



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

ÁREA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**LABORATORIO VIRTUAL DE UN
MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA**

Autor: Carlos López Miguel

Tutor: Enrique Bauzano Núñez

Titulación: Grado en Ingeniería Eléctrica

MÁLAGA, junio de 2025

RESUMEN

Este proyecto se enfoca en el desarrollo de un gemelo digital de un motor de corriente continua, pensado como una herramienta educativa y de apoyo a la investigación. El trabajo abarca desde la modelización y caracterización del sistema hasta la implementación del modelo en Simulink y Simscape. Además, se crea una representación tridimensional en SolidWorks que reproduce fielmente la maqueta física utilizada en el laboratorio. A través de este entorno virtual, es posible simular el comportamiento del motor y compararlo con datos reales, lo que permite validar el modelo y analizar diferentes configuraciones de control. El resultado es un laboratorio virtual que facilita la comprensión del funcionamiento de los motores de corriente continua y refuerza la enseñanza de conceptos clave en ingeniería eléctrica mediante el uso de tecnologías digitales avanzadas.

PALABRAS CLAVE: Motor CC, Simulink, Simscape, caracterización, laboratorio virtual, gemelo digital.

ABSTRACT

This project focuses on the development of a digital twin of a DC motor, intended as an educational and research support tool. The work covers from the modeling and characterization of the system to the implementation of the model in Simulink and Simscape. In addition, a three-dimensional representation is created in SolidWorks that faithfully reproduces the physical model used in the laboratory. Through this virtual environment, it is possible to simulate the behavior of the engine and compare it with real data, which allows validating the model and analyzing different control configurations. The result is a virtual laboratory that facilitates the understanding of the operation of DC motors and reinforces the teaching of key concepts in electrical engineering through the use of advanced digital technologies.

KEYWORDS: DC Motor, Simulink, Simscape, characterization, virtual laboratory, digital twin.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Estado del Arte	2
1.4. Objetivo	5
1.5. Estructura de la Memoria	5
Capítulo 2: Fundamentos Físicos y Arquitectura del Sistema Basado en Motor de CC..	7
2.1. Introducción.....	7
2.2. Características y Funcionamiento del Sistema	7
2.2.1. Funcionamiento y Características del Motor de CC.....	8
2.2.2. Elementos de Sensado	11
2.3. Arquitectura del Sistema	12
Capítulo 3: Estudio Teórico del Motor de CC Real	13
3.1. Introducción.....	13
3.2. Equipo Alecop MV-541	14
3.3. Estudio del Motor de CC	15
3.3.1. Constante de Par y Constante de Fuerza Electromotriz.....	16
3.3.2. Modelado Matemático	19
3.3.3. Comportamiento Dinámico y las Constantes de Tiempo	22
3.3.4. Efectos no Lineales del Motor de CC.....	23
3.4. Estudio del Captador Potenciométrico y la Reductora.....	24
3.5. Estudio del Encoder Incremental.....	28
3.6. Estudio del Captador de Velocidad: Tacodinamo	31
Capítulo 4: Identificación de Parámetros Físicos y Simulación.....	37

4.1.	Introducción.....	37
4.2.	Herramientas Utilizadas	37
4.3.	Modelo y Caracterización del Motor CC	40
4.3.1.	Modelo del Motor de CC con Simscape.....	40
4.3.2.	Constante de Tiempo Mecánica y Eléctrica	43
4.3.3.	Resistencia de Armadura	44
4.3.4.	Inductancia.....	44
4.3.5.	Constante Electromotriz	47
4.3.6.	Zona Muerta, Corriente de Arranque y Torque de Fricción.....	48
4.3.7.	Momento de Inercia.....	49
4.3.8.	Constante de Fricción Viscosa.....	49
4.3.9.	Saturación	50
4.3.10.	Resumen de Parámetros Característicos del Motor CC.....	50
4.4.	Modelo y Caracterización del Captador Potenciométrico y de la Reductora	51
4.4.1.	Modelo del Captador Potenciométrico y de la Reductora con Simscape	51
4.4.2.	Parámetros Característicos del Captador Potenciométrico y de la Reductora	55
4.5.	Modelo del Encoder Incremental	59
4.6.	Modelo del Captador de Velocidad: Tacodinamo.....	59
4.6.1.	Modelo del Captador de Velocidad en Simscape	59
4.6.2.	Parámetros Característicos del Captador de Velocidad.....	61
4.7.	Modelado de la Vibración en la Velocidad	63
4.7.1.	Identificación del Problema	63
4.7.2.	Modelado de la Vibración	66
4.8.	Modelo de la Maqueta	72
4.9.	Modelo de la Maqueta con Simscape Multibody	73
4.9.1.	SolidWorks	73
4.9.2.	Simscape Multibody	79
Capítulo 5: Entorno Virtual de Control y Operación del Sistema Basado en Gemelo Digital.....		83
5.1.	Introducción.....	83

5.2.	Modelado del Entorno de Control	83
5.2.1.	Modelado del Módulo ALI 700.....	84
5.2.2.	Modelado del Módulo MUX 547	86
5.2.3.	Modelado del Módulo Encoder 547	87
5.2.4.	Modelado del Módulo Consigna 547	88
5.2.5.	Modelado del Módulo Corrector 547	99
5.2.6.	Esquema Final del Entorno Virtual de Control	100
5.3.	Manual de Usuario	101
5.4.	Modos de Operación del Sistema	104
5.4.1.	Configuración Básica.....	105
5.4.2.	Control Mediante Entorno Virtual.....	105
5.4.3.	Visualización Virtual Offline con Datos Reales.....	106
5.4.4.	Visualización Virtual Online con Datos Reales	106
5.4.5.	Simulación Autónoma del Motor Virtual	107
5.4.6.	Otros Modos de Operación.....	107
Capítulo 6:	Implantación y Resultados Experimentales.....	111
6.1.	Introducción.....	111
6.2.	Pruebas Realizadas	111
6.2.1.	Respuesta ante Consigna Tipo Escalón	112
6.2.2.	Respuesta ante Consigna Tipo Rampa	115
6.2.3.	Respuesta ante Consigna Tipo Rampa Escalonada	118
6.2.4.	Respuesta ante Consigna Tipo Senoidal.....	120
6.2.5.	Comparación Control PI en Posición	123
6.2.6.	Comparación Control PI en Velocidad.....	128
Capítulo 7:	Conclusiones y Trabajos Futuros	131
7.1.	Conclusiones.....	131
7.2.	Trabajos Futuros	132
BIBLIOGRAFÍA	133
Anexo A:	Detalles Técnicos y Códigos Utilizados	139
A.1.	Nomenclatura Motor de CC.....	139
A.2.	Pinout Tarjeta de Adquisición de Datos	140
A.3.	Cálculo del Factor de Conversión de la Tacodinamo	141

A.4. Código Matlab - Valor Medio de Voltaje	142
A.5. Código Matlab - Generación Gráfica Amplitud Vibración	144
A.6. Archivo PreConf_Multibody.m del Esquema en Simscape Multibody	147
A.7. Código Matlab – Carga de Parámetros	150
A.8. Código Matlab – Gráfica PWM.....	152
Anexo B: Documento de la Práctica Propuesta.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de clasificación de los motores eléctricos.	3
Figura 2: Diagrama funcional del sistema físico.	7
Figura 3: Principio de funcionamiento de un motor de CC. [12]	8
Figura 4: Partes de una máquina de corriente continua. [2]	9
Figura 5: Esquema de la sección de un motor de CC. [14]	10
Figura 6: Componentes de un motor de CC de imanes permanentes. [16]	11
Figura 7: Arquitectura del sistema.	12
Figura 8: Ensamblaje de componentes físicos del motor y los sensores. [1]	13
Figura 9: Equipo Alecop ubicada en el laboratorio.	14
Figura 10: Maqueta MV-541.	15
Figura 11: Motor de CC de la maqueta.	15
Figura 12: Producción de torque. [17]	16
Figura 13: Sección transversal del motor CC.	18
Figura 14: Modelo motor de CC. [18]	19
Figura 15: Diagrama de bloques con la posición como salida. [18]	20
Figura 16: Diagrama de bloques con la velocidad como salida. [18]	21
Figura 17: Respuesta de un motor de CC ante un cambio en la tensión de entrada. [19]	22
Figura 18: Representación de la zona muerta de un motor. [20]	24
Figura 19: Captador potenciométrico (esquema). [1]	25
Figura 20: Captador potenciométrico de la maqueta	25
Figura 21: Potenciómetro desplazamiento angular. [1]	26
Figura 22: Excitación de un captador potenciométrico. [1]	27
Figura 23: Encoder incremental y absoluto de la maqueta.	28

Figura 24: Conexionado encoder incremental. [1]	28
Figura 25: Encoder incremental con detección de sentido de giro. [1]	29
Figura 26: Señal de salida del encoder incremental. [1].....	29
Figura 27: Salida índice del encoder incremental. [1].....	30
Figura 28: Relación entre señales según sentido de giro. [1]	30
Figura 29: Fijación de la tacodinamo al eje motriz. [1].....	31
Figura 30: Tacodinamo utilizada en la maqueta.....	31
Figura 31: Colector de dos delgas. [14].....	32
Figura 32: Funcionamiento del colector de delgas y tensión obtenida entre escobillas. [14]	33
Figura 33: Rotor de una tacodinamo. [1].....	34
Figura 34: Inducido con dos espiras y colector con cuatro delgas. [14]	34
Figura 35: Esquema genérico de una tacodinamo.	35
Figura 36: Tarjeta de adquisición de datos NI PCIe6321.....	38
Figura 37: Diagrama en Simulink para la adquisición de datos.	39
Figura 38: Diagrama de adquisición de datos para un rango de valores de consigna. ...	39
Figura 39: Instrumentos de medida. Generador de funciones, multímetro y osciloscopio.	40
Figura 40: Modelo del motor de CC en Simscape.	40
Figura 41: Bloque DC Motor en Simscape.	41
Figura 42: Bloque rotational friction en Simscape.....	42
Figura 43: Esquema simplificado en Simscape del motor CC.	42
Figura 44: Constante de tiempo mecánica.....	43
Figura 45: Circuito corriente alterna RL en serie.	44
Figura 46: Circuito resonante serie [28].	45
Figura 47: Montaje en protoboard del circuito resonante serie.	46
Figura 48: Captura de las señales del circuito resonante serie	46
Figura 49: Experimento para calcular la saturación del motor.....	50
Figura 50: Bloque potenciómetro en Simscape.....	52
Figura 51: Bloque reductora 1:30 en Simscape.....	53
Figura 52: Esquema en Simscape del Captador potenciométrico.	53
Figura 53: Configuración del sensor de rotación de la reductora.....	54

Figura 54: Esquema del módulo Captador potenciométrico.	54
Figura 55: Salida del captador potenciométrico con una entrada de 5 V.....	56
Figura 56: Zona muerta del potenciómetro.	57
Figura 57: Zona muerta del potenciómetro medida con el osciloscopio.....	58
Figura 58: Bloque encoder incremental en Simscape.	59
Figura 59: Bloque tacodinamo en Simscape.	60
Figura 60:Esquema del módulo Captador de velocidad: Tacodinamo.....	60
Figura 61: Subsistema de la tacodinamo en Simscape.	61
Figura 62: Período de la señal del encoder incremental (I0) para una entrada de 5 V...	62
Figura 63:Ondulación de la señal de la tacodinamo.....	64
Figura 64: Fenómeno de ondulación para distintos valores de consigna.	65
Figura 65: Relación entre la velocidad del motor y la vibración de la tacodinamo.	67
Figura 66: Comparación de los datos originales con los ajustes de los tres modelos. ...	68
Figura 67: Bloque 1-D Lookup Table de Simulink.....	69
Figura 68: Modelado de la vibración en la velocidad en Simscape.	70
Figura 69: Modelado de la vibración en la velocidad para diferentes ajustes.	71
Figura 70: Disposición del bloque de vibración en el sistema.	71
Figura 71: Modelo de la maqueta en Simscape.....	72
Figura 72: Modelo 3D del motor CC en SolidWorks.....	73
Figura 73: Modelo 3D del tornillo sinfín-corona en SolidWorks.	74
Figura 74: Modelo 3D de la carcasa-reductora en SolidWorks.	74
Figura 75: Modelo 3D del conjunto tornillo sinfín-corona en SolidWorks.	75
Figura 76: Modelo 3D del encoder absoluto e incremental en SolidWorks.....	75
Figura 77: Modelo 3D de la tacodinamo en SolidWorks.	76
Figura 78: Modelo 3D del acople flexible en SolidWorks.....	76
Figura 79: Modelo 3D de la maqueta en SolidWorks.	77
Figura 80: Subensamblaje nº1 para exportar a Simscape Multibody.....	78
Figura 81: Subensamblaje nº2 para exportar a Simscape Multibody.....	78
Figura 82: Subensamblaje nº3 para exportar a Simscape Multibody.....	78
Figura 83: Bloque "Worm and Gear Constraint" en Multibody.....	80
Figura 84: Ejemplo de anulación de los momentos y productos de inercia en Simscape Multibody.	80

Figura 85: Esquema del sistema en Simscape Multibody.	81
Figura 86: Visualización de la maqueta en Mechanics Explorer.	82
Figura 87: Cuatro vistas estándar de la maqueta en Mechanics Explorer.	82
Figura 88: Sistema modular de la maqueta MV-541. [1].....	84
Figura 89: Módulo ALI – 700 [1].....	84
Figura 90: Modelado del módulo ALI – 700.....	85
Figura 91: Subsistema del módulo ALI 700.....	85
Figura 92: Rizado de la señal del módulo ALI 700.....	86
Figura 93: Módulo MUX 547 [1].....	86
Figura 94: Bloque Scope en Simulink.....	87
Figura 95: Módulo Encoder 547. [1].....	87
Figura 96: Subsistema del módulo Encoder 547.....	88
Figura 97: Modelado del módulo Encoder 547.....	88
Figura 98: Módulo Consigna 547. [1].....	89
Figura 99: Modelado potenciómetro de consigna y bornas de alimentación.	90
Figura 100: Modelado consigna escalón y rampa.	90
Figura 101: Ejemplo de señal tipo PWM. [5].....	91
Figura 102: Bloque PWM en Simscape.	91
Figura 103: Medida de la señal de entrada (azul) y salida (amarilla) del driver.	92
Figura 104: Representación de tensión media PWM frente a tensión de entrada al driver.	93
Figura 105: Ajuste lineal de la señal PWM.....	94
Figura 106: Bloque de saturación para la señal de entrada al driver.....	95
Figura 107: Modos de funcionamiento de un puente H de transistores.	95
Figura 108: Bloque "Puente-H" en Simscape.....	96
Figura 109: Modelado del driver.....	97
Figura 110: Esquema del driver.	97
Figura 111: Modelado del Módulo Consigna 547.....	98
Figura 112: Modelado del módulo Consigna 547.	98
Figura 113: Módulo Corrector 547. [1].....	99
Figura 114: Modelado Corrector 547.	100
Figura 115: Modelado en Simscape de los módulos de control.....	100

Figura 116: Secuencia de inicialización del modelo.	101
Figura 117: Data Inspector de Simulink.	102
Figura 118: Etiquetas GoTo y From para el control de posición del motor.	103
Figura 119: Subsistemas de medida de voltaje e intensidad.	103
Figura 120: Ejemplo de selección de señales.	103
Figura 121: Modelo final del Sistema en Simscape.	104
Figura 122: Modo de operación: Configuración Básica.	105
Figura 123: Modo de operación: Control mediante entorno virtual.	105
Figura 124: Modo de operación: Visualización virtual offline con datos reales.	106
Figura 125: Modo de operación: Visualización virtual online con datos reales.	106
Figura 126: Modo de operación: Simulación autónoma del motor virtual.	107
Figura 127: Modo de operación para la visualización del comportamiento de un proceso.	108
Figura 128: Modo de operación para la comparación entre gemelo digital y físico. ...	109
Figura 129: Esquema de ayuda para realizar un control de posición o velocidad.	112
Figura 130: Velocidad del motor ante una consigna tipo escalón.	112
Figura 131: Diferencia de velocidades del motor real vs motor simulado ante consigna escalón.	113
Figura 132: Posición del eje del motor ante una consigna tipo escalón.	113
Figura 133: Diferencia de la señal de posición del motor real vs motor simulado ante consigna escalón.	114
Figura 134: Pulsos del encoder virtual vs real ante una consigna tipo escalón.	114
Figura 135: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo rampa ascendente. .	115
Figura 136: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs motor simulado ante consigna rampa ascendente.	116
Figura 137: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo rampa descendente.	117
Figura 138: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs motor simulado ante consigna rampa descendente.	117
Figura 139: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo rampa escalonada ascendente.	118
Figura 140: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado ante consigna escalonada ascendente.	119
Figura 141: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo rampa escalonada descendente.	119

Figura 142: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado ante consigna escalonada descendente.	120
Figura 143: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo senoidal con amplitud 5 V.	121
Figura 144: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado ante consigna senoidal de 5 V.	121
Figura 145: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo senoidal con amplitud 10 V.	122
Figura 146: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado ante consigna senoidal de 10 V.	123
Figura 147: Esquema de control en posición.	123
Figura 148: Esquema de adquisición de datos para control PI en posición.	124
Figura 149: Esquema de control PI en posición.	124
Figura 150: Respuesta de la posición del motor ante un control PI.	125
Figura 151: Diferencia de la señal de posición del motor real vs simulado en el control PI de posición.	125
Figura 152: Respuesta de la velocidad del motor en el control de posición.	126
Figura 153: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado en el control PI de posición.	126
Figura 154: Respuesta del error de control en el control de posición.	127
Figura 155: Diferencia de la señal de error del motor real vs simulado en el control PI de posición.	128
Figura 156: Esquema de control PID en velocidad.	128
Figura 157: Esquema de adquisición de datos para control PI en velocidad.	129
Figura 158: Esquema de control PI en velocidad.	129
Figura 159: Respuesta de la velocidad del motor ante un control PI de velocidad.	130
Figura 160: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado en el control PI de velocidad.	130
Figura 161: NI PCIe6321 Pinout. [32]	140
Figura 162: P0 - Módulo virtual CONSIGNA 547 (azul) y maqueta virtual (magenta).	155
Figura 163: P0 - Herramientas de conversión y visualización de señales.	156
Figura 164: P0 - Agrupación de señales de interés utilizando un multiplexor.	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características del motor CC.....	16
Tabla 2: Características del potenciómetro.	26
Tabla 3: Valores del experimento para obtener la constante electromotriz.	47
Tabla 4: Recopilación de los parámetros característicos del motor de CC	51
Tabla 5: Datos obtenidos de la amplitud de la vibración de la señal de la tacodinamo.	66
Tabla 6: Parámetros y MSE de los tres modelos matemáticos.....	68
Tabla 7: Datos de la señal PWM.	92
Tabla 8: Nomenclatura empleada en el motor de CC.....	139
Tabla 9: Valores medidos para calcular el promedio del factor de conversión de la tacodinamo.	141
Tabla 10: P0 - Conexiones del equipo virtual.	157
Tabla 11: P0 - Identificación de la zona muerta.....	159
Tabla 12: P0 - Relación tensión-posición.....	159
Tabla 13: P0 - Coeficientes de ajuste lineal para la relación tensión-posición.	159

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Los laboratorios virtuales y gemelos digitales están revolucionando la forma en que se experimentan y comprenden sistemas complejos. El enfoque de este trabajo se dirige hacia la creación de un laboratorio virtual de un motor de corriente continua, un elemento esencial utilizado en una variedad de aplicaciones industriales, desde maquinaria automatizada hasta sistemas de control de velocidad.

La motivación principal por la que se da comienzo a este proyecto es debido al potencial del laboratorio virtual en facilitar la comprensión y experimentación con motores de corriente continua, permitiendo a estudiantes y profesionales acceder a un aprendizaje dinámico sin restricciones de tiempo o ubicación.

Además de satisfacer una necesidad educativa, mi interés personal radica en explorar un campo en constante evolución, donde la capacidad de modelar y caracterizar con precisión cualquier sistema es fundamental para comprender su comportamiento y optimizar su rendimiento en diversas aplicaciones.

1.2. ANTECEDENTES

Durante varios años, las asignaturas de automática y control de la Universidad de Málaga cuentan con un mayor número de alumnos frente al número de puestos de prácticas que existen en los laboratorios. Esto ocasiona que se deban establecer varias sesiones prácticas o su realización por parejas. Además, la imposibilidad de alumnado de asistir presencialmente a prácticas debido a problemas de salud o incompatibilidad de horarios hace más complicado el seguimiento de la asignatura. Otro punto a destacar es la limitación de las horas disponibles en el laboratorio, lo que hace que los equipos virtuales sean una herramienta útil para preparar ejercicios o completar tareas pendientes.

Por otro lado, cualquier posible incidencia o fallo en los equipos Alecop MV-541 [1] adquiridos por el departamento podrían limitar el acceso de todos los alumnos a las prácticas, dificultando su desarrollo con normalidad. En este contexto, los gemelos digitales se presentan como una solución eficaz para mitigar este problema.

1.3. ESTADO DEL ARTE

Los motores eléctricos han sido un pilar fundamental en el desarrollo de la industria moderna, desempeñando un papel crucial en la automatización, la producción y el transporte. Entre ellos, los motores de CC destacan por sus características de par elevado, controlabilidad de la velocidad en un amplio rango, portabilidad y buena característica par-velocidad. Es por esto que se utiliza en numerosas aplicaciones de control, incluyendo: manipuladores robóticos, mecanismos de transporte de cintas, unidades de disco, máquinas herramienta, actuadores de servo-válvulas, etc. [2]. Sin embargo, el correcto funcionamiento de estos motores depende de un conocimiento detallado de sus parámetros característicos, lo que los convierte en un tema constante de investigación. La necesidad de estudiar y modelar estos motores en profundidad no solo busca mejorar su diseño y rendimiento, sino también garantizar su integración eficiente en sistemas más amplios.

Existen cinco grandes tipos de motores de CC de uso general. En primer lugar, el motor de CC de excitación separada consigue obtener la alimentación del rotor y del estátor de dos fuentes de tensión independientes. Tiene como aplicaciones industriales el torneado y taladrado de materiales, ventilación de horno y desenrollado de bobinas entre otros. Es el más adecuado para cualquier tipo de regulación, por la independencia entre el control por el inductor y el control por el inducido. En segundo lugar, el motor de CC en derivación conecta la excitación en paralelo con el inducido. La regulación de velocidad se consigue mediante un reóstato en serie con la excitación. En general, son motores estables y de precisión, muy utilizados en fresadoras, tornos, etc. En tercer lugar, el motor de CC en serie, donde la excitación está en serie con el inducido. Se utiliza en aplicaciones donde se requiere un par alto, como por ejemplo el motor de arranque de vehículos. En cuarto lugar, el motor de CC compuesto tiene una parte del devanado de excitación en serie con el inducido y otra parte en paralelo. Estos motores presentan características intermedias entre el motor serie y el de derivación. Por último, el motor de CC de imán permanente no necesita alimentación de energía eléctrica para excitación ni el devanado asociado, pues el campo está hecho con un imán permanente [3].

Para tener una visión más amplia en cuanto a tipo de motores se refiere, en la Figura 1 se muestra un esquema donde se clasifican los diferentes tipos de motores existentes según su tipología.

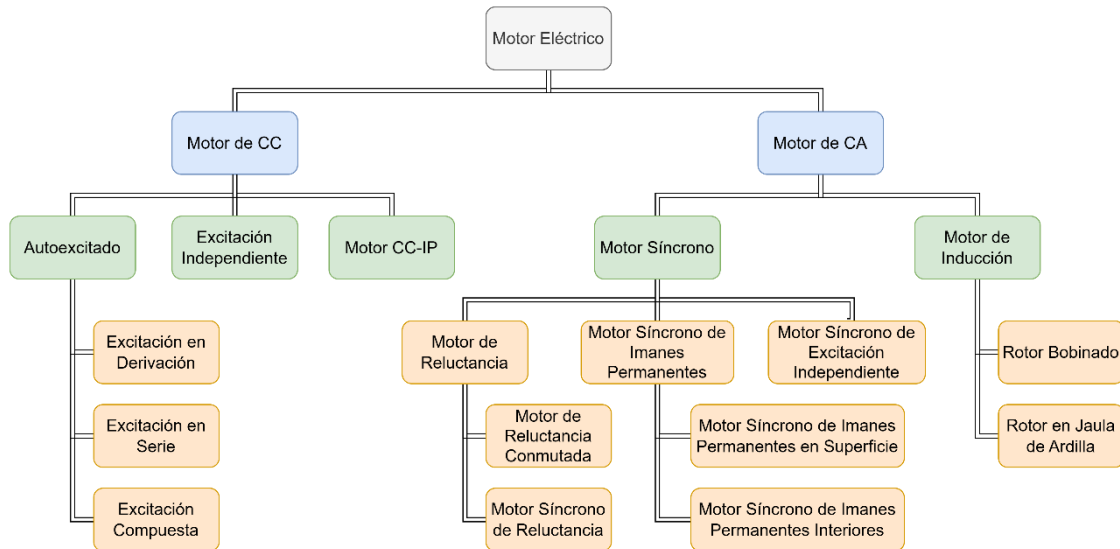


Figura 1: Esquema de clasificación de los motores eléctricos.

De forma general, el modelado de un sistema es un proceso en el que se conceptualiza y abstrae las propiedades y el comportamiento de un sistema. En el caso de sistemas físicos, los componentes de un sistema y sus interacciones se describen mediante modelos matemáticos. En el modelado, la definición de la frontera del sistema dependerá de la naturaleza del estudio a realizar. Por ejemplo, si se realiza un estudio de un circuito eléctrico de corriente continua en régimen permanente no sería necesario tener en cuenta los efectos capacitivos e inductivos. Sin embargo, si se realizase un estudio del circuito en régimen transitorio sí se tendría que considerar tales efectos [4]. El conocimiento del modelo dinámico de las máquinas eléctricas es necesario para resolver problemas de control de generadores y motores, diseñar sistemas de protección y monitoreo, determinar las estructuras y parámetros de control en robótica y resolver problemas en la automatización de la producción, vehículos eléctricos y otras aplicaciones similares. Un buen modelo no es aquel que tiene en cuenta todos los aspectos del comportamiento dinámico de un sistema, sino aquel que se simplifica mediante aproximaciones justificables, facilitando y mejorando el proceso de obtención de conclusiones y toma de decisiones de diseño, al mismo tiempo que conserva todos los fenómenos relevantes (significativos) dentro del sistema [5].

Una vez establecido un modelo que represente de manera adecuada el comportamiento del sistema bajo estudio, el siguiente paso natural consiste en su simulación. Simular proviene de la palabra latina “simulare”, cuyo significado es fingir. Una simulación es el proceso por el cual se le aplican unas entradas a un modelo, ya sea este un objeto material o un modelo matemático, y se estudia cómo se comporta. En el caso de que el modelo sea un objeto material, se realizan experimentos reales a escala para replicar las condiciones que se darían en la realidad y poder extrapolar el resultado. Si, por el contrario, el modelo es una descripción abstracta como un modelo matemático, el método que se utiliza es la simulación numérica por computadora. Las simulaciones se han convertido

en una herramienta muy útil debido a las ventajas que ofrecen. Permiten reducir la necesidad de realizar experimentos en sistemas reales, ahorrando tiempo y disminuyendo costes. Además, reducen el tiempo de diseño de nuevos productos, al poder evaluarse más rápidamente varias posibles soluciones. También proporcionan un instrumento de análisis que mejora el conocimiento del sistema estudiado, y, por tanto, permite una mejora en la toma de decisiones. Estas simulaciones permiten realizar predicciones en el comportamiento del sistema ante cambios en el diseño y disminuyen el riesgo al que pueden estar expuestos tanto el equipamiento como las personas. Por último, ayudan a clarificar las especificaciones del sistema, en el caso de que se esté diseñando un producto nuevo en el que las especificaciones no estén plenamente definidas. En resumen, las simulaciones permiten la reducción del riesgo de dañar equipamiento o personas y el aumento de la eficiencia y efectividad antes de implementarlo en un sistema experimental [4].

En los últimos años, la caracterización de motores de CC ha sido objeto de investigación constante debido a la necesidad de conocer los parámetros característicos correspondientes al motor a estudiar. Existen diferentes métodos a la hora de caracterizar un motor de CC como, por ejemplo, los Métodos Tradicionales de Caracterización. Antes de la era de la simulación por ordenador, la caracterización de motores de CC se basaba en experimentos prácticos que implicaban la medición de corrientes, tensiones y velocidades. Estos métodos aún son valiosos para validar modelos teóricos [6]. Con el paso del tiempo, se han ido desarrollando diferentes métodos, como puede ser la utilización de redes neuronales. Este método consiste en utilizar estructuras de aprendizaje automático para modelar de forma precisa las relaciones no lineales en un sistema, permitiendo aproximar dinámicas complejas a partir de datos experimentales. Un ejemplo de ello se puede consultar en [7]. Otro de los métodos es la utilización de algoritmos genéticos [8]. En concreto, el método empleado es una técnica de optimización basada en el comportamiento colectivo de enjambres, que busca soluciones óptimas iterativamente en problemas con múltiples variables y restricciones. Ambos métodos destacan por su capacidad para manejar no linealidades y comportamientos complejos, además de adaptarse a diferentes sistemas sin depender de modelos matemáticos detallados. Sin embargo, comparten inconvenientes como la necesidad de contar con grandes volúmenes de datos de calidad para garantizar su efectividad, así como ser intensivos en recursos computacionales.

Un paso más allá en modelado de motores de CC es lo relativo a los laboratorios virtuales y gemelos digitales. Actualmente, se está trabajando en estos ámbitos por la importancia que tienen en la industria y la enseñanza de la ingeniería, pues permiten a los estudiantes experimentar con dispositivos y sistemas complejos de manera segura y accesible desde cualquier lugar. En los últimos años, los gemelos digitales se han presentado como un paradigma innovador para mejorar el funcionamiento de sistemas ciberfísicos, software o procesos. El gemelo digital es una réplica virtual del sistema cuyo funcionamiento pretende optimizarse, ya sea mejorando su rendimiento, o permitiendo su mantenimiento preventivo y la detección de anomalías [9]. En cuanto al software utilizado para realizar los gemelos digitales destacan Unity y Simscape Multibody junto con

SolidWorks. Cabe resaltar el software Simscape Multibody, el cual presenta un sistema de bloques que ayuda a simular sistemas multicuerpo complejos. En los trabajos [10] y [11] se muestra la utilización de SolidWorks para el modelado físico de los elementos junto con Simscape, permitiendo visualizar el movimiento relativo de las diferentes partes del sistema en función de las señales de actuación.

Para la realización de este trabajo, se ha decidido obtener los parámetros característicos mediante pruebas experimentales, es decir, por medición física directa. Esto es debido a la gran cantidad de información existente respecto a otros métodos y su facilidad de implementación. Además, para complementar este enfoque, se utilizarán herramientas como MATLAB, Simulink y Simscape para simular el comportamiento del motor, así como SolidWorks para modelar y diseñar su estructura en 3D. Esta combinación permite integrar los resultados experimentales con simulaciones precisas y modelos tridimensionales, logrando un análisis más completo y detallado del motor.

1.4. OBJETIVO

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es llevar a cabo la caracterización detallada de un motor de corriente continua mediante la realización de una serie de experimentos y la utilización de herramientas de simulación avanzadas, como Matlab, Simulink y Simscape. Esto permitirá desarrollar un modelo lo más preciso posible que refleje su comportamiento en la realidad. Este modelo servirá como base para la creación de un laboratorio virtual que los alumnos de la universidad podrán utilizar como herramienta de aprendizaje y así facilitar la comprensión de los conceptos básicos del motor de CC.

Los objetivos que se han realizado en este proyecto son:

- Estudio de cada elemento que conforma el sistema.
- Obtención de los parámetros característicos del motor de CC.
- Modelo y simulación de cada elemento mediante el software Matlab, Simulink y Simscape.
- Realización de ensayos para la comparación entre el modelo virtual y real.
- Implementación del modelado 3D del sistema en Simscape Multibody.

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La estructura de la memoria de este Trabajo Fin de Grado está formada por 6 capítulos, los cuales se enumeran y se presenta un conciso resumen de ellos a continuación.

- **Capítulo 1. Introducción.** Se lleva a cabo una introducción de la motivación del proyecto, junto a los antecedentes, estado del arte, objetivos y estructura de este.

- **Capítulo 2. Fundamentos físicos y arquitectura del sistema basado en motor de CC.** Se presentan los fundamentos del motor de CC, estructura, comparativa con otros tipos de motores eléctricos y la arquitectura del sistema de gemelo digital.
- **Capítulo 3. Estudio teórico del motor de CC real.** Se ofrece una descripción específica de la maqueta y sus elementos para conocer el comportamiento y dinámica de estos.
- **Capítulo 4. Identificación de parámetros físicos y simulación.** Se presenta el método de modelado utilizado y la técnica de caracterización del motor, así como los diferentes parámetros del resto de elementos. Obteniendo, finalmente, el modelo del sistema al completo.
- **Capítulo 5. Entorno virtual de control y operación del sistema basado en gemelo digital.** Se desarrolla el entorno virtual de control que permite manejar la maqueta real y se explican los diferentes modos de operación del sistema.
- **Capítulo 6. Implantación y resultados experimentales.** Se muestran los procedimientos y resultados obtenidos, junto a comparaciones entre el modelo real y el simulado.
- **Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.** Se recogen las conclusiones a las que se han llegado una vez terminado el proyecto y se plantean posibles estudios futuros de mejora.
- **Anexos.** Se incluyen anexos en los que se encuentra nomenclatura utilizada, código Matlab y cálculo e iniciación de parámetros.

Cabe destacar que cada capítulo está compuesto por una serie de subapartados, tantos como se han considerado necesarios.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS FÍSICOS Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA BASADO EN MOTOR DE CC

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las características principales del sistema y sus componentes clave, destacando al motor de corriente continua (CC) como el elemento central. Se aborda su principio de funcionamiento, su estructura, el tipo específico de motor CC empleado en el sistema y una comparativa con otros tipos de motores. Además, se describen los elementos de sensado integrados en el sistema, responsables de medir la posición y la velocidad del eje motor. Por último, se presenta la arquitectura del gemelo digital desarrollada para replicar y analizar el comportamiento del sistema, junto con las distintas configuraciones posibles que permiten su implementación en diferentes escenarios.

2.2. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

En este apartado se describe el mecanismo de funcionamiento general del sistema bajo estudio (Figura 2), detallando cada uno de los componentes. El elemento principal de este sistema es un motor de CC de imanes permanentes. Para complementar su funcionamiento, el sistema cuenta con un conjunto de elementos de sensado. Entre ellos se incluye una tacodinamo para medir la velocidad del motor mediante la conversión de energía mecánica en una señal eléctrica proporcional. También se tienen dos *encoders*, uno de ellos absoluto y otro incremental, permitiendo obtener la posición y velocidad del eje motor. Por último, se incorpora un captador potenciométrico, utilizado para determinar la posición del eje motor mediante la variación en la resistencia de un potenciómetro.

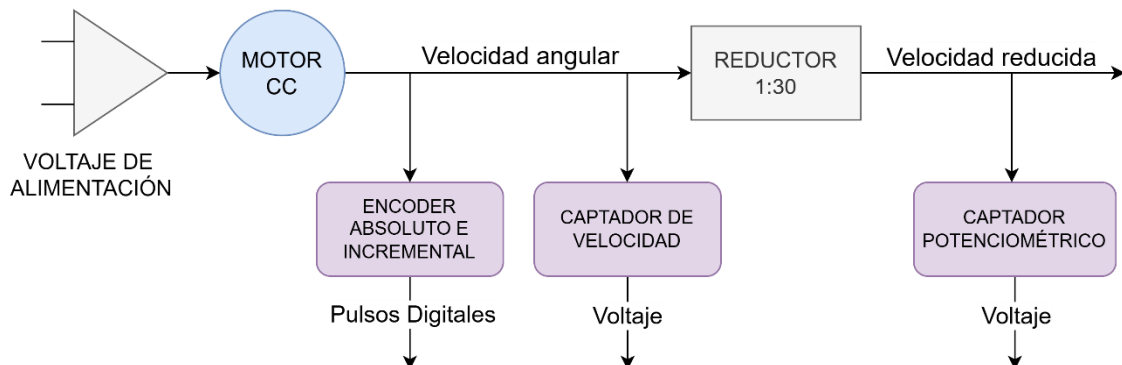


Figura 2: Diagrama funcional del sistema físico.

2.2.1. FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR DE CC

Un motor de CC es un dispositivo actuador de potencia que proporciona energía a una carga. Convierte energía eléctrica en forma de corriente continua en energía mecánica rotacional. Para poder producir un par motor se necesita disponer de un campo magnético que contenga en su interior conductores eléctricos. Cuando circula corriente por el conductor eléctrico, éste reacciona con el campo magnético produciendo una fuerza responsable de producir el par y por ende el movimiento del motor, tal y como se observa en la Figura 3.

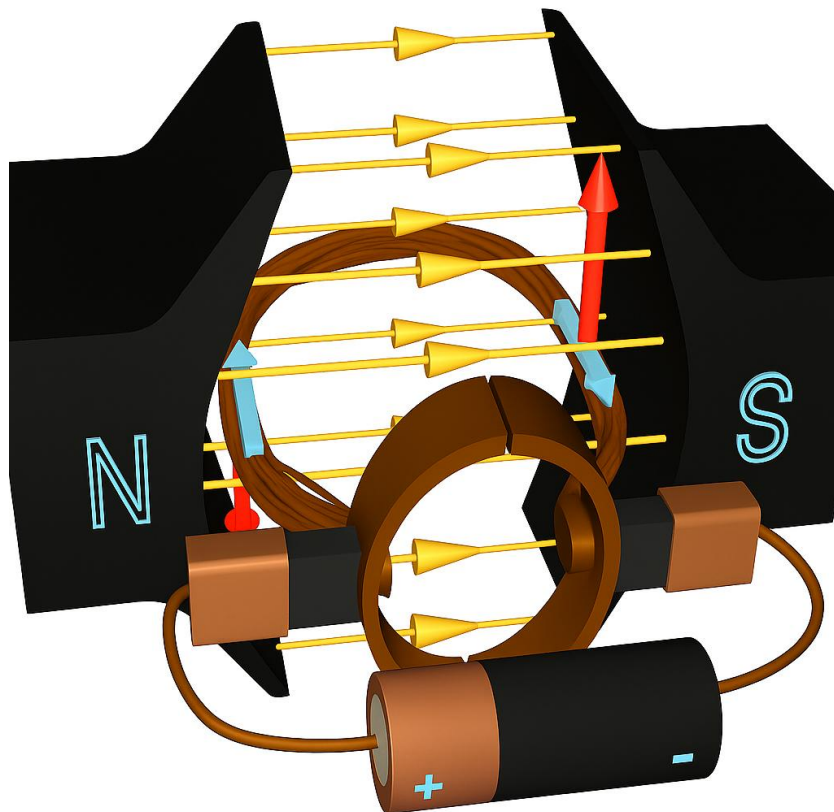


Figura 3: Principio de funcionamiento de un motor de CC. [12]

Para producir el campo magnético se utilizan polos magnéticos (Norte, Sur), que se crean mediante una bobina enrollada sobre un núcleo ferromagnético. Lo común es que los polos estén ubicados en el estator (bloque estático de la máquina), zona a la que se denomina campo. Los conductores necesarios para la producción del par están colocados en un núcleo ferromagnético móvil denominado rotor, para facilitar el giro al producirse la fuerza sobre ellos. A esta zona del motor se denomina armadura. Gran parte del par generado en el rotor (inducido) estará disponible para mover una carga externa.

La Figura 4 muestra un esquema donde en el estator se encuentra el devanado inductor y en el rotor, compuesto por un colector de delgas, el devanado inducido.

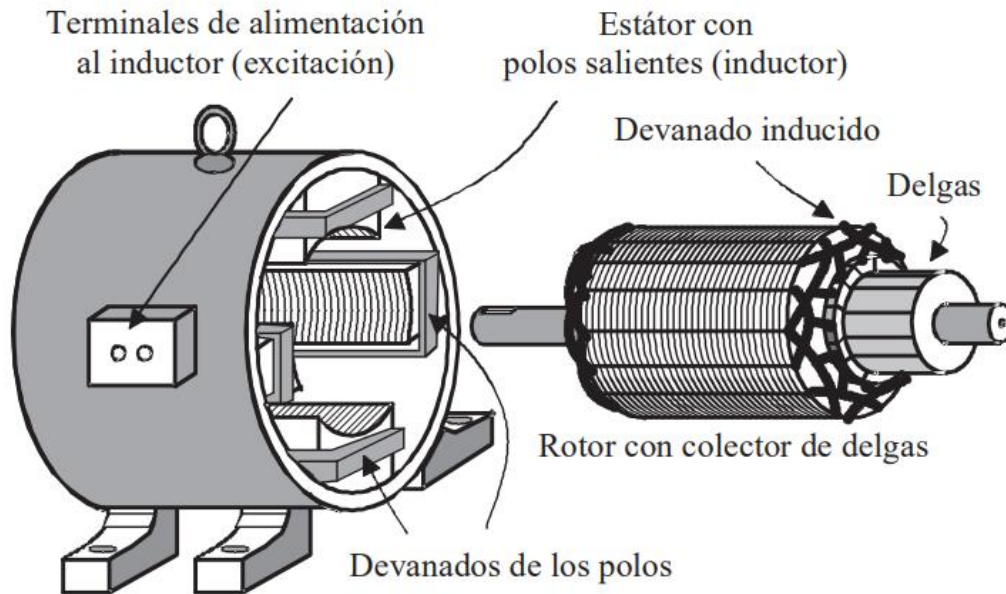


Figura 4: Partes de una máquina de corriente continua. [2]

Los motores de CC son accionados desde una fuente de potencia de CC. A menos que se especifique lo contrario, se supone que el voltaje de entrada de un motor de CC es constante, porque esto simplifica el análisis de los motores y la comparación entre diferentes tipos de ellos [13].

En cuanto a la estructura de un motor de CC, en base a la teoría de motores de CC [14], se diferencian tres grupos de elementos constructivos:

- Grupo de elementos que componen el estátor del motor de CC:
El estator es la parte fija del motor, está compuesto por la culata que le sirve de protección y soporte al motor. Sobre la culata, a través de huecos perforados en su periferia, se sitúan los núcleos polares. El devanado de excitación o inductor se coloca sobre los núcleos polares.
- Grupo de elementos que componen el rotor del motor de CC:
El rotor es la parte móvil del motor de CC, está formado por el inducido (construido con discos de chapa de acero al silicio ranurado para alojar los devanados) y el colector de delgas o conmutación. El devanado inducido, inicialmente tenía configuración de anillo (utilizado en dinamos) y en la actualidad su configuración es la configuración en tambor.
- Grupo de elementos que intervienen en la interconexión entre estátor y rotor:
El colector de delgas hace de contacto entre el devanado inductor y el inducido, junto con el entrehierro que es el espacio entre ambos devanados (donde existe un campo magnético) son los elementos que intervienen en la interconexión del estátor y rotor.

Un motor forma parte del grupo de máquinas eléctricas está constituido por diferentes elementos ya introducidos, se explican con detalle a continuación con ayuda de la Figura 5:

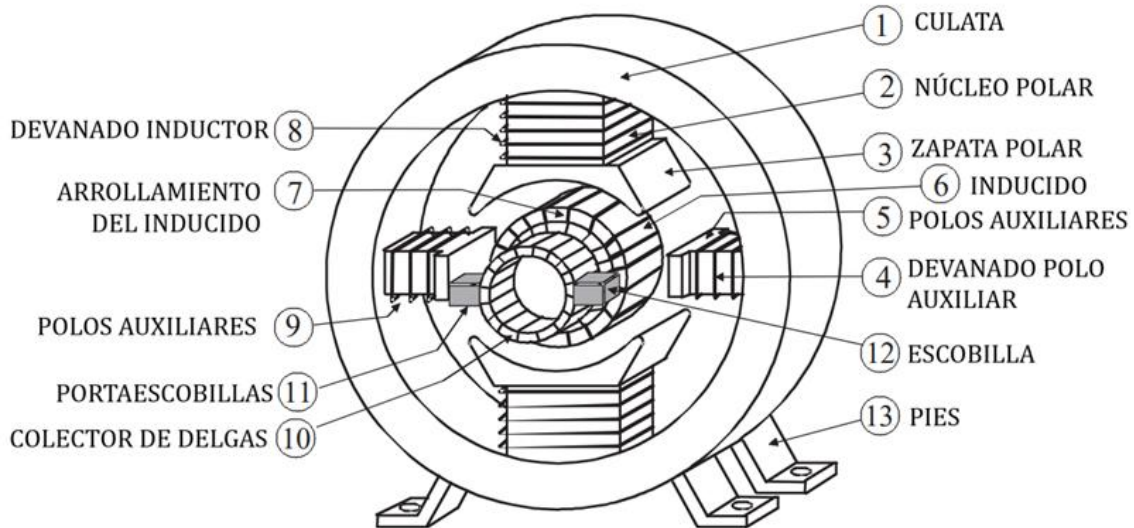


Figura 5: Esquema de la sección de un motor de CC. [14]

- Estator: es la parte fija del motor.
- Carcasas o culata: parte exterior de la máquina eléctrica, constituida por un cilindro y cubre el estator.
- Rotor: es la parte móvil del motor. Situado en la cavidad del estator.
- Devanado inductor: situado en el estator. Recibe la energía eléctrica suministrada e induce el campo magnético que se genera en el entrehierro.
- Devanado inducido: situado en el rotor, por acción de campo magnético se induce una *f.e.m* (fuerza electromotriz) que permite el giro.
- Colector de delgas: concéntrico al eje de giro y permite el contacto eléctrico entre la bobina del inducido y el inductor. Hace la función de rectificador.
- Polos auxiliares: sirven para mejorar la conmutación
- Escobillas: la extracción o suministro de corriente al colector se realiza por medio de estas.

En concreto, el motor que emplea el sistema es un motor de CC de imán permanente. En las máquinas de CC de imán permanente, el devanado de campo es reemplazado por un imán permanente que simplifica la construcción. La ventaja principal es que no requieren excitación externa y disipación de potencia asociada para crear campos magnéticos en la máquina. El espacio que precisan los imanes permanentes puede ser menor que el requerido para el devanado de campo, por lo que las máquinas de imán permanente pueden ser de menor tamaño, y en algunos casos más baratas que sus contrapartes externamente excitadas. Asimismo, las máquinas de CC de imán permanente están sujetas a limitaciones impuestas por los imanes mismos. Éstas incluyen el riesgo de

desmagnetización debido a las corrientes excesivas en los devanados del motor o debido al sobrecalentamiento del imán. Además, los imanes permanentes están un tanto limitados en la magnitud de la densidad de flujo a través del entrehierro que pueden producir [15]. Un ejemplo de la estructura de este tipo de motores se muestra en la Figura 6:

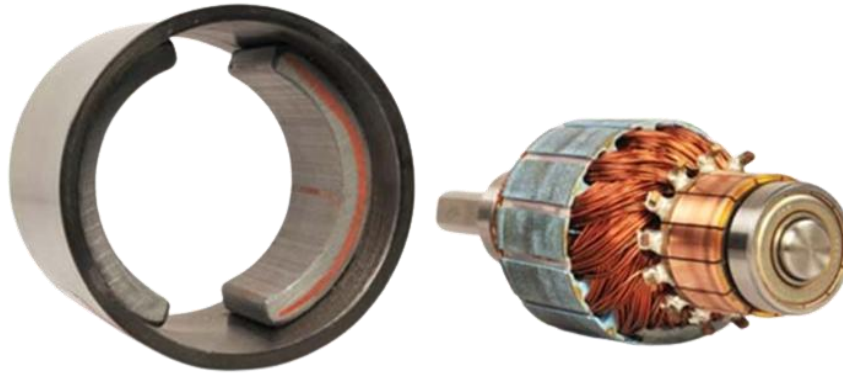


Figura 6: Componentes de un motor de CC de imanes permanentes. [16]

El motor de CC mantiene un rendimiento alto en un amplio margen de velocidades, lo que junto con su alta capacidad de sobrecarga lo hace más apropiado que el de corriente alterna para muchas aplicaciones. Los motores de CC empleados en juguetes suelen ser del tipo de imán permanente, proporcionan potencias desde algunos vatios a cientos de vatios. Los empleados en giradiscos, unidades lectoras de CD, y muchos discos de almacenamiento magnético son motores en los que el rotor es de imán fijo y sin escobillas. Otra ventaja es la facilidad de inversión de marcha de los motores grandes con cargas de gran inercia, al mismo tiempo que devuelven energía a la línea actuando como generador, lo que ocasiona el frenado y la reducción de velocidad [3].

2.2.2. ELEMENTOS DE SENSADO

En lo que respecta a los elementos de sensado integrados en el sistema, se dispone de un captador potenciométrico, empleado para medir la posición angular del rotor del motor de CC. Asimismo, se utiliza una tacodinamo, cuya función es proporcionar una señal proporcional a la velocidad de giro del eje del motor. Como sensores auxiliares, el sistema incorpora un encoder absoluto y otro incremental, lo que permite obtener medidas tanto de posición como de velocidad.

Estos dispositivos de sensado resultan fundamentales para la monitorización y análisis del comportamiento dinámico del motor. Su correcta integración en el sistema permite implementar estrategias de control más robustas y fiables.

El funcionamiento físico detallado de estos elementos de sensado, así como su interacción con el sistema, se desarrollará en profundidad en el Capítulo 3.

2.3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Para el diseño de la arquitectura utilizada en la implementación del gemelo digital del motor de CC (Figura 7), se ha tomado como referencia la propuesta presentada en [9], en la cual se define el concepto de Sistema de Gemelo Digital como un conjunto compuesto por el sistema físico, su réplica digital, los mecanismos de sincronización entre ambos y los servicios que permiten su explotación.

Por un lado, el gemelo físico es el sistema real del cual se replica y monitoriza el comportamiento. Está compuesto por el motor de CC y los sensores. Por otro lado, el gemelo digital es la réplica virtual del sistema físico, implementada en MATLAB/Simulink/Simscape para simular el comportamiento dinámico del motor CC y los diferentes componentes que conforman el sistema.

La arquitectura también contempla un Data Lake como núcleo de almacenamiento centralizado, donde se registran los datos generados durante las simulaciones o experimentos físicos. Además, un orquestador se encarga de coordinar la interacción entre los distintos componentes del sistema, permitiendo la escalabilidad y la integración de servicios como visualización 3D, control remoto, análisis de datos o comparación de resultados.

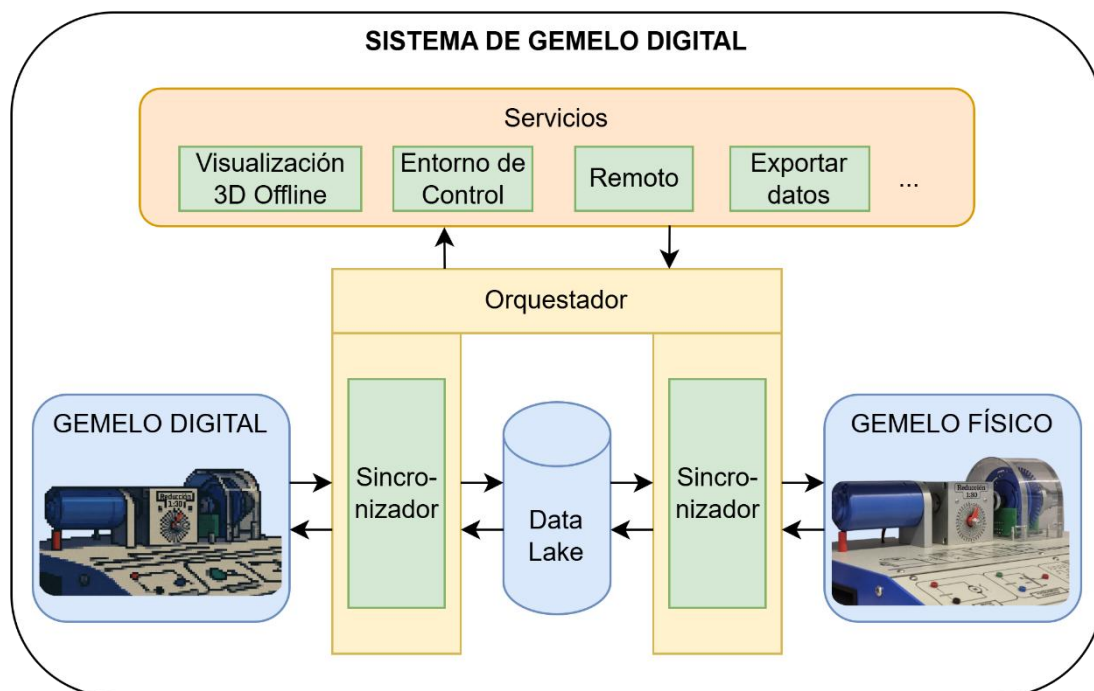


Figura 7: Arquitectura del sistema.

En el Capítulo 5 se aborda en detalle los distintos modos de operación del sistema, su implementación en el entorno desarrollado y las instrucciones necesarias para su correcta utilización.

CAPÍTULO 3: ESTUDIO TEÓRICO DEL MOTOR DE CC REAL

3.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es presentar y estudiar los diferentes elementos que constituyen el sistema para conocer su comportamiento y obtener una visión general del funcionamiento del mismo.

Los componentes que forman el sistema son:

- Motor de CC de imanes permanentes
- Captador potenciométrico con reductor
- Encoder absoluto e incremental
- Tacodinamo

La disposición de estos se puede visualizar en el esquema de la Figura 8.

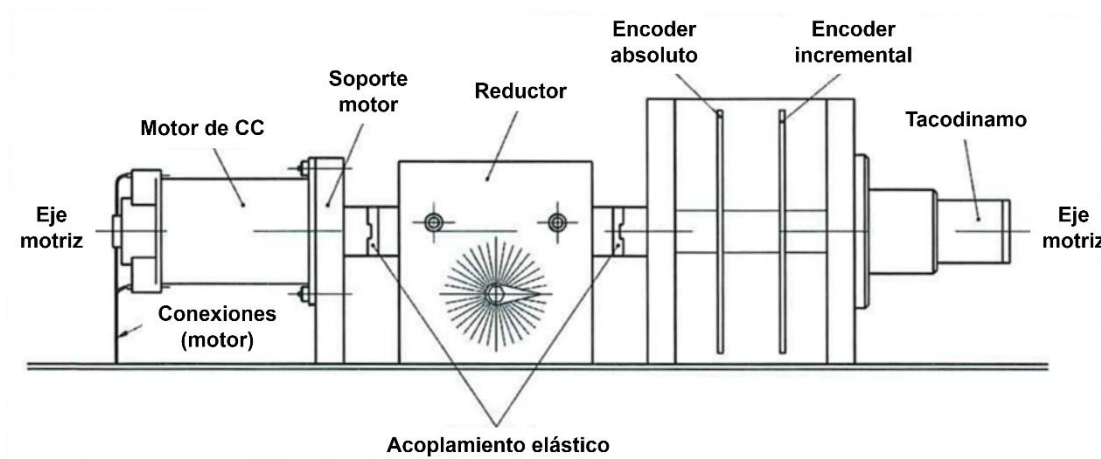


Figura 8: Ensamblaje de componentes físicos del motor y los sensores. [1]

Cada uno de estos elementos ha sido analizado para comprender su comportamiento individual, lo que ha conducido a la obtención de ecuaciones matemáticas que los representan, destacando además sus comportamientos dinámicos y no lineales. Este estudio no solo facilita la comprensión del funcionamiento de cada componente, sino que también posibilita la identificación precisa de los parámetros característicos de todos los elementos involucrados, con especial atención a aquellos correspondientes al motor de CC, los cuales resultan de vital importancia para modelar correctamente el funcionamiento del sistema.

3.2. EQUIPO ALECOPI MV-541

En este apartado se describe el sistema [1] que está disponible en el laboratorio del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, del cual se realizará el gemelo digital.

El sistema está compuesto por dos elementos, el primero de ellos es la maqueta MV-541, compuesta por el motor de CC y los diferentes captadores. El segundo elemento es el mueble bastidor de sobremesa, donde van alojados los módulos específicos para controlar la maqueta MV-541, tal y como se observa en la Figura 9.

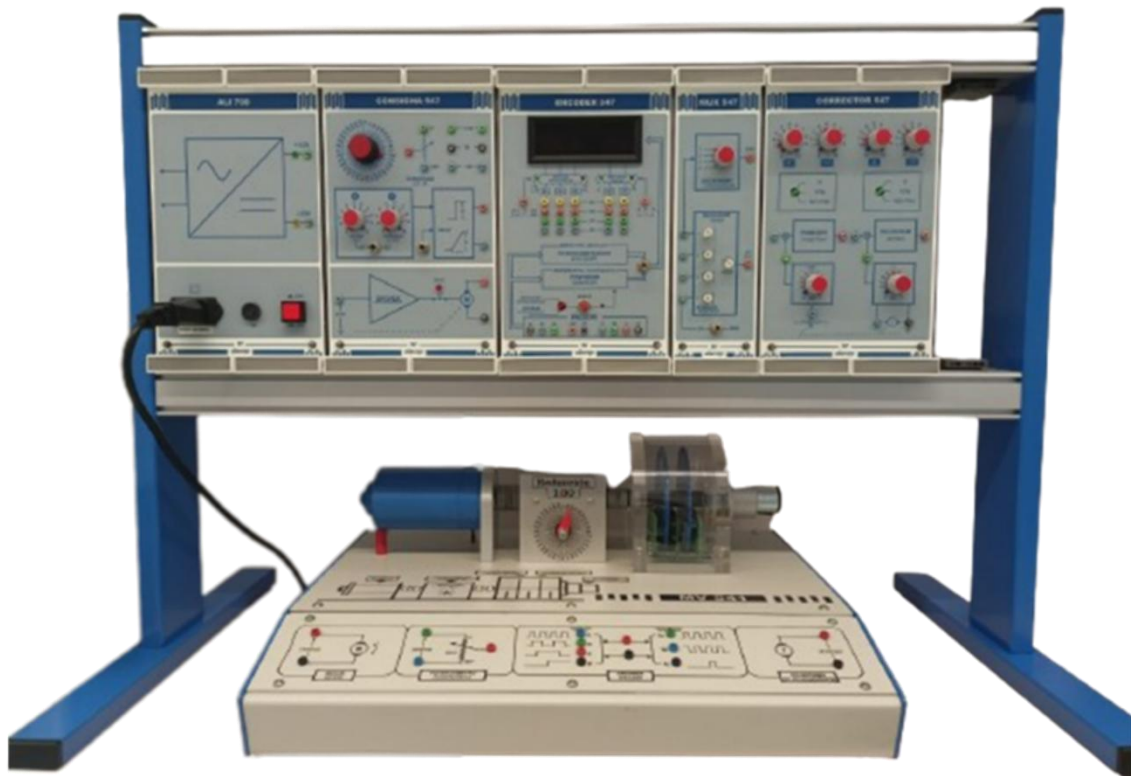


Figura 9: Equipo Alecop ubicada en el laboratorio.

En el panel frontal de la maqueta se sitúan las bornas de conexión entre los distintos captadores y motor con los módulos de control situados en el mueble bastidor de sobremesa. Estos módulos de control se describen posteriormente en el Capítulo 5:

La maqueta MV-541 (Figura 10) ha sido diseñada para la realización de un estudio real y práctico de captadores de magnitudes físicas como desplazamiento y velocidad angular. Además de un estudio de los captadores, esta maqueta permite realizar una introducción a los servosistemas de posición y velocidad.

En el eje asociado al motor, se dispone de un tacodinamo para la captación de velocidad, un encoder absoluto y uno incremental para la captación de desplazamiento angular, recubiertos con una carcasa transparente y una reductora de velocidad con

indicación del ángulo de giro en su eje reducido al que acompaña un captador potenciométrico de posición angular.

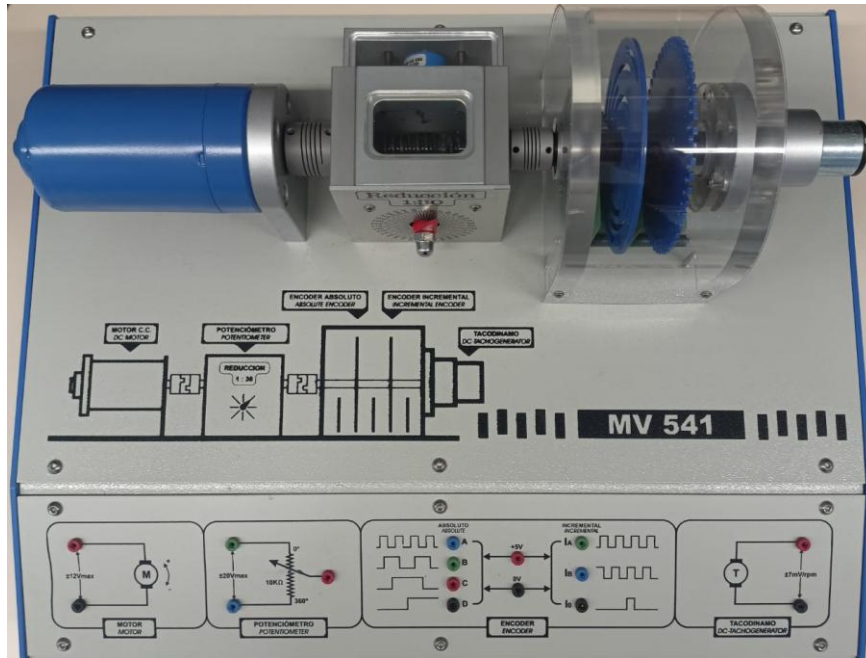


Figura 10: Maqueta MV-541.

3.3. ESTUDIO DEL MOTOR DE CC

Como elemento accionador de los ejes de los diferentes captadores instalados en la maqueta se ha colocado un motor de CC de imanes permanentes. En la Figura 11 se muestra el motor de CC real que se emplea en la maqueta.

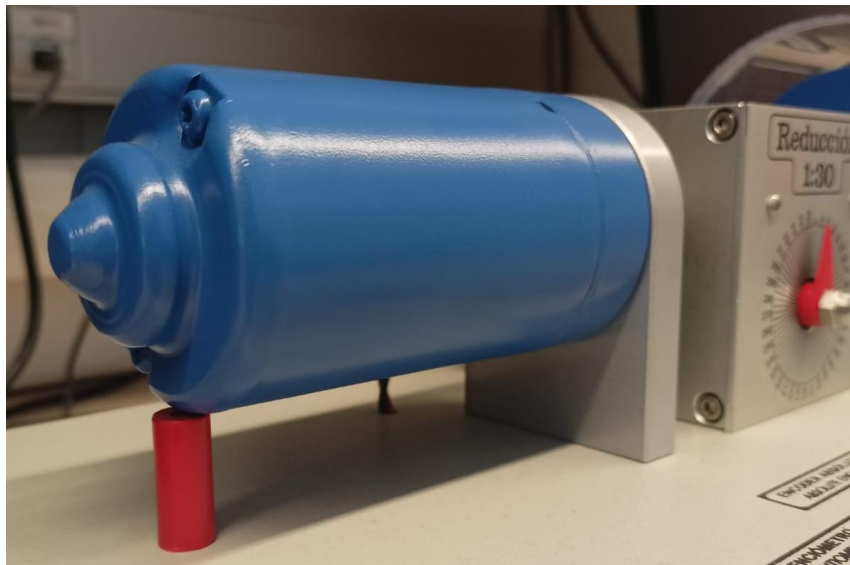


Figura 11: Motor de CC de la maqueta.

Las características principales de este motor expuestas en el manual Alecop [1] son las mostradas en la Tabla 1:

CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR CC	
Tensión de alimentación máxima	±12 V
Consumo de corriente (nominal)	0,6 A
Velocidad nominal	1200 rpm

Tabla 1: Características del motor CC.

Las conexiones eléctricas del motor están disponibles directamente en el panel frontal de la maqueta para su utilización.

En los siguientes apartados se explican los fundamentos teóricos del motor de CC. Estos son necesarios para comprender cuáles son los parámetros característicos del motor.

3.3.1. CONSTANTE DE PAR Y CONSTANTE DE FUERZA ELECTROMOTRIZ

Cuando un conductor por el que atraviesa una corriente I está situado en un campo magnético de densidad de flujo uniforme B , este experimentará una fuerza resultante F , tal y como se muestra en la Figura 12:

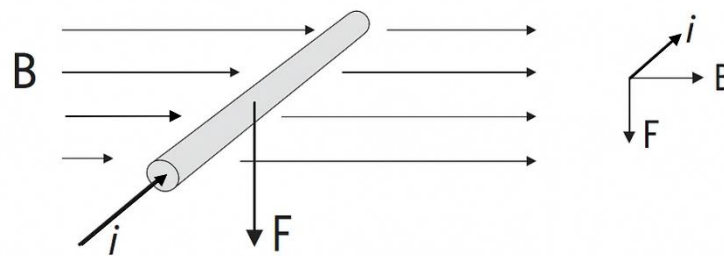


Figura 12: Producción de torque. [17]

Según la ley de Ampere, esta fuerza F resultante, tendrá una dirección ortogonal tanto a la corriente como al flujo. El valor de esta fuerza viene determinado por:

$$F = Bli \quad (1)$$

Donde i es la corriente que fluye a través del cable y l es la longitud del cable dentro del campo magnético. En el caso del motor utilizado en este trabajo, los imanes permanentes son los encargados de producir el campo magnético B .

Un motor está compuesto por numerosas espiras alrededor de un eje de giro en lugar de un solo conductor. Al hacer fluir corriente a través de la espira, se crearán fuerzas opuestas en cada lado de la espira y comenzará a rotar alrededor del eje de giro,

produciendo así un torque. Si el motor posee N espiras, entonces la expresión por la que se obtiene el valor de torque es:

$$T_m = 2NB\ell r i \quad (2)$$

Siendo r la distancia entre el eje de giro y la espira. Dado que N , B , ℓ y r son constantes particulares según el tipo de motor, se pueden agrupar en una única constante K_t de manera que:

$$T_m = K_t i \quad (3)$$

Por otro lado, según la ley de Faraday, una bobina de longitud ℓ rotando en un campo magnético uniforme de densidad de flujo B generará una fuerza electromotriz:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

Donde ϕ es el flujo magnético a través de la bobina y viene determinado por:

$$\phi = \int B \cdot dS = B \cdot S \cdot \cos \theta_m \quad (5)$$

Donde S es la superficie que forma la bobina y θ_m es el ángulo entre el vector B y el vector normal a la superficie, que varía con el tiempo debido a la rotación de la bobina. Si la bobina tiene una longitud del conductor ℓ y un radio del rotor r , la superficie S puede aproximarse a $S = \ell \cdot 2r$, quedando:

$$\phi = B\ell 2r \cos \theta_m \quad (6)$$

Si la bobina está rotando a una velocidad angular constante w_m , entonces su ángulo en cualquier instante de tiempo es $w_m t$. Sustituyendo en (4), se obtiene:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = 2NB\ell r w_m \sin w_m t \quad (7)$$

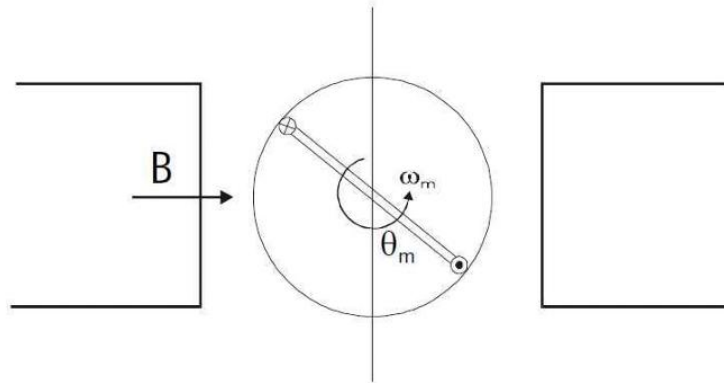


Figura 13: Sección transversal del motor CC.

Cuando la bobina está en la posición donde $\theta_m = 90^\circ$, el término $\sin w_m t$ alcanza su valor máximo de 1, ya que $\theta_m = w_m t = 90^\circ$ y $\sin w_m t = \sin 90^\circ = 1$. En este caso, la fuerza electromotriz inducida es máxima. Simplificando la expresión anterior se obtiene:

$$e = 2NBlrw_m = K_t w_m \quad (8)$$

Cabe destacar que la misma constante K_t aparece en (3) y (4). La primera constante deducida mediante la ley de Ampere corresponde a la constante de par motor, mientras que la deducida mediante la ley de Faraday corresponde a la constante de fuerza electromotriz. Si e , w_m , i y T_m están expresados en el mismo sistema de unidades, se cumple que ambas constantes son iguales. Una demostración de ello se muestra en (9), si k_i se expresa en $\left[\frac{N \cdot m}{A}\right]$ y k_b en $\left[\frac{V}{rad/s}\right]$ (unidades del S.I.), entonces:

$$\frac{[N][m]}{[A]} = \frac{[J]}{[A]} = \frac{[W][s]}{[A]} = \frac{[V][A][s]}{[A]} = [V][s] \quad (9)$$

En la expresión final no aparecen los radianes ya que se trata de una unidad adimensional. Por tanto, se llega a la conclusión de que:

$$k_i = k_b = k \quad (10)$$

Una vez demostradas las ecuaciones correspondientes a la producción de torque y fuerza electromotriz, se procede a unificar la nomenclatura para la continuación del desarrollo del apartado. En el anexo A.1. Nomenclatura Motor de CC, se muestra dicha nomenclatura.

Como resumen de este apartado, el par producido por el motor es proporcional al flujo magnético ϕ y a la corriente de la armadura ($i_a(t)$). La constante que recoge esto se denomina constante de par (k_i), donde el par producido por el motor se puede expresar como:

$$T_m(t) = k_i \cdot i_a(t) \quad (11)$$

También, la fuerza electromotriz en un motor de CC es proporcional a la velocidad de rotación del rotor (n) y al flujo magnético en el entrehierro (ϕ). También varía en función de una serie de parámetros constructivos de la máquina. La fuerza contraelectromotriz se puede expresar como:

$$e_b(t) = k_b \cdot \omega_m(t) \quad (12)$$

3.3.2. MODELADO MATEMÁTICO

El modelado matemático de un motor de CC de imanes permanentes se deriva del modelo general de máquinas de corriente continua, eliminando las ecuaciones diferenciales asociadas al devanado de excitación [5]. A continuación, se presenta el esquema equivalente de este motor (Figura 14), que ilustra tanto el circuito eléctrico del devanado de armadura como las interacciones mecánicas del sistema:

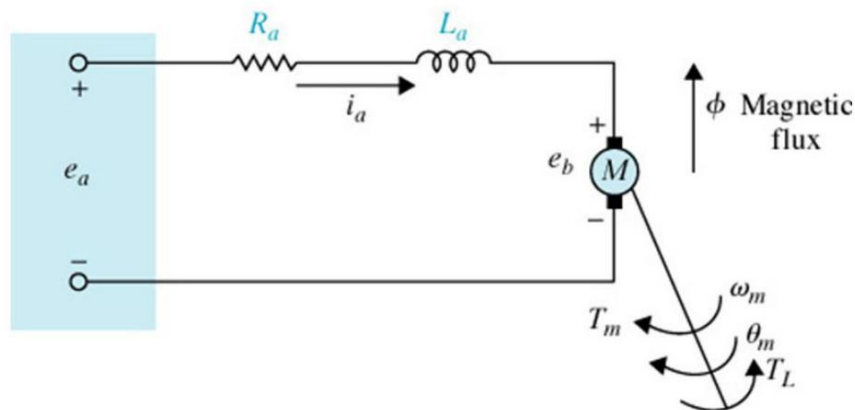


Figura 14: Modelo motor de CC. [18]

A continuación, se presentan las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento eléctrico y mecánico del motor. Se comienza planteando la ecuación del circuito eléctrico por la ley de voltaje de Kirchhoff:

$$e_a(t) = L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + R_a \cdot i_a(t) + e_b(t) \quad (13)$$

a la que le sigue la ecuación de la fuerza electromotriz:

$$e_b(t) = k_b \cdot \frac{d\theta_m(t)}{dt} = k_b \cdot w_m(t) \quad (14)$$

Por último, se aplica la segunda ley de movimiento de Newton para establecer el equilibrio de pares:

$$J_m \cdot \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B_m \cdot \frac{d\theta_m(t)}{dt} = T_m(t) - T_L(t) \quad (15)$$

Aplicando la transformada de Laplace y sustituyendo de (13) a la (15) junto con (11), se obtiene la expresión del desplazamiento del eje motor:

$$\Theta_m(s) = \frac{k_i \cdot E_a(s) - (R_a + L_a s) \cdot T_L(s)}{s[(R_a + L_a s)(J_m s + B_m) + k_i \cdot k_b]} \quad (16)$$

Se expande el denominador y se reordena por potencia de s , obteniendo:

$$\Theta_m(s) = \frac{k_i \cdot E_a(s) - (R_a + L_a s) \cdot T_L(s)}{s[L_a \cdot J_m s^2 + (R_a \cdot J_m + L_a \cdot B_m)s + (R_a \cdot B_m + k_i \cdot k_b)]} \quad (17)$$

El término $k_i \cdot E_a(s)$ muestra como el voltaje aplicado genera un desplazamiento angular, mientras que el término $-(R_a + L_a s) \cdot T_L(s)$ representa el efecto perturbador del par de carga. En la Figura 15 se puede ver el diagrama de bloques correspondiente a la ecuación (17), donde la señal de salida es la posición del eje del motor.

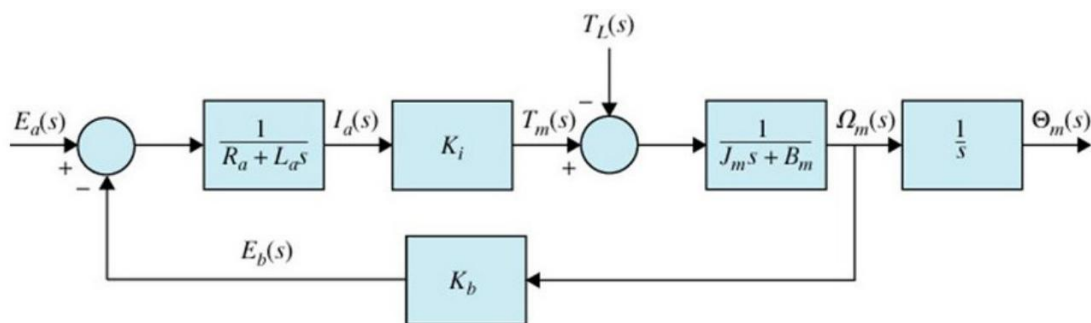


Figura 15: Diagrama de bloques con la posición como salida. [18]

La “realimentación negativa” es debida a la fuerza contraelectromotriz, que es proporcional (en valor negativo) a la velocidad del motor. Por lo tanto, provoca que la propia salida del sistema (en este caso la velocidad) afecte a la entrada del mismo.

Si se supone que el rozamiento es despreciable ($T_L(t) = 0$), de manera que se puede eliminar de (15), se obtiene (18), donde se muestra la función de transferencia que relaciona la **posición** del motor con la tensión de entrada. Para trabajar con la función de transferencia entre la **velocidad** del motor y la tensión de entrada del mismo, hace falta derivar la expresión (18).

$$\frac{\Theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k_i}{s[L_a \cdot J_m s^2 + (R_a \cdot J_m + L_a \cdot B_m)s + (R_a \cdot B_m + k_i \cdot k_b)]} \quad (18)$$

En el *Dominio s*, para derivar una expresión hace falta aplicar la *Propiedad de Derivación*:

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = s\mathcal{L}\{f(t)\} - f(0) \quad (19)$$

Aplicando (19) a la función de transferencia de (18), queda la función de transferencia entre la velocidad del motor y la tensión de entrada:

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k_i}{L_a \cdot J_m s^2 + (R_a \cdot J_m + B_m \cdot L_a)s + (k_b \cdot k_i + R_a \cdot B_m)} \quad (20)$$

Factorizando el denominador de (20), se obtiene (21). Además, se muestra el diagrama de bloques correspondiente en la Figura 16:

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k_i}{(R_a + L_a s)(J_m s + B_m) + k_b \cdot k_i} \quad (21)$$

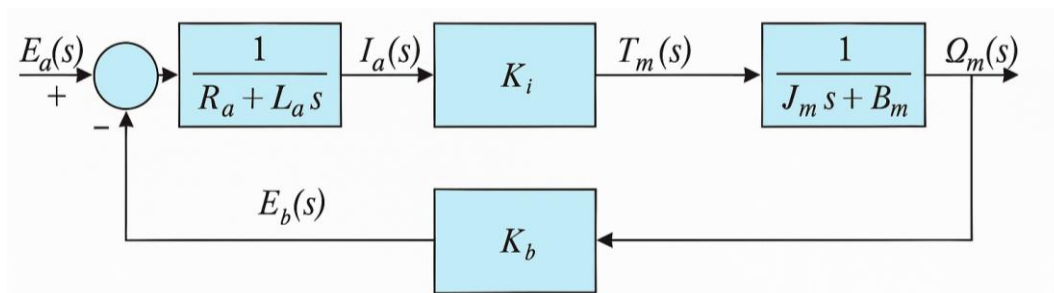


Figura 16: Diagrama de bloques con la velocidad como salida. [18]

3.3.3. COMPORTAMIENTO DINÁMICO Y LAS CONSTANTES DE TIEMPO

Durante el funcionamiento de un motor de CC se puede producir un cambio brusco en dos de las magnitudes de entrada del mismo: un cambio repentino en la tensión de entrada y en el par de carga.

Estas variaciones provocarán un cambio en el régimen de funcionamiento del motor, haciendo que éste entre en una zona de comportamiento dinámico, es decir, en régimen no estable (Figura 17) antes de estabilizarse de nuevo. Este comportamiento dinámico se puede definir con dos constantes de tiempo: eléctrica (τ_a) y electromecánica (τ).

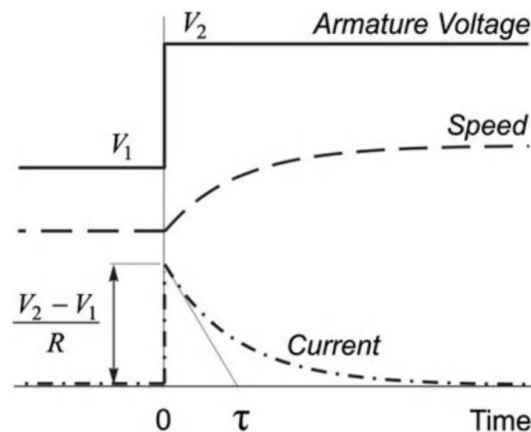


Figura 17: Respuesta de un motor de CC ante un cambio en la tensión de entrada. [19]

La primera de ellas se trata de la constante de tiempo eléctrica (τ_a), la cual define cómo cambia la intensidad en el motor ante un cambio en la tensión de entrada. Para un tiempo $t = 0$, se considera w_m constante o igual a 0 si se parte del reposo. Esto es válido cuando la inercia mecánica es grande en comparación con la eléctrica, de modo que la velocidad no varía instantáneamente. Por tanto, de la ecuación (13) se obtiene una ecuación diferencial de un circuito RL con fuente de tensión continua:

$$e_a(t) = L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + R_a \cdot i_a(t) \quad (22)$$

Donde la constante de tiempo es:

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (23)$$

Esta constante de tiempo eléctrica describe lo rápido que la corriente de armadura llega a su nuevo valor de régimen tras un escalón de tensión (o una perturbación eléctrica). Dado que el término L_a suele ser pequeño, el tiempo τ_a también suele ser muy corto.

La segunda es la constante de tiempo electromecánica (τ). Esta constante define cómo se va a estabilizar la velocidad ante un cambio en la tensión de entrada E_a o del par de carga T_L . El primer paso para obtener la expresión de esta constante es expresar i_a en función de w_m . Para ello, se asume que L_a es pequeña o que la corriente se adapta muy rápido, por lo que, en régimen cuasi-estacionario desde el punto de vista eléctrico se tiene:

$$i_a(t) \approx \frac{e_a(t) - k_b \cdot w_m(t)}{R_a} \quad (24)$$

Sustituyendo (24) en (15) junto con (11) e incluyendo el término $B_m \cdot w_m$ en el par de carga T_L , se tiene:

$$J_m \cdot \frac{dw_m(t)}{dt} = k_i \cdot \left(\frac{e_a(t) - k_b \cdot w_m(t)}{R_a} \right) - T_L(t) \quad (25)$$

Reordenando y agrupando términos:

$$J_m \cdot \frac{dw_m(t)}{dt} + \frac{k_i \cdot k_b}{R_a} \cdot w_m(t) = \frac{k_i}{R_a} \cdot e_a(t) - T_L(t) \quad (26)$$

Esta ecuación diferencial de primer orden es muy similar a:

$$\frac{dw_m(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot w_m(t) = cte \quad (27)$$

Por comparación, se obtiene que la constante de tiempo electromecánica es:

$$\tau = \frac{R_a \cdot J_m}{k_i \cdot k_b} \quad (28)$$

3.3.4. EFECTOS NO LINEALES DEL MOTOR DE CC

En función de los elementos físicos que intervienen (configuración del motor, electrónica de potencia, elementos mecánicos, rozamientos, etc.), pueden aparecer no linealidades en el funcionamiento real de un motor de CC.

En un motor ideal, la velocidad de giro respondería de forma proporcional a la tensión de alimentación, incluso para valores de tensión muy pequeños. Sin embargo, en un motor real existe fricción estática entre las partes mecánicas del motor (rodamientos, engranajes, escobillas, etc.), provocando que el eje no comience a girar hasta que la fuerza electromagnética supera ese par de rozamiento estático. Esto provoca que, para tensiones de entrada por debajo de cierto umbral (positivo o negativo), el par no sea suficiente para iniciar el movimiento. Este fenómeno se conoce como la “zona muerta”, una vez superada, el eje empieza a girar. El mencionado par de rozamiento se puede incluir en el término de par de carga T_L , que se puede visualizar en la Figura 15.

Por otro lado, el fenómeno de saturación puede tener distintos orígenes, pero en términos generales se refiere a que, a partir de cierto nivel, el sistema (el motor o la etapa de potencia que lo alimenta) no puede aumentar más la magnitud de salida (par, corriente, flujo magnético, etc.) aunque se incremente la señal de entrada. Para el caso de la etapa de potencia, si el amplificador llega a su límite, no podrá aumentar más la tensión o la corriente de salida, aunque la referencia de control lo pida. Por otra parte, tiene lugar la saturación magnética en el motor, la cual se produce cuando alguna parte del circuito magnético entra en una región en la que el flujo no puede aumentar de forma proporcional al incremento de la corriente de armadura. Aunque en estos motores el campo principal permanece relativamente fijo por la acción de los imanes permanentes, una sobrecorriente prolongada o condiciones extremas de carga pueden incrementar significativamente el flujo inducido en el rotor hasta un punto en el que el hierro se sature.

En la Figura 18 se representa la zona muerta de un motor para valores de entrada positivos y el fenómeno de saturación anteriormente descrito.

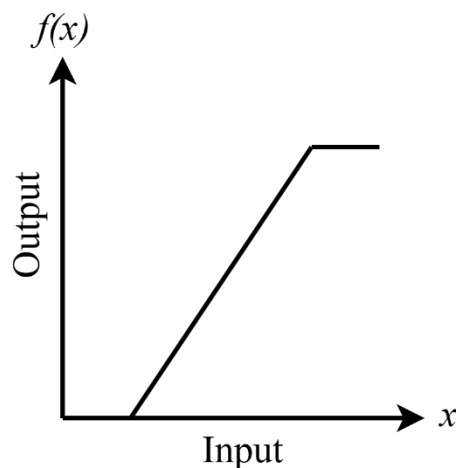


Figura 18: Representación de la zona muerta de un motor. [20]

3.4. ESTUDIO DEL CAPTADOR POTENCIOMÉTRICO Y LA REDUCTORA

El captador potenciométrico utilizado en la maqueta tiene como finalidad medir la posición angular del eje del motor. En la Figura 19 se muestra la localización de este captador en la maqueta. Como se puede observar, el eje del potenciómetro está

firmemente sujeto a la salida de la reductora, mientras que el eje del motor está conectado a su entrada.

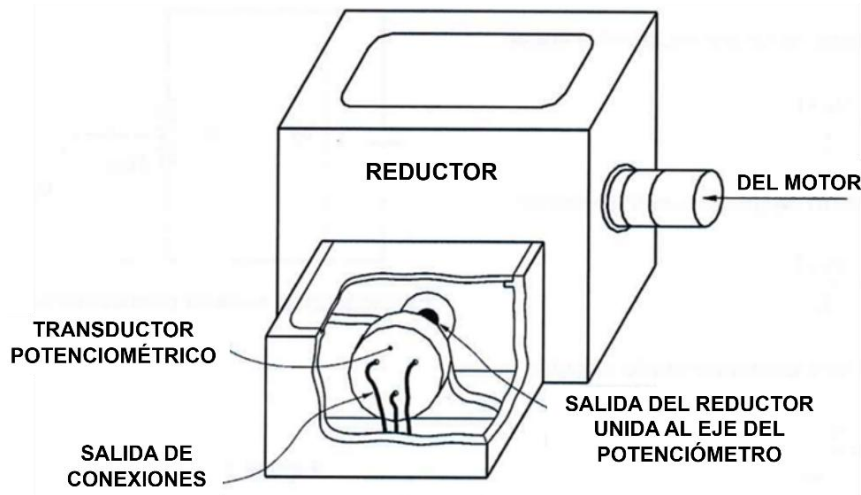


Figura 19: Captador potenciométrico (esquema). [1]

En la Figura 20, se muestra la cara frontal de este bloque, donde se observa una flecha indicadora de color rojo que indica la posición angular del potenciómetro.



Figura 20: Captador potenciométrico de la maqueta

Las conexiones del potenciómetro se extraen al panel frontal de la maqueta para su utilización.

En la Tabla 2 se muestran las características principales del potenciómetro:

CARACTERÍSTICAS DEL POTENCIÓMETRO	
Resistencia frontal	10 kΩ ± 20%
Máxima potencia	1 vatio
Linealidad	± 2% Valor nominal
Rotación útil	340° ± 4°
Rotación mecánica	360° continuos

Tabla 2: Características del potenciómetro.

La reductora es un elemento mecánico que permite obtener en su eje de salida una fracción del giro experimentado en su eje de entrada. Esto se consigue aplicando una transmisión por tornillo sinfín y corona, la cual se basa en el acoplamiento de un eje helicoidal, denominado tornillo sinfín, con una rueda dentada, la corona. Este diseño mecánico permite obtener grandes reducciones de velocidad en el eje de salida. En concreto, esta reductora tiene una relación de transmisión 1:30, lo cual significa que, por cada vuelta del tornillo sinfín, la corona gira 1/30 de vuelta, de modo que:

$$w_{salida} = \frac{1}{30} w_{entrada} \quad (29)$$

A continuación, se muestra el estudio y fundamento teórico del potenciómetro empleado de tipo angular y de giro continuo (Figura 21). La resistencia entre el cursor C y alguno de los extremos A o B, depende de la posición de la escobilla sobre la resistencia fija, del valor nominal de esta y de la distribución respecto al desplazamiento.

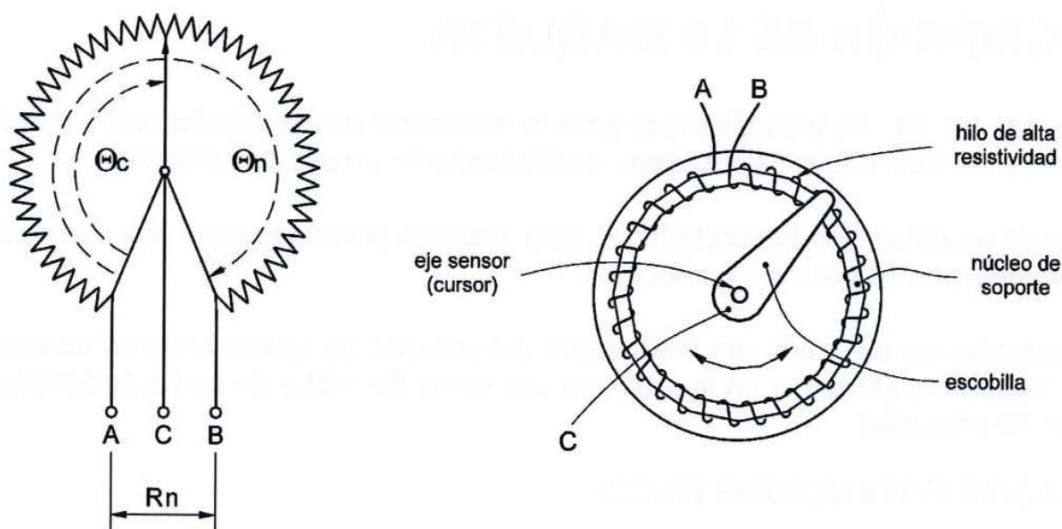


Figura 21: Potenciómetro desplazamiento angular.[1]

La ecuación que gobierna el valor de resistencia según la posición del cursor es la siguiente:

$$R_c(\theta) = \frac{\theta}{\theta_n} \cdot R_n \quad (30)$$

Al tratarse de un transductor pasivo, se debe aportar una energía eléctrica de excitación para obtener una señal eléctrica proporcional al desplazamiento, en este caso, el ángulo. La forma más usual de realizar esto es la mostrada en la Figura 22:

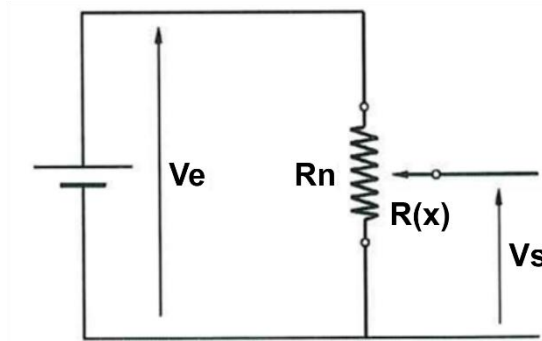


Figura 22: Excitación de un captador potenciométrico. [1]

Por tanto, al tratarse de un divisor de tensión, la ecuación que gobierna su comportamiento es la siguiente:

$$V_s = \frac{V_e \cdot \theta}{\theta_n} \quad (31)$$

En cuanto a las no linealidades que presentan tanto el potenciómetro como la reductora, en el potenciómetro de giro continuo surge una zona muerta debida a la geometría de sus terminales, de modo que la rotación útil se limita a 340°. Según [1], cuando la flecha indicadora de la cara frontal de la reductora está en 0°, la resistencia entre la hembrilla roja (cursor) y la hembrilla azul (extremo de la resistencia fija) es aproximadamente 0 ohmios, mientras que al situarse en 340° dicha resistencia llega a 10 kΩ.

Por otro lado, la reductora presenta rozamientos en cojinetes y dientes de contacto, lo que puede impedir el giro a bajas velocidades o en el arranque hasta sobrepasar un cierto umbral de par. Además, puede presentar un pequeño juego entre el tornillo y la corona que genera inversiones de sentido con pequeños golpes o retrasos en la transmisión del movimiento

3.5. ESTUDIO DEL ENCODER INCREMENTAL

Un encoder incremental es un dispositivo electromecánico que se utiliza para medir la posición, la velocidad o el desplazamiento angular de un eje, en este caso del eje motor. El encoder incremental utilizado en la maqueta se muestra en la Figura 23.

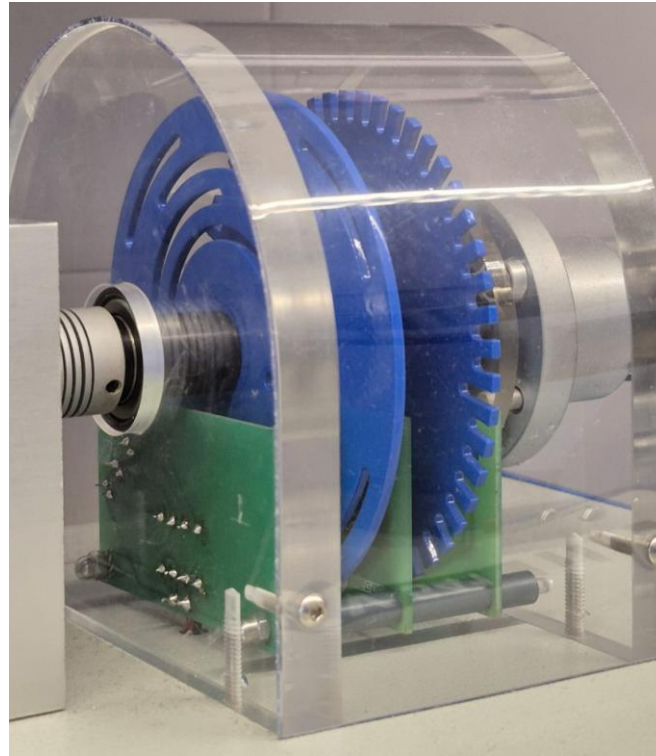


Figura 23: Encoder incremental y absoluto de la maqueta.

Los elementos que lo componen son tres pares de fototransistores y fotodiodos y un disco que está fraccionado en 100 segmentos, 50 opacos y 50 transparentes. Además, se puede observar un encoder absoluto, el cual no es objeto de estudio en este trabajo, por lo que no se comentará en este apartado.

En el panel frontal de la maqueta se encuentran las salidas del encoder (I_A , I_B , I_0), mostrándose en la carátula la relación entre ellas, tal y como se muestra en Figura 24:

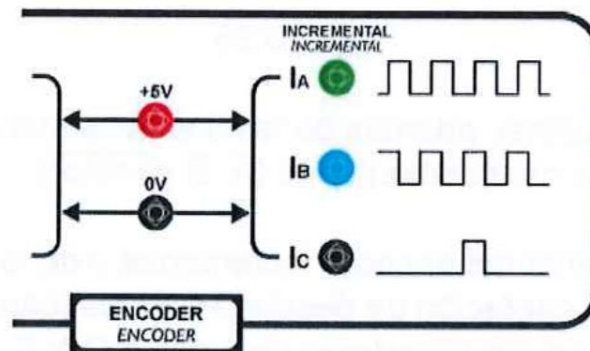


Figura 24: Conexión de encoder incremental. [1]

Para realizar el estudio del encoder incremental, se muestra de ejemplo el de la Figura 25, el cual cuenta con tres parejas de fotodiodo-fototransistor y 16 segmentos, 8 opacos y 8 transparentes.

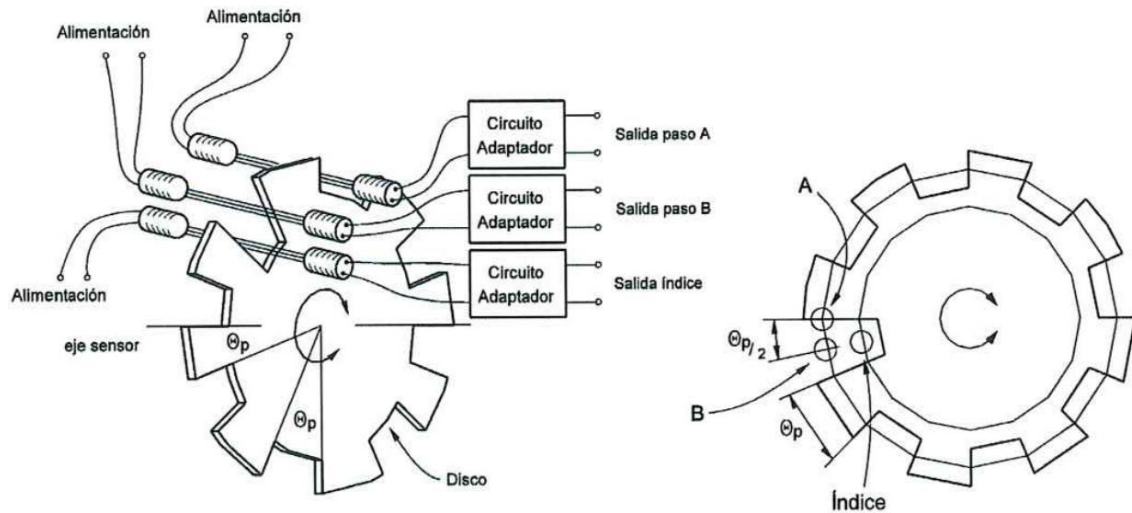


Figura 25: Encoder incremental con detección de sentido de giro. [1]

La función de la primera pareja de fotodiodo-fototransistor es medir la velocidad de giro y el ángulo girado por el disco. Los segmentos opacos interrumpen el haz de luz emitido por el fotodiodo dirigido al fototransistor, obteniéndose una señal de 0 voltios a la salida. Por el contrario, cuando un segmento transparente se sitúa entre el emisor y el sensor de luz se obtiene una señal de 5 voltios a la salida. Al girar el disco, la salida alternará entre los dos valores a una frecuencia proporcional a la velocidad de giro (Figura 26).

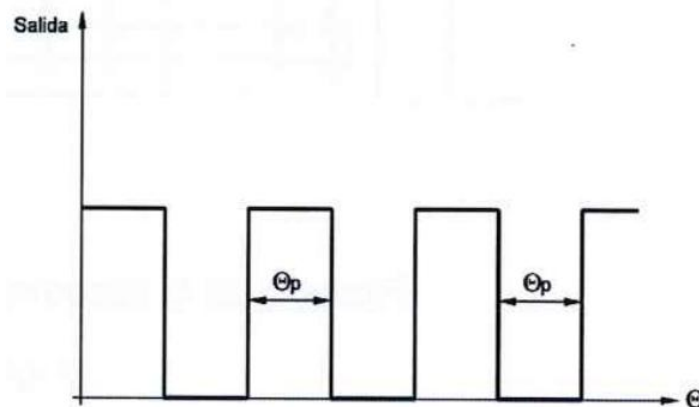


Figura 26: Señal de salida del encoder incremental. [1]

Para determinar el ángulo rotado por el disco, es necesario contar la cantidad de impulsos generados a la salida. Para determinar cuántos grados se giran por cada impulso, se debe calcular el valor de la resolución mediante la siguiente ecuación:

$$Resolución = \frac{360^\circ}{Número\ de\ impulsos} \quad (32)$$

La siguiente pareja de fotodiodo-fototransistor tiene la función de determinar la posición inicial del disco, obteniendo así un impulso por cada vuelta realizada (Figura 27). Esto se consigue modificando la geometría del disco de tal manera que la señal de salida sea activa en uno de los segmentos del disco.

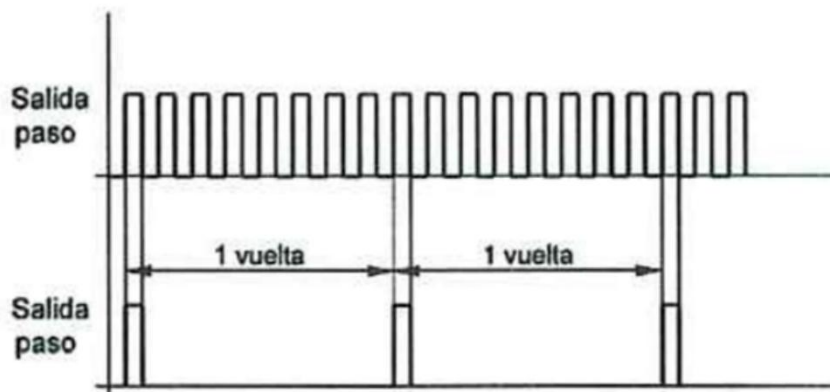


Figura 27: Salida índice del encoder incremental. [1]

Por último, para determinar el sentido de giro, se incorpora la tercera pareja de fotodiodo-fototransistor. Esta pareja está situada $\frac{\theta_p}{2}$ respecto a la pareja fotodiodo-fototransistor de paso. Esto ocasionará que la señal de salida suministrada por la nueva pareja esté adelantada o retrasada 90° respecto a la señal de la primera pareja, dependiendo del sentido de giro. Este comportamiento se puede observar en la Figura 28:

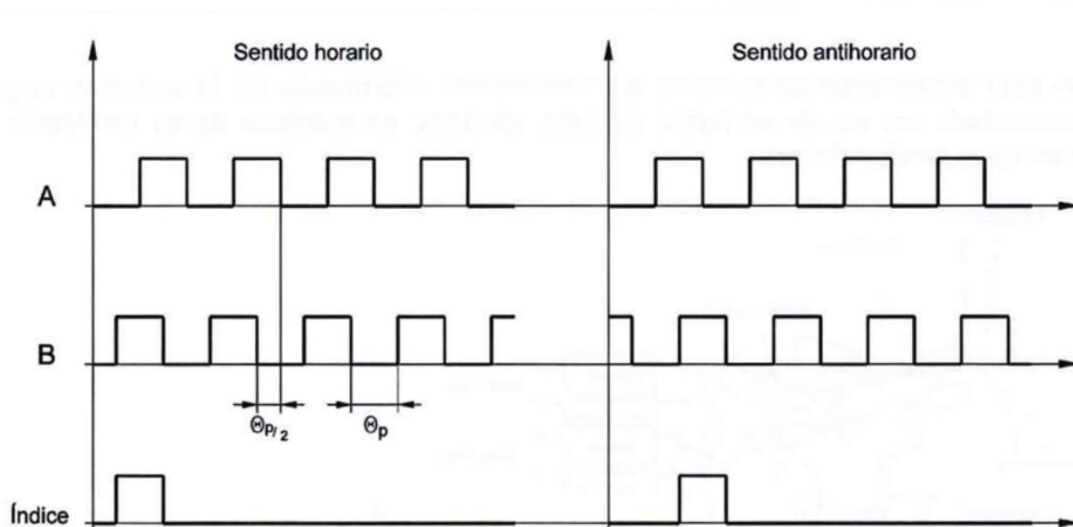


Figura 28: Relación entre señales según sentido de giro. [1]

3.6. ESTUDIO DEL CAPTADOR DE VELOCIDAD: TACODINAMO

La disposición de la tacodinamo empleada en la maqueta se muestra en la Figura 29. Como se puede observar, la tacodinamo se comporta como una carga y no está conectada al eje de salida de la reductora, sino directamente al eje motriz, es decir, al eje del motor de CC.

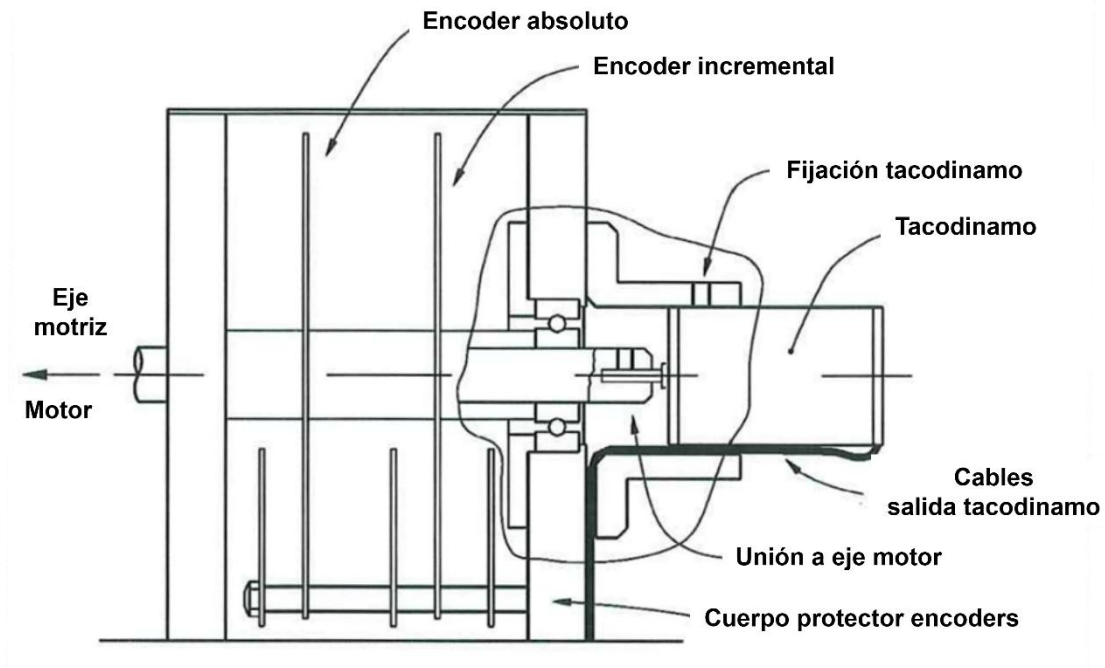


Figura 29: Fijación de la tacodinamo al eje motriz. [1]

En la Figura 30 se observa el montaje real de la tacodinamo en la maqueta:

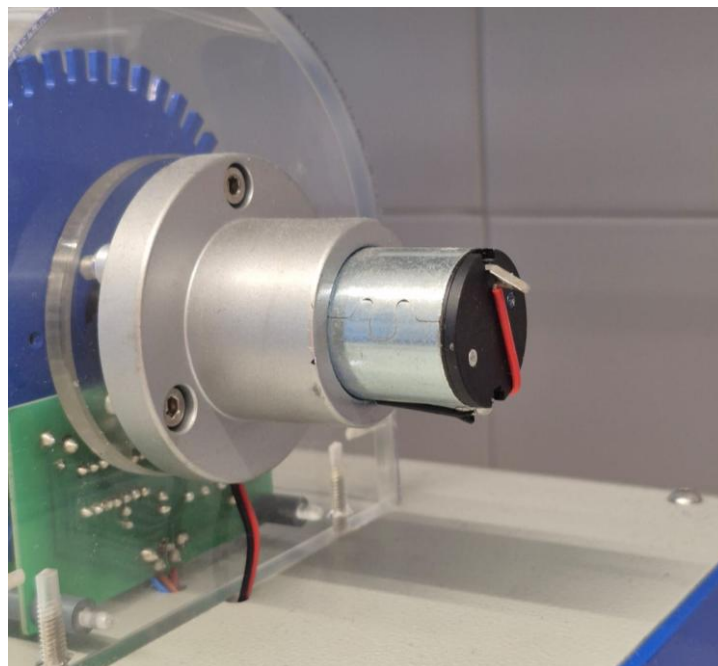


Figura 30: Tacodinamo utilizada en la maqueta.

Las conexiones de la tacodinamo se extraen al panel frontal de la maqueta. La polaridad de la salida de la tacodinamo (colores de las hembrillas de conexión) es para el caso en el que el eje motriz gire en el sentido que produzcan un movimiento horario de la flecha indicadora en la parte frontal de la reductora.

A continuación, se procede con el estudio del funcionamiento de una tacodinamo, explicando sus principios básicos de operación y la manera en que convierte la velocidad de rotación en una señal de voltaje proporcional.

Una tacodinamo elemental está constituida por un inductor fijo, entre cuyos polos magnéticos gira un inducido formado por una espira cuyas extremidades están conectadas a un colector de delgas. Este colector, solidario al inducido, está compuesto de dos segmentos aislados eléctricamente entre sí (delgas) sobre los cuales frotan dos escobillas, tal y como se muestra en la Figura 31:

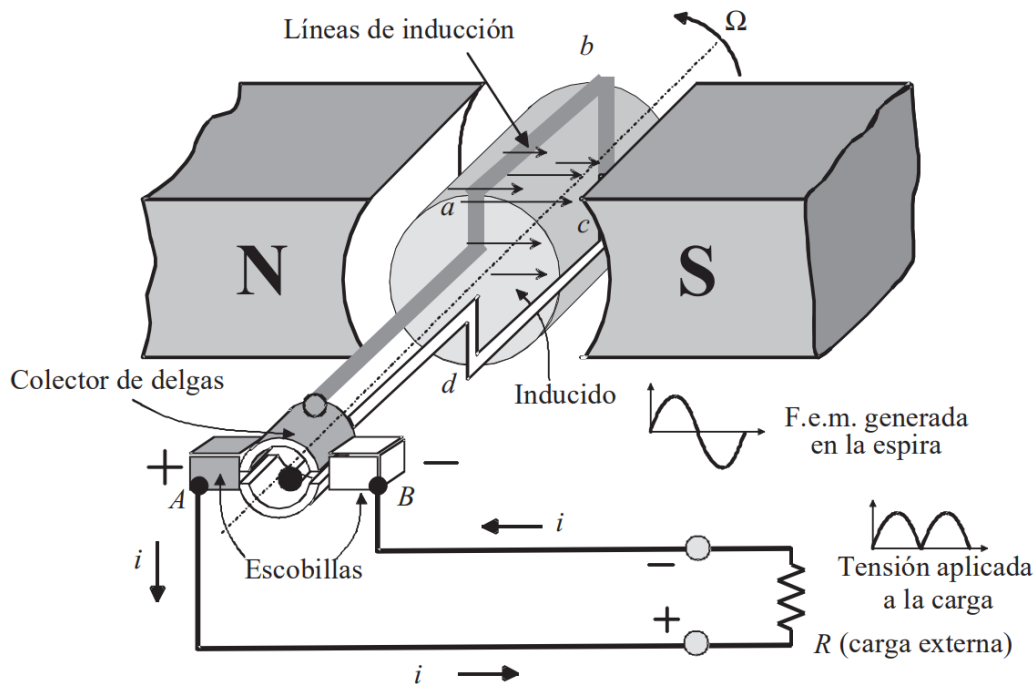


Figura 31: Colector de dos delgas. [14]

La f.e.m. inducida en la espira viene expresada por la ley de Faraday

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (33)$$

En la Figura 32 se ha representado una revolución completa de la espira. En el instante t_1 , el plano de la espira es vertical, por lo que el flujo magnético es máximo y en consecuencia la f.e.m. inducida es nula. Al pasar la espira desde el instante t_1 al instante t_2 , la f.e.m. inducida irá aumentando progresivamente, siendo en el instante t_2 máxima.

La misión del colector de delgas es obligar a que la corriente que atraviesa el circuito exterior circule siempre en el mismo sentido, de tal forma que, aunque la f.e.m. inducida en la espira sea sinusoidal, la corriente que atraviesa el circuito sea unidireccional. Esta operación se denomina rectificación.

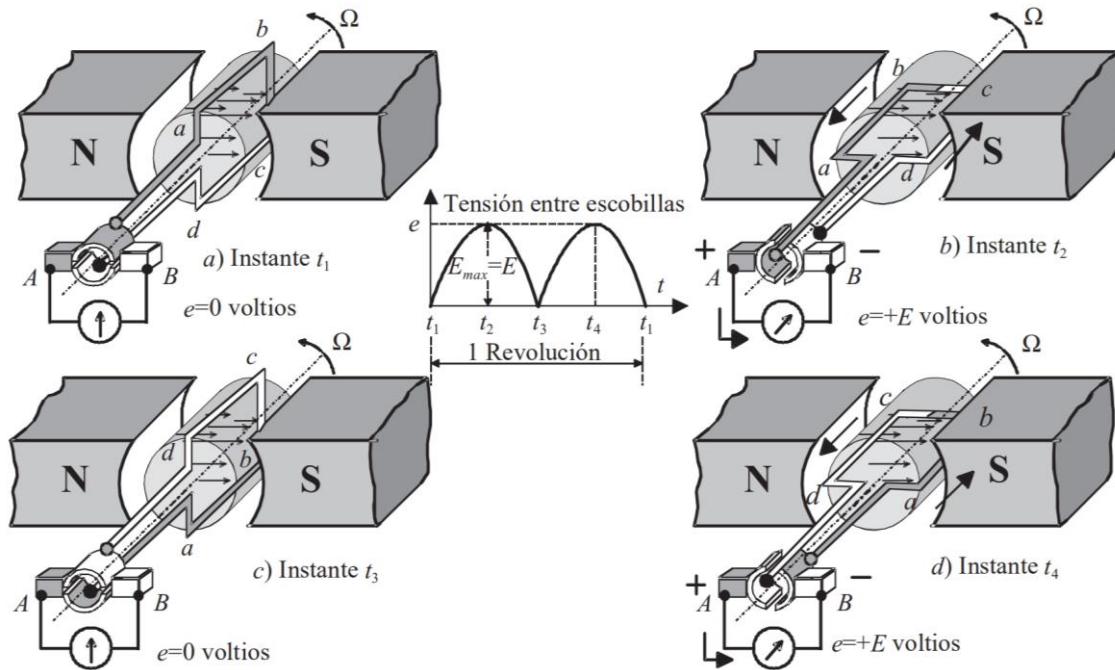


Figura 32: Funcionamiento del colector de delgas y tensión obtenida entre escobillas. [14]

En la práctica, para obtener una corriente continua con menor rizado se aumenta el número de delgas del colector, con más bobinas en el inducido, posicionándolas con un cierto ángulo de decalaje entre ellas. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 33:

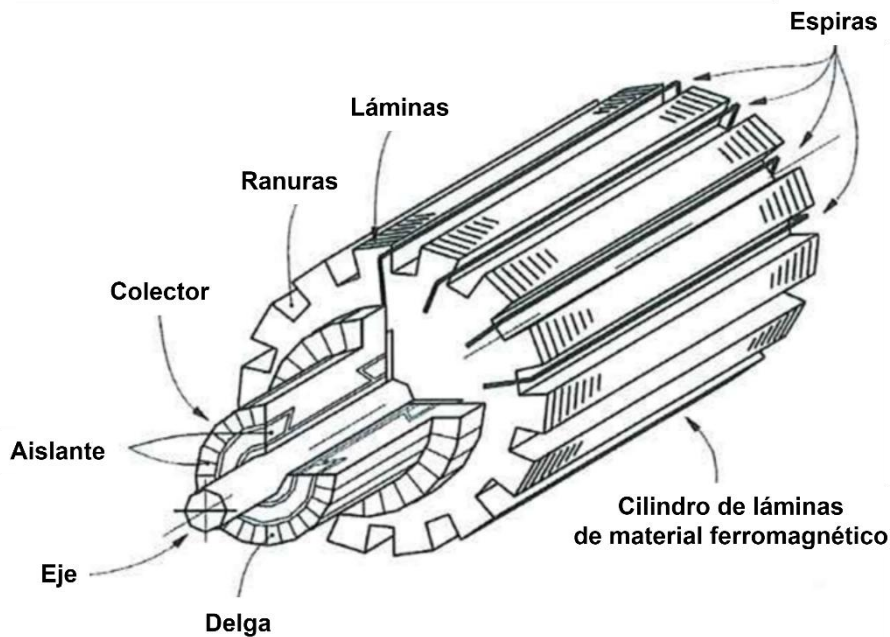


Figura 33: Rotor de una tacodinamo. [1]

En la Figura 34, se muestra un ejemplo de la f.e.m. con dos bobinas desfasadas 90° entre sí. Se observa que la forma de onda obtenida posee un menor rizado. Por tanto, a mayor número de bobinas, menor rizado en la señal de salida.

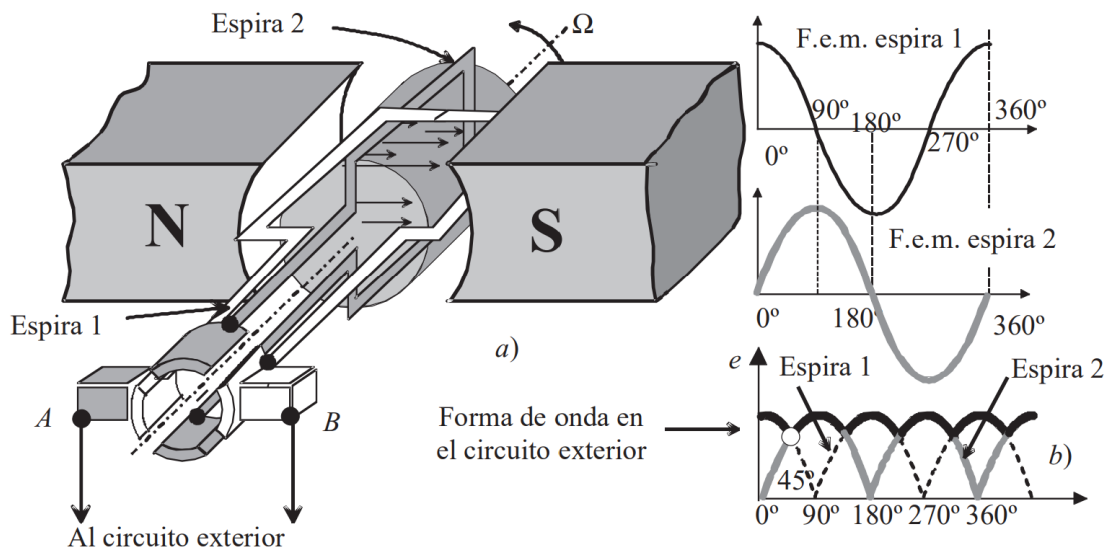


Figura 34: Inducido con dos espiras y colector con cuatro delgas. [14]

Según [14], la tacodinamo es una dinamo de imán permanente que produce una f.e.m. proporcional a la velocidad y que tiene salidas típicas del orden de 10 V cada 1.000 r.p.m.; la tensión del tacómetro es, por consiguiente, proporcional a la velocidad de giro de la máquina, y como quiera que a bajas velocidades esta tensión tiene mucho rizado, se alisa su salida por medio de un filtro adecuado. Las ecuaciones fundamentales son similares a las del motor de CC, siendo el voltaje inducido en los bornes de la tacodinamo:

$$e_{taco}(t) = K_t \cdot w_m(t) - R_{taco} \cdot i_a(t) \quad (34)$$

Donde K_t es la constante de la tacodinamo, $w_m(t)$ es la velocidad angular del eje, R_{taco} es la resistencia interna del devanado y $i_a(t)$ es la corriente que suministra la tacodinamo hacia la carga. Sin embargo, la carga que mide la tensión de salida tiene una resistencia muy elevada, por lo que $i_a(t) \approx 0$, obteniendo:

$$e_{taco}(t) \approx K_t \cdot w_m(t) \quad (35)$$

Por otra parte, la tacodinamo puede oponer un par resistivo al eje si entrega corriente a la carga. Sin embargo, se asume despreciable dado que la corriente de salida es muy pequeña.

Aplicando la transformada de Laplace a (35), la función de transferencia de la tacodinamo se puede representar como:

$$\frac{e_{taco}(s)}{w_m(s)} = K_t \quad (36)$$

En la Figura 35 se observa de una forma más visual un esquema representativo de la conversión que realiza la tacodinamo.

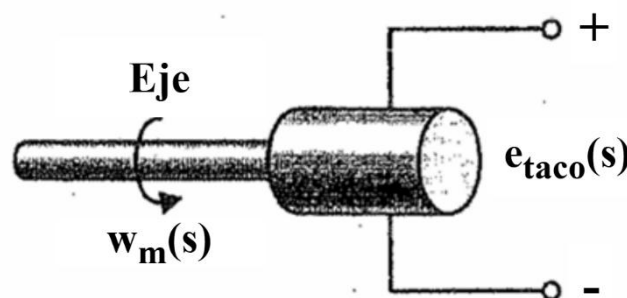


Figura 35: Esquema genérico de una tacodinamo.

Cabe destacar que, para el caso concreto de la maqueta utilizada, se tiene como captador de velocidad angular una tacodinamo de baja inercia con compensación de reacción de inducido.

En cuanto a las no linealidades que pueden aparecer en la tacodinamo, el rozamiento mecánico en rodamientos y escobillas introduce un par de frenado similar a lo observado en los motores de CC, generando así una pequeña zona muerta. Otro aspecto importante es que, si la impedancia de salida no resulta suficientemente alta, el flujo de corriente puede ser significativo, lo cual compromete la linealidad entre la tensión y la velocidad. Asimismo, en situaciones extremas de diseño o sobreexcitación, puede presentarse saturación magnética, reduciendo la proporcionalidad ideal entre la velocidad y el voltaje de salida. Por último, los contactos mecánicos y la conmutación pueden originar ruido de alta frecuencia, que interfiere en la señal de medición.

CAPÍTULO 4: IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y SIMULACIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

El principal problema surge cuando el fabricante de la maqueta no facilita la hoja de datos de los diferentes elementos que conforman el sistema, tan solo los datos que aparecen en el manual, ya expuestos en el capítulo 3. Inclusive, es posible que la hoja de datos del fabricante no proporcione todos los parámetros necesarios y, aunque estos sean facilitados, no tienen por qué corresponderse con los del motor bajo estudio, ya que pueden existir variaciones entre unidades debido a tolerancias de fabricación. Por este motivo es fundamental este capítulo, donde se modela cada elemento, así como el sistema final resultante obteniendo los parámetros característicos correspondientes a cada elemento. Cabe resaltar que la maqueta es un conjunto único sin posibilidad de separar los elementos que la conforman, provocando ciertas limitaciones a la hora de obtener los parámetros de cada elemento.

Se pretende que el modelado de cada uno de los elementos represente fielmente el comportamiento real del mismo y poder unificar estos elementos en un diagrama para conformar el laboratorio virtual. Para ello, se utilizará el software Matlab/Simulink, en concreto Simscape.

4.2. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para llevar a cabo los experimentos necesarios para obtener los parámetros característicos de cada elemento, se han utilizado una serie de herramientas de medida y programas de simulación.

Software como Matlab y Simulink se han convertido en herramientas esenciales para la simulación y el análisis de motores eléctricos. Matlab es un software de cálculo numérico diseñado para trabajar con matrices y vectores, utiliza un lenguaje que integra cálculo, programación y visualización gráfica basado en una notación matemática sencilla de entender [21]. Por otro lado, Simulink es un entorno de diagramas de bloques que se utiliza para diseñar sistemas con modelos multidominio, simular antes de implementar en hardware y desplegar sin necesidad de escribir código.

Sin embargo, los últimos estudios realizados emplean la herramienta denominada Simscape para simular dichos motores [22]. Simscape permite crear rápidamente modelos de sistemas físicos dentro del entorno de Simulink. Con Simscape, se pueden crear modelos de componentes físicos basados en conexiones físicas que se integran directamente con diagramas de bloques y otros paradigmas de modelado. Se pueden modelar sistemas, tales como motores eléctricos, rectificadores de puente, actuadores hidráulicos y sistemas de refrigeración, agrupando los componentes fundamentales en un esquema. Las herramientas complementarias de Simscape ofrecen prestaciones de análisis y componentes más complejos [23]. Un ejemplo de la utilización de Simscape se visualiza en el artículo [24], donde se emplea este software para modelar y simular un robot móvil.

La principal herramienta de medida es la tarjeta de adquisición de datos NI PCIe6321 (Figura 36) que, junto con un PC y el entorno Simulink, permite obtener los valores de tensión correspondientes al captador potenciométrico y a la tacodinamo, además de establecer el valor de consigna del motor de CC.



Figura 36: Tarjeta de adquisición de datos NI PCIe6321.

En el anexo A.2. Pinout Tarjeta de Adquisición de Datos, se muestra el *pinout* de la tarjeta de adquisición de datos, donde se encuentra subrayado de color amarillo los pines a los que se conectarán los captadores (entradas AI) y la consigna (salida AO).

Siguiendo las normas de [25], se conectan los captadores a los pines correspondientes y configurar Simulink en tiempo real. Tras ello, se procede a realizar el diagrama en mostrado en la Figura 37 para la adquisición de datos y establecer la consigna al motor.

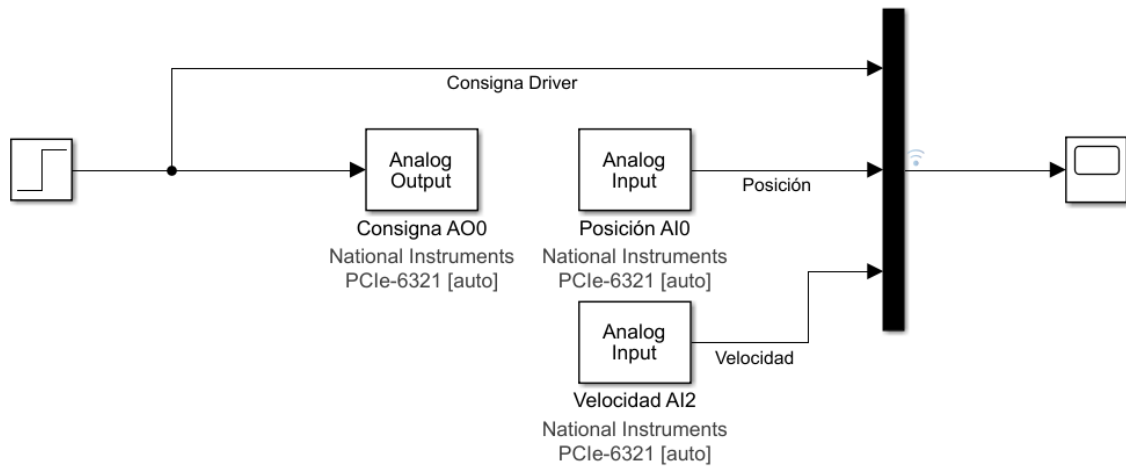


Figura 37: Diagrama en Simulink para la adquisición de datos.

Para un estudio completo del sistema, es conveniente obtener valores de los captadores para distintos niveles de consigna de tipo escalón aplicados al motor. Una forma de conseguirlo consiste en aplicar a una rampa unitaria la función matemática de Simulink llamada *floor*. Por tanto, el esquema mostrado en la Figura 37, se convierte en el mostrado en la Figura 38. Hay que destacar que la entrada AI0 se utiliza para medir tanto la señal del encoder incremental como la del captador potenciométrico.

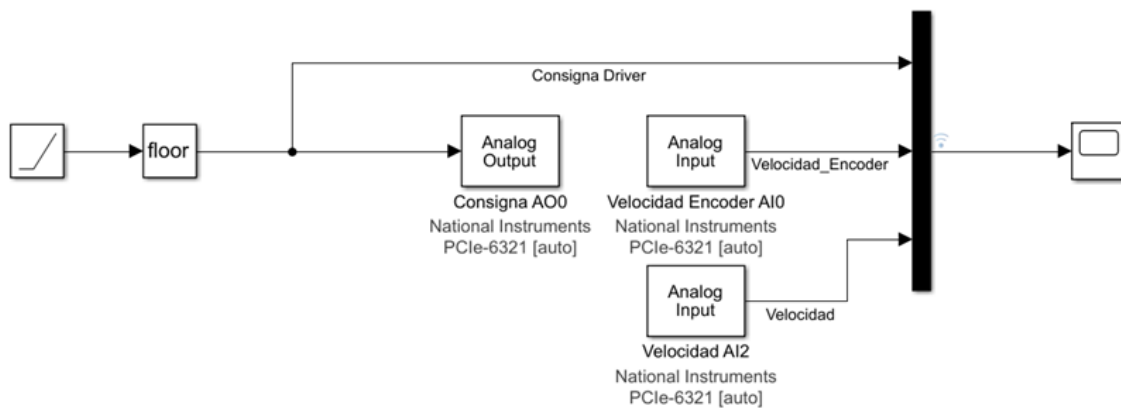


Figura 38: Diagrama de adquisición de datos para un rango de valores de consigna.

Tras ejecutar las diferentes configuraciones necesarias, los datos generados para cada variable se pueden visualizar a través de *Data Inspector* de Simulink. Posteriormente, estos datos se exportan a un archivo *.mat*, lo que permite graficarlos y analizarlos con mayor detalle.

Además, se han empleado instrumentos de medida electrónicos tales como el osciloscopio, multímetro y generador de funciones, los cuales se muestran en la Figura 39. Dependiendo del tipo de experimento a realizar se utilizará el instrumento de medida más adecuado entre los mencionados anteriormente.



Figura 39: Instrumentos de medida. Generador de funciones, multímetro y osciloscopio.

4.3. MODELO Y CARACTERIZACIÓN DEL MOTOR CC

En este apartado se muestra el modelo del motor CC realizado en Simscape y se procede a explicar los diferentes experimentos realizados para obtener los parámetros característicos del motor. Este estudio se denomina caracterización del motor.

4.3.1. MODELO DEL MOTOR DE CC CON SIMSCAPE

Simscape es una herramienta de simulación de MATLAB que permite modelar y analizar sistemas físicos multidominio, como eléctricos, mecánicos y térmicos, mediante el uso de bloques basados en ecuaciones físicas. Esto es posible gracias a un conjunto de bibliotecas y bloques. Conectar bloques es análogo a la conexión de componentes reales, tales como bombas, válvulas, etc. Además, los puertos de conexión no son direccionales, como no lo son en general los elementos físicos. En Simscape se consigue modelar el motor de CC con mayor similitud a la realidad en comparación con Simulink.

En la Figura 40 se muestra el esquema realizado en Simscape para modelar un motor de CC. Este modelo se ha diseñado teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el Capítulo 3.

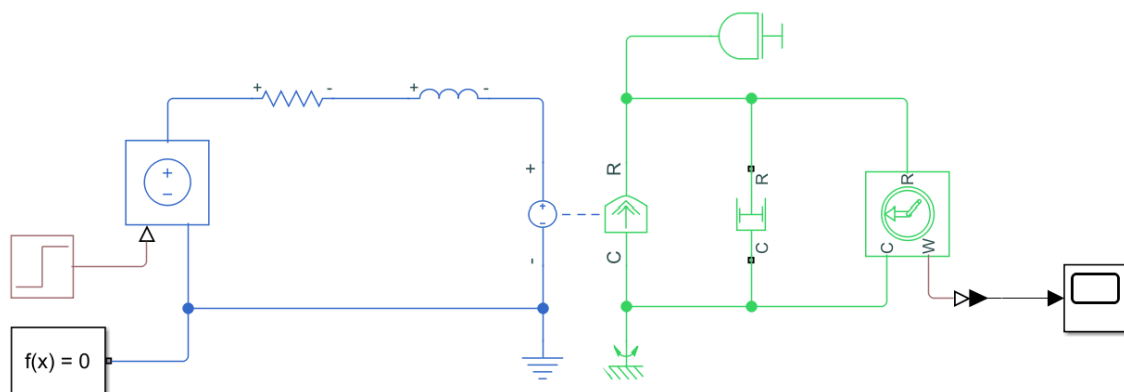
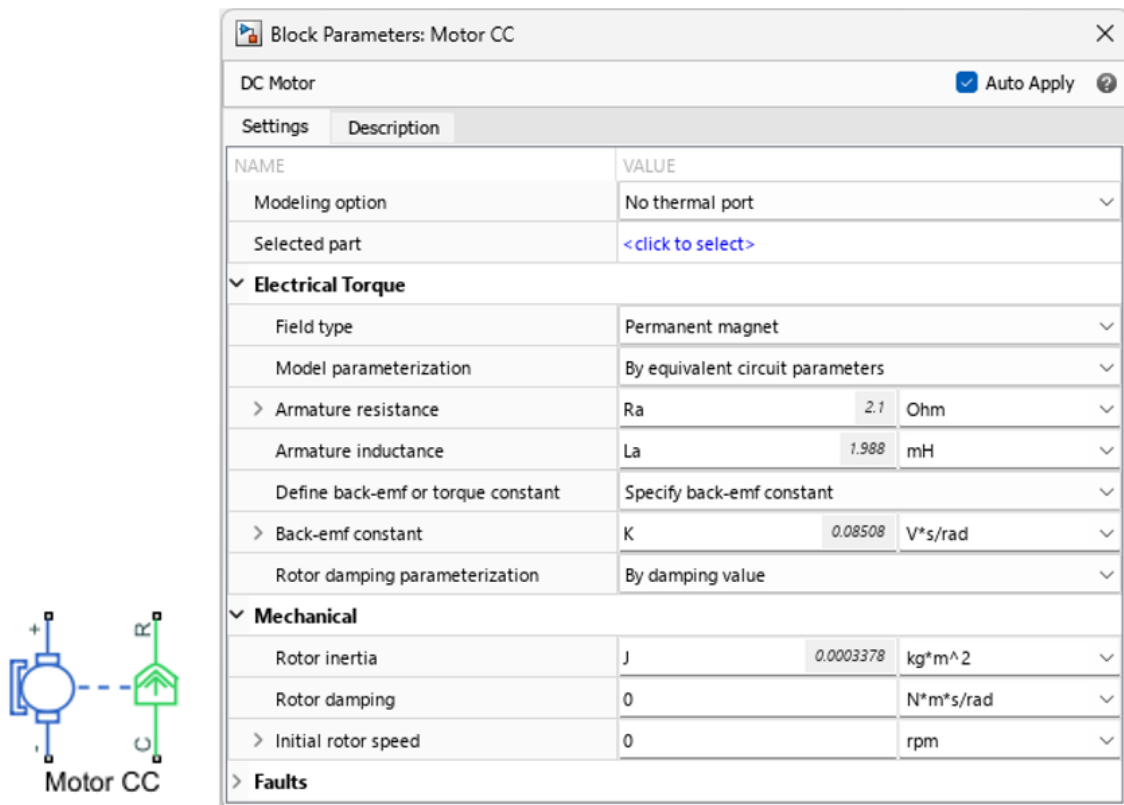


Figura 40: Modelo del motor de CC en Simscape.

Se observa que el diagrama en color azul (izquierda) corresponde al dominio eléctrico, donde aparece la resistencia de la armadura, la inductancia, la tensión de entrada y la fuerza contraelectromotriz. Por otra parte, el diagrama en color verde (derecha) representa el dominio mecánico, observándose la inercia y la fricción correspondientes al motor. Por último, se conecta un sensor ideal de movimiento rotacional a la salida del motor para medir su velocidad angular, aunque no forme parte del motor en sí.

Simscape cuenta con un bloque específico para modelar un motor de CC, en el que se establecerán los parámetros característicos del mismo. Este bloque se muestra en la Figura 41.



NAME	VALUE
Modeling option	No thermal port
Selected part	<click to select>
Electrical Torque	
Field type	Permanent magnet
Model parameterization	By equivalent circuit parameters
> Armature resistance	Ra 2.1 Ohm
Armature inductance	La 1.988 mH
Define back-emf or torque constant	Specify back-emf constant
> Back-emf constant	K 0.08508 V*s/rad
Rotor damping parameterization	By damping value
Mechanical	
Rotor inertia	J 0.0003378 kg*m^2
Rotor damping	0 N*m*s/rad
> Initial rotor speed	0 rpm
Faults	

Figura 41: Bloque DC Motor en Simscape.

Para poder modelar la zona muerta existente en el motor, es necesario añadir en paralelo al bloque anterior una fricción. Esto se consigue con el bloque “*rotational friction*” (Figura 42). Aquí se añade el coeficiente de fricción viscosa y la constante de fricción de Coulomb. Un ejemplo de ello se puede visualizar en [26] y [27].

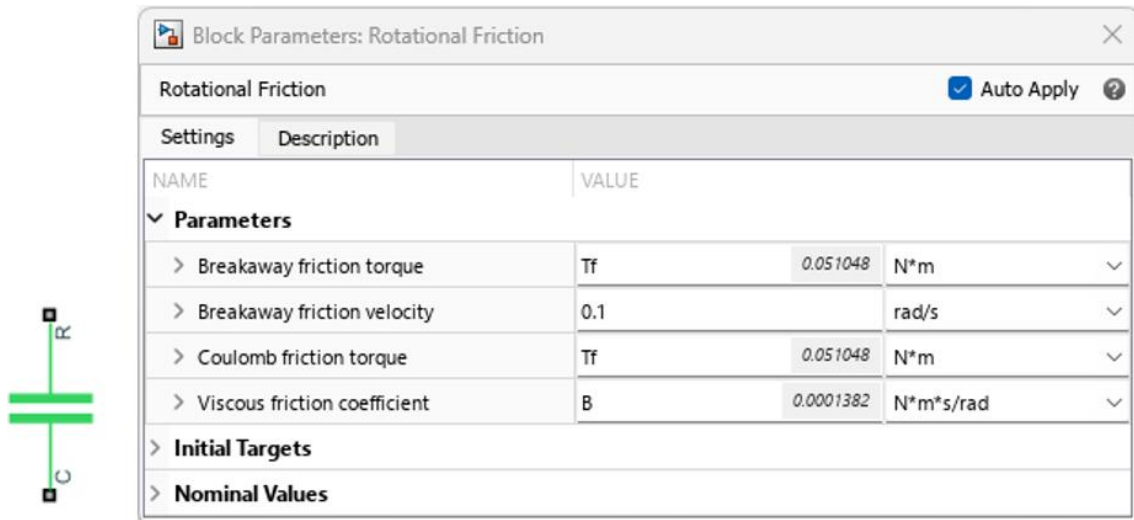


Figura 42: Bloque rotational friction en Simscape.

En la Figura 43 se muestra el esquema del modelo final del motor de CC, en el cual se han combinado los bloques comentados. También se han añadido un voltímetro y un amperímetro para realizar las mediciones de voltaje y corriente eléctrica, respectivamente.

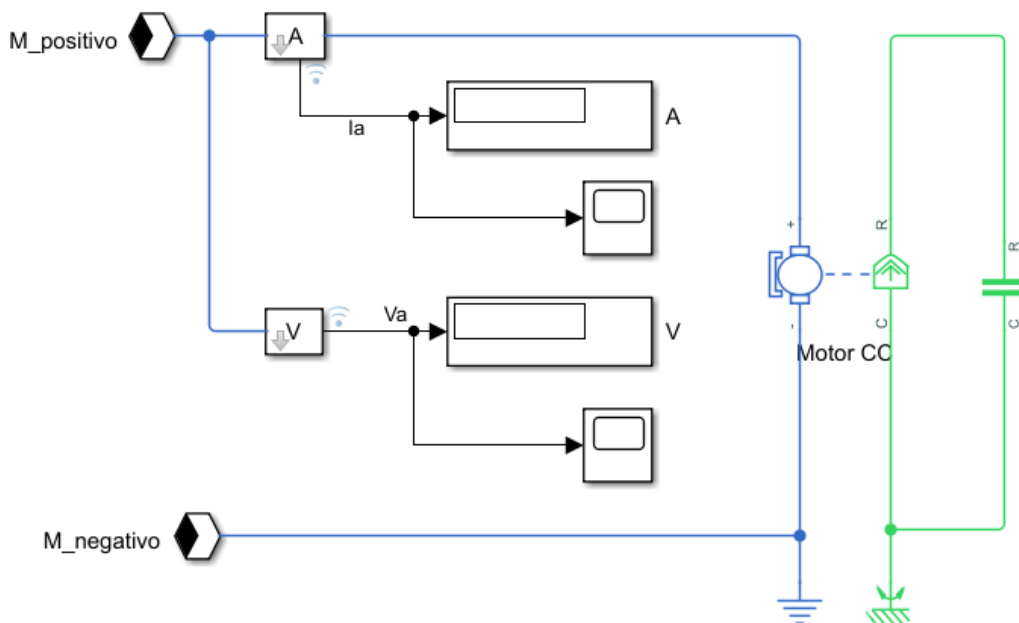


Figura 43: Esquema simplificado en Simscape del motor CC.

Una vez definido el esquema de Simscape del motor de CC, en los siguientes apartados el estudio se centra en describir los experimentos necesarios para obtener cada uno de los parámetros característicos que definen el modelo.

4.3.2. CONSTANTE DE TIEMPO MECÁNICA Y ELÉCTRICA

La constante de tiempo mecánica se define como el tiempo en el cual el sistema mecánico alcanza el 63,2 % de su valor final. El experimento para medir la constante de tiempo mecánica consiste en aplicar una entrada tipo escalón con una determinada amplitud y medir el valor final a la salida. Por tanto, se calcula el 63,2 % del valor final y se mide el tiempo que tarda el sistema en alcanzar dicho valor.

Para medir la constante de tiempo mecánica se ha aplicado como consigna una señal tipo escalón con una amplitud de 6 V, obteniendo un valor final a la salida de la tacodinamo de 6,43 V, tal y como se muestra en la Figura 44.

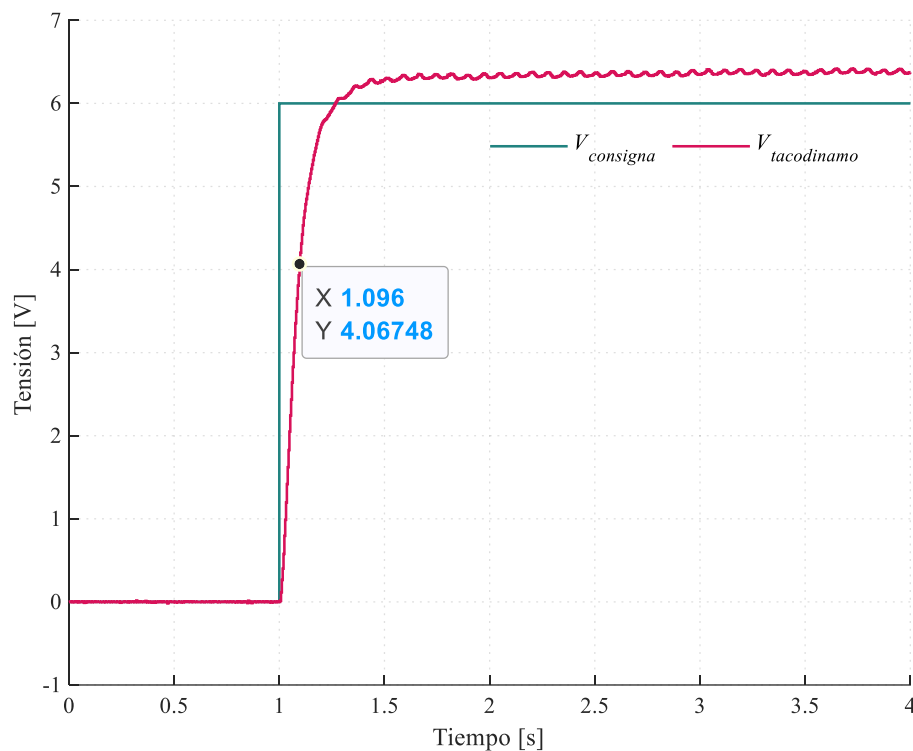


Figura 44: Constante de tiempo mecánica.

Se calcula el 63,2 % del valor final, lo que da lugar a 4,06 V. Midiendo en la gráfica mostrada en la Figura 44, se tiene un tiempo de $t = 1,096$ s, que restándole el tiempo en el que comienza el escalón se tiene una constante de tiempo de 0,096 s.

Se han realizado tres experimentos adicionales con consignas de 4 V, 5 V y 7 V, respectivamente, con el objetivo de calcular el valor medio de la constante de tiempo del sistema. Las constantes obtenidas para cada una de las consignas han sido 0,1 s, 0,1 s y 0,096 s, respectivamente. A partir de estas cuatro mediciones se calcula el promedio, tal y como se muestra en (37):

$$\tau_m = \frac{0,1 + 0,1 + 0,096 + 0,096}{4} = 0,098 \text{ s} \quad (37)$$

En cuanto a la constante de tiempo eléctrica, esta se calcula sustituyendo valores en (38):

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{1,988 \cdot 10^{-3}}{2,1} = 0,946 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (38)$$

4.3.3. RESISTENCIA DE ARMADURA

El método más sencillo para obtener el valor de la resistencia R de armadura es utilizando el multímetro, simplemente se procede conectándolo entre las bornas del motor de CC y midiendo su resistencia eléctrica.

Tras la realización de este experimento se tiene que:

$$R_a = 2,1 \Omega$$

4.3.4. INDUCTANCIA

Existen diferentes formas para obtener el valor de la inductancia de armadura (L_a), como puede ser utilizar el aparato de medida *Henry test*, o a través de un circuito de medida utilizando el *Timer 555*, entre otros. También se puede realizar un análisis de teoría de circuitos sobre el circuito RL serie que conforma el rotor del motor, como se muestra en la Figura 45:

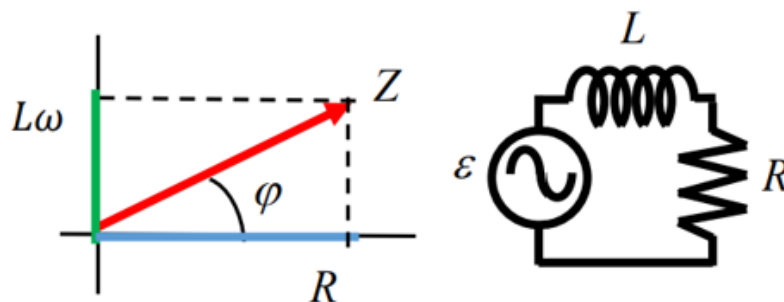


Figura 45: Circuito corriente alterna RL en serie.

Aplicando un voltaje de entrada alterno, conociendo su frecuencia y midiendo la intensidad del circuito, se sustituyen valores en (39) y se obtiene el valor de inductancia L_a .

$$L_a = \frac{\sqrt{\frac{V^2}{I^2} - R_a^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{V^2}{I^2} - R_a^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (39)$$

En este caso, se ha realizado un experimento aprovechando el fenómeno de la resonancia en los circuitos eléctricos, según [28].

Un circuito pasivo, representado por su impedancia equivalente y excitado con una señal senoidal de frecuencia variable, es resonante o está en resonancia cuando su impedancia equivalente es resistiva pura. A la frecuencia a la que se produce la resonancia la denominamos frecuencia de resonancia, ω_0 . Es decir $Z_{eq}(\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$; $\omega = \omega_0 : Z_{eq}(\omega_0) = R(\omega_0)$.

El circuito resonante a realizar está formado por la asociación en serie de una resistencia, una bobina real y un condensador, tal y como se muestra en la Figura 46:

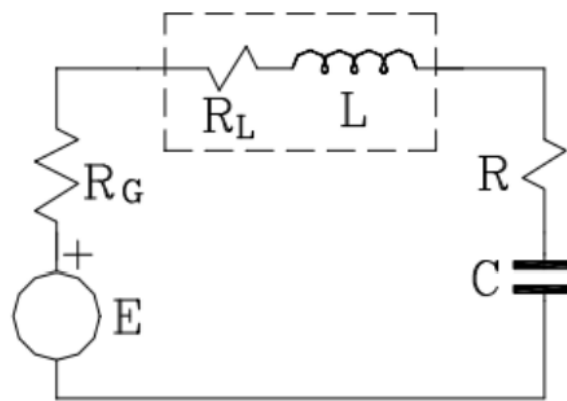


Figura 46: Circuito resonante serie [28].

Puesto que a frecuencia de resonancia se cumple que la tensión de alimentación y la intensidad están en fase [28], se irá modificando la frecuencia de la tensión de alimentación hasta que ambas señales estén en fase. Esto se realizará con la ayuda de un generador de funciones. Para poder observar la forma de onda de la intensidad que circula por el circuito resonante serie, se medirá la tensión en la resistencia R , pues esta tendrá la misma forma de onda. Para obtener el valor eficaz de la intensidad, se divide la tensión medida en R entre el valor de la propia resistencia [29].

Una vez conocida la frecuencia de resonancia, según [28], a dicha frecuencia se cumple que:

$$\omega_0 \cdot L_a = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} \quad (40)$$

Por tanto, se procede a despejar L_a para obtener su valor, ya que el valor de C es conocido.

El circuito descrito se ha montado sobre una protoboard (Figura 47), utilizando un condensador de $1 \mu F$, que tras medirlo con el multímetro se obtiene un valor de $1,013 \mu F$ y una resistencia de 977 ohmios.

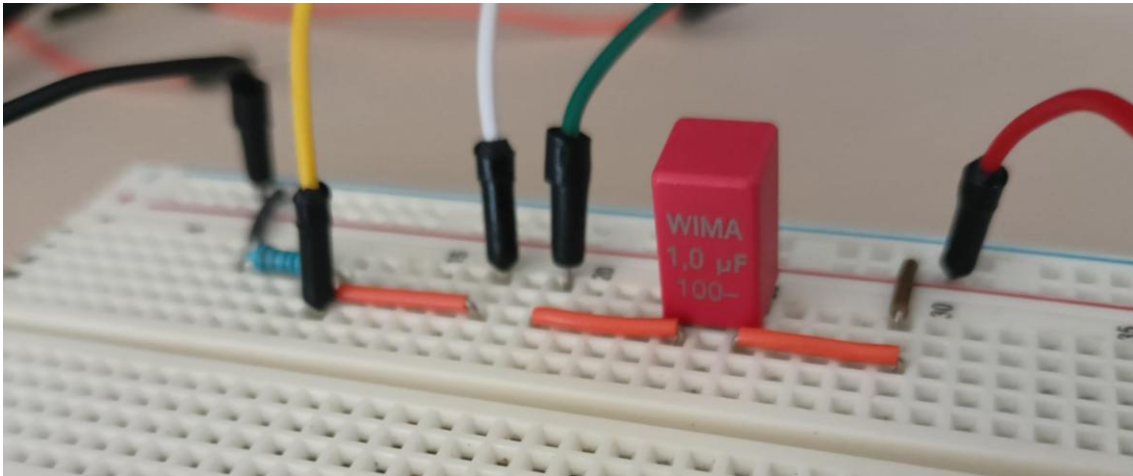


Figura 47: Montaje en protoboard del circuito resonante serie.

La alimentación del circuito se realiza por medio del generador de funciones, aplicando una tensión sinusoidal de aproximadamente 5 V rms . Entre los cables de color blanco y verde se conecta el motor, quedando en serie con el condensador y la resistencia. El cable amarillo sirve para medir la tensión que cae en la resistencia haciendo uso del osciloscopio, a la vez que se mide la tensión de entrada.

Se procede a variar la frecuencia del generador de funciones hasta conseguir que ambas señales estén en fase, tal y como se muestra en la Figura 48. Se observa que la frecuencia de resonancia es de $3,546\text{ kHz}$, que convertido a radianes son $22,28\frac{\text{krad}}{\text{s}}$.

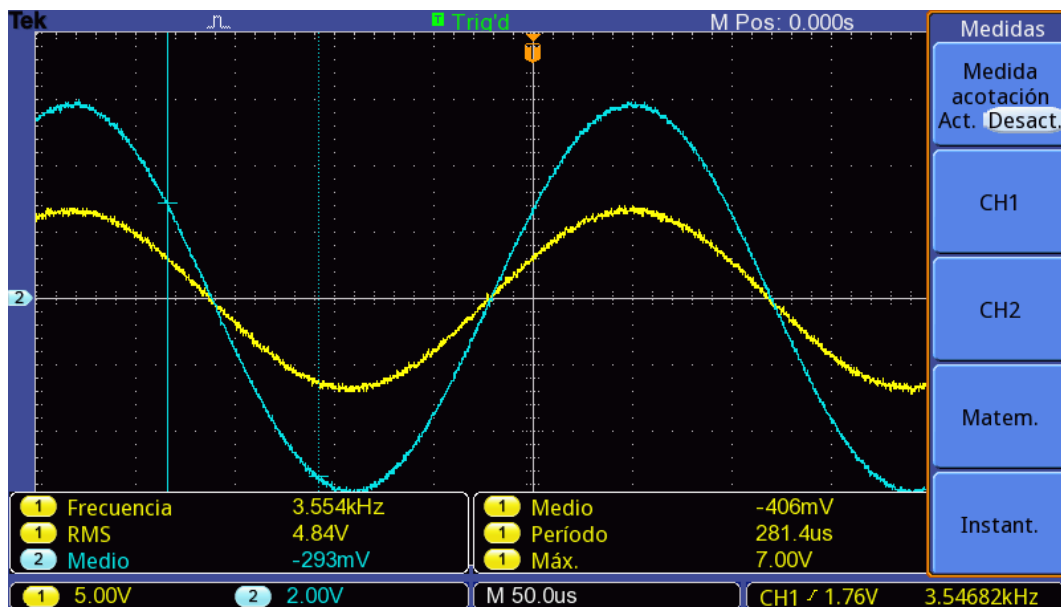


Figura 48: Captura de las señales del circuito resonante serie

Una vez conocida la frecuencia de resonancia, se calcula el valor de L_a , teniendo:

$$L_a = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot C} = \frac{1}{(22,28 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,013 \cdot 10^{-6}} = 1,988 \text{ mH} \quad (41)$$

4.3.5. CONSTANTE ELECTROMOTRIZ

Si se considera que el motor de CC se encuentra trabajando en estado estable, podemos considerar que la influencia de la parte inductiva es despreciable. Por tanto, eliminando términos de (13) y sustituyendo el valor de e_b de (14), se tiene:

$$e_a = R_a \cdot i_a + \omega_m \cdot k \quad (42)$$

Despejando k se tiene:

$$k = \frac{e_a - R_a \cdot i_a}{\omega_m} \quad (43)$$

Para obtener el valor de este parámetro se necesita medir el voltaje de entrada aplicado, la intensidad y la velocidad angular.

Tras realizar el experimento con diferentes valores de voltaje de entrada, se recopilan los valores medidos en la Tabla 3:

CONSTANTE ELECTROMOTRIZ						
V_{in} (V)	e_a (V)	I_a (A)	ω (V)	ω (rpm)	ω (rad/s)	K ($\frac{V \cdot s}{rad}$)
1	1,52	0,54	0	0,000	0,000	-
2	2,73	0,5	1,3189	164,451	17,221	0,09755
3	4,07	0,57	2,5257	314,925	32,979	0,08712
4	5,47	0,63	3,7239	464,327	48,624	0,08529
5	6,96	0,69	4,9309	614,825	64,384	0,08560
6	8,42	0,75	6,1455	766,272	80,244	0,08530
7	9,73	0,79	7,3792	920,100	96,353	0,08377
8	11,10	0,83	8,5891	1070,960	112,151	0,08343
9	11,90	0,84	9,4313	1175,973	123,148	0,08231
10	12,10	0,84	9,6585	1204,302	126,114	0,08196

Tabla 3: Valores del experimento para obtener la constante electromotriz.

Se calcula la k promedio sin tener en cuenta la primera y última medida, obteniendo un valor de:

$$k = 0,08508 \frac{V \cdot s}{rad}$$

4.3.6. ZONA MUERTA, CORRIENTE DE ARRANQUE Y TORQUE DE FRICCIÓN

Se denomina corriente de arranque I_{arr} a la corriente necesaria para que el motor venza la inercia mecánica. Para calcular dicha corriente, se procede a conectar en las bornas del motor una fuente de tensión regulable. A continuación, se incrementará el valor del voltaje hasta que el eje del motor comience a moverse, justo en este instante se medirá la corriente consumida por el motor, la cual corresponderá a la corriente de arranque y se tomará medida de la tensión aplicada, la cual corresponderá a la zona muerta del motor.

Tras realizar esta prueba tres veces, se han obtenido valores muy parecidos de la corriente de arranque, de los cuales se calcula el promedio, tal y como se muestra en (44):

$$I_{arr_m} = \frac{0,59 + 0,61 + 0,60}{3} = 0,6 A \quad (44)$$

Para el valor de voltaje de zona muerta se calcula el promedio de la misma forma:

$$V_{ZM_m} = \frac{1,55 + 1,52 + 1,56}{3} = 1,54 V \quad (45)$$

En cuanto al torque de fricción, este corresponde al par necesario para vencer la fricción estática. El valor viene determinado por:

$$T_{fr} = k \cdot I_{arr} \quad (46)$$

Para el valor del torque de fricción se tiene entonces un valor tal que:

$$T_{fr} = 0,08508 \cdot 0,6 = 5,051 \times 10^{-2} Nm$$

Es importante destacar que este valor de torque de fricción T_{fr} es el responsable de provocar la zona muerta. Por lo tanto, introducirlo en los parámetros del motor es suficiente, sin necesidad de especificar el valor de V_{ZM} .

4.3.7. MOMENTO DE INERCIA

Para determinar el valor del momento de inercia J , se podría realizar aplicando cálculo geométrico, pero para ello se debería desmontar el motor y medir detalladamente la geometría interna.

Para evitar esto, se despeja el valor de inercia de (28), quedando:

$$J = \frac{t_m \cdot k^2}{R_a} \quad (47)$$

Cabe destacar que, para este trabajo, la inercia calculada corresponde a la inercia del motor junto con la inercia de la tacodinamo, reductora y los ejes que los unen entre sí.

Tras realizar este experimento, se obtiene el siguiente valor:

$$J = \frac{t_m \cdot k^2}{R_a} = \frac{0,098 \cdot 0,08508^2}{2,1} = 3,38 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.3.8. CONSTANTE DE FRICCIÓN VISCOSA

Para calcular la constante de fricción viscosa, se parte de una situación de régimen estacionario, en la que el sistema gira a velocidad angular constante. En estas condiciones, la aceleración es nula, convirtiéndose (15) en:

$$B_m = \frac{(k \cdot i_a) - T_{fr}}{\omega_m} \quad (48)$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 3 en (48), al igual que a la hora de calcular la constante electromotriz, se obtiene su valor promedio:

$$B_m = 1,3826 \times 10^{-4} \text{ Nms/rad}$$

4.3.9. SATURACIÓN

La saturación en motores CC es un fenómeno crítico que ocurre cuando el motor alcanza límites físicos o eléctricos que impiden un aumento adicional en variables como la velocidad, a pesar de incrementos en la tensión de entrada.

La mayoría de los trabajos relacionados, limitan el rango de trabajo dentro de la zona lineal de funcionamiento del motor. De esta manera, no sería necesario conocer la saturación que presentan este tipo de motores.

Para calcular dicha saturación, se procede a introducir una rampa unitaria como valor de consigna al motor y medir la señal de la tacodinamo, obteniendo la gráfica de la Figura 49:

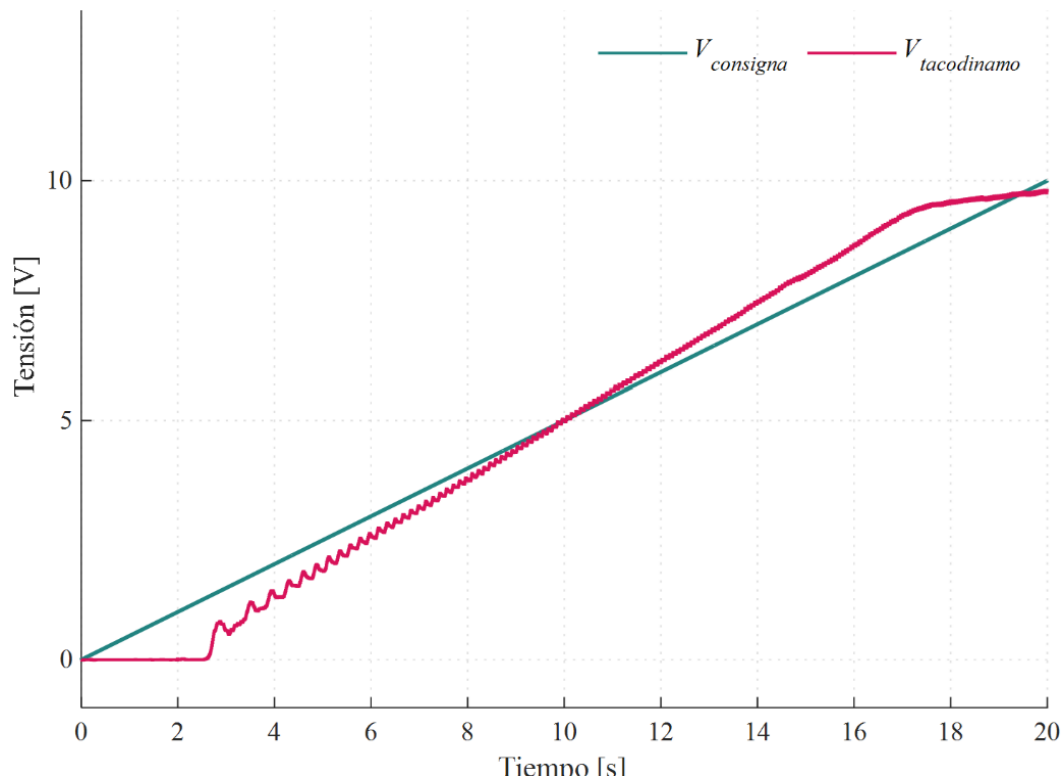


Figura 49: Experimento para calcular la saturación del motor.

Se observa que, de manera aproximada en $T = 17$ segundos, la velocidad del motor se mantiene casi constante, es en este momento cuando se comienza a producir la saturación. Aproximadamente con un valor de tensión de entrada $V = 8,8$ voltios. Posteriormente, en el apartado 5.2.4 se aclara que dicha saturación se debe, en realidad, al controlador del motor, es decir, al *driver*.

4.3.10. RESUMEN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOTOR CC

La Tabla 4 muestra un resumen de los parámetros obtenidos tras la realización de los experimentos.

PARÁMETROS DEL MOTOR CC DE IMÁN PERMANENTE			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Momento de inercia	J	$3,38 \times 10^{-4}$	$kg \cdot m^2$
Constante de fricción viscosa	B	$1,38 \times 10^{-6}$	$\frac{Nms}{rad}$
Constante de fuerza electromotriz	k_b	0,08508	$\frac{V \cdot s}{rad}$
Constante del par del motor	k_i	0,08508	$\frac{V \cdot s}{rad}$
Resistencia de armadura	R_a	2,1	Ω
Inductancia eléctrica	L_a	1,988	mH
Constante de tiempo mecánica	τ_m	0,098	s
Constante de tiempo eléctrica	τ_a	$0,946 \cdot 10^{-3}$	s
Intensidad de arranque	I_{arr}	0,6	A
Torque de fricción	T_{fr}	$5,051 \times 10^{-2}$	Nm
Zona muerta	V_{ZM_m}	1,54	V

Tabla 4: Recopilación de los parámetros característicos del motor de CC

Los parámetros obtenidos se definen en un archivo *.m* de Matlab para posteriormente introducirlos como variables en los bloques de Simscape del motor CC y fricción, mostrados anteriormente en la Figura 41 y Figura 42.

4.4. MODELO Y CARACTERIZACIÓN DEL CAPTADOR POTENCIOMÉTRICO Y DE LA REDUCTORA

En este apartado se aborda el modelo del captador potenciométrico y la reductora con Simscape. Se recuerda que la reductora está acoplada al eje motriz, teniendo un índice de reducción de 1:30.

4.4.1. MODELO DEL CAPTADOR POTENCIOMÉTRICO Y DE LA REDUCTORA CON SIMSCAPE

Primero se modela la parte eléctrica, que corresponde al potenciómetro. Para ello, se utiliza el bloque de Simscape “*potentiometer*”, mostrado en la Figura 50:

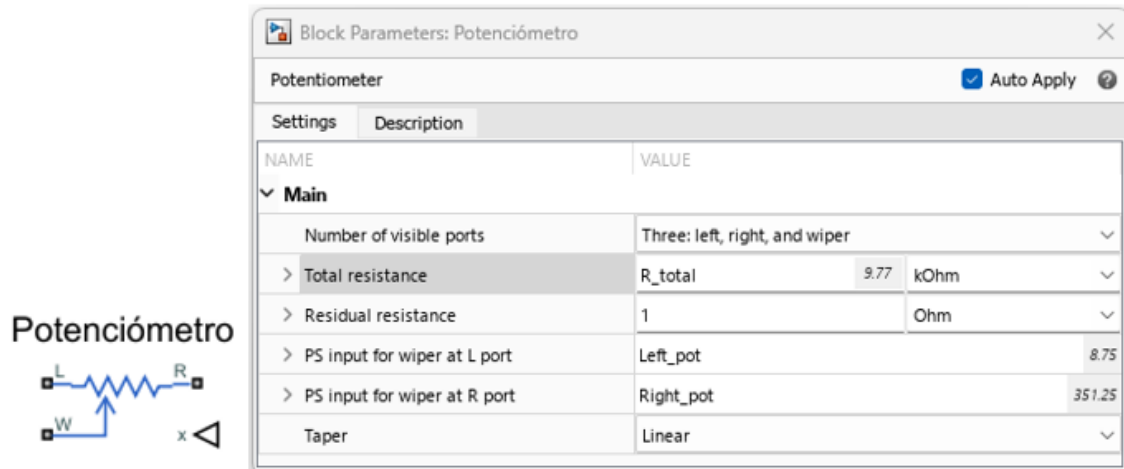


Figura 50: Bloque potenciómetro en Simscape.

Los terminales R y L deben ser alimentados entre un rango de +10 V y -10 V. Cuanto mayor sea la entrada x del potenciómetro, menor será la resistencia entre el terminal W y R. La señal del terminal W proporciona la tensión correspondiente a la posición. Los parámetros más relevantes son, la resistencia total y los valores de entrada para los cuales la escobilla del potenciómetro se sitúa en el terminal R o L. Estos valores de entrada dependerán del valor de zona muerta del potenciómetro, siendo $Left_pot$ la mitad del valor de la zona muerta y $Right_pot$ igual a 360° menos la mitad del valor de zona muerta.

En cuanto al modelado de la reductora, Simscape cuenta con un bloque específico para modelar una reductora del tipo sinfín-corona, donde se introduce como parámetro el índice de reducción con valor 1:30 y el tipo de rosca helicoidal de sentido derecho.

Cuenta con la opción de establecer el modelo de fricción, pero no se hace uso pues no se tienen los parámetros necesarios. Aunque podría reemplazarse con un bloque de ganancia, se opta por mantener el bloque actual para hacer más visual el esquema y conservar la posibilidad de modelar la fricción. Este bloque se muestra en la Figura 51:

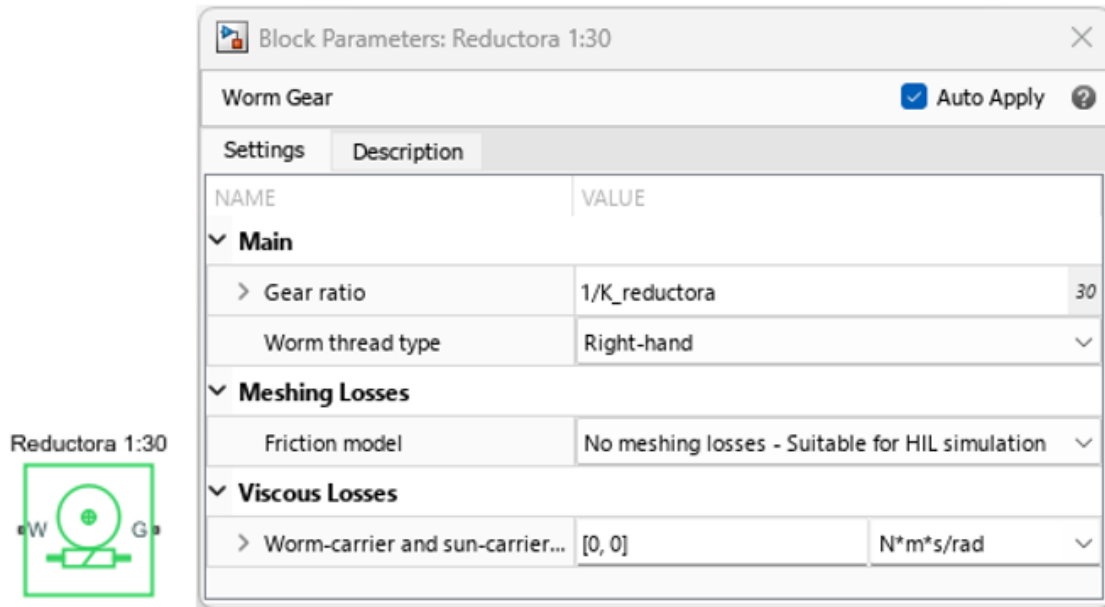


Figura 51: Bloque reductora 1:30 en Simscape.

La forma en la que se conecta la reductora al potenciómetro es la mostrada en la Figura 52.

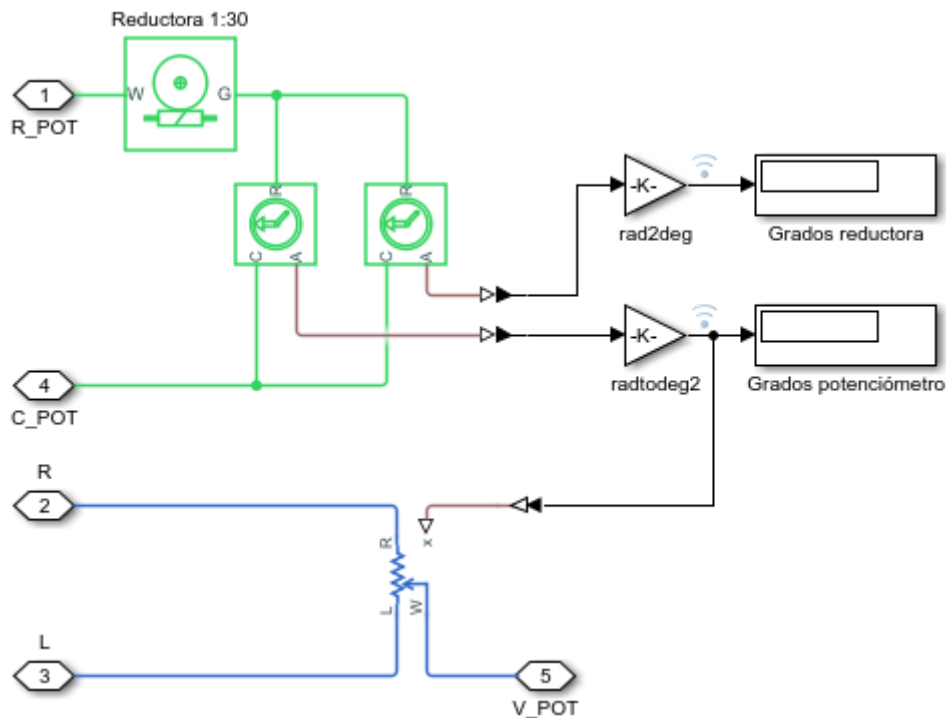


Figura 52: Esquema en Simscape del Captador potenciométrico.

Primero, el puerto W del bloque de la reductora se conecta al puerto R del motor de CC y, seguidamente, se añade un sensor ideal rotacional que mide la posición en radianes del eje de salida de la reductora (corona). Además, esta medida se reinicia cada 2π radianes, consiguiendo que el rango de medida sea de 0 a 2π radianes (Figura 53).

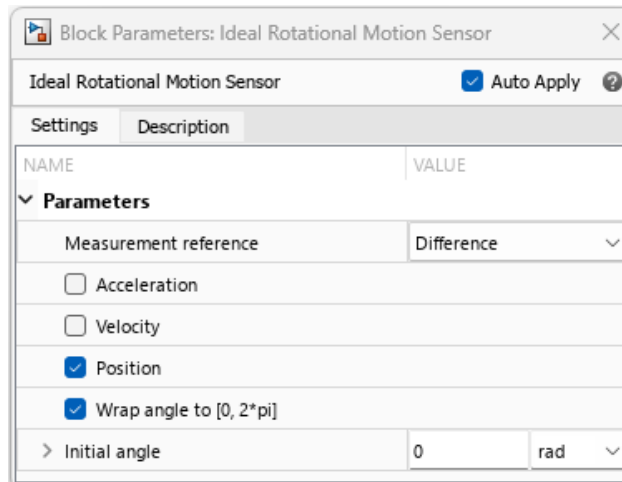


Figura 53: Configuración del sensor de rotación de la reductora.

A continuación, se incorpora una ganancia para convertir de radianes a grados centesimales, es decir, se multiplica la señal por $\frac{360}{2\pi}$, obteniendo así el giro en grados de la reductora. Si el eje de la reductora (corona) y el eje del potenciómetro estuviesen alineados y en fase, esta medida en grados sería la entrada al puerto x del potenciómetro. Sin embargo, puede existir un desfase originado por el proceso de montaje del potenciómetro a la maqueta, por lo que es necesario incluir un segundo sensor ideal rotacional para incluir el posible desfase entre ejes. La medida en grados de este segundo sensor es la que se introduce en el puerto x del potenciómetro.

Se crea un subsistema de estos elementos para una visión más compacta y limpia del esquema, llamado *Captador Potenciométrico*, mostrado en la Figura 54.

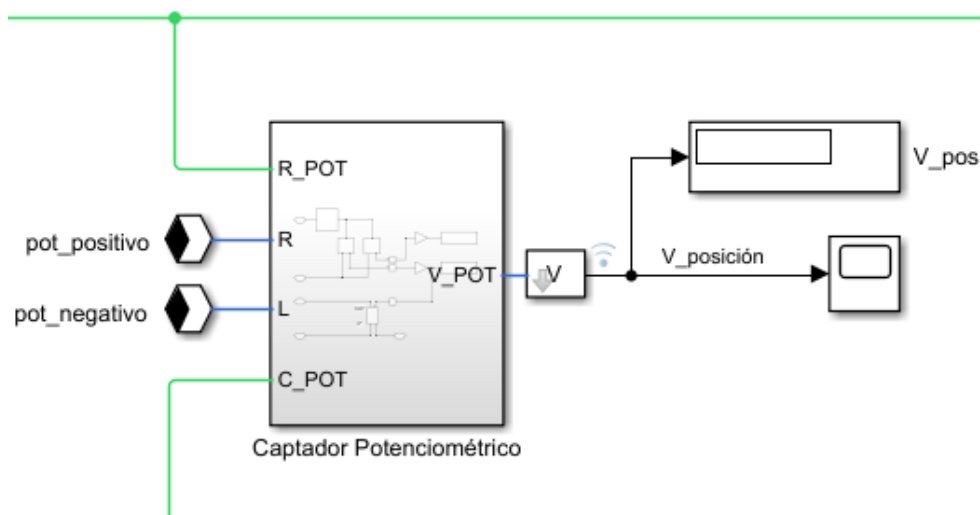


Figura 54: Esquema del módulo Captador potenciométrico.

4.4.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL CAPTADOR POTENCIOMÉTRICO Y DE LA REDUCTORA

Como principal característica a la hora de modelar el captador potenciométrico se tiene la no linealidad que este presenta. Como bien dice el manual Alecop [1], el potenciómetro tiene una rotación útil de $340^{\circ} \pm 4^{\circ}$, lo que quiere decir que tiene una zona muerta de $20^{\circ} \pm 4^{\circ}$.

Para medir esta zona muerta, se debe realizar un experimento donde se introduzca una señal de consigna constante al motor, se alimente el potenciómetro con una tensión de ± 10 V y se lea el valor de tensión del potenciómetro (hembrilla roja) utilizando la tarjeta de adquisición de datos. A continuación, se deberá calcular el valor del periodo T, es decir, lo que tarda el potenciómetro en realizar una revolución (360°). Además, se deberá medir el tiempo que tarda la tensión del potenciómetro en cambiar desde -10 V a +10 V. Por último, conocido el tiempo que tarda el potenciómetro en realizar una revolución y conocido el tiempo que tarda en cambiar de -10 V a +10 V, se calculará el valor en grados centesimales de la zona muerta.

Este experimento se puede realizar haciendo uso del osciloscopio presente en el laboratorio, al igual que con la tarjeta de adquisición de datos. Otra forma de obtener el valor de zona muerta sería midiendo manualmente con el multímetro el valor de resistencia en cada uno de los extremos del potenciómetro e identificando el cambio de valores rotando manualmente el eje del motor. Sin embargo, este método no sería tan preciso como los anteriores.

Como primer paso, se ha realizado la medida de la resistencia total del potenciómetro con ayuda del multímetro, obteniendo un valor de:

$$R_{total} = 9,77 \text{ k}\Omega$$

Para medir la zona muerta del potenciómetro, se ha realizado el experimento descrito anteriormente, donde se alimenta el potenciómetro con una tensión de ± 10 V y se lee el valor del potenciómetro (hembrilla roja) con la tarjeta de adquisición de datos tras aplicar un valor de consigna al motor de 5 V, obteniendo la gráfica de la Figura 55:

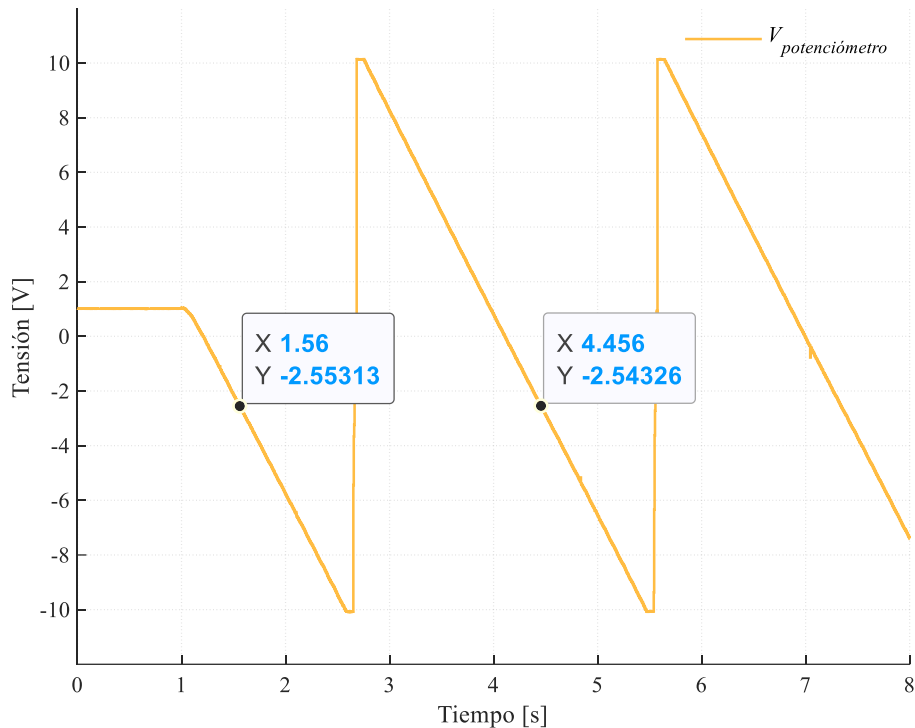


Figura 55: Salida del captador potenciométrico con una entrada de 5 V.

Como se puede observar, se han marcado dos *data tips* con sus correspondientes coordenadas para poder obtener el periodo, es decir, el tiempo que tarda el potenciómetro en realizar una vuelta (360°). La elección de estos puntos debe de ser de tal forma que la coordenada Y tenga aproximadamente el mismo valor en ambos puntos. Además, entre ellos debe estar la zona muerta del potenciómetro, para así poder tener una medición más precisa. El valor del período es:

$$T = 4,456 - 1,56 = 2,896 \text{ s}$$

Se ha realizado un aumento a la gráfica anterior (Figura 56) para poder observar con más detalle la zona muerta del potenciómetro. Para calcular los grados correspondientes a esta, se han fijado de nuevo dos *data tips*. Dado que la finalidad es calcular los grados centesimales correspondientes a la zona muerta, la elección de estos *data tips* no es arbitraria. El correspondiente a -10,0796 V se sitúa justo cuando la pendiente de voltaje es cero. Al igual que con el segundo punto (10,133 V), este se sitúa justo cuando la pendiente de voltaje deja de ser 0. Por tanto, el tiempo que tarda en cambiar de -10 V a +10 V se obtiene restando el valor de la coordenada X de cada *data tip*, resultando un tiempo de:

$$T_{ZM} = 2,744 - 2,6 = 0,144 \text{ s.}$$

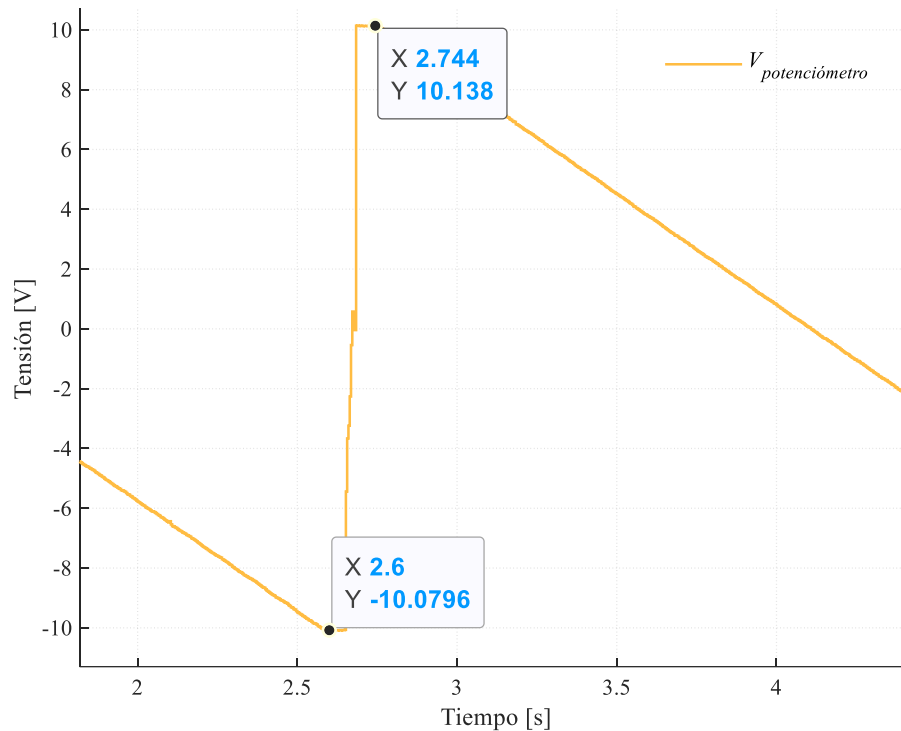


Figura 56: Zona muerta del potenciómetro.

Por tanto, realizando la correspondencia de 0,144 s a grados se obtiene:

$$ZM_{pot} = \left(2,896 \frac{s}{360^\circ} \cdot \frac{1}{0,144 s} \right)^{-1} = 17,9^\circ \quad (49)$$

En (50) se convierte el valor de velocidad a rpm:

$$w_{pot} = \left(2,896 \frac{s}{rev} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 s} \right)^{-1} = 20,718 \text{ rpm} \quad (50)$$

Dado que el captador potenciométrico está tras la reductora, su velocidad se debe multiplicar por 30 para obtener la velocidad del eje motor:

$$w_m = 20,718 \cdot 30 = 621,54 \text{ rpm} \quad (51)$$

Este mismo experimento se ha realizado haciendo uso del osciloscopio como elemento de medición, obteniendo **2,92 s por vuelta** (360°). En la Figura 57 se puede observar la zona muerta del potenciómetro, que corresponde a **0,14 s**.

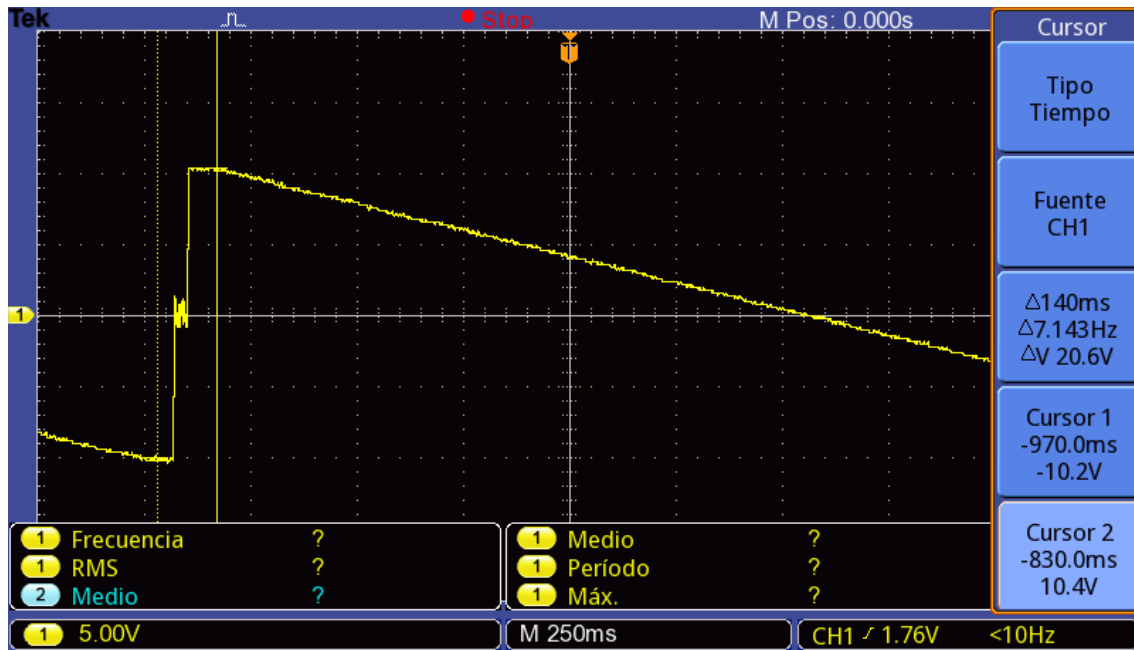


Figura 57: Zona muerta del potenciómetro medida con el osciloscopio.

De igual manera, se calcula los grados correspondientes:

$$ZM_{pot_2} = \left(2,92 \frac{s}{360^\circ} \cdot \frac{1}{0,14 s} \right)^{-1} = 17,26^\circ \quad (52)$$

El resultado obtenido es cercano al calculado con la tarjeta de adquisición de datos, por lo que se corrobora la correcta realización de estos y la validación del resultado. Se decide escoger este último resultado como valor de zona muerta.

Cabe resaltar que para que la medida del potenciómetro tenga pendiente positiva y coincida con el sentido de giro del motor se debe conectar la alimentación del potenciómetro con polaridad invertida.

Una vez determinado el valor de la zona muerta, se procede a calcular el desfase angular entre el eje de la reductora y el potenciómetro. Determinar este desfase permite conocer si la zona muerta está centrada en 0° o no. Para ello, se alimenta el potenciómetro aplicando +10 V en el puerto R y -10 V en el puerto L. A continuación, se gira manualmente el eje del motor mientras se registra el voltaje de salida del potenciómetro. Cuando esta salida alcanza un valor de 0 V, se observa el ángulo marcado por la flecha roja, que en este caso es de 184° . Teóricamente, para una salida de 0 V el indicador debería señalar 180° , por lo que se deduce que existe un desfase de:

$$offset_{pot} = 4^\circ$$

Este desfase implica que, para conocer el ángulo real del potenciómetro, es necesario restar este desfase al ángulo de la reductora, antes de introducirlo en el puerto x del modelo del potenciómetro. Es por esto que se utiliza un segundo sensor ideal rotacional para incluir este desfase.

A partir de este análisis, se concluye que la zona muerta es simétrica y está centrada en 4° , abarcando un rango desde $-4,63^\circ$ hasta $12,63^\circ$. Este resultado no concuerda con lo indicado en [1], donde se afirma que la zona muerta se extiende de 340° a 360° .

4.5. MODELO DEL ENCODER INCREMENTAL

Para modelar el encoder incremental de la maqueta se ha utilizado el bloque predefinido de Simscape llamado “*Incremental Shaft Encoder*”. Según [1], las señales generadas por los sensores del encoder de la maqueta real son de tipo digital, teniendo como nivel alto 5 V y como nivel bajo 0 V. Además, este encoder genera 50 pulsos por revolución. Para verificar la amplitud del pulso, se ha realizado una medición con el osciloscopio, obteniéndose un pulso de 4 V.

Este bloque (Figura 58) se conecta a los puertos R y C del motor de CC. En su salida se obtienen las señales A y B, las cuales generan 50 pulsos por revolución con un desfase entre ellas que permite determinar el sentido de giro del motor. Además, se dispone de la señal Z, que genera un único pulso por revolución.

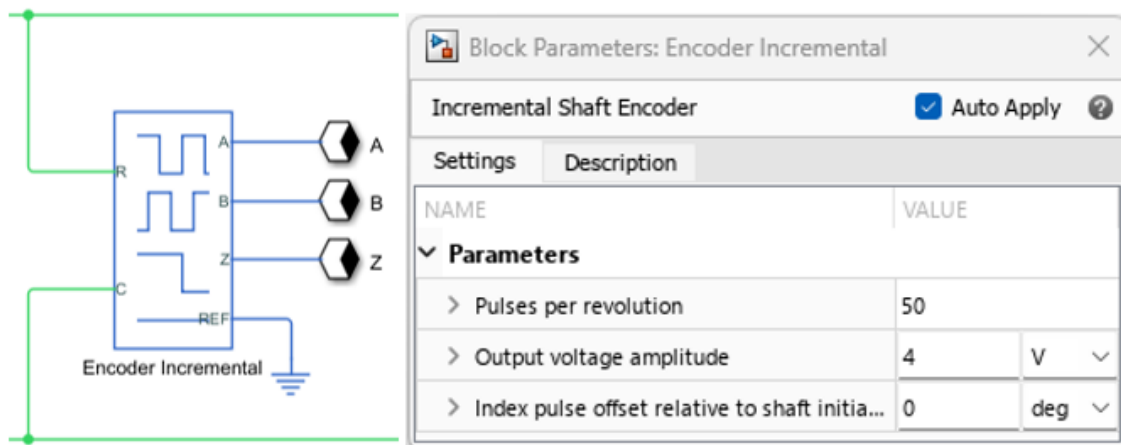


Figura 58: Bloque encoder incremental en Simscape.

4.6. MODELO DEL CAPTADOR DE VELOCIDAD: TACODINAMO

4.6.1. MODELO DEL CAPTADOR DE VELOCIDAD EN SIMSCAPE

La tacodinamo es un generador de CC acoplado al eje del motor con el propósito de medir su velocidad angular. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, no es posible desvincular la tacodinamo del eje del motor para así obtener sus parámetros característicos de una forma más sencilla.

No obstante, se ha optado por una aproximación en la que los parámetros de inercia del motor incluyen los asociados a la tacodinamo, además de su fricción. Por tanto, se ha decidido utilizar el bloque de Simscape llamado "*ideal rotational motion sensor*" (Figura 59) con el propósito de registrar la velocidad angular del motor. Posteriormente, se efectúa la conversión de esta velocidad angular a voltios a través de un factor de conversión específico de la tacodinamo.

Por otra parte, cabe destacar que el fabricante menciona en el manual de la maqueta que no es necesario introducir ningún parámetro asociado al desgaste de las escobillas de la tacodinamo, pues son de larga duración.

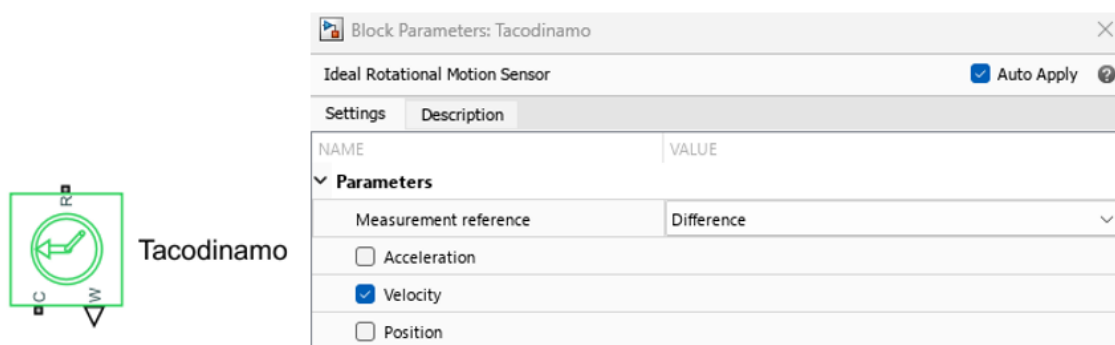


Figura 59: Bloque tacodinamo en Simscape.

La salida de este bloque es en $\frac{rad}{s}$, para obtener *rpm* se multiplica esta señal por una ganancia K de valor $\frac{60}{2\pi}$. Para obtener una señal de voltaje a partir de la señal en *rpm*, se debe multiplicar por el factor de conversión de la tacodinamo.

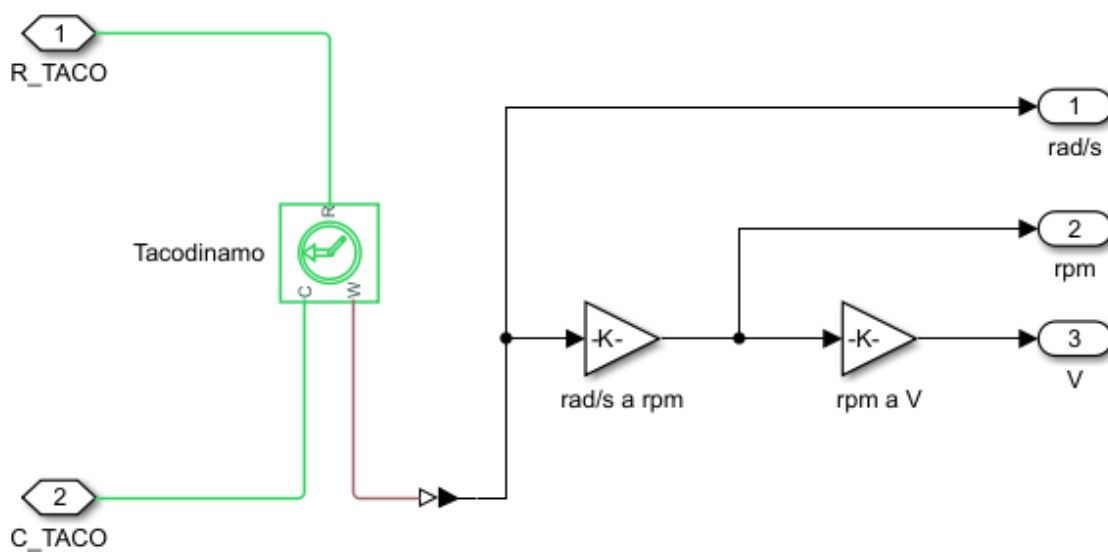


Figura 60: Esquema del módulo Captador de velocidad: Tacodinamo.

En la Figura 61, se muestra el subsistema que engloba el anterior esquema. Se añaden *displays* para cada una de las unidades de medida de velocidad. Se observa también que este bloque se conecta a los terminales R y C del motor.

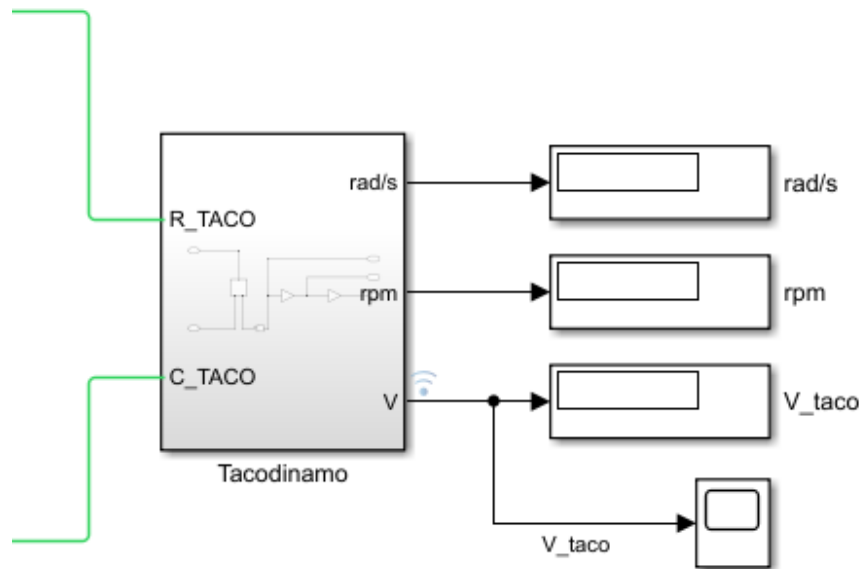


Figura 61: Subsistema de la tacodinamo en Simscape.

4.6.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL CAPTADOR DE VELOCIDAD

El factor de conversión de la tacodinamo es de $\pm 7 \frac{mV}{rpm}$ según [1] pero, esto es un valor que establece el fabricante para todas las maquetas MV-541 y puede que no sea del todo acertado. Esto provoca que, al realizar la conversión de voltaje a *rpm* haciendo uso de este factor, se tenga un valor erróneo de la velocidad medida.

Debido a esto, es buena práctica realizar una comprobación utilizando un elemento de medida de velocidad más preciso, como lo puede ser el captador potenciométrico o el encoder incremental. Para este experimento se escoge el encoder incremental.

Se procede a introducir una consigna al motor, tras su estabilización, se realiza la medición con el osciloscopio o con la tarjeta de adquisición de datos de la señal de salida I_0 del encoder incremental, obteniendo un pulso por revolución. Posteriormente, se calcula el tiempo transcurrido entre dos pulsos y se obtiene el valor del periodo T , el cual se deberá convertir a *rpm*. Paralelamente, se mide el valor de la señal de salida en voltios de la tacodinamo y se convierte a *rpm* con el factor de conversión propio de la tacodinamo, $\pm 7 \frac{mV}{rpm}$. Si las dos medidas de velocidad obtenidas no son iguales, significa que el factor de conversión de la tacodinamo no es correcto, por lo que se calculará el nuevo factor de conversión utilizando como referencia la medida de velocidad obtenida con el encoder incremental.

Como resumen, tras introducir una consigna de 5 V al *driver* y conseguir la estabilización del motor, se realiza la medición con la tarjeta de adquisición de datos de la

señal de salida I_0 del encoder incremental y de la señal de voltaje proporcionada por la tacodinamo (Figura 62).

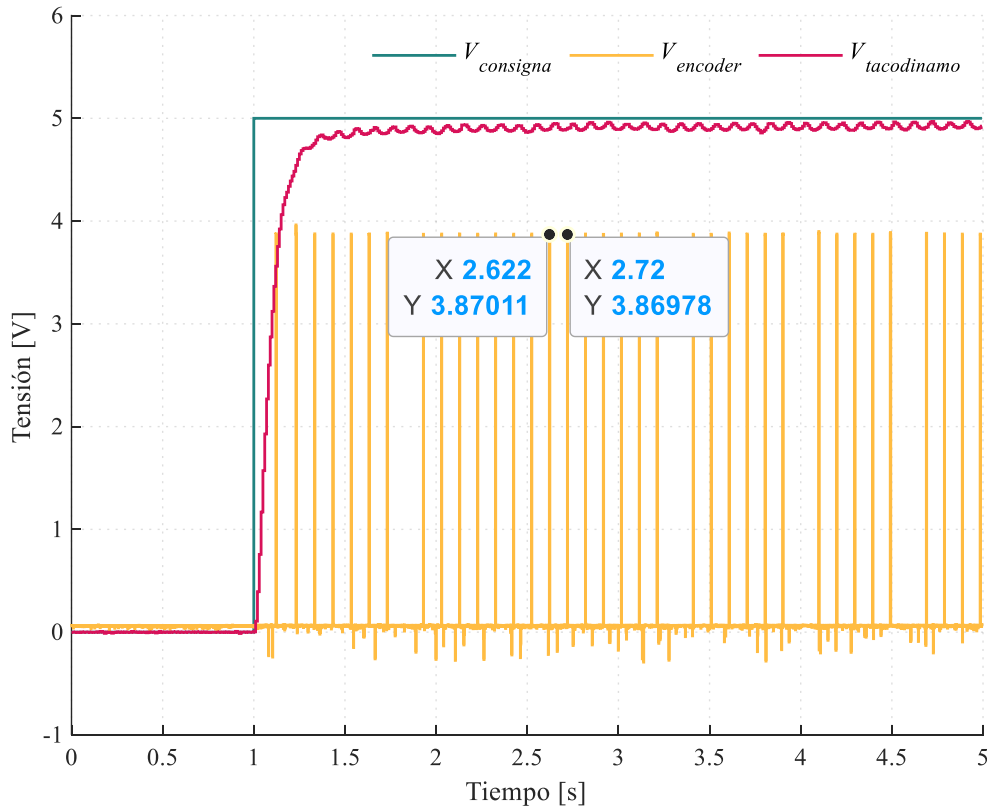


Figura 62: Período de la señal del encoder incremental (I_0) para una entrada de 5 V.

Marcando dos *data tips* entre dos impulsos sucesivos, se obtiene un período de:

$$T = 2,72 - 2,622 = 0,098 \text{ s}$$

O, dicho de otro modo, una vuelta cada 0,098 segundos. En (53) se convierte el valor obtenido a *rpm*:

$$w_{enco} = \left(0,098 \frac{\text{s}}{\text{rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)^{-1} = 612,24 \text{ rpm} \quad (53)$$

Se calcula el valor medio de tensión de la señal de la tacodinamo tal y como se muestra en el anexo A.4. Código Matlab - Valor Medio de Voltaje, dando como resultado **4,91 V**. Este valor se convierte a *rpm* utilizando el factor de conversión de la tacodinamo dada por el manual [1]:

$$w_{taco} = 4,91 V \cdot \frac{1 rpm}{7 mV} = 701,43 rpm \quad (54)$$

Se observa que el valor calculado con la tacodinamo difiere en 89,19 rpm respecto al calculado con el encoder incremental. Por lo que se concluye que el valor del factor de conversión inicial de la tacodinamo está desajustado. Para que el valor de velocidad en rpm coincida con el calculado con el encoder incremental, es necesario que el valor del factor de conversión sea el siguiente:

$$k_{taco} = 4,91 V \cdot \frac{1}{612,24 rpm} = 8,02 \frac{mV}{rpm} \quad (55)$$

En este apartado, tan sólo se ha calculado el nuevo valor de conversión k_{taco} para un valor de consigna. Para obtener un resultado más acertado, se ha realizado el mismo procedimiento hasta 9 veces, aplicando al motor una señal de escalones sucesivos desde 2 V hasta 10 V. La gráfica correspondiente y los cálculos realizados se muestran en el anexo A.3. Cálculo del Factor de Conversión de la Tacodinamo. Como resultado, el valor promedio de la constante de conversión de la tacodinamo es:

$$k_{taco_m} = 8,07 \frac{mV}{rpm}$$

4.7. MODELADO DE LA VIBRACIÓN EN LA VELOCIDAD

A lo largo de los experimentos descritos en los apartados previos, se puede observar que la velocidad del motor presenta una vibración u ondulación. Este apartado se centra en el análisis de dicho fenómeno y en su modelado.

4.7.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Tras introducir una entrada tipo escalón al motor, la señal de la tacodinamo, que representa la velocidad del motor, presenta una ondulación. Para visualizar este fenómeno con mayor detalle, se presenta la Figura 63.

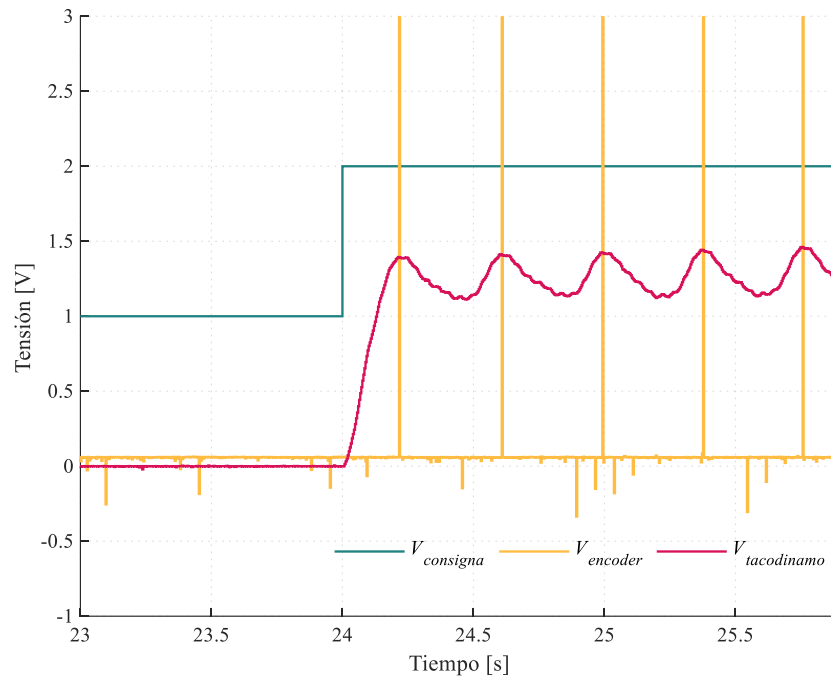


Figura 63: Ondulación de la señal de la tacodinamo.

Se puede observar que, la señal de pulso que proporciona el encoder incremental tiene el mismo período que la ondulación de la señal de voltaje de la tacodinamo. Esto quiere decir que, dicha ondulación se da una vez por cada revolución completa del motor, pues el encoder proporciona un pulso por vuelta. Es importante destacar que, la señal de la tacodinamo también se ha medido con el osciloscopio y se ha observado la misma vibración.

Para estudiar este comportamiento más en profundidad, se ha introducido una señal de escalones sucesivos, obteniendo la Figura 64.

Gracias a este experimento, se consigue conocer el comportamiento de esta vibración. Se observa que la frecuencia de esta ondulación cambia al variar el valor de la consigna pues, al aumentar la tensión de consigna, aumenta la velocidad del motor y, por consiguiente, la frecuencia de la señal de vibración. Además, la amplitud de esta vibración disminuye conforme aumenta el valor de la consigna.

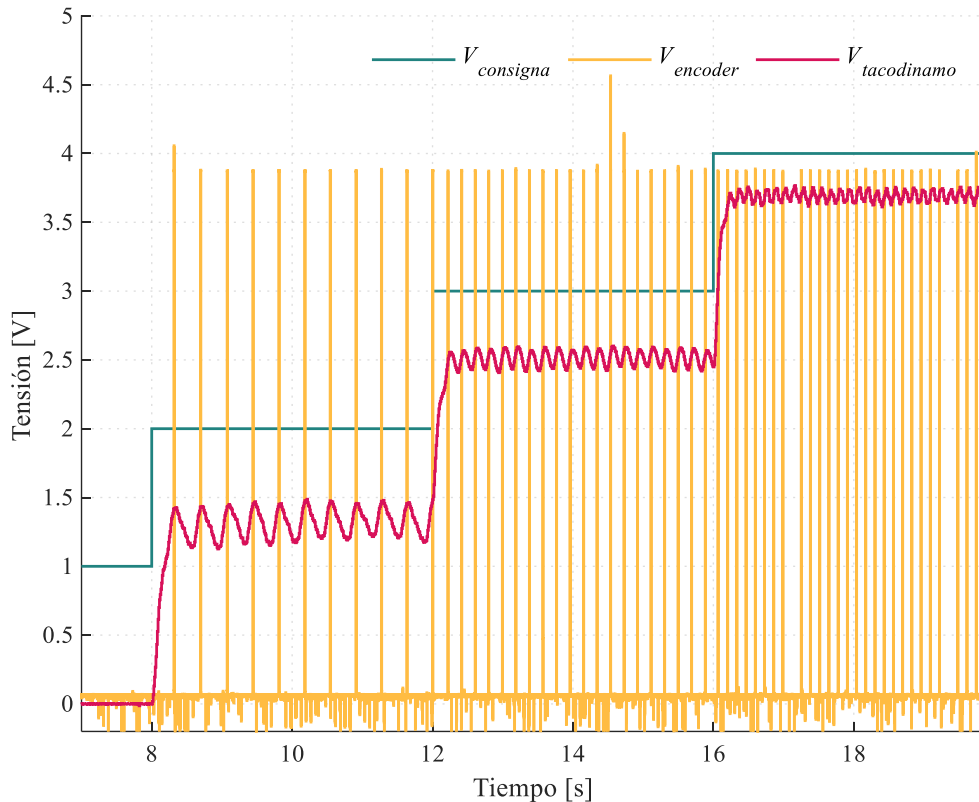


Figura 64: Fenómeno de ondulación para distintos valores de consigna.

Con este análisis, se comprueba que esta vibración no es característica de la señal que genera la tacodinamo (Figura 34) pues, en una sola vuelta, se produciría un mayor número de oscilaciones en función del número de espiras que tenga el rotor de la tacodinamo, y en este caso, dicho número es mayor que uno. Por tanto, se llega a la conclusión que este fenómeno vibratorio es causado por problemas de naturaleza mecánica. Estos problemas pueden ser, desalineamiento, desequilibrio o fallos en rodamientos, entre otros.

En la ingeniería mecánica, existe una disciplina fundamental que es el análisis de vibraciones en máquinas rotativas, destinada a asegurar la eficiencia, fiabilidad y durabilidad de equipos rotativos. Mediante técnicas avanzadas de monitoreo y análisis de vibraciones, es posible descomponer la señal de vibración en sus componentes frecuenciales, identificando órdenes específicos y patrones de resonancia que revelan el estado de salud de la máquina.

Esta vibración puede darse por varios factores y su estudio no está contemplado en este trabajo, por lo que no se modelará el origen físico de esta vibración. Sin embargo, se decide modelarla añadiendo una fuente ideal de velocidad angular controlada para modificar la velocidad del motor.

Para facilitar la comprensión, se establece una analogía eléctrica. La fuente de velocidad angular se asemeja a una fuente de tensión, cuya magnitud se suma cuando las fuentes están dispuestas en serie. De manera similar, la fuente de torque es equivalente a una fuente de corriente, y su magnitud se suma cuando están en paralelo. Además, el

sensor de velocidad se conecta en paralelo, al igual que un voltímetro, mientras que el sensor de torque se dispone en serie, como un amperímetro. Un ejemplo claro es cuando se requiere modelar ruido eléctrico, para ello se inserta en serie una fuente de tensión sinusoidal. Por tanto, para modelar esta vibración en velocidad se inserta en serie una fuente de velocidad ideal.

Cabe destacar que se ha intentado modelar la vibración utilizando diferentes bloques de la librería de Simscape, pero los resultados obtenidos no han sido satisfactorios debido a la falta de parámetros característicos que requería cada bloque.

4.7.2. MODELADO DE LA VIBRACIÓN

Para poder modelar este comportamiento, se necesita conocer la variación de la amplitud de la vibración de la señal de la tacodinamo. Para ello, se mide el voltaje pico a pico (V_{pp}) para cada valor de consigna. En la Tabla 5 se recopilan los valores obtenidos:

DATOS OBTENIDOS AMPLITUD VIBRACIÓN				
<i>Consigna (V)</i>	V_{mtaco} (V)	V_{mtaco} (rad/s)	V_{pp} (V)	V_{pp} (rad/s)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,30	16,86	0,287	3,72
3	2,50	32,42	0,160	2,08
4	3,70	47,99	0,123	1,60
5	4,95	64,20	0,065	0,84
6	6,20	80,41	0,050	0,65
7	7,45	96,62	0,043	0,56
8	8,70	112,83	0,033	0,43
9	9,50	123,21	0,033	0,43
10	9,65	125,15	0,031	0,40

Tabla 5: Datos obtenidos de la amplitud de la vibración de la señal de la tacodinamo.

La amplitud de la vibración se ha convertido a rad/s para facilitar su implementación posterior en Simscape.

Para visualizar cómo es la relación de disminución de la vibración frente a los valores de consigna, se realiza la gráfica que se muestra en la Figura 65. Se observa que la amplitud de la vibración va disminuyendo con un carácter aparentemente exponencial, hasta llegar a un límite de 0,4 rad/s aproximadamente.

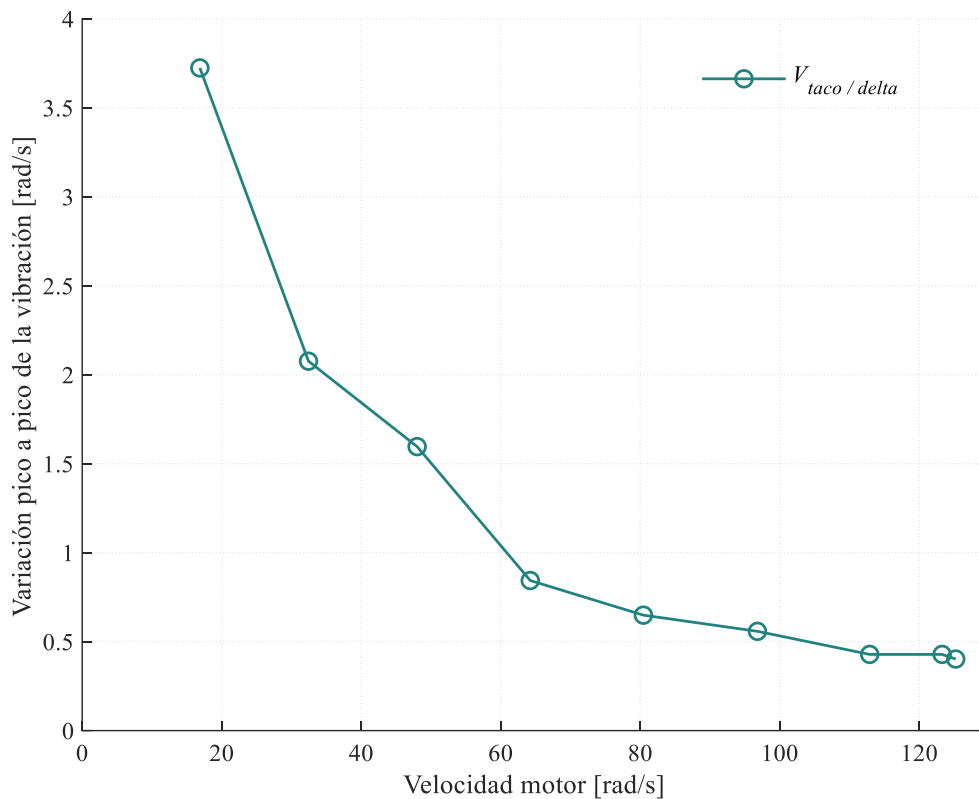


Figura 65: Relación entre la velocidad del motor y la vibración de la tacodinamo.

Para poder modelar la relación de disminución de la amplitud de la vibración, se realiza el ajuste de los datos variación pico-pico (rad/s) y velocidad del motor (rad/s) utilizando tres modelos matemáticos diferentes:

- Un modelo exponencial decreciente

$$y = a \cdot e^{-bx}$$

- Un modelo de potencia

$$y = a \cdot x^{-b}$$

- Un modelo logarítmico

$$y = a \cdot \log(x) + b$$

Donde a y b son los parámetros del modelo.

Seguidamente, para cada modelo, se calcula el error cuadrático medio (MSE) para saber cuál de ellos se aproxima mejor a los datos experimentales. Se define como:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Donde, y_i son los datos originales y \hat{y}_i son los valores ajustados.

Para obtener los parámetros de cada modelo, se ha realizado el código Matlab que se muestra en el anexo A.5. Código Matlab - Generación Gráfica Amplitud Vibración. También se muestra cómo se generan la gráfica de la Figura 65 y la gráfica comparativa de la Figura 66, la cual muestra los datos originales junto con las curvas ajustadas correspondientes a los tres modelos

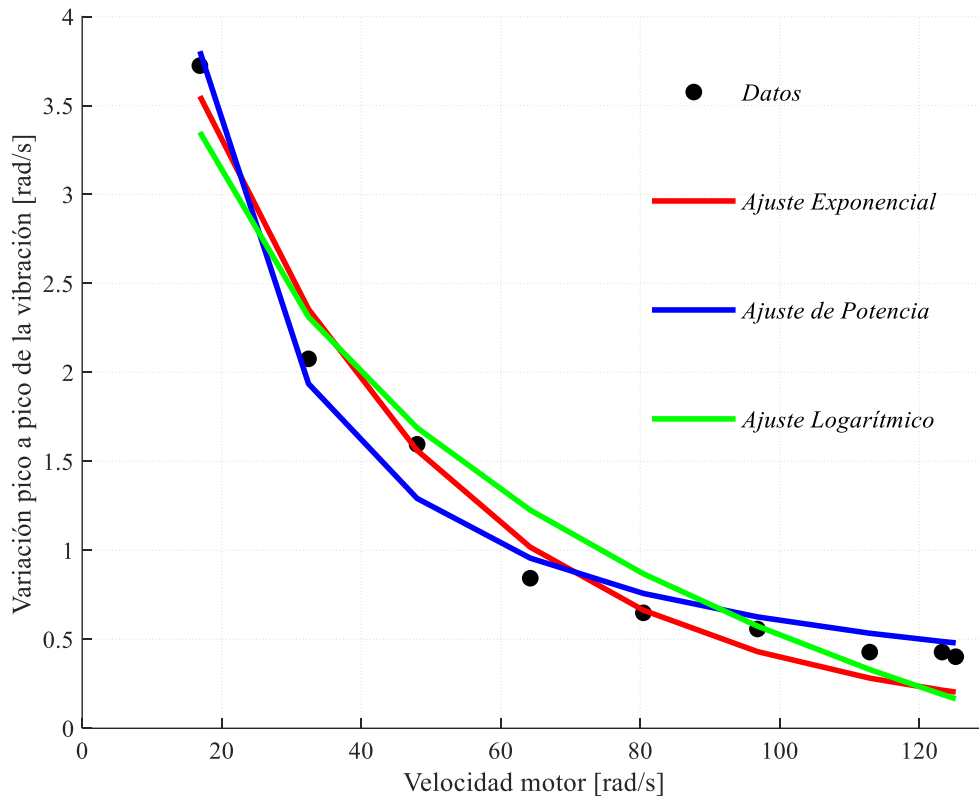


Figura 66: Comparación de los datos originales con los ajustes de los tres modelos.

Como resumen, en la Tabla 6 se recopilan los datos obtenidos correspondientes a los modelos matemáticos.

AJUSTE DE DATOS DE VIBRACIÓN			
Tipo de Ajuste	a	b	MSE
Exponencial	5,5449	0,0264	0,02912
Potencia	70,434	1,0329	0,01875
Logarítmico	-1,5888	7,8396	0,05786

Tabla 6: Parámetros y MSE de los tres modelos matemáticos.

Dado que el modelo de potencia es el que menor error cuadrático medio presenta, será el elegido para implementar el modelado de la vibración. Sin embargo, existe un bloque llamado “*I-D Lookup Table*” (Figura 67) que realiza una búsqueda en una tabla unidimensional para interpolar o extrapolar valores, dependiendo de una entrada. Básicamente, permite mapear una entrada (x) a una salida (y) utilizando datos tabulados

predefinidos, lo que es útil para representar relaciones matemáticas o experimentales sin necesidad de ecuaciones complejas, como las descritas anteriormente.

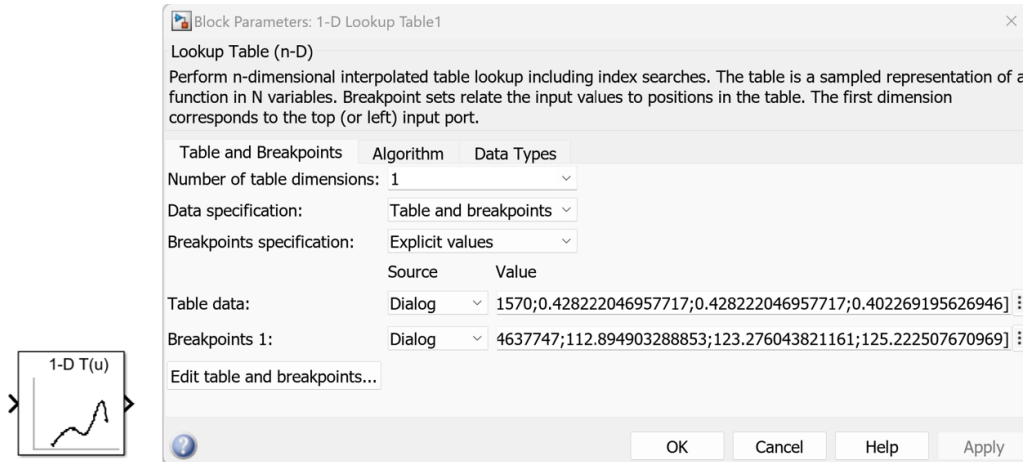


Figura 67: Bloque 1-D Lookup Table de Simulink.

Para este bloque se pueden escoger entre diferentes tipos de algoritmos. Para el método de extrapolación se ha escogido “*lineal*”, mientras que para el método de interpolación se ha optado por “*cubic spline*”, obteniendo una curva suavizada que atraviesa cada uno de los puntos definidos.

Una vez establecidos los pasos para modelar la amplitud de la vibración en función de la velocidad, se procede a definir los pasos necesarios para modelar la variación de la frecuencia. Para ello, se utiliza el bloque “*Sine Wave*”, cuya salida se rige por:

$$O(t) = Amp \cdot \sin(Freq \cdot t + Phase) + Bias \quad (56)$$

El valor de amplitud (*Amp*) se establece en 1, ya que será ajustado según la variación de amplitud de la vibración descrita previamente. De igual forma, el valor de frecuencia (*Freq*) se establece en 1. Por otro lado, el término de tiempo (*t*) será el ángulo de rotación del eje del motor, definido en un rango de 0 a 2π radianes, obteniendo que una vuelta completa del eje equivale a un ciclo completo de la señal senoidal $O(t)$. Los valores de *Phase* y *Bias* son cero.

Todos los pasos descritos previamente se implementan en Simscape, obteniendo el diagrama de la Figura 68. Primeramente, se observa que se utiliza el bloque “*Ideal Rotational Motion Sensor*” para medir la velocidad y la posición del eje motor. La señal de posición se introduce en el bloque “*Sine Wave*” para obtener la frecuencia variable. La señal de velocidad se introduce en el bloque “*1-D Lookup Table*” para obtener la amplitud variable. Dado que esta amplitud es pico a pico, se tiene que dividir entre dos. El bloque de saturación sirve para asegurar que la velocidad está en un rango entre 17 y 125 rad/s.

Posteriormente, estas señales se multiplican y se introducen en el bloque “*Ideal Angular Velocity Source*”, que es el encargado de sumar esta vibración a la velocidad del motor.

Señalar que se ha añadido un bloque “*Memory*” para romper el bucle algebraico generado debido a la dependencia directa entre la entrada y la salida. Este bloque introduce un retraso mínimo en el cálculo, permitiendo al *solver* resolver las ecuaciones de manera estable. El bucle algebraico se produce porque el *solver* de Simulink necesita calcular simultáneamente la entrada y la salida, lo que no es posible sin un retraso o ajuste.

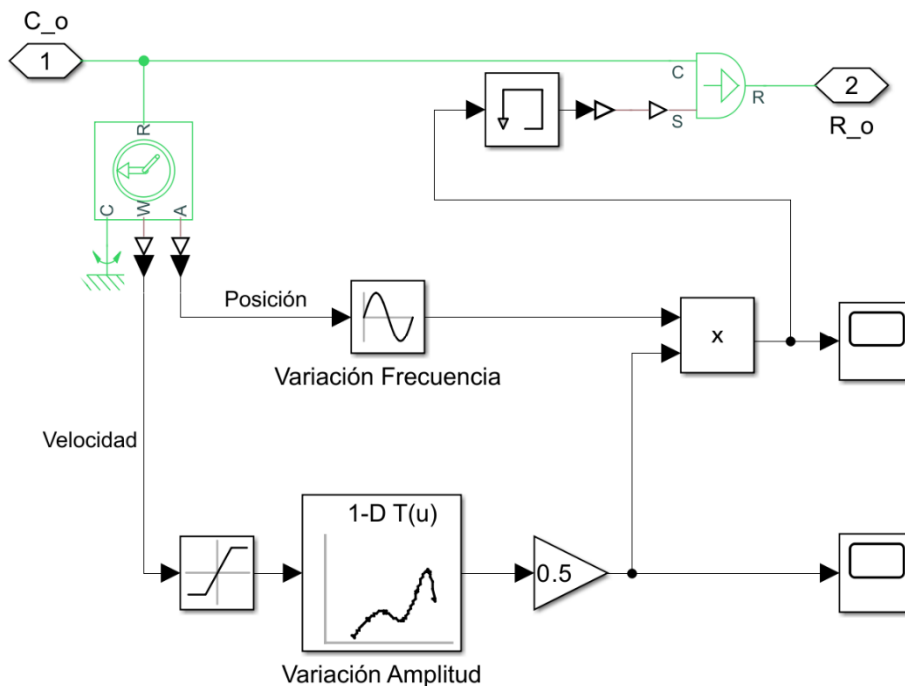


Figura 68: Modelado de la vibración en la velocidad en Simscape.

Al esquema anterior se incorporan las opciones de ajuste de potencia y exponencial, lo que permite seleccionar entre ambos métodos según sea necesario. Quedando el esquema de la Figura 69.

Como dato adicional, este fenómeno de vibración se observa, de manera general, en todos los motores del laboratorio.

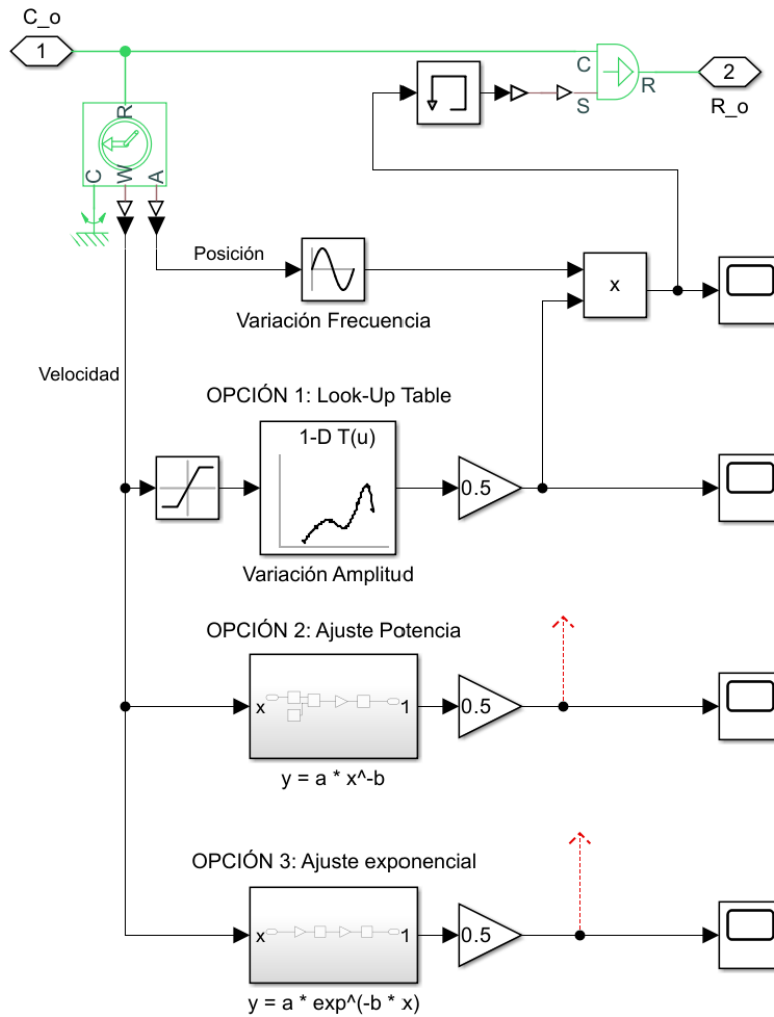


Figura 69: Modelado de la vibración en la velocidad para diferentes ajustes.

En este apartado, se crea un subsistema que encapsula el esquema modelado. En la Figura 70 se presenta la disposición de dicho subsistema, llamado “Vibración”.

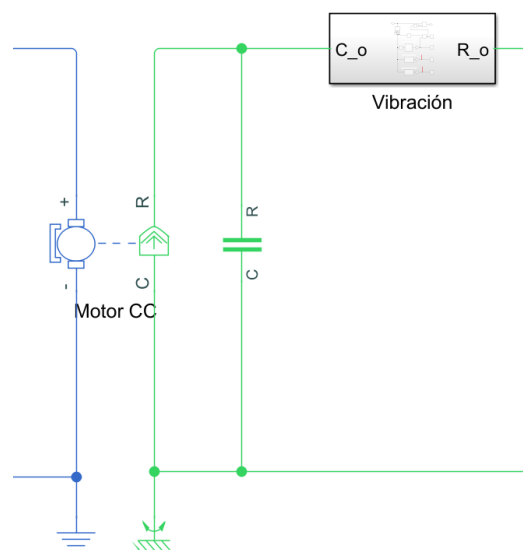


Figura 70: Disposición del bloque de vibración en el sistema.

4.8. MODELO DE LA MAQUETA

En este apartado se muestra el esquema final del sistema realizado en Simscape. Se han utilizado etiquetas de conexión para hacer conexiones virtuales entre dos bloques sin necesidad de utilizar líneas físicas, con la finalidad de eliminar el desorden y obtener un esquema más limpio y visual. Estas etiquetas tienen forma hexagonal.

En la Figura 71, las etiquetas $M_positivo$ y $M_Negativo$ corresponden a la alimentación del motor. De igual forma ocurre para el captador potenciométrico con las etiquetas $pot_positivo$ y $pot_negativo$. Por último, las etiquetas A, B y Z se conectan al módulo de control del encoder, explicado más adelante.

Cabe destacar que pueden crearse más señales de las que aparecen, para realizar otro tipo de conexiones entre elementos. En particular, las etiquetas "Goto" y "From" resultan especialmente útiles para establecer las conexiones del control de posición y velocidad.

MAQUETA

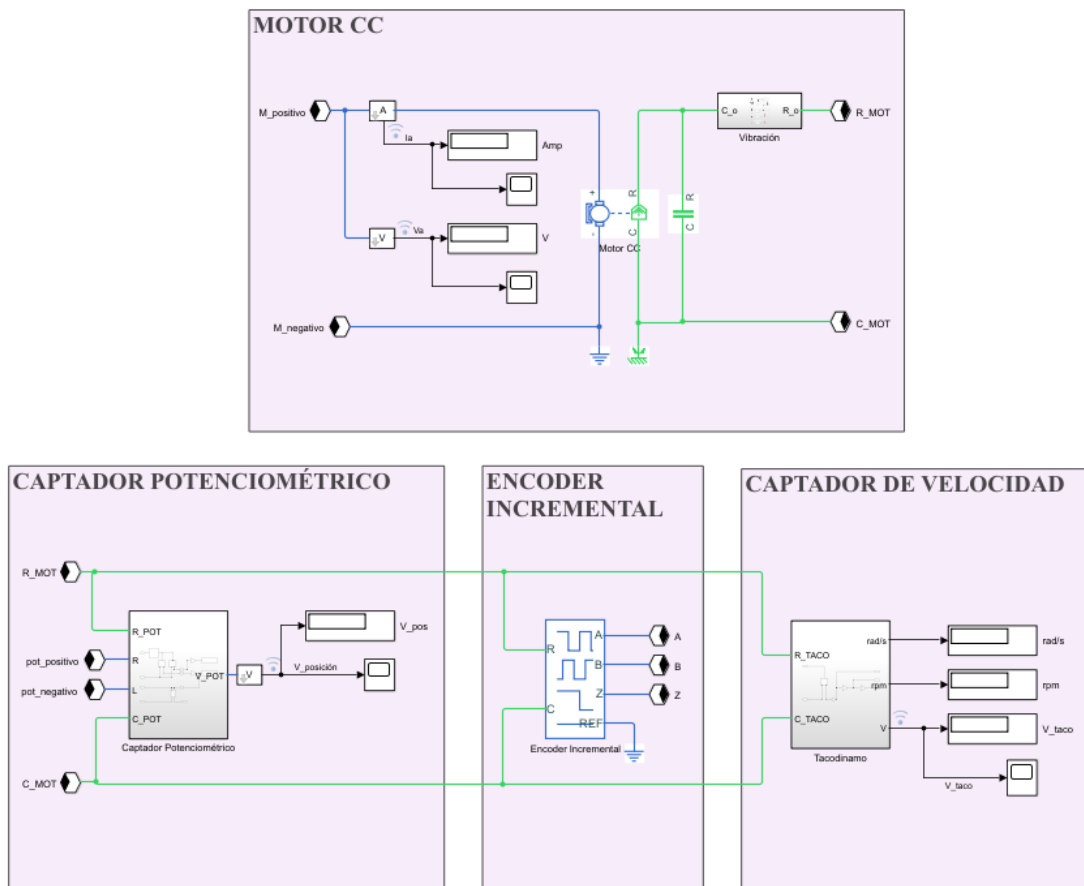


Figura 71: Modelo de la maqueta en Simscape.

4.9. MODELO DE LA MAQUETA CON SIMSCAPE MULTIBODY

En este apartado se realiza el modelado 3D de la maqueta haciendo uso del software Simscape Multibody y SolidWorks. Esto permite una mejor comprensión del trabajo realizado en apartados anteriores, pues permite visualizar el movimiento del motor CC junto con sus diferentes componentes.

4.9.1. SOLIDWORKS

Para realizar el modelado 3D de la maqueta, se utiliza la herramienta de diseño *SolidWorks*. Es posible realizar modelos con Simscape Multibody, pero debido a la complejidad de la maqueta, es más eficiente realizar el modelado en SolidWorks y luego exportarlo a Simscape Multibody.

Para realizar el modelo de cada componente, se toman medidas representativas para realizar el croquis correspondiente y después generar la pieza 3D. Como primer componente, se muestra el motor CC junto con el eje de rotación (Figura 72):

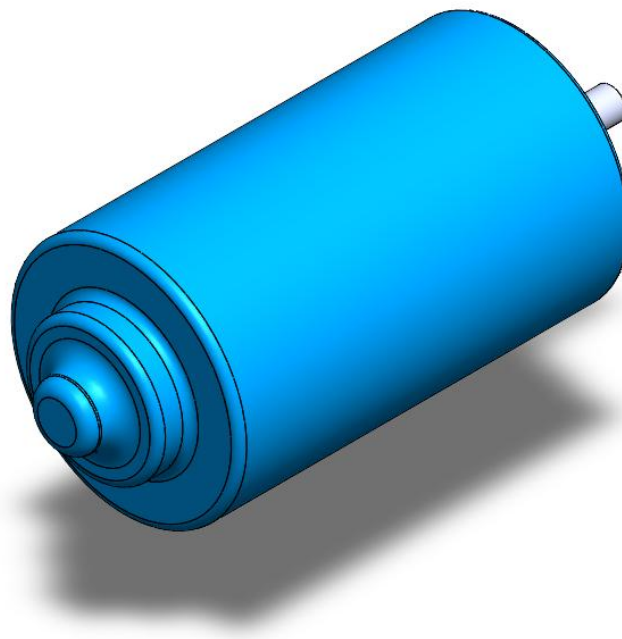


Figura 72: Modelo 3D del motor CC en SolidWorks.

Como segundo paso, se procede a modelar la reductora (Figura 73). Esta está compuesta por un tornillo sinfín – corona. Este conjunto de engranajes es un mecanismo utilizado para transferir movimiento y potencia entre ejes que se encuentran perpendiculares entre sí. Se debe mantener un índice de reducción de 1:30, por lo que la corona tiene 30 dientes. Además, se ha añadido el potenciómetro que está acoplado al eje de la corona.

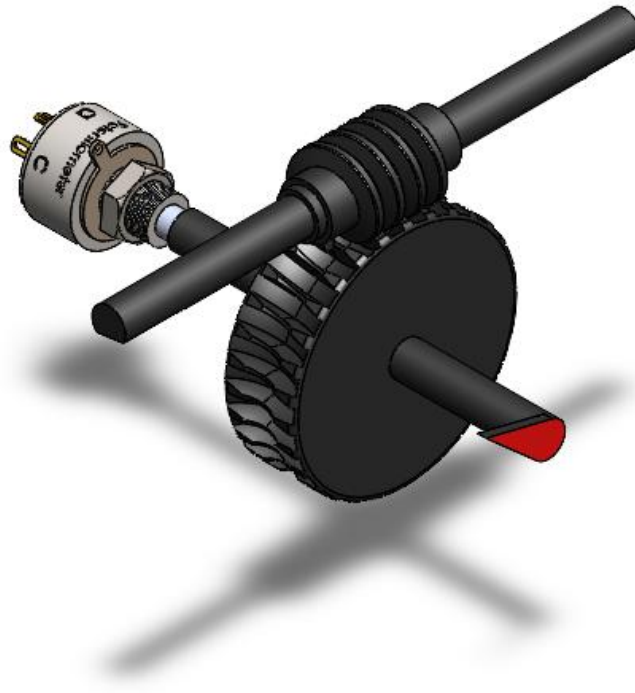


Figura 73: Modelo 3D del tornillo sinfin-corona en SolidWorks.

Para completar la reductora, se muestra el modelo de la carcasa que envuelve estos engranajes (Figura 74):

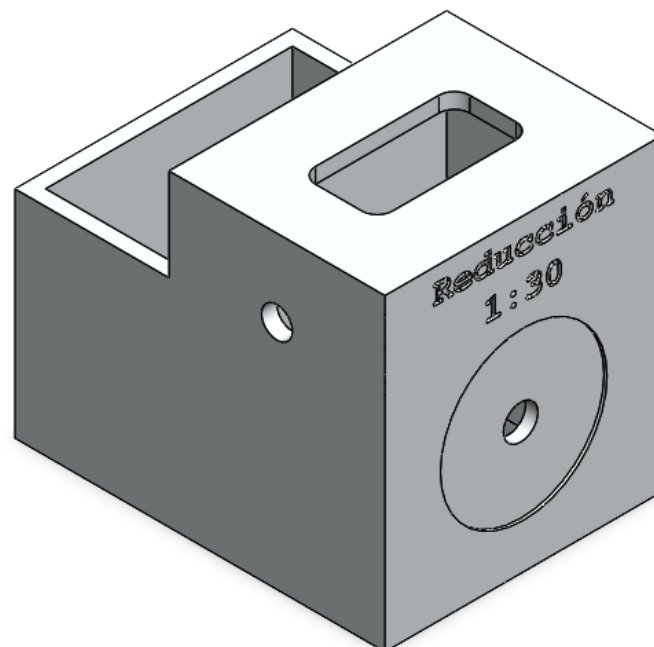


Figura 74: Modelo 3D de la carcasa-reductora en SolidWorks.

Como resultado final, cambiando la transparencia de la carcasa, se muestra el conjunto de la reductora (Figura 75):

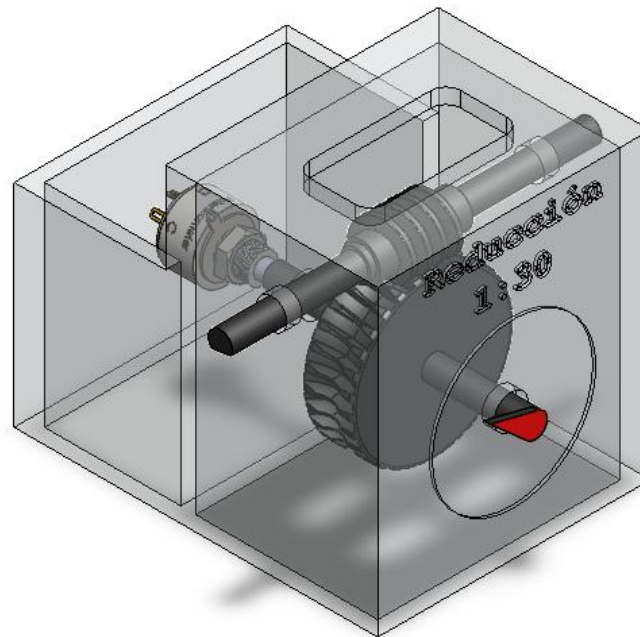


Figura 75: Modelo 3D del conjunto tornillo sinfín-corona en SolidWorks.

A continuación, se procede a modelar el encoder incremental y el encoder absoluto, manteniendo las dimensiones y número de segmentos de cada uno. Además, se añade una carcasa transparente, como en la maqueta real (Figura 76):

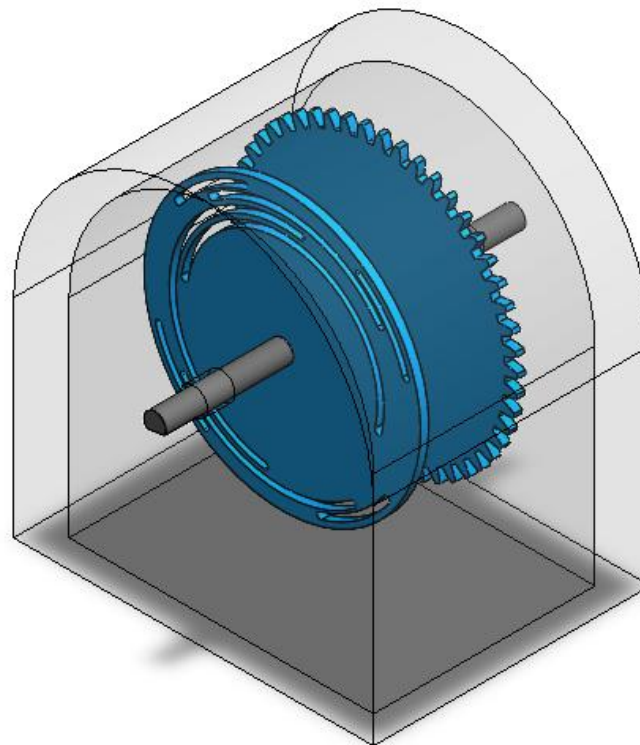


Figura 76: Modelo 3D del encoder absoluto e incremental en SolidWorks.

Como último elemento principal, se muestra el modelo de la tacodinamo junto al acople correspondiente con el eje de los encoders y la carcasa (Figura 77):

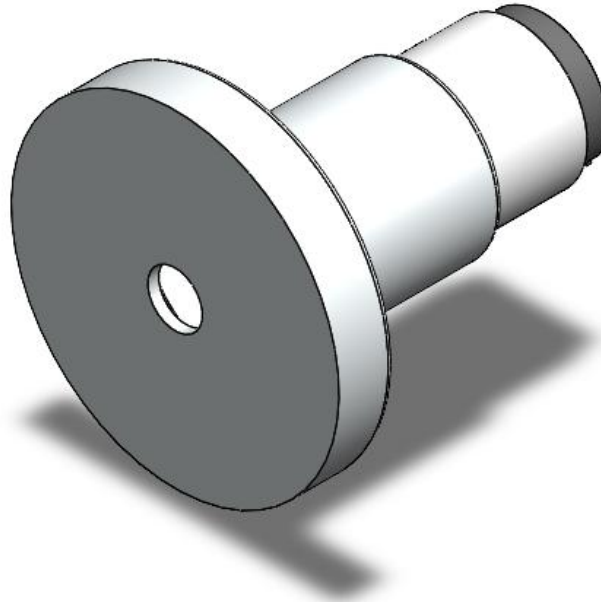


Figura 77: Modelo 3D de la tacodinamo en SolidWorks.

Como elemento secundario, se ha decidido modelar el acople flexible encargado de unir los diferentes ejes mecánicos, tal y como se muestra en la Figura 78:

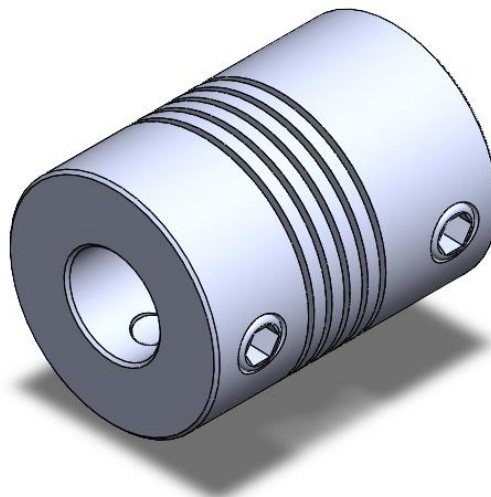


Figura 78: Modelo 3D del acople flexible en SolidWorks.

Por último, se añade el soporte del motor CC y la base sobre la que se anclan todos los componentes. Para ello, se crea un ensamblaje en el que se crean las relaciones de posición entre todos los elementos modelados, quedando el resultado final del sistema mostrado en la Figura 79:

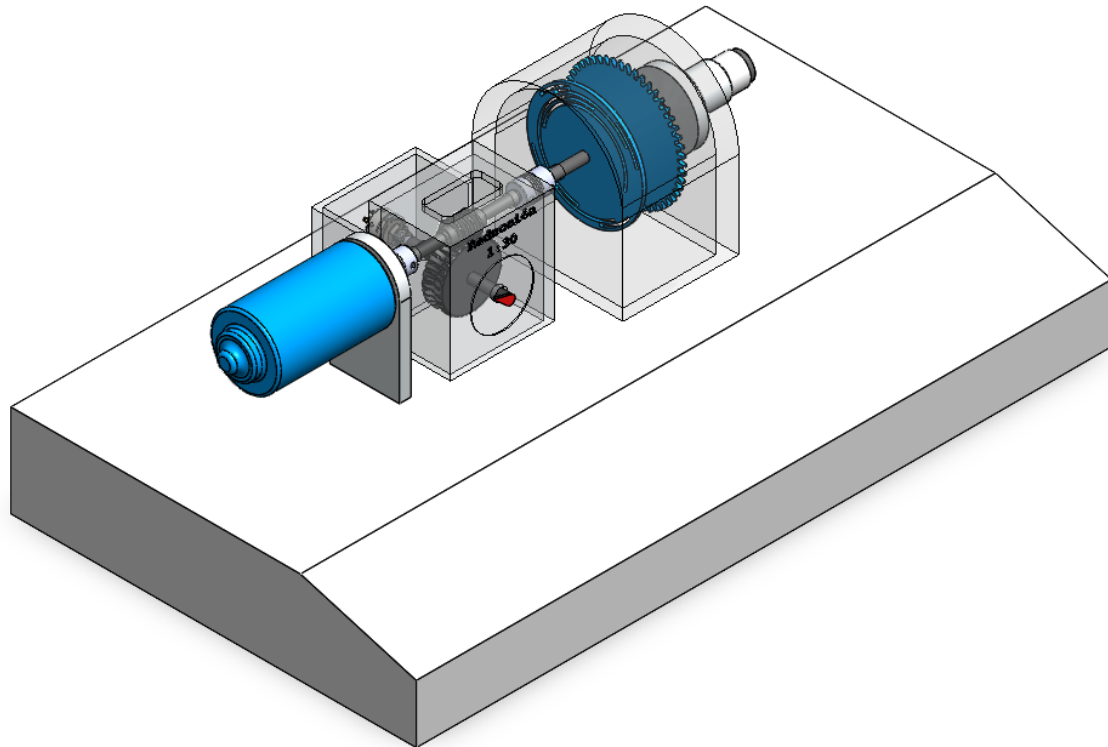


Figura 79: Modelo 3D de la maqueta en SolidWorks.

Una vez se tiene el ensamblaje de la maqueta, el siguiente paso es exportar el diseño a Simscape Multibody. Para ello, es necesario instalar “*Simscape Multibody Link Plugin*”. Este plugin permite migrar las características de los componentes a Simscape Multibody, como geometría, apariencia y restricciones de posición entre ellos.

Dentro del ensamblaje mostrado, se han creado tres subensamblajes, esto permite que la exportación a Multibody sea más sencilla, pues no se crearán tantos cuerpos como piezas se hayan diseñado. Esto permitirá una mejor visualización y comprensión del diagrama creado por el plugin. El primero de estos subensamblajes se compone de las partes fijas del sistema, como son: la base, el cuerpo y soporte del motor, la carcasa de la reductora y el potenciómetro, la carcasa de los encoders y el cuerpo de la tacodinamo (Figura 80).

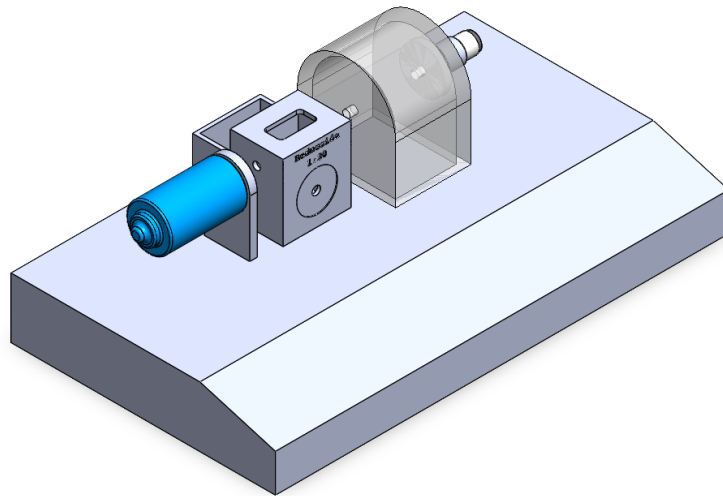


Figura 80: Subensamblaje nº1 para exportar a Simscape Multibody.

El segundo subensamblaje (Figura 81) comprende el eje del motor, el tornillo sin-fín y los encoders. Por último, el tercer subensamblaje (Figura 82) consta de la corona y el eje del potenciómetro.

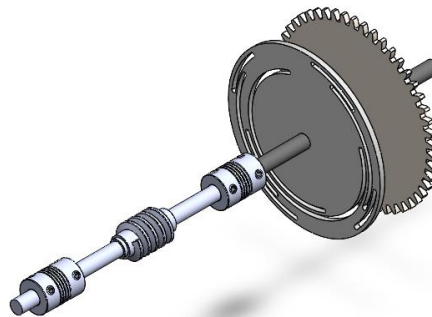


Figura 81: Subensamblaje nº2 para exportar a Simscape Multibody.

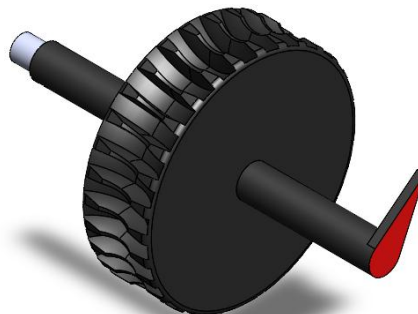


Figura 82: Subensamblaje nº3 para exportar a Simscape Multibody.

Una vez establecidos los tres subensamblajes, las relaciones de posición a realizar en SolidWorks son menores. Se han utilizado dos relaciones de tipo “concéntrica” para alinear los ejes con los taladros de la caja reductora y dos relaciones de tipo distancia para hacer coincidir los dientes de cada engranaje. Como última relación de posición se añade el movimiento relativo entre ambos engranajes. Para ello, se añade una relación de posición de tipo mecánica, en concreto, “engranaje”, donde se especifica el índice de reducción. También se debe asegurar que no existen interferencias entre engranajes. Esto se realiza con la herramienta “detección de interferencias” de SolidWorks. Una vez realizados estos pasos, se comprueba manualmente que el sistema se mueve adecuadamente.

4.9.2. SIMSCAPE MULTIBODY

Simscape Multibody es una herramienta dentro del entorno de MATLAB/Simulink diseñada para modelar, simular y analizar sistemas mecánicos complejos en un entorno visual e intuitivo. Se utiliza principalmente para representar sistemas multicuerpo (multibody) mediante la creación de modelos basados en diagramas de bloques, permitiendo simular el comportamiento dinámico de mecanismos articulados y otros dispositivos mecánicos.

Esta herramienta dispone de una serie de componentes básicos que permiten modelar sistemas mecánicos tridimensionales de manera intuitiva. Entre ellos, los cuerpos rígidos (Solid) sirven para definir las propiedades físicas de los elementos, como la masa, el momento de inercia y la geometría. Las juntas mecánicas (Joints) permiten especificar los grados de libertad entre los cuerpos, siendo los diferentes tipos revoluta, prismática o esférica. Además, los sensores y actuadores hacen más fácil la medición de variables, como posición, velocidad y fuerza. Otro elemento clave es el bloque Rigid Transform, que conecta y posiciona los diferentes elementos del modelo en el espacio 3D. Por último, los bloques de fuerzas y torsiones permiten incluir cargas externas o internas que afectan al comportamiento dinámico del sistema.

Como se ha mencionado anteriormente, para importar el modelo CAD realizado en SolidWorks a Simscape Multibody, se hace uso del plugin “*Simscape Multibody Link Plugin*”. Durante el proceso de importación, aparece un error al trasladar la restricción de posición asociada al tornillo sinfin-corona, es decir, no está soportada. Esto significa que el modelo generado no refleja el comportamiento del ensamblaje original. Por tanto, esta relación de posición se debe eliminar de SolidWorks e implementar haciendo uso de bloques de Simscape Multibody. El bloque utilizado es “*Worm and Gear Constraint*”, mostrado en la Figura 83:

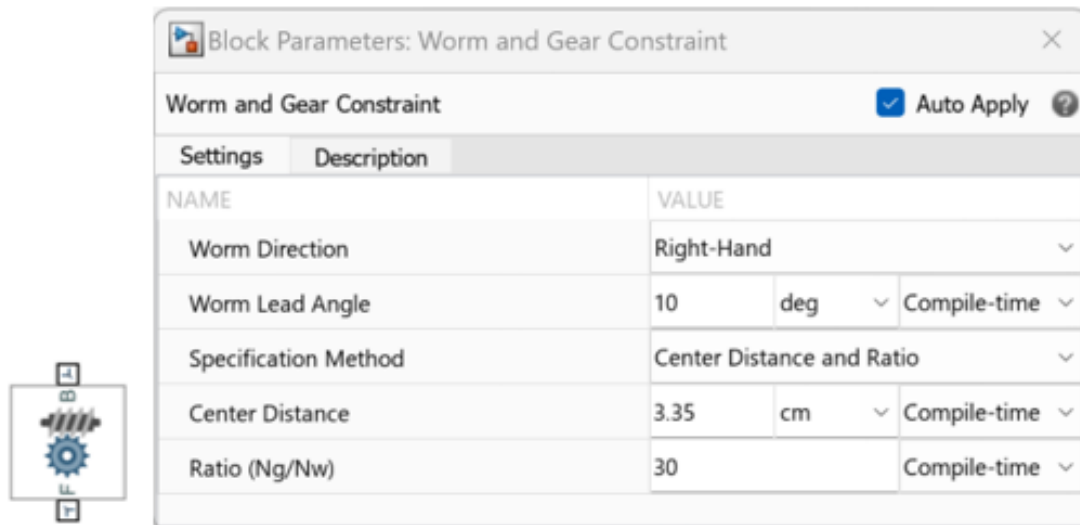


Figura 83: Bloque "Worm and Gear Constraint" en Multibody.

Para especificar los parámetros característicos de este bloque, se ha escogido el método "Center Distance and Ratio", donde el ángulo de avance del tornillo sinfín es de 10 grados, la distancia centros el de 3,35 cm y la relación es de 30.

Tras obtener el esquema generado por el plugin, se realizan los siguientes pasos para completar el sistema:

- Se añade el bloque "Worm and Gear Constraint" para crear la relación de vueltas entre el tornillo sinfín y la corona [30].
- Se añade el bloque "Rotational Multibody Interface" [31] para establecer la conexión entre Multibody y Simscape. Este bloque se vincula al eje del motor en Simscape y al eje de la junta revolvente (Articulación Motor) en Multibody haciendo uso de las etiquetas virtuales C_{3D} y R_{3D} .
- Se ajustan los momentos y productos de inercia para garantizar que no afecten el comportamiento del esquema de Simscape, es decir, se establecen a cero (Figura 84). Esto se realiza porque dichos aspectos ya están considerados en el esquema de la maqueta realizado en Simscape.
- Se añaden las imágenes de cada subensamblaje para conocer a qué subensamblaje corresponde cada bloque.

Inertia			
Type	Custom		
Mass	smiData.Solid(3).mass	kg	Compile
Center of Mass	smiData.Solid(3).CoM	mm	Compile
Moments of Inertia	[0 0 0]	kg*mm ²	Compile
Products of Inertia	[0 0 0]	kg*mm ²	Compile

Figura 84: Ejemplo de anulación de los momentos y productos de inercia en Simscape Multibody.

Una vez realizados los pasos descritos, se tiene el esquema resultante mostrado en la Figura 85:

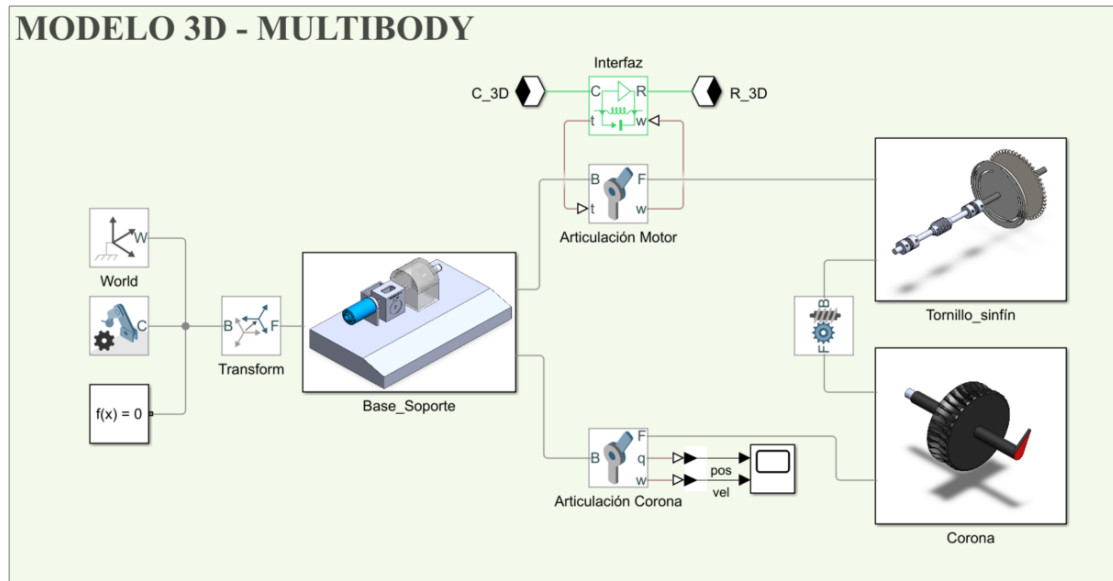


Figura 85: Esquema del sistema en Simscape Multibody.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el plugin también genera un archivo “Data-File.m” que contiene la definición del modelo mecánico exportado. Principalmente, incluye parámetros sobre las propiedades físicas de los sólidos, posición y orientación de los mismos en el espacio 3D, tipos de juntas utilizadas, entre otros. Es importante señalar que en este archivo se han incorporado dos variables para inicializar la orientación de la corona y del tornillo sinfín (eje motor). La variable $\theta_{reductora}$, definida en el archivo “Parameters_MotorCC.m”, establece el ángulo inicial de la corona. Por otro lado, en (57) se calcula la variable asociada con el ángulo inicial del tornillo sinfín:

$$\theta_{tornillo} = \text{mod} \left(\frac{1}{K_{reductora}} \cdot \theta_{reductora}, 360^\circ \right) \quad (57)$$

Esta expresión permite obtener el ángulo del tornillo sinfín ajustado dentro de un ciclo completo, es decir, con un valor comprendido entre 0° y 360° .

Este archivo se ha renombrado a “PreConf_Multibody.m” y se incluye en el anexo A.6. Archivo PreConf_Multibody.m del Esquema en Simscape Multibody. Este archivo debe ser ejecutado previamente a la ejecución para cargar los valores en el esquema de Simscape Multibody.

Una vez se ejecuta este esquema, se abre el “Mechanics Explorers”, donde se puede visualizar el movimiento del eje del motor a lo largo del tiempo de simulación. En la Figura 86 y Figura 87 se muestra un ejemplo de ello.

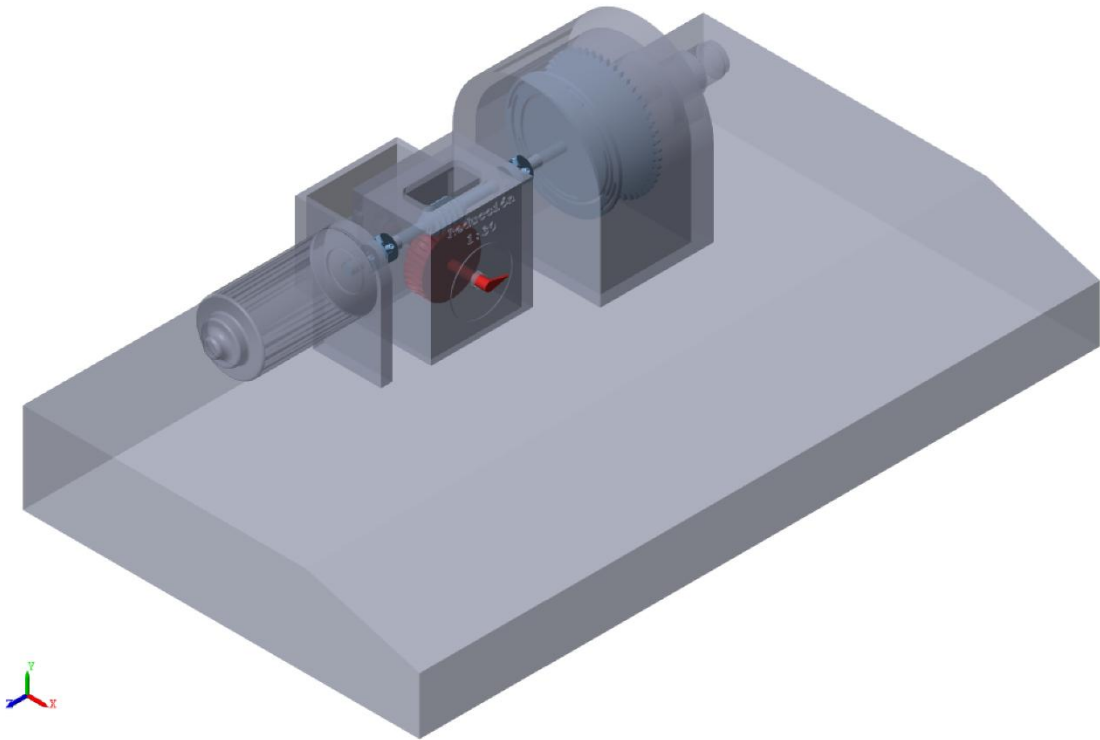


Figura 86: Visualización de la maqueta en Mechanics Explorer.

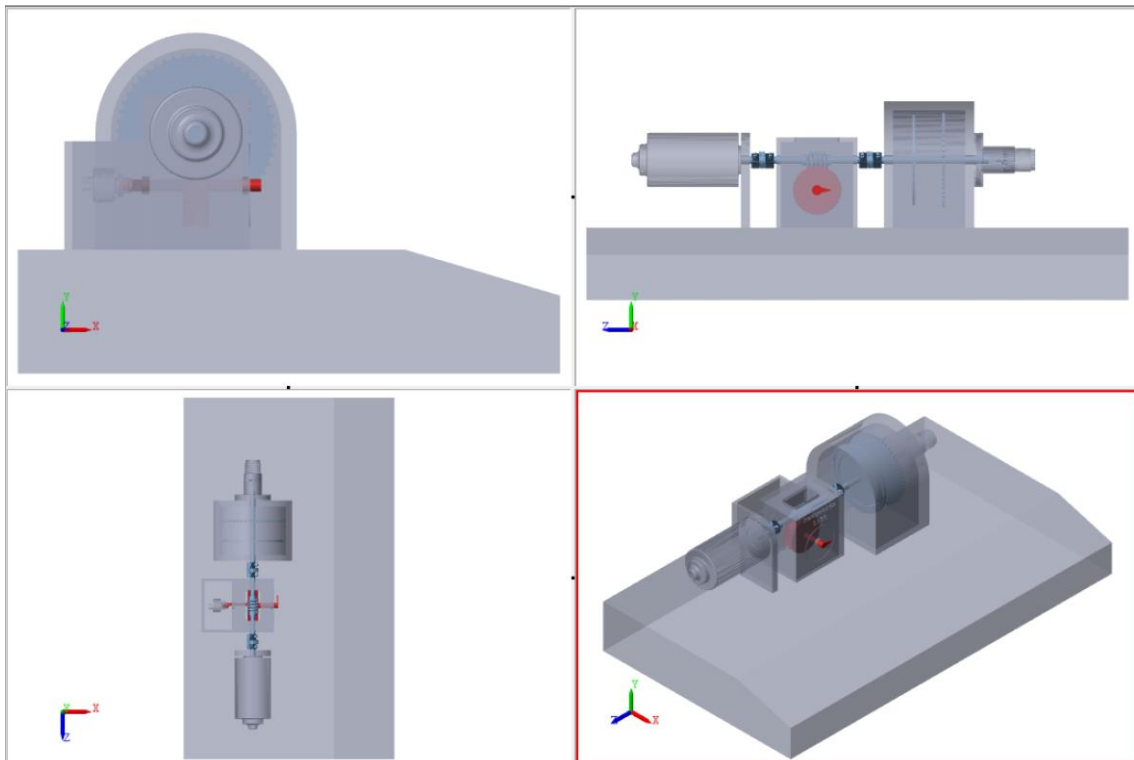


Figura 87: Cuatro vistas estándar de la maqueta en Mechanics Explorer.

CAPÍTULO 5: ENTORNO VIRTUAL DE CONTROL Y OPERACIÓN DEL SISTEMA BASADO EN GEMELO DIGITAL

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudian, modelan y simulan los módulos de control de forma similar a lo realizado con el motor de CC y los sensores, permitiendo generar una plataforma o entorno de control a disposición del alumnado para interactuar con la maqueta, tanto la virtual como la real.

5.2. MODELADO DEL ENTORNO DE CONTROL

En este apartado se pretende crear subsistemas en Simscape que modelen el comportamiento de los módulos de control, para que así el usuario pueda visualizar las mismas señales tanto en el laboratorio de la Universidad de Málaga como en el laboratorio virtual. Para formar dichos subsistemas, se utilizarán bloques específicos de Simscape, sin necesidad de realizar experimentos concretos, tan solo ciertas mediciones de parámetros físicos como tensiones, resistencias, etc.

Cada uno de los captadores descritos en el capítulo 3 precisa de un circuito electrónico para el acondicionamiento de la señal suministrada, con el fin de que esta señal sea útil para su empleo. Esta electrónica está implementada mediante un sistema modular, en el que cada módulo tiene un fin concreto.

Además, es necesario la utilización de otros bloques como fuente de alimentación para el motor CC, generadores de consigna para gobernar el actuador de la maqueta, etc. En la Figura 88 se muestra el sistema modular de la maqueta MV-541.

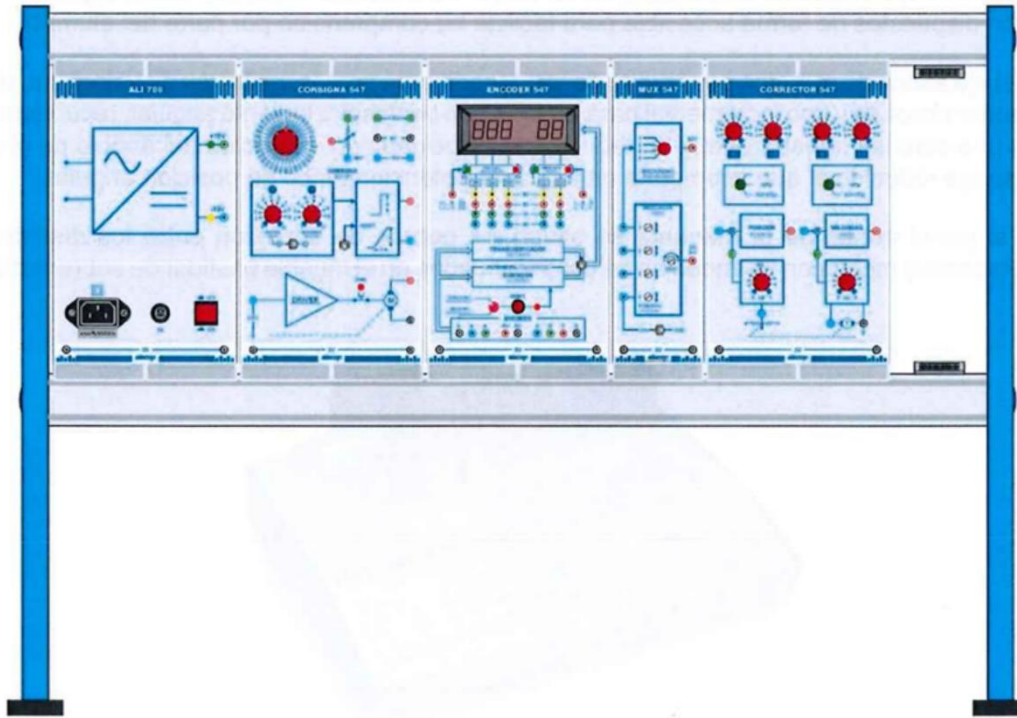


Figura 88: Sistema modular de la maqueta MV-541. [1]

5.2.1. MODELADO DEL MÓDULO ALI 700.

Este módulo realiza la función de alimentación del resto de los módulos del equipo aplicando una tensión bipolar de $\pm 15\text{ V}$ c/c y 2 A. La parte superior del módulo dispone de dos hembrillas de salida para la tensión de $\pm 15\text{ V}$. Además, posee un interruptor general y un fusible de protección. Este módulo se muestra en la Figura 89.

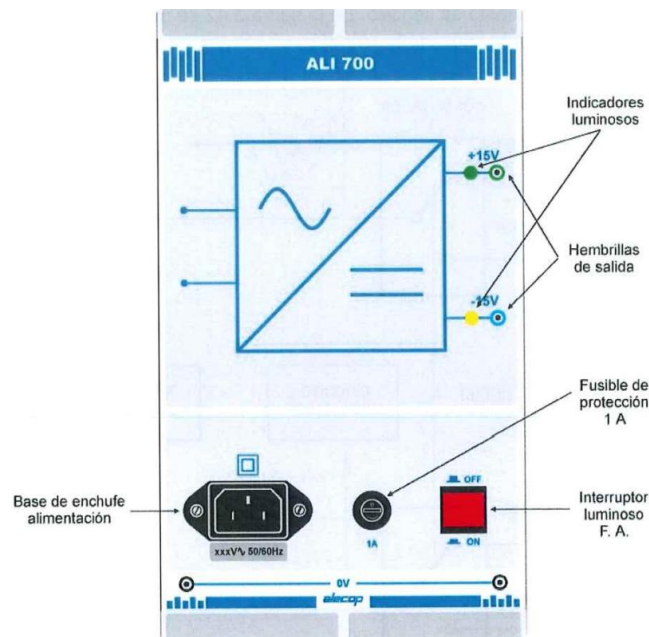


Figura 89: Módulo ALI – 700 [1].

Para modelar este módulo simplemente se mide con el voltímetro la tensión en bornas (hembrillas verde y azul), obteniendo una tensión de $\pm 15,3$ V. Se ha añadido un interruptor ON/OFF para activar y desactivar el módulo, tal y como aparece en la maqueta real.

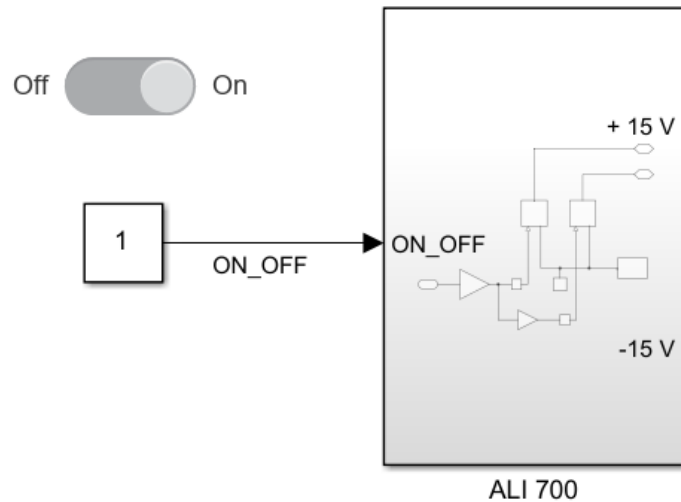


Figura 90: Modelado del módulo ALI – 700.

En la Figura 91, se muestra el diagrama realizado en el subsistema ALI 700, donde a la entrada ON_OFF se le aplica una ganancia de 15,3 correspondiente a la tensión real que hay en bornas. Posteriormente, esta señal se aplica como entrada a una fuente de tensión continua controlable. Este mismo procedimiento se realiza para el voltaje negativo, aplicando una ganancia con valor igual a -1.

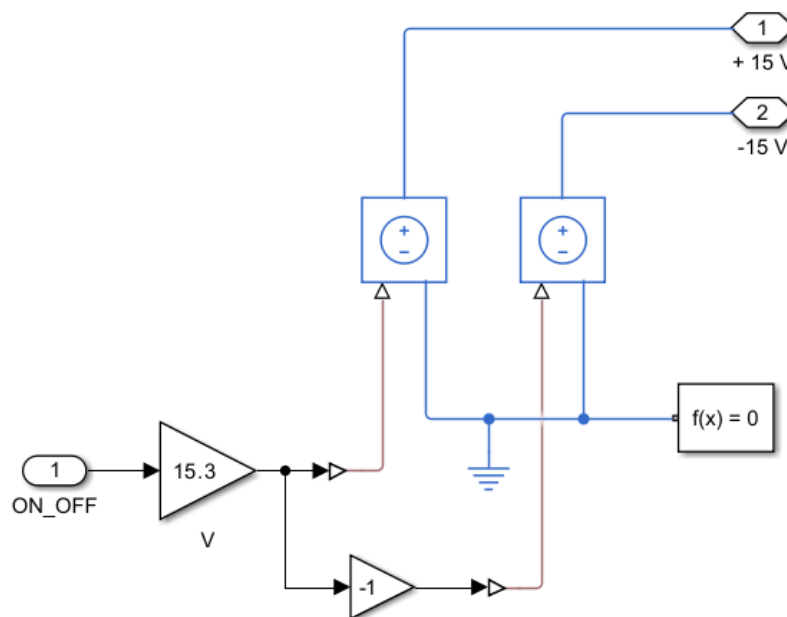


Figura 91: Subsistema del módulo ALI 700.

En cuanto al rizado de esta señal, se mide con el osciloscopio obteniendo el resultado de la Figura 92:

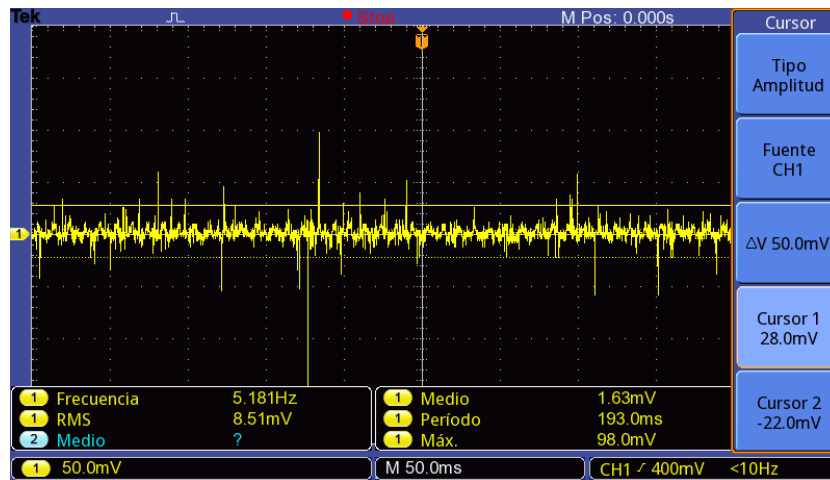


Figura 92: Rizado de la señal del módulo ALI 700.

Dado que este rizado es de 50 mV, no se tendrá en cuenta a la hora de modelar este módulo, pues es de valor muy pequeño en comparación con los 15 V y no tiene relevancia en el comportamiento del sistema en el contexto de este trabajo.

5.2.2. MODELADO DEL MÓDULO MUX 547

Para poder medir y observar los desfases entre diferentes señales es necesario un osciloscopio multicanal cuyo precio puede ser elevado. Este módulo sirve para visualizar en el osciloscopio con un único canal hasta cuatro señales analógicas y/o digitales y así solventar dicho problema.

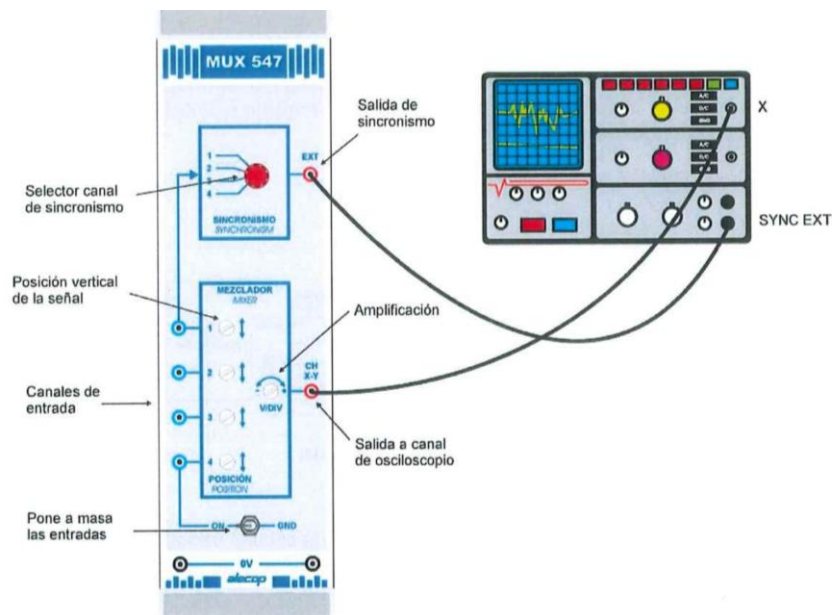


Figura 93: Módulo MUX 547 [1].

El modelado de este módulo no tiene sentido ya que este es necesario exclusivamente si no se tiene un osciloscopio multicanal en el laboratorio. Sin embargo, en Simscape se pueden implementar tantos visualizadores (*scope*) como se requieran (Figura 94), por lo que no se tendría este problema.



Figura 94: Bloque Scope en Simulink.

5.2.3. MODELADO DEL MÓDULO ENCODER 547

Para el encoder incremental es necesario un circuito exterior que determine el sentido de giro y un circuito contador/descontador de impulsos. En cuanto al encoder absoluto, es necesario un transcodificador exterior que convierta el código Gray a código binario natural. Estos circuitos mencionados se implementan en el módulo Encoder 547 (Figura 95). Este módulo no se encuentra disponible en el laboratorio de la universidad, por lo que se decide modelar únicamente el encoder incremental, dada su simplicidad.

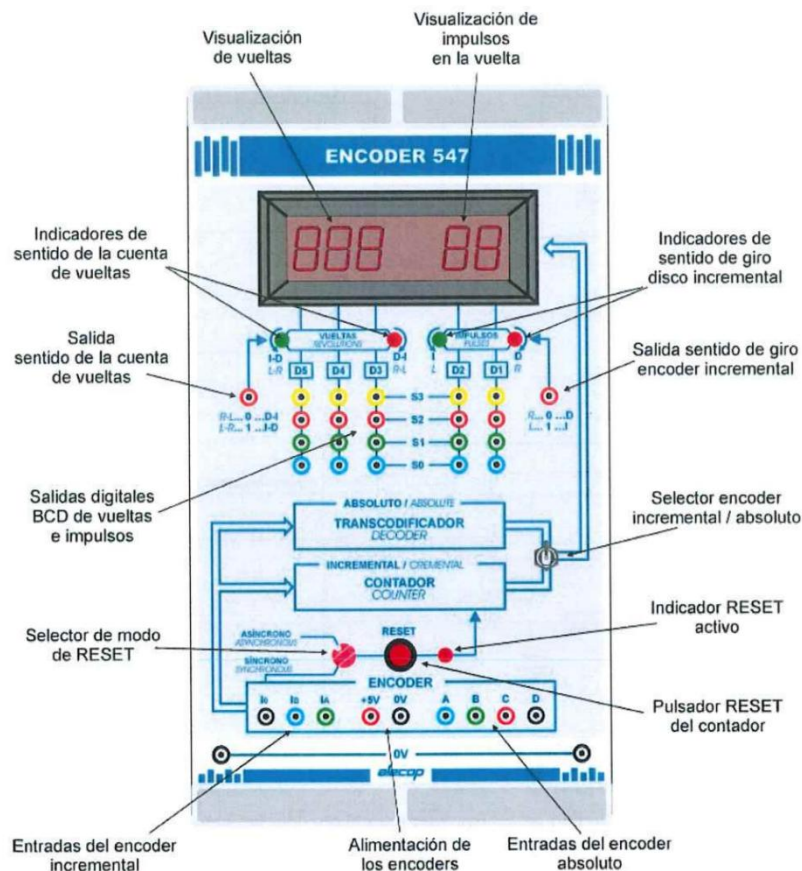


Figura 95: Módulo Encoder 547. [1]

Para ello, se han implementado tres voltímetros, con sus respectivas entradas y salidas (Figura 96):

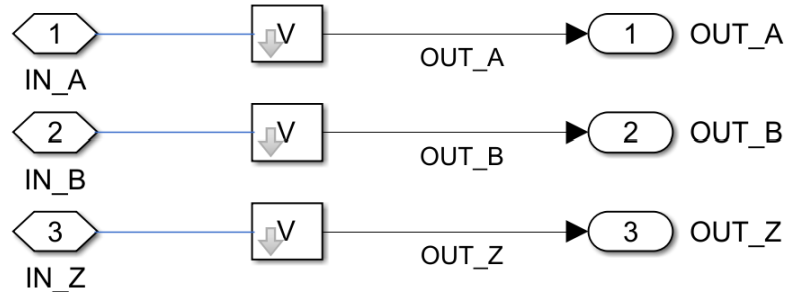


Figura 96: Subsistema del módulo Encoder 547.

En los puertos de entrada IN_A, IN_B y IN_Z están conectadas las salidas A, B y Z del bloque “encoder incremental”, tal y como se muestra en la Figura 97. Dichas salidas se visualizan con un scope.

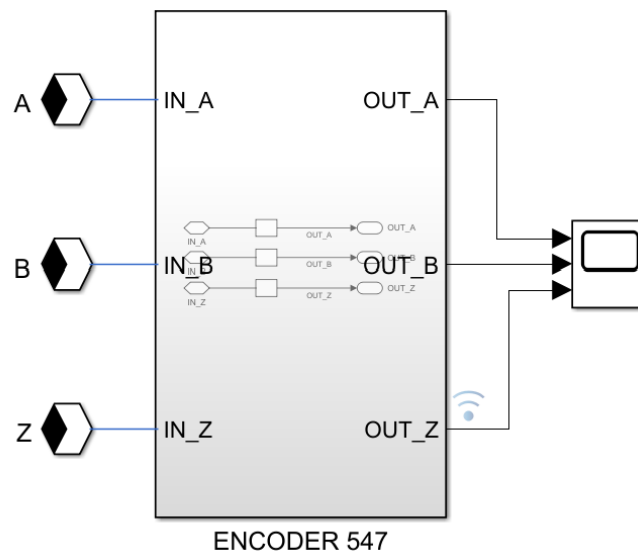


Figura 97: Modelado del módulo Encoder 547

5.2.4. MODELADO DEL MÓDULO CONSIGNA 547

Este módulo (Figura 98) contiene en su parte superior un potenciómetro de 10 K Ω y 360° de giro continuo para su utilización como consigna de posición en un servocontrol de posición. Este potenciómetro tiene una escala graduada de posición angular 0° - 360° idéntica al presentado en su cara frontal por la reductora de la maqueta. Además, se observa las conexiones de dicho potenciómetro junto con las bornas de alimentación de ± 10 V.

En la parte central se observa las salidas de consigna, escalón y rampa. Dichas salidas son modificables en amplitud y rampa, además del signo.

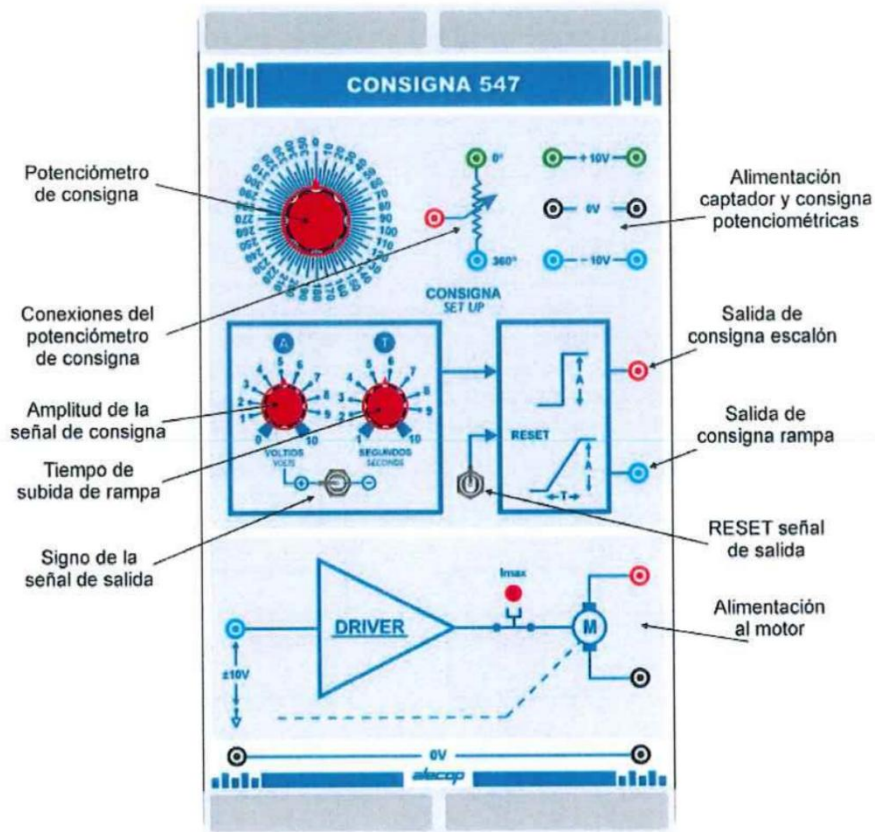


Figura 98: Módulo Consigna 547. [1]

Dado que estas señales de consigna son de pequeña potencia, insuficiente para alimentar al motor de corriente continua, se ha incluido un *driver*. Un *driver* es un pequeño amplificador de corriente cuya función es tomar una señal de control de baja corriente y luego convertirla en una señal de corriente más alta que pueda alimentar un motor. Este *driver* posee un circuito de protección contra sobrecorriente tarado a 2 A, que corta la alimentación al motor.

La realización del modelado del módulo *Consigna 547* se ha dividido en tres etapas, siendo la más importante la correspondiente al *driver* que gobierna el motor.

La primera parte consiste en el modelado del potenciómetro de consigna y las bornas de alimentación (Figura 99). Para ello, se ha utilizado el bloque “*potentiometer*”, donde la entrada x corresponde a la posición de la escobilla. Para controlar esta posición se ha incorporado un dial a la entrada x para seleccionar entre 0° y 360° , tal y como aparece en el módulo real.

En cuanto a las bornas de alimentación, se ha realizado un pequeño circuito eléctrico con dos fuentes de tensión de valor 10 V y -10 V, ambas conectadas a tierra. Estas bornas de salida se conectarán a las entradas 0° y 360° del potenciómetro para darle alimentación. Por último, se tiene la salida OUT_POT de la cual se obtiene la tensión correspondiente a la posición de la escobilla, regida por la ecuación del divisor de tensión. El valor de resistencia total de este potenciómetro se establece en 10 k Ω .

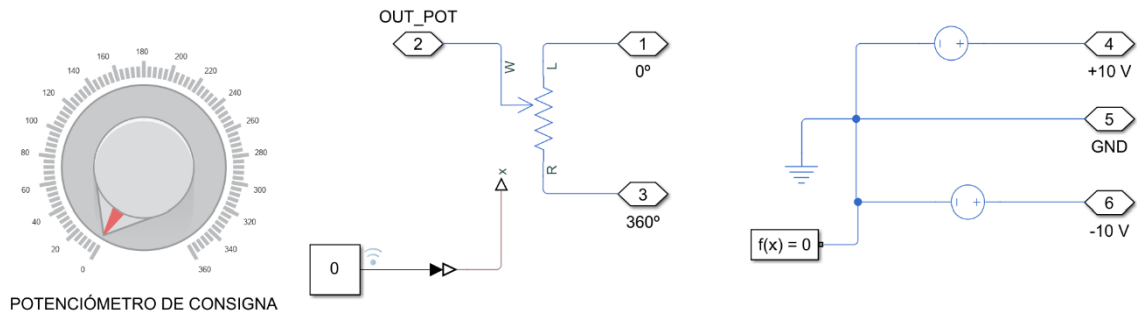


Figura 99: Modelado potenciómetro de consigna y bornas de alimentación.

Para la segunda parte de este módulo, se ha escogido modelar los elementos correspondientes a la señal de consigna tipo escalón y rampa (Figura 100). El dial correspondiente a la variable A establece el valor de amplitud de la consigna escalón, mientras que el dial de la variable T establece el valor del tiempo de subida de rampa. Se añade un *switch* de color rojo para establecer un escalón positivo o negativo, cambiando así el valor de la ganancia entre 1 y -1. Además, se ha añadido un bloque de saturación para el caso de la rampa, entre -10 V y 10 V. Estas señales son las entradas a dos fuentes de voltaje controlables. También se puede observar que se ha añadido una rampa tipo escalonada, para poder conocer la respuesta dinámica para diferentes valores de entrada al motor de CC.

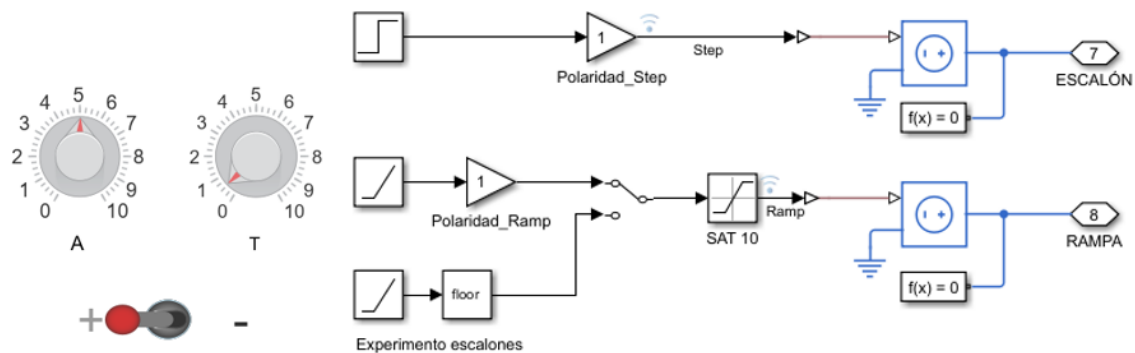


Figura 100: Modelado consigna escalón y rampa.

Por último, la tercera parte de este módulo corresponde al *driver*, que es un dispositivo electrónico empleado para alimentar al motor. Este está compuesto por un bloque tipo *PWM* y un circuito denominado “*Puente H*”. Es conocido que el sistema real emplea estos elementos. Gracias a los bloques existentes en Simscape se ha podido realizar dicho modelado.

PWM son las siglas de *Pulse Width Modulation* (Modulación por ancho de pulso) y es una técnica utilizada en electrónica para controlar la cantidad de energía entregada a un dispositivo, como un motor. Para conseguir esto, se varía el ancho relativo de los pulsos de una señal cuadrada, manteniendo constante la frecuencia. La señal resultante tiene ciclos de trabajo variables, que representan la relación entre el tiempo de encendido y el período total, tal y como se muestra en la Figura 101.

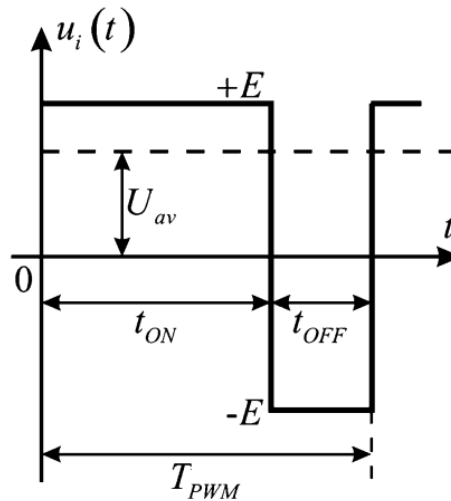


Figura 101: Ejemplo de señal tipo PWM. [5]

Cabe resaltar el término “Duty Cycle”, el cual hace referencia a la relación entre el tiempo de encendido y el período completo. Este viene representado por:

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{ON}}{T} \cdot 100 \quad (58)$$

Una vez conocido su funcionamiento, se modela esta señal PWM haciendo uso del bloque “PWM” de Simscape, mostrado en la Figura 102:

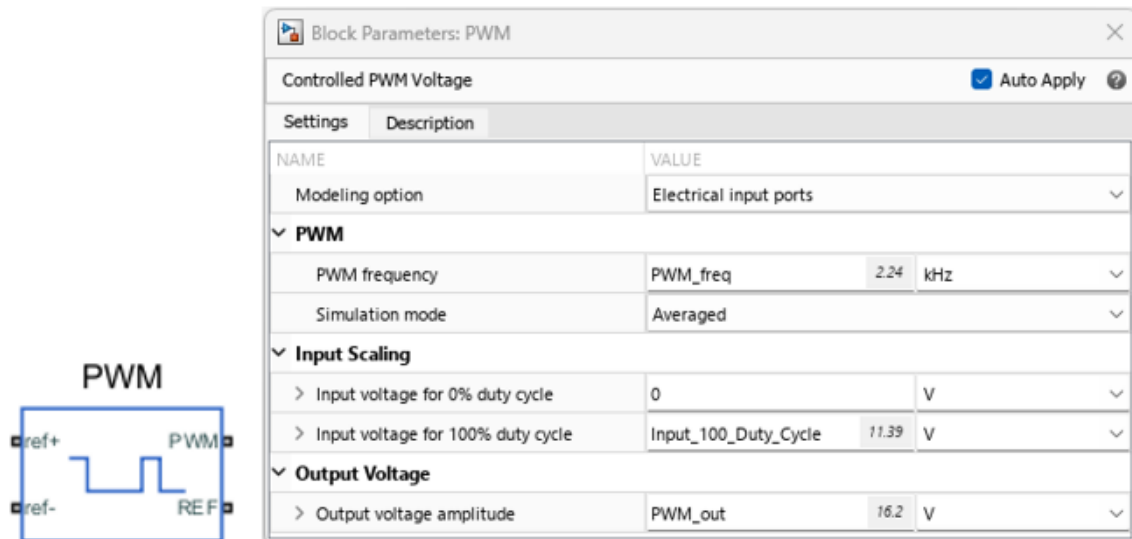


Figura 102: Bloque PWM en Simscape.

Con el objetivo de determinar los parámetros característicos de este bloque, se ha realizado un experimento en el que se aplica una tensión de entrada al *driver* y se mide la tensión máxima y media a la salida. Este procedimiento se realiza para cada valor de entrada, desde 1 V hasta 10 V, con el fin de graficar los datos obtenidos y analizar su

comportamiento. El elemento de medida utilizado ha sido el osciloscopio, pues permite obtener el valor de frecuencia de la señal.

En la Figura 103, se muestran las señales obtenidas para un valor de entrada de aproximadamente 1 V.

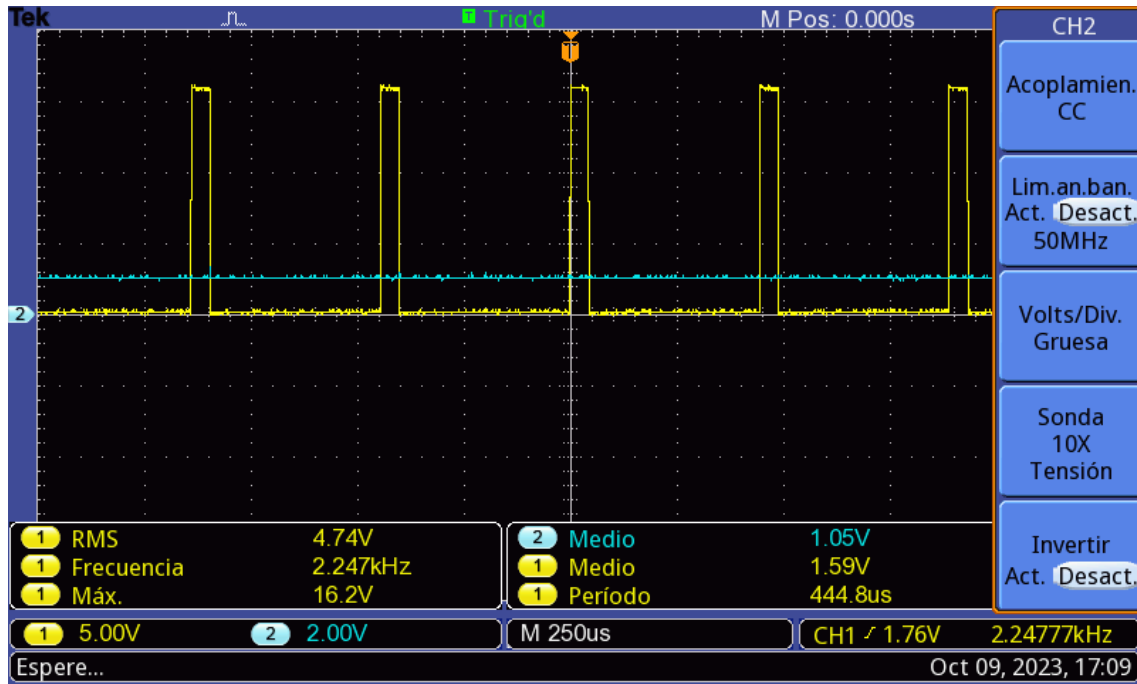


Figura 103: Medida de la señal de entrada (azul) y salida (amarilla) del driver.

Se puede observar que la tensión máxima de la señal PWM es de 16,2 V y que la frecuencia es de aproximadamente 2,24 kHz. En la Tabla 7, se recopilan los datos de salida del *driver* para cada consigna.

DATOS PWM	
Consigna <i>driver</i> (V)	Salida <i>driver</i> (V)
1	1,52
2	2,97
3	4,40
4	5,75
5	7,12
6	8,54
7	9,86
8	11,30
9	11,90
10	12,20
11	12,30

Tabla 7: Datos de la señal PWM.

El parámetro "*Input voltage for 100% duty cycle*" corresponde a la tensión de entrada asociada a un 100% de *Duty Cycle*. Sin embargo, el *driver* real no alcanza este valor, ni siquiera aumentando la tensión de entrada.

Este fenómeno se observa en la Figura 104, donde la señal de salida comienza a saturarse cuando la señal de entrada alcanza un valor de 8 V.

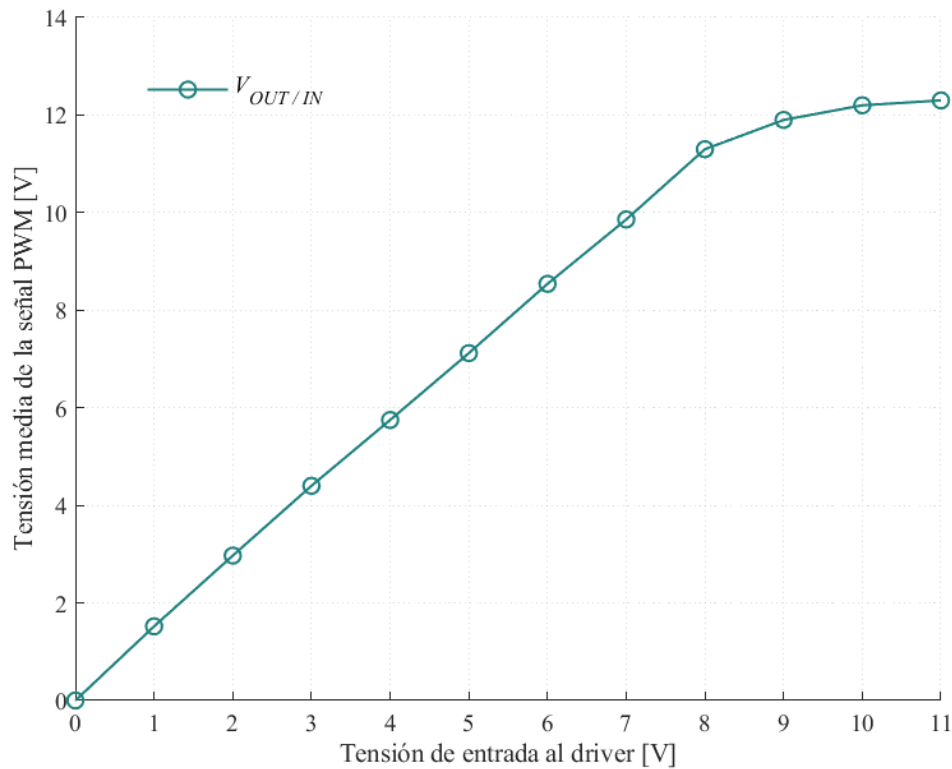


Figura 104: Representación de tensión media PWM frente a tensión de entrada al driver.

Es por este motivo por lo que se ha realizado la siguiente suposición. Se establece la zona lineal como el rango comprendido entre 0 V y 6 V, para así evitar trabajar cerca del codo de saturación. Seguidamente, se realiza un ajuste lineal para determinar los coeficientes de la recta. Con los datos obtenidos, se calcula el valor de tensión de entrada para el cual se obtiene un valor de tensión media de 16,2 V, es decir, para un "*Duty Cycle*" del 100%. Estos cálculos se realizan con ayuda del código realizado en Matlab que se encuentra en el anexo A.8. Código Matlab – Gráfica PWM, obteniendo la gráfica mostrada en la Figura 105.

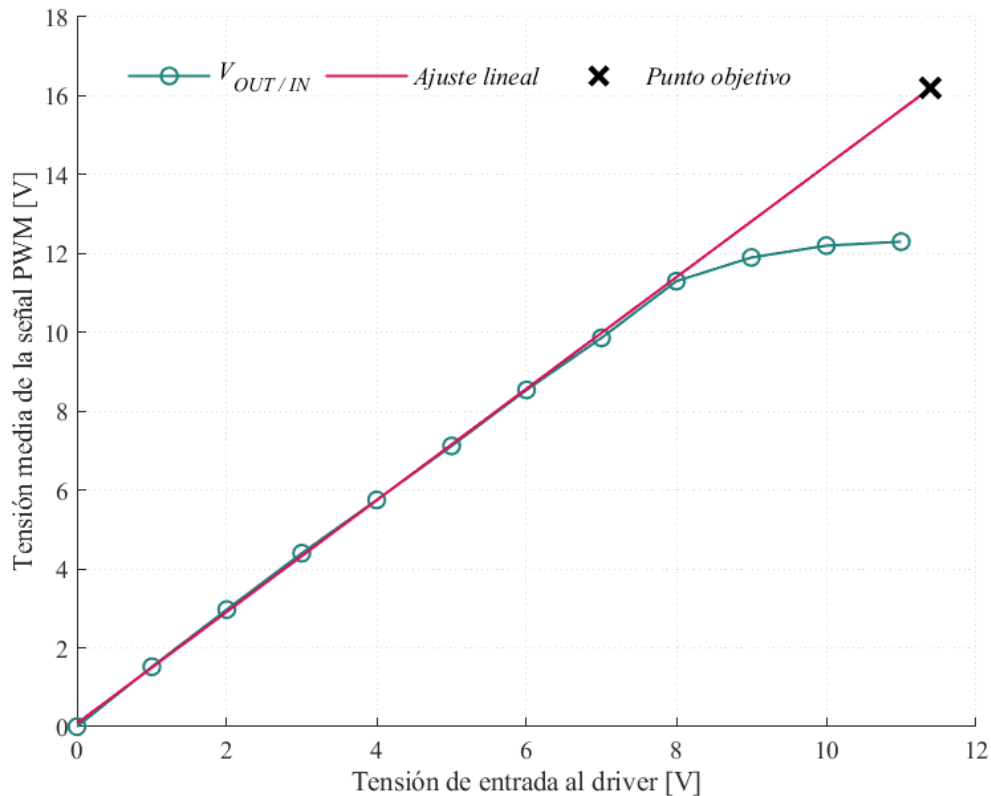


Figura 105: Ajuste lineal de la señal PWM.

La ecuación de la recta del ajuste lineal es:

$$y = 1,4143x + 0,0857 \quad (59)$$

El valor de tensión de entrada al *driver* que hace que se tenga un 100% de *Duty Cycle* es de 11,39 V.

Una vez se tiene esta configuración, para poder modelar la saturación a la salida del *driver*, se debe hacer la siguiente suposición. Se estima que, dada la tendencia de la curva característica del *driver*, la tensión de salida se satura en 12,5 V aproximadamente. Por tanto, si se despeja de (56) el valor de 'x' para un valor de 'y' de 12,5 V, se tiene que la saturación ocurre para un valor de 8,78 V en la entrada. Este límite a la entrada se establece haciendo uso del bloque "*Saturation*", y tiene un valor designado por la variable "*PWM_sat*" tanto para valores positivos como negativos (Figura 106).

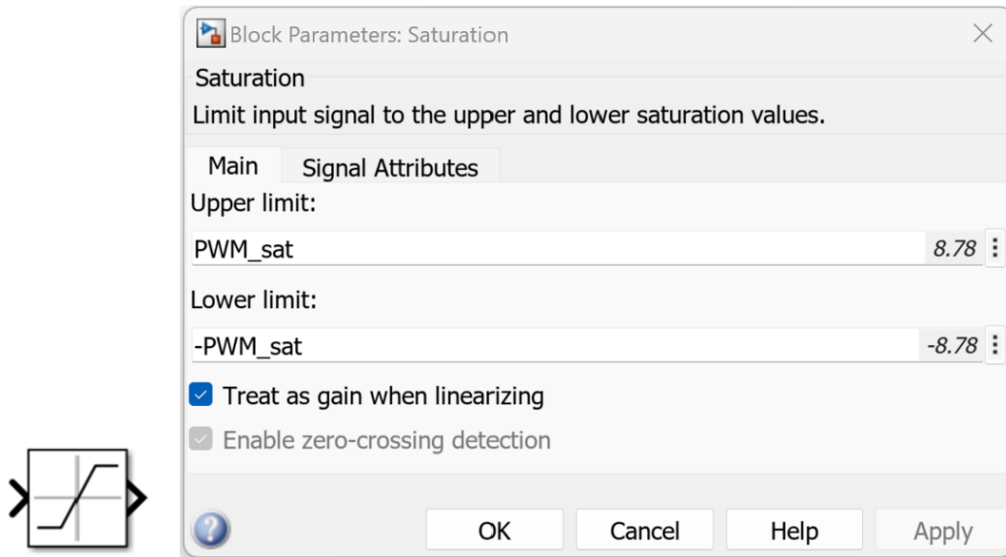


Figura 106: Bloque de saturación para la señal de entrada al driver.

Con esta implementación, la pendiente de la recta calculada anteriormente, que era de 1,4143, se reduce a 0 cuando el valor de la entrada al *driver* es 8,78 V. Sin embargo, en la práctica, este cambio no ocurre de forma inmediata, sino que se produce un fenómeno conocido como codo de saturación.

Por último, el modo de simulación se establece en “*Averaged*” dado que si se escoge el modo “*PWM*” el tiempo de simulación aumenta en exceso.

Por otro lado, el “*Puente H*” es un circuito utilizado en electrónica para controlar la dirección y la velocidad de un motor CC. Este circuito se compone de 4 transistores que trabajan como interruptores. Tal y como se muestra en la Figura 107, según la combinación de encendido y apagado, se puede controlar la dirección de giro del motor. Cabe destacar que cada transistor debe tener un diodo antiparalelo como protección frente a las corrientes inducidas por la inductancia del motor, presentes cuando los transistores se apagan.

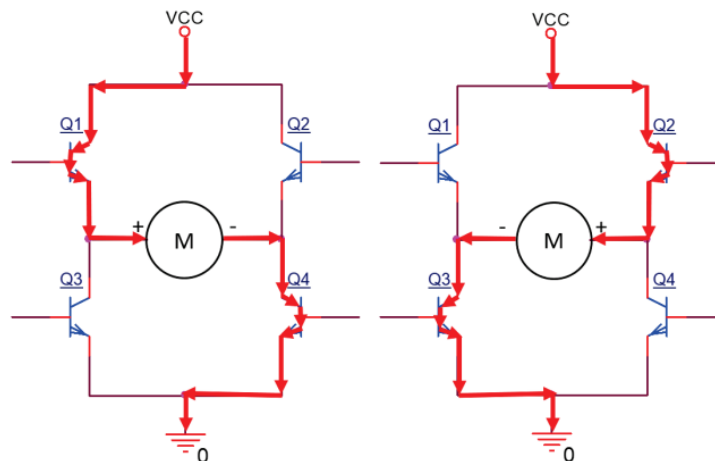
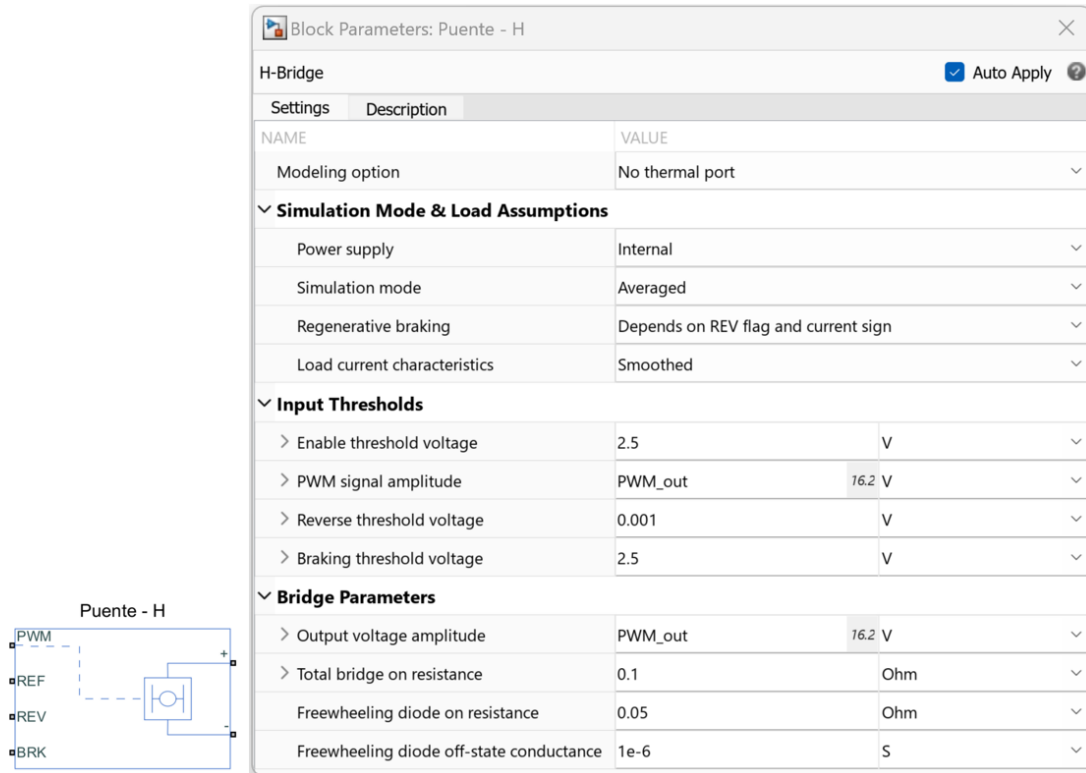


Figura 107: Modos de funcionamiento de un puente H de transistores.

Se podría haber decidido simular este bloque haciendo uso de elementos como transistores, diodos y optoacopladores. Sin embargo, Simscape cuenta con un bloque predefinido llamado “*H-Bridge*”, mostrado en la Figura 108. Para este bloque también se establece el modo de simulación en “*Averaged*”, pues debe ser el mismo que el establecido en el bloque *PWM*.



The screenshot shows the 'Block Parameters: Puente - H' window in Simscape. The window is titled 'H-Bridge' and has an 'Auto Apply' checkbox checked. It contains a table of parameters organized into sections:

- Settings**: Modeling option (No thermal port)
- Simulation Mode & Load Assumptions**:
 - Power supply: Internal
 - Simulation mode: Averaged
 - Regenerative braking: Depends on REV flag and current sign
 - Load current characteristics: Smoothed
- Input Thresholds**:
 - Enable threshold voltage: 2.5 V
 - PWM signal amplitude: PWM_out, 16.2 V
 - Reverse threshold voltage: 0.001 V
 - Braking threshold voltage: 2.5 V
- Bridge Parameters**:
 - Output voltage amplitude: PWM_out, 16.2 V
 - Total bridge on resistance: 0.1 Ohm
 - Freewheeling diode on resistance: 0.05 Ohm
 - Freewheeling diode off-state conductance: 1e-6 S

To the left of the window is a small schematic diagram of the 'Puente - H' block. It shows four input pins: PWM, REF, REV, and BRK. The PWM pin is connected to a dashed line representing a signal. The REF, REV, and BRK pins are connected to ground. The schematic shows the internal H-bridge circuit with two output terminals.

Figura 108: Bloque "Puente-H" en Simscape.

Observando el esquema de la Figura 109, a la entrada del bloque PWM se conecta una fuente de voltaje controlada gobernada por el valor absoluto de la consigna. Esto es así para poder controlar el giro del motor con el pin **REV** por medio de otra fuente controlable de voltaje. Si el voltaje del puerto REV es mayor que el “*Reverse threshold voltage*”, entonces se invierte la polaridad del voltaje de salida. Por tanto, si la consigna es negativa, esta se multiplica por una ganancia negativa y se conecta al pin REV para así superar dicho umbral y cambiar el giro del motor. Es por esto por lo que el valor de este parámetro es bajo.

En cuanto al pin BRK, si la tensión es mayor que la tensión umbral de frenado, los terminales de salida se cortocircuitan y, para volver a habilitarlo, se debe superar el umbral de habilitación. Sin embargo, el pin BRK está conectado a tierra porque no se utiliza en este proyecto. El pin REF también se conecta a tierra. La salida de este bloque proporciona la alimentación al motor de CC, la cual se establece con la variable PWM_{out} con valor 16,2 V. El resto de los parámetros se dejan por defecto.

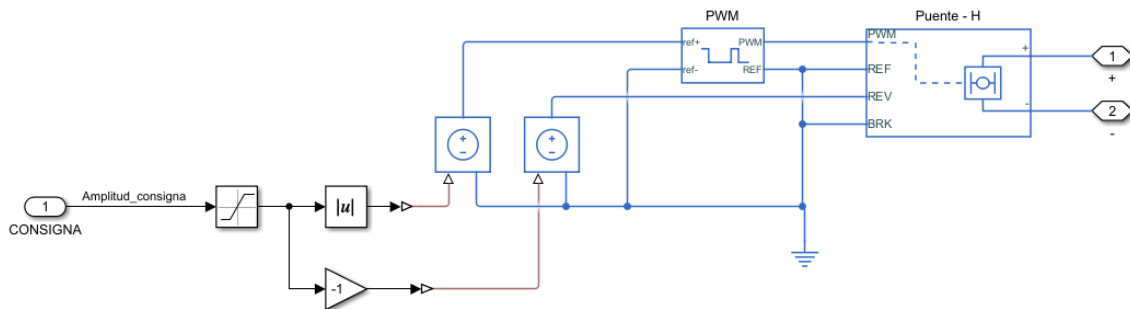


Figura 109: Modelado del driver.

Para una visión más compacta y limpia, se ha creado un subsistema donde encapsular el diagrama anterior. Tanto en la Figura 109 como en la Figura 110 se muestra el bloque de saturación de voltaje y el limitador de corriente.

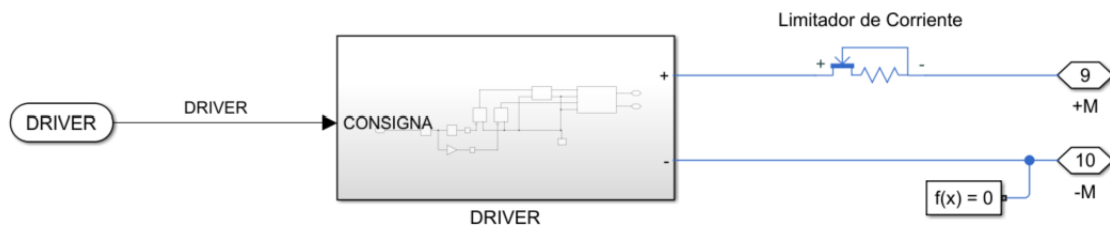


Figura 110: Esquema del driver.

Las tres partes modeladas se muestran en conjunto en el esquema de la Figura 111, formando así el módulo *Consigna 547*. A su vez, se ha creado un subsistema de estas partes, donde se visualizan los diferentes diales de consigna junto con el *switch* de polaridad.

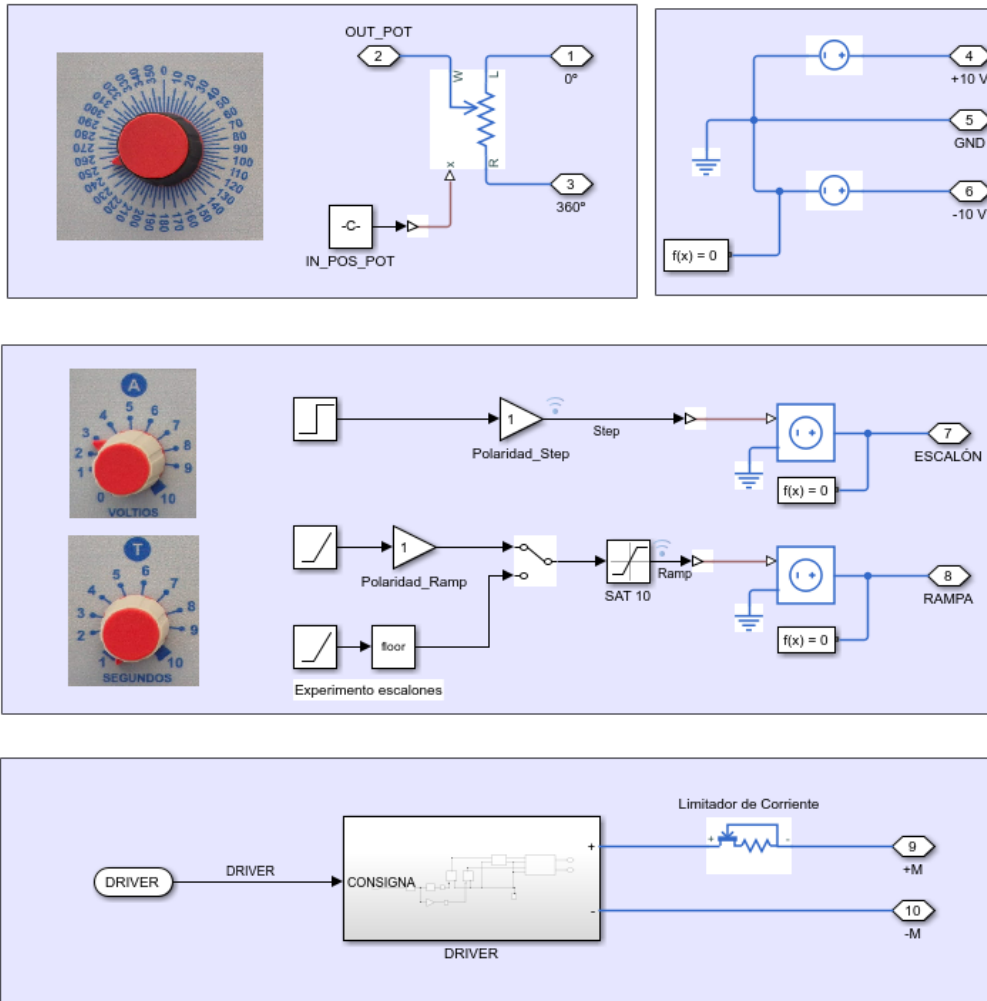


Figura 111: Modelado del Módulo Consigna 547.

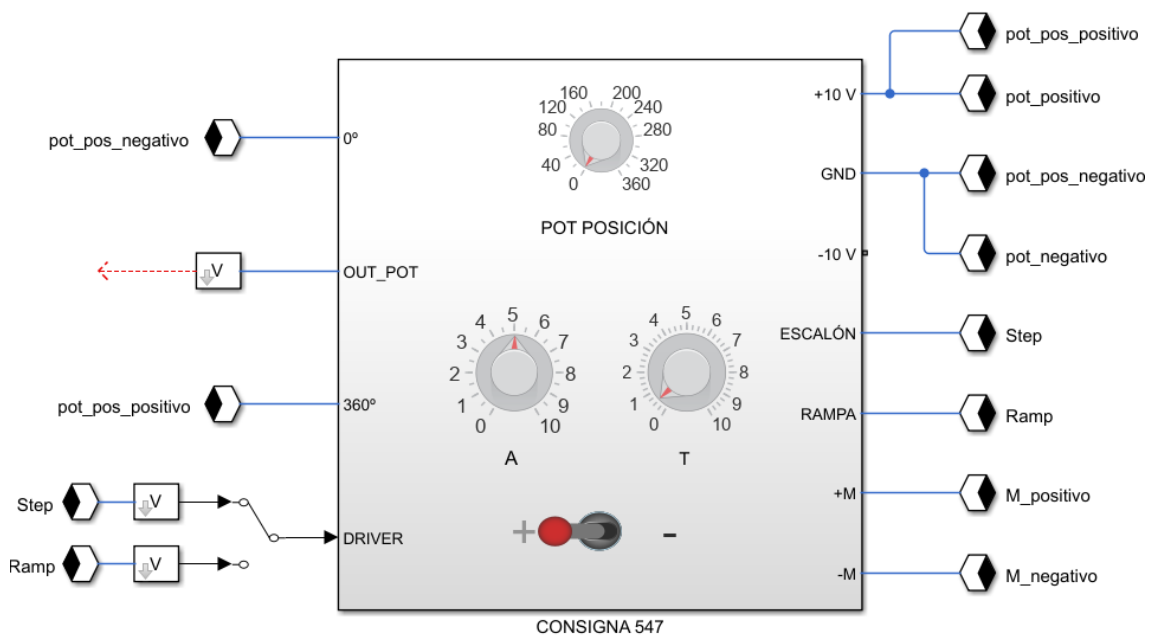


Figura 112: Modelado del módulo Consigna 547.

5.2.5. MODELADO DEL MÓDULO CORRECTOR 547

En la parte derecha de este módulo (Figura 113) se sitúan el corrector de velocidad y el acondicionador para el captador de velocidad (tacodinamo). En la parte izquierda se incorporan el corrector de posición y el acondicionador para el captador potenciométrico.

El corrector puede ser de acción proporcional, integral o proporcional integral, seleccionables por medio de un conmutador rotativo. Además, los parámetros del corrector pueden ser ajustados por medio de potenciómetros.

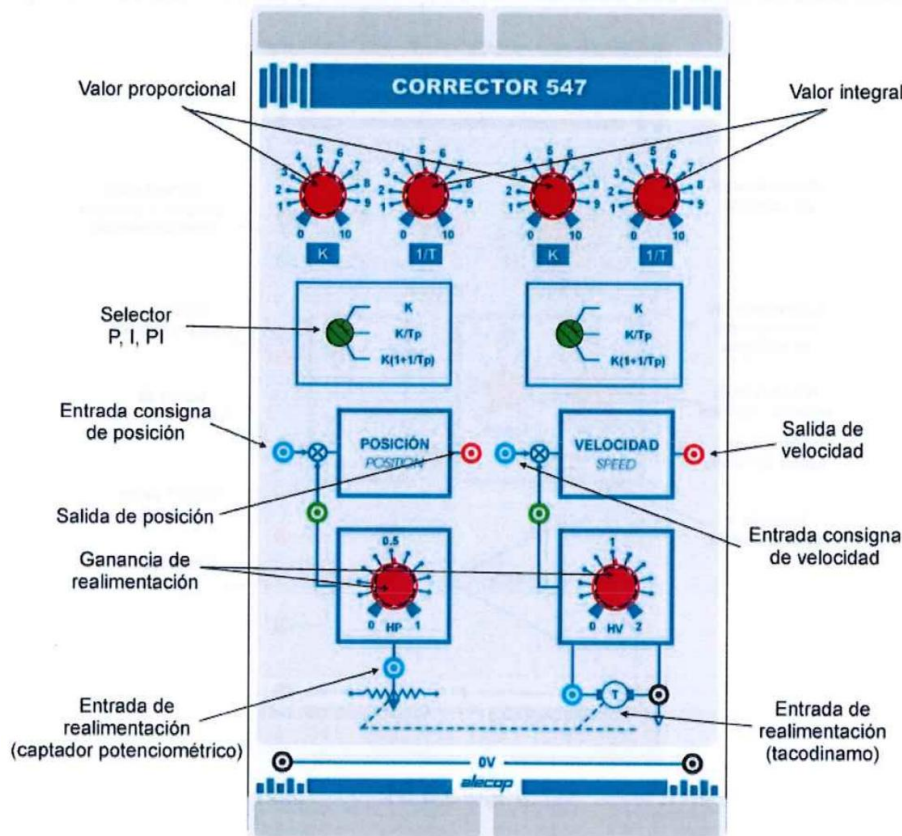


Figura 113: Módulo Corrector 547. [1]

El modelado de este módulo de control es sencillo, pues consta de dos controladores PI junto con varios potenciómetros para modificar cada uno de los parámetros característicos de ganancia y tiempo integral (K y T_i). Para ello, se han empleado diales y bloques PID de Simulink. El esquema resultante se muestra en la Figura 114:

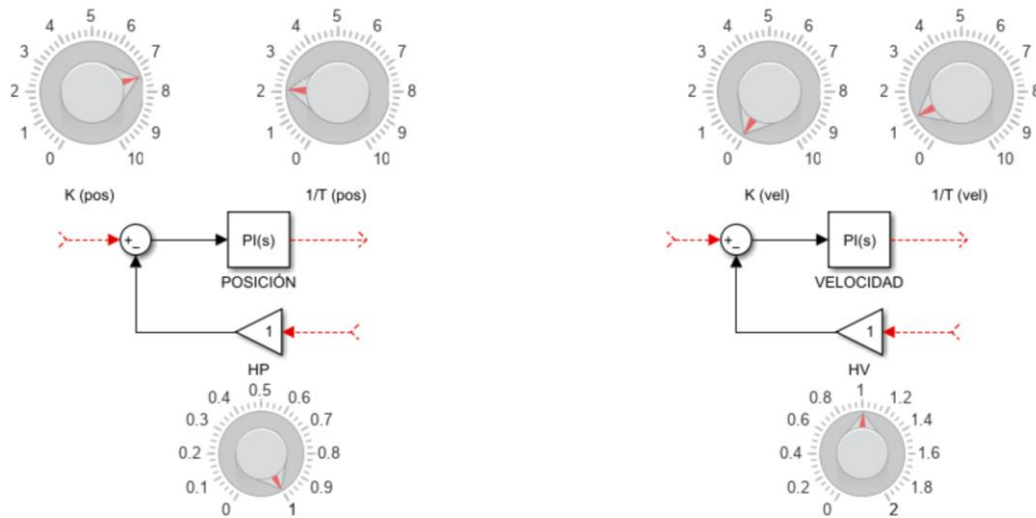


Figura 114: Modelado Corrector 547.

5.2.6. ESQUEMA FINAL DEL ENTORNO VIRTUAL DE CONTROL

En este apartado se muestra el esquema final de los módulos del bastidor (Figura 115). Se han utilizado etiquetas de conexión para hacer conexiones virtuales entre dos bloques sin necesidad de utilizar líneas físicas, con la finalidad de eliminar el desorden y obtener un esquema más limpio y visual.

MÓDULOS

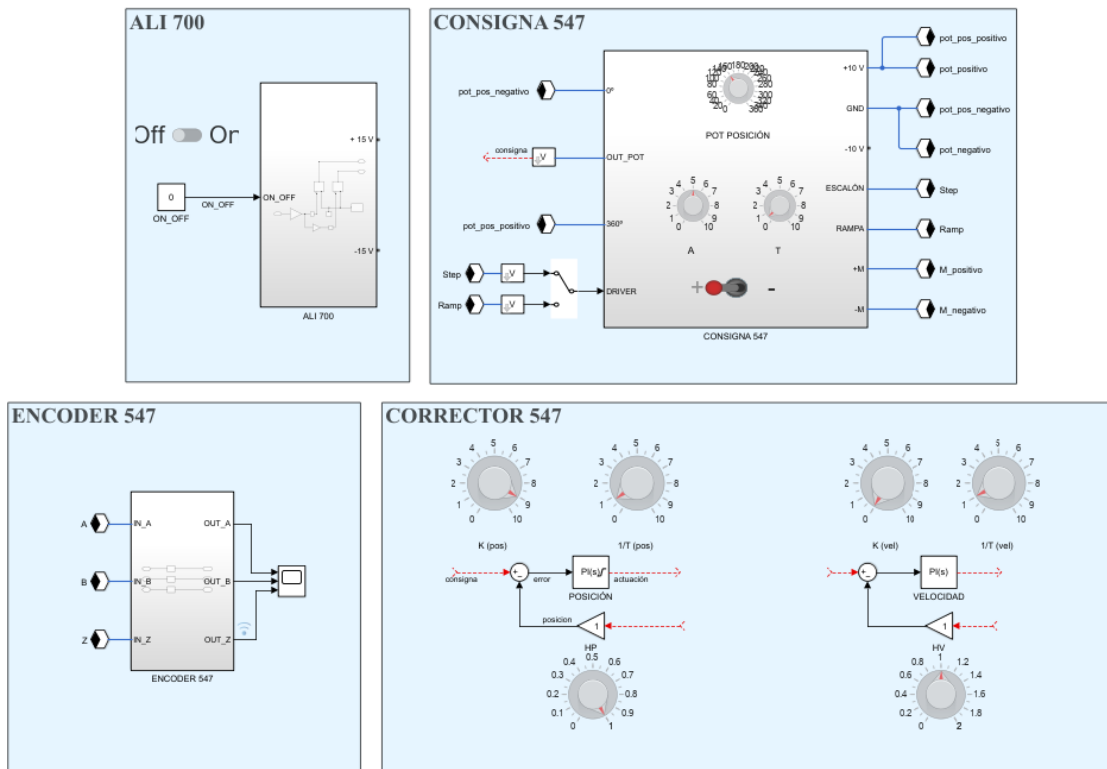


Figura 115: Modelado en Simscape de los módulos de control.

5.3. MANUAL DE USUARIO

En este apartado se pretende establecer una guía para que el usuario obtenga las nociones mínimas de uso del simulador para poder realizar sus propios experimentos.

La versión de Matlab con la que se ha realizado este trabajo es la R2023b. Sin embargo, también se tienen los archivos compatibles para la versión R2020b, que es la que se encuentra instalada en los ordenadores del laboratorio de la UMA.

Antes de ejecutar el sistema de gemelo digital, se deben inicializar una serie de parámetros característicos, tanto del motor como del esquema en general, estos se muestran en el anexo A.7. Código Matlab – Carga de Parámetros. Además, si se utiliza una versión que contenga el modelo 3D Multibody, se debe ejecutar el archivo de configuración “PreConf_Multibody.m”. Una vez ejecutados estos archivos, las variables están listas para ser utilizadas en el modelo de Simscape (Figura 116).

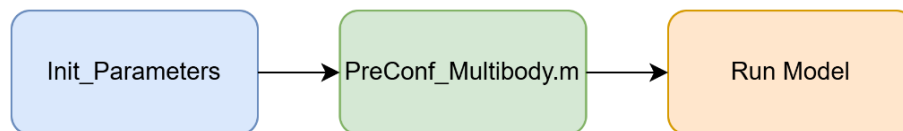


Figura 116: Secuencia de inicialización del modelo.

El tiempo de simulación debe establecerse en función del tipo de experimento a realizar. Además, si se quiere variar parámetros en tiempo real se debe establecer el tiempo de simulación en “*inf*” (tiempo de simulación infinito). Esto permite poder ajustar los diales del módulo Consigna 547 y de los controladores PI de posición y velocidad.

Cabe destacar que, si se opta por utilizar la versión del gemelo digital que incluye el modelado de la vibración presente en la velocidad, se recomienda utilizar el tipo de *solver* “*Fixed step*” con un tiempo de muestreo de $1e-4$. En caso contrario, se puede utilizar el *solver* “*Variable step*” y el tiempo de muestreo en “auto” o el que se considere necesario. Si se requiere de una ejecución rápida del modelo, se recomienda utilizar la versión sin el modelado de la vibración de la velocidad.

Para visualizar las señales de interés durante o después de la simulación, el usuario puede emplear el bloque “*Scope*”, que permite observar la evolución temporal de una o varias señales en tiempo real. No obstante, una opción más avanzada y flexible es utilizar la herramienta *Data Inspector* de Simulink, mostrada en la Figura 117.

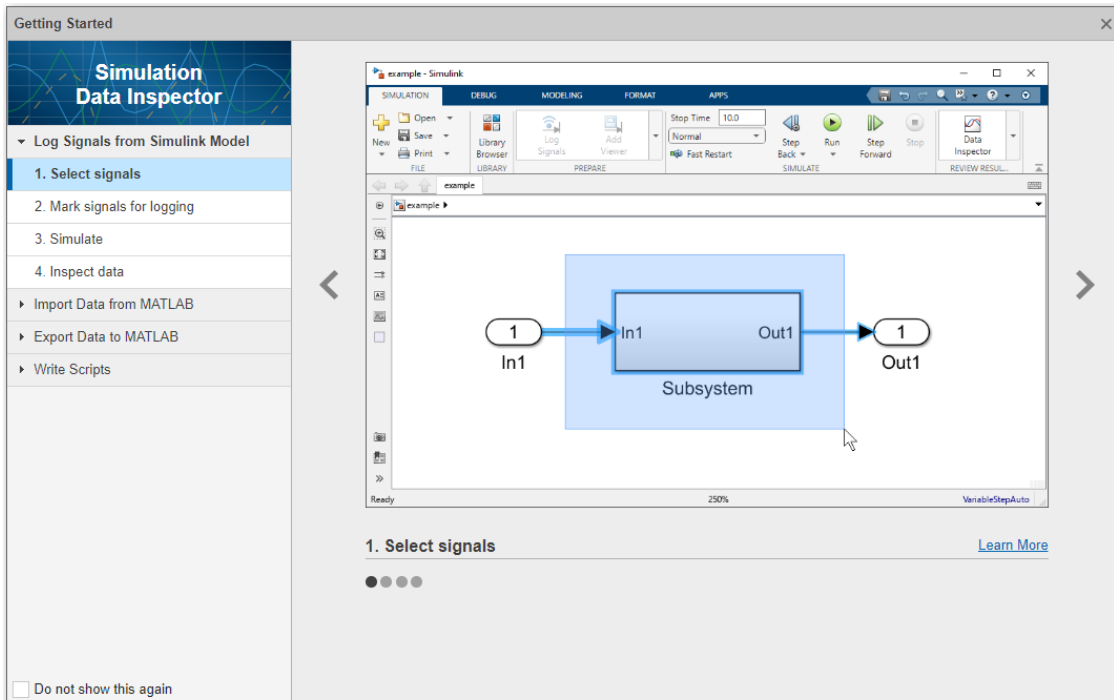


Figura 117: Data Inspector de Simulink.

Esta herramienta permite comparar señales procedentes de diferentes experimentos o ejecuciones del modelo. Para habilitar el registro de una señal específica en el *Data Inspector*, es necesario seleccionarla en el modelo y activar la opción “*Log Selected Signal*” haciendo clic derecho sobre ella. Una vez registrada, la señal estará disponible en el *Data Inspector*, donde podrá visualizarse junto a otras para realizar comparaciones gráficas. Esta funcionalidad resulta especialmente útil, ya que permite evaluar las diferencias entre la respuesta simulada y la real, además de poder importar y exportar los datos.

Para conectar diferentes bloques, es habitual hacerlo de forma manual mediante líneas de señal, pero con el fin de mantener el modelo más limpio y organizado, resulta especialmente útil emplear las etiquetas “*Goto*” y “*From*” (Figura 118), que permiten establecer conexiones lógicas sin necesidad de trazos visibles. Estas etiquetas son particularmente eficaces para estructurar los lazos de control de posición y velocidad. Por último, se ha mantenido una correspondencia visual entre los colores de las bornas en el modelo virtual y los del sistema físico, con el objetivo de facilitar la comprensión del entorno y guiar al alumno durante el uso del laboratorio virtual.

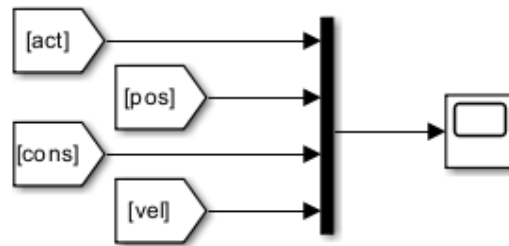


Figura 118: Etiquetas GoTo y From para el control de posición del motor.

Dado que este tipo de etiquetas manejan únicamente señales del entorno Simulink, es necesario convertir previamente las señales de Simscape. Para ello, se han creado subsistemas específicos que agrupan los bloques necesarios para realizar la conversión de magnitudes eléctricas a señales compatibles con Simulink (Figura 119).

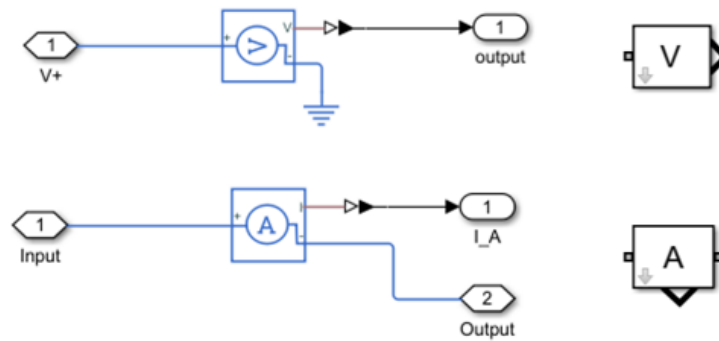


Figura 119: Subsistemas de medida de voltaje e intensidad.

Por otro lado, se encuentran las “*connection labels*”, que permiten trabajar directamente con señales del entorno Simscape, facilitando la identificación y trazado de conexiones entre bloques físicos dentro del modelo.

A la hora de definir señales de consigna, es posible utilizar una amplia variedad de tipos de señal (escalón, rampa, etc), no estando limitado únicamente a los disponibles en el entorno virtual de control original. Además, pueden utilizarse selectores de señal que permiten cambiar entre diferentes entradas de forma rápida y sencilla, tal y como se muestra en la Figura 120.

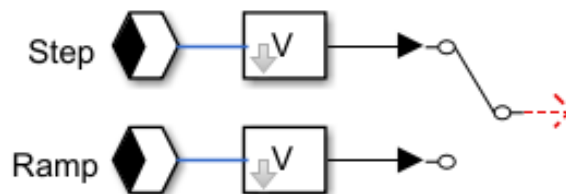


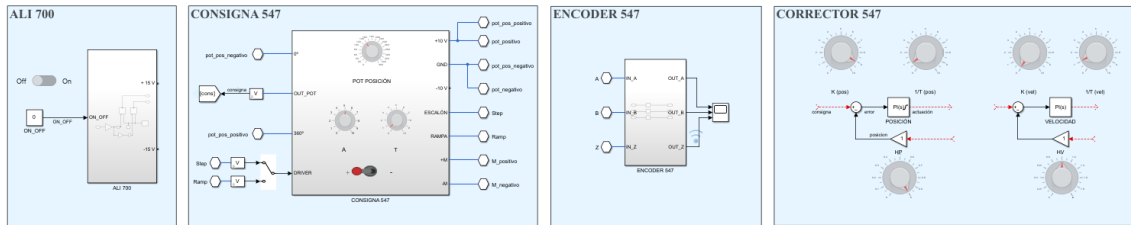
Figura 120: Ejemplo de selección de señales.

Por último, en la Figura 121 se muestra el esquema final compuesto por los “MÓDULOS”, que representa el panel frontal de módulos de control, la “MAQUETA”, que representa la maqueta que incluye el motor de CC real con los diferentes sensores y

el modelado 3D realizado con Simscape Multibody. Se obtiene así un sistema funcional para realizar todo tipo de pruebas.

LABORATORIO VIRTUAL MOTOR CC

MÓDULOS



MAQUETA

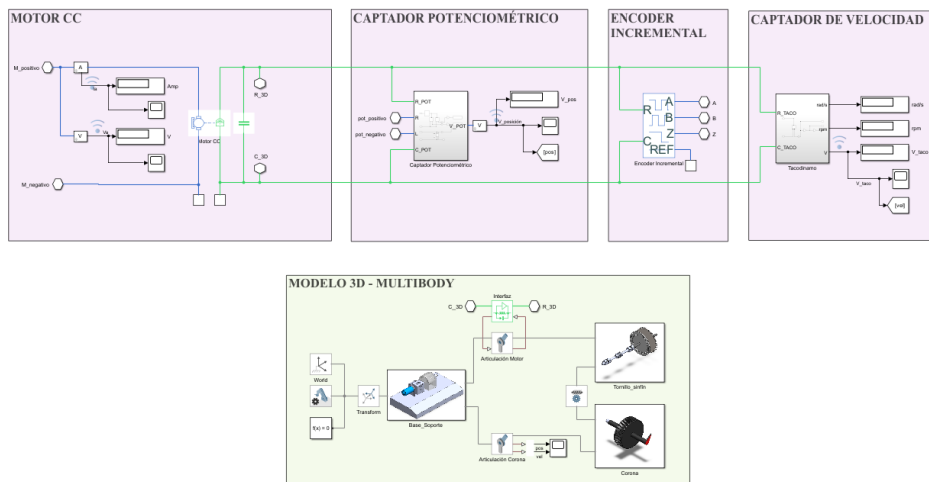


Figura 121: Modelo final del Sistema en Simscape.

5.4. MODOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

En este apartado se explicarán los diferentes modos de operación del sistema de gemelo digital. A continuación, se listan cada uno de ellos desde el más simple al más complejo, seguido de su archivo de Simulink correspondiente, adaptado para cumplir con los requisitos y características propias de dicho modo. Todos los archivos necesarios para la ejecución de cada modo, así como los vídeos demostrativos, están ubicados en un [repositorio](#) dedicado en GitHub.

- Configuración básica: Read_Data.slx
- Control mediante entorno virtual: Entorno_Control_Virtual.slx
- Visualización virtual offline con datos reales: Offline_3D.slx
- Visualización virtual online con datos reales: Entorno_Control_Virtual_3D.slx
- Simulación autónoma del motor virtual: Entorno_Control_DT_3D.slx
- Otras combinaciones

5.4.1. CONFIGURACIÓN BÁSICA

La opción más simple y utilizada por los estudiantes consiste en emplear el panel frontal de módulos físicos para controlar directamente la maqueta. Se añade la tarjeta de adquisición de datos junto con el PC para obtener los datos representativos del sistema. Esta configuración representa el punto de partida (Figura 122).

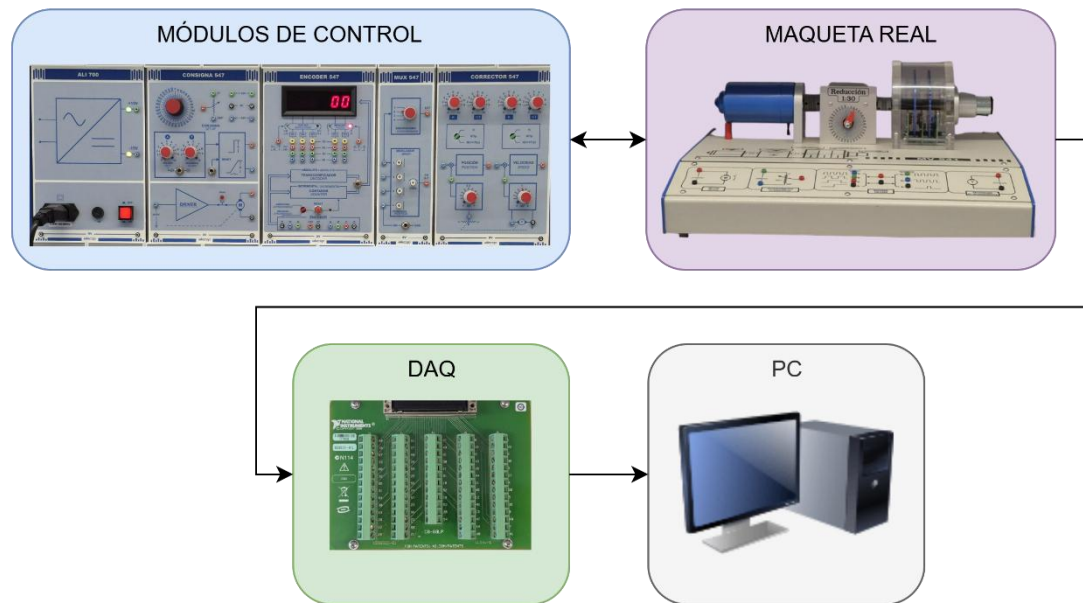


Figura 122: Modo de operación: Configuración Básica.

5.4.2. CONTROL MEDIANTE ENTORNO VIRTUAL

En una segunda configuración (Figura 123), se reemplaza el panel de módulos físicos de control por el entorno virtual de control desarrollado en este trabajo con el objetivo de controlar la maqueta real. Para ello, es necesario que a través de la tarjeta de adquisición de datos se envíe la consigna al motor y se realimenten los datos de posición y velocidad. Sin embargo, al tratarse de una tarjeta de adquisición de datos, esta no tiene potencia suficiente para alimentar al motor de CC con la consigna establecida. Es por esto por lo que se necesita hacer uso del *driver* disponible en el panel físico de módulos de control y así poder alimentar al motor de CC con suficiente potencia.

Este entorno permite controlar la maqueta de manera más flexible e intuitiva, facilitando la realización de pruebas más variadas y con mayor comodidad.

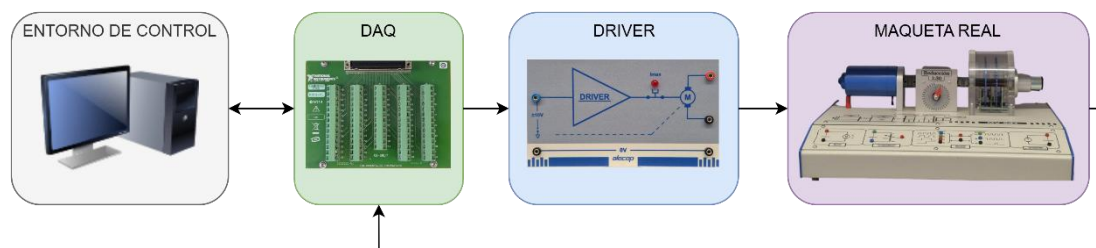


Figura 123: Modo de operación: Control mediante entorno virtual.

5.4.3. VISUALIZACIÓN VIRTUAL OFFLINE CON DATOS REALES

Una vez que se ha establecido el control de la maqueta real desde el entorno virtual de control, se pueden registrar datos como la posición, la velocidad y la señal de consigna. Estos datos pueden exportarse y utilizarse posteriormente para alimentar el modelo 3D virtual de la maqueta en Simscape Multibody, tal y como se muestra en Figura 124. De esta forma, es posible visualizar de manera offline el comportamiento dinámico del motor, sin necesidad de haber grabado un vídeo del experimento. Esto resulta especialmente útil para que el alumno relacione las gráficas obtenidas con el movimiento real.

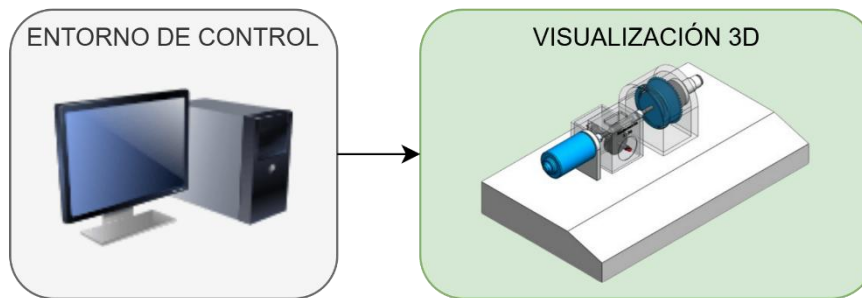


Figura 124: Modo de operación: Visualización virtual offline con datos reales.

5.4.4. VISUALIZACIÓN VIRTUAL ONLINE CON DATOS REALES

Por otro lado, los datos recogidos pueden emplearse para actualizar en tiempo real el modelo 3D virtual, de modo que este reproduzca de forma sincronizada el movimiento del motor físico (Figura 125). Esta opción permite observar el comportamiento del sistema sin necesidad de estar presente en el laboratorio, siempre que exista una conexión remota al PC del laboratorio. Esta funcionalidad tiene también aplicaciones industriales, ya que permite monitorizar componentes sin necesidad de cámaras ni observación directa.

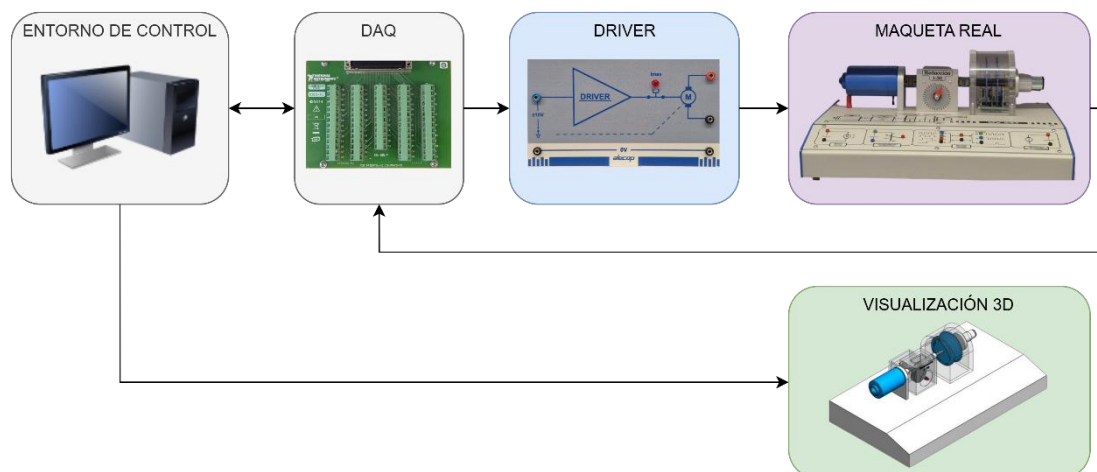


Figura 125: Modo de operación: Visualización virtual online con datos reales.

5.4.5. SIMULACIÓN AUTÓNOMA DEL MOTOR VIRTUAL

Otro modo de operación consiste en utilizar únicamente el entorno virtual de control junto con el gemelo digital del motor de CC, sin necesidad de conexión a la maqueta real (Figura 126). En este caso, el comportamiento observado corresponde al gemelo digital, que ha sido configurado con los parámetros característicos del motor de CC real. Esto permite realizar simulaciones, analizar datos y visualizar movimientos en 3D sin depender del hardware, lo cual facilita el aprendizaje y la experimentación en remoto. Es importante señalar que este modo de operación permite analizar la respuesta del sistema ante modificaciones en los parámetros característicos del motor, lo que resulta útil para prever su comportamiento antes de realizar ensayos sobre el sistema real.

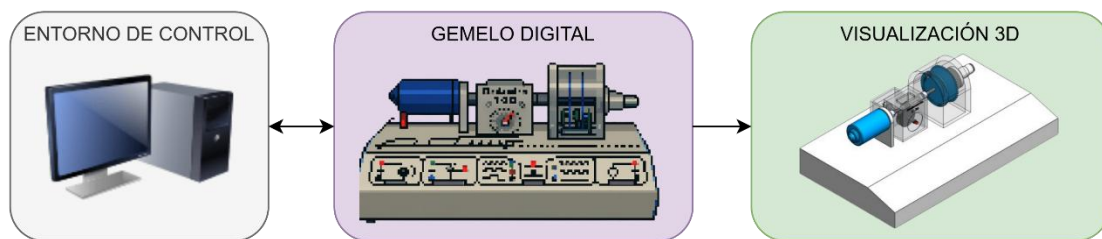


Figura 126: Modo de operación: Simulación autónoma del motor virtual

5.4.6. OTROS MODOS DE OPERACIÓN

Si bien existen combinaciones menos comunes, como utilizar el panel de módulos físicos para controlar únicamente el motor virtual, estas no resultan especialmente útiles. El panel físico carece de la flexibilidad y conectividad que ofrece el entorno virtual desarrollado, y no permite realizar experimentos de forma remota ni personalizar con facilidad las condiciones de prueba.

Otra de las combinaciones posibles se enmarca en un entorno industrial, donde están presentes mecanismos más complejos con necesidad de visualizarlos en tiempo real de forma remota, disponiendo únicamente de datos procedentes de sensores instalados en la fábrica, por ejemplo, la posición del eje de un determinado motor o la velocidad de una cinta transportadora.

Esta opción representaría una extensión de la “configuración básica”, en la que los módulos de control y la maqueta se tratan como una caja negra (proceso productivo), de la que se extraen únicamente las señales de los sensores. Estas señales se podrían emplear para la visualización virtual del gemelo digital e incluso para realizar un análisis de datos que permita extraer conclusiones adicionales sobre el comportamiento del sistema (Figura 127).

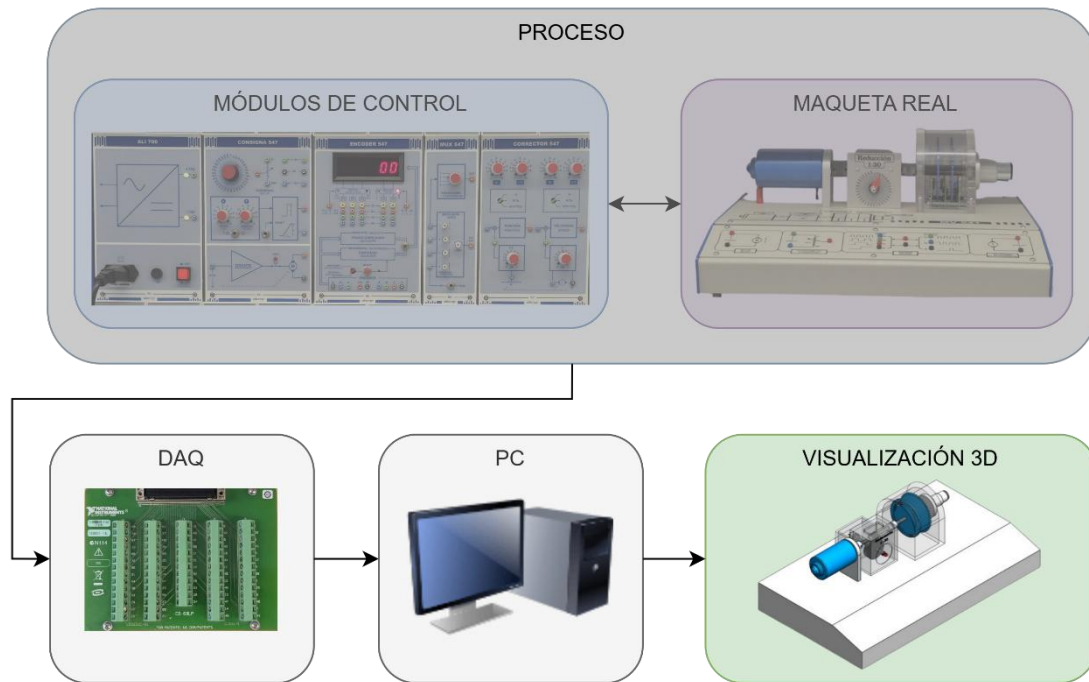


Figura 127: Modo de operación para la visualización del comportamiento de un proceso.

Cabe destacar que, en caso de tener capacidad de control sobre el sistema, correspondería al modo de operación denominado “visualización virtual online con datos reales”. Sin embargo, este enfoque no ha sido considerado en este trabajo, ya que no aporta un beneficio relevante para los objetivos del mismo.

Otra posibilidad consiste en que el entorno virtual controle de forma simultánea tanto el gemelo digital como el físico, lo que permitiría comparar sus respuestas en tiempo real y ajustar los parámetros del gemelo digital, con el fin de aproximar su comportamiento al del sistema real. Sin embargo, esta funcionalidad no ha sido abordada ni desarrollada en el presente trabajo, al no aportar beneficios significativos en el contexto de las prácticas del alumno, por lo que se ha decidido no implementar este modo de operación. El esquema correspondiente se presenta en la Figura 128:

