PRBS: (Pseudo Random Binary Sequence)</b> Es una señal formada por una secuencia de ceros y unos. Usado para probar y analizar sistemas como motores o controladores.</li> <li>▪ <b>PWM: (Pulse Width Modulation)</b> Es una señal digital que cambia muy rápido entre encendido y apagado para regular la energía que llega el dispositivo. Se usa por ejemplo para el control de velocidad.</li> </ul>	

### III. EQUIPOS Y MATERIALES

- **Controladores**

- 01 Arduino mega 2560 R3:



- **Elementos de alimentación**

- 01 Fuente de alimentación de 12 VDC



- **Actuadores.**

- 01 driver BTS7960



- **Sistema.**

- 01 motor de 12V DC con encoder

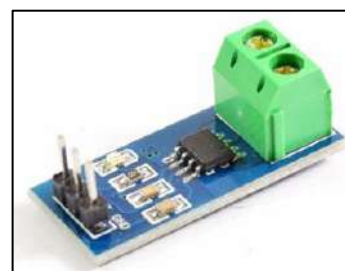


- **Sensores**

- 01 sensor de voltaje 0-25V DC



- 01 sensor de corriente ACS712 20A



▪ **Materiales**

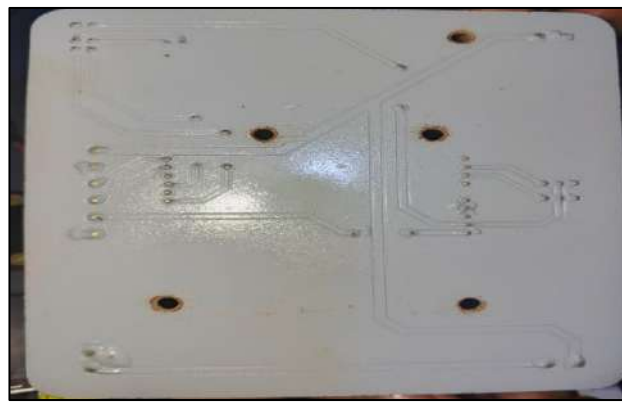
- Cable USB tipo A-B



- Cables jumpers de conexión eléctrica.



- 01 placa PCB del circuito.



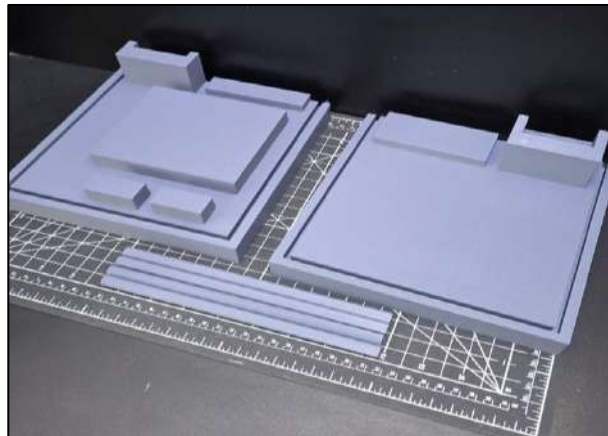
- 01 enchufe.



- Cable.

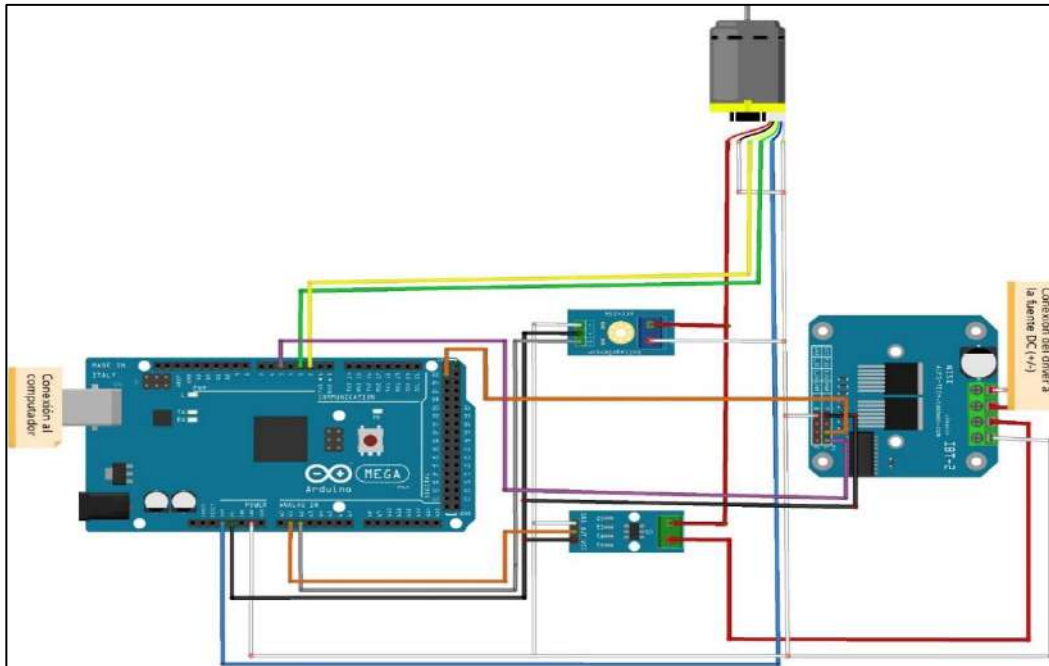


- Módulo soporte.



## IV. PROCEDIMIENTO Y TOMA DE DATOS

- Implementación del circuito eléctrico – electrónico en Fritzing.



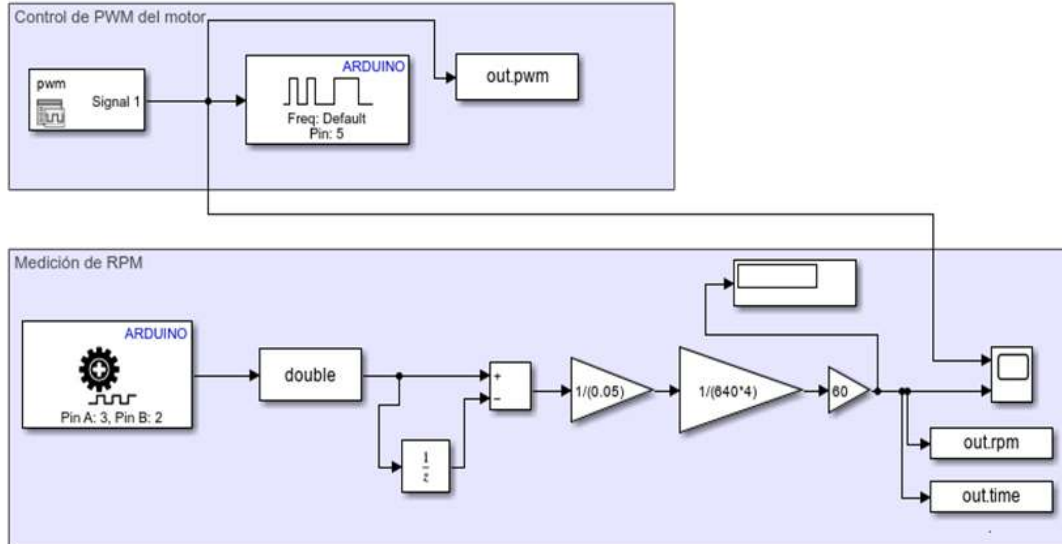
### Comentario de funcionamiento

El sistema se alimenta con una fuente DC de 12V conectada al driver BTS7960 en los terminales (B+) y (B-), compartiendo la tierra común con el Arduino Mega para asegurar una referencia estable. El driver controla el motor DC mediante sus salidas (M+) y (M-), mientras que sus pines R\_PWM y R\_EN se conectan a los pines 5 y 22 del Arduino, respectivamente. El Vcc del driver se alimenta con 5V del Arduino. El motor DC con encoder se conecta al driver y sus señales de velocidad (fase A y B) se envían a los pines 2 y 3 del Arduino. El Vcc del encoder recibe 3.3V y su GND se une a la tierra común.

El sensor de voltaje (0–25V) toma lectura del cable positivo entre el driver y el motor, con su señal analógica conectada al pin A2 del Arduino y alimentación de 5V. El sensor de corriente ACS712 (20A) se coloca en serie con la línea del motor; su salida (OUT) se conecta al pin A1 del Arduino y también comparte 5V y GND comunes.

- **Implementación del diagrama de bloques de Matlab/ Simulink.**

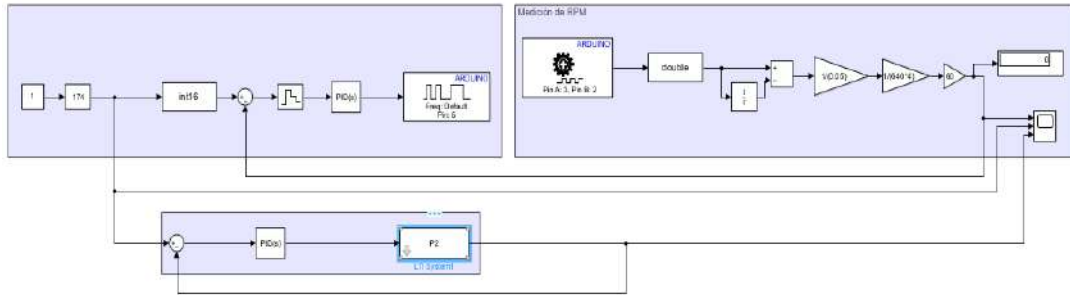
- **Control a lazo abierto**



### **Comentario de funcionamiento**

El sistema genera una señal PRBS mediante el bloque Signal Editor, que se aplica al bloque PWM ~ (pin 5) para controlar la modulación del motor. Paralelamente, el bloque Encoder (pines 2 y 3) mide los pulsos del sensor para determinar la velocidad (RPM). Los datos del encoder se convierten a tipo double y se procesan con Unit Delay y Add para obtener los pulsos por intervalo. Luego, una serie de Gain transforma los pulsos en RPM considerando el tiempo de muestreo (0.05 s) y las características del encoder (640 pulsos/rev, cuadratura  $\times 4$ ). Finalmente, los resultados se visualizan en Scope y Display, y se guardan en To Workspace para análisis posterior.

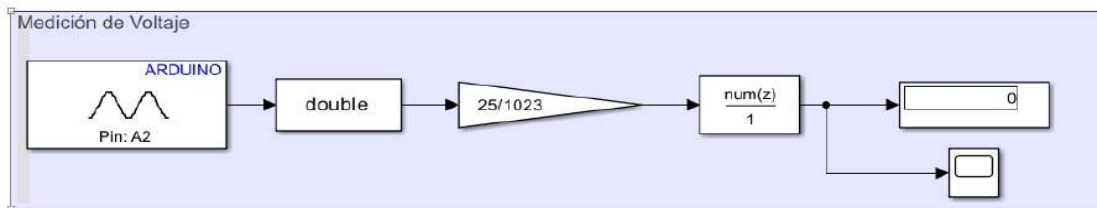
- **Control a lazo cerrado**



**Comentario de funcionamiento**

El sistema en lazo cerrado con controlador PID complementa el modelo de lazo abierto para el control de velocidad del motor. Se usa una constante (1) como referencia de velocidad máxima, ajustable mediante un Slider Gain. La señal se convierte a tipo int16 para ser compatible con el Arduino y se calcula el error entre la referencia y la velocidad real. Luego, el bloque PID procesa este error y, a través del PWM (pin 5), regula el voltaje del motor para mantener la velocidad deseada. Los parámetros (Kp, Ki, Kd, N) se ajustan con el PID Tuner, y se compara la respuesta del motor real con la obtenida mediante el modelo de planta (P2) cargado en el bloque LTI System.

- **Para la lectura de voltaje**

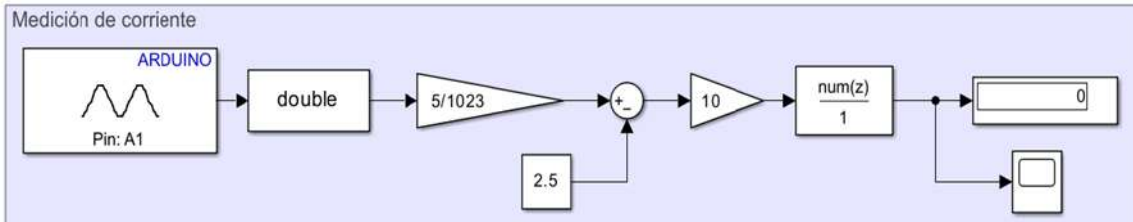


**Comentario de funcionamiento**

El sistema de medición de voltaje comienza con el bloque Analog Input (A2), que convierte la señal analógica del sensor (0–5 V) en un valor digital entre 0 y 1023 con una resolución de 10 bits. Luego, un bloque Data Type Conversion transforma el valor entero (int16) a double para evitar errores de compatibilidad. Posteriormente, el bloque Gain (25/1023) convierte el valor digital en voltaje real, donde 25 representa el rango máximo que puede medir el sensor y 1023 el valor

digital máximo entregado por el ADC. Finalmente, un bloque FIR Filter suaviza la lectura eliminando ruidos y variaciones rápidas.

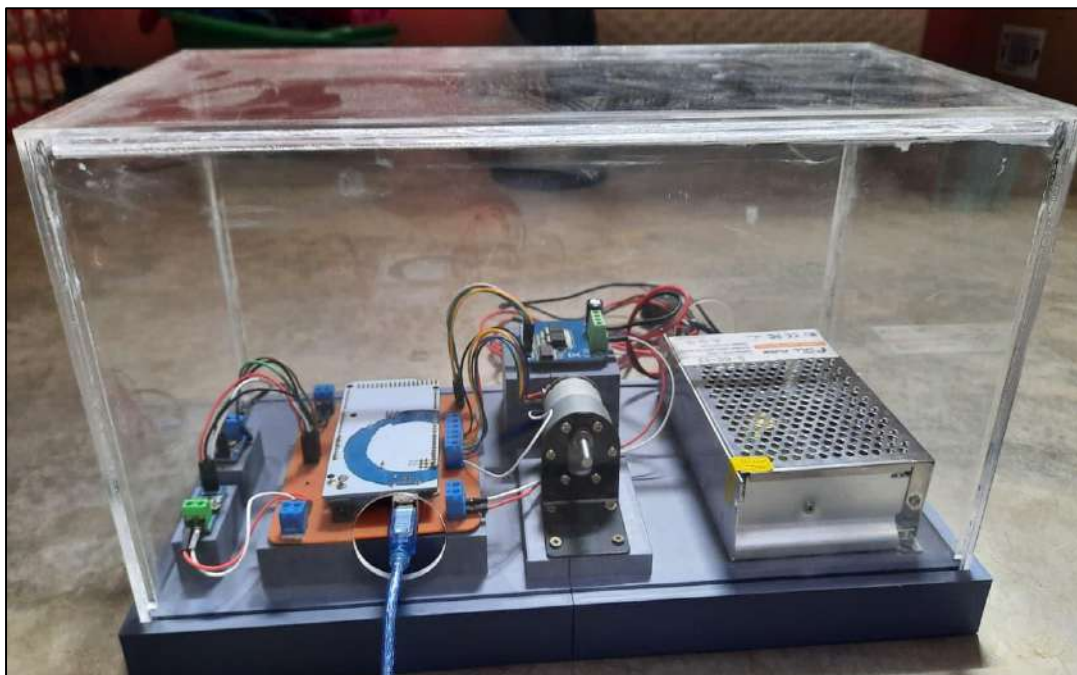
- **Para la lectura de corriente**



### Comentario de funcionamiento

El sistema de medición de corriente utiliza el bloque Analog Input (A1) para leer la señal del sensor ACS712 de 20 A. Luego, un Data Type Conversion convierte el valor entero a double, y un Gain (5/1023) transforma el dato digital en voltaje real. Con un Sum (-2.5) se corrige el voltaje base del sensor (2.5 V a 0 A) y un Gain (10) convierte el voltaje en corriente real según su sensibilidad (0.1 V/A). Finalmente, un FIR Filter suaviza la señal eliminando ruidos.

### Fotos de implementación en módulo:



## **V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **▪ Conclusiones**

- Se logró implementar exitosamente un módulo didáctico funcional que integra microcontroladores, sensores y actuadores, permitiendo la enseñanza práctica de técnicas de control automático como el control PID, el control a lazo abierto y cerrado, fortaleciendo el aprendizaje experimental en el laboratorio de automatización.
- El uso de herramientas accesibles como Arduino y MATLAB/Simulink facilitó la adquisición, procesamiento y visualización de datos en tiempo real, garantizando una comprensión más clara del comportamiento gráfico del sistema.
- Los resultados obtenidos evidencian que el módulo responde de manera estable y precisa ante variaciones de referencia, validando el correcto funcionamiento del control PID y la efectividad de los sensores de voltaje, corriente y velocidad en la identificación y análisis de la planta.

### **▪ Recomendaciones**

- Se recomienda continuar con la ampliación del módulo incorporando otros tipos de controladores (como P, PI, PD, o control difuso) y diferentes tipos de actuadores, con el fin de diversificar las prácticas y fortalecer la formación en control automático.
- Es conveniente realizar un mantenimiento del sistema, verificando periódicamente las conexiones, calibración de sensores y estado de los componentes electrónicos, para asegurar la confiabilidad y durabilidad del módulo.
- Se sugiere que el módulo sea utilizado de forma guiada en las sesiones de laboratorio, complementado con simulaciones en MATLAB/Simulink, de manera que los estudiantes relacionen los modelos teóricos con los resultados experimentales del sistema real.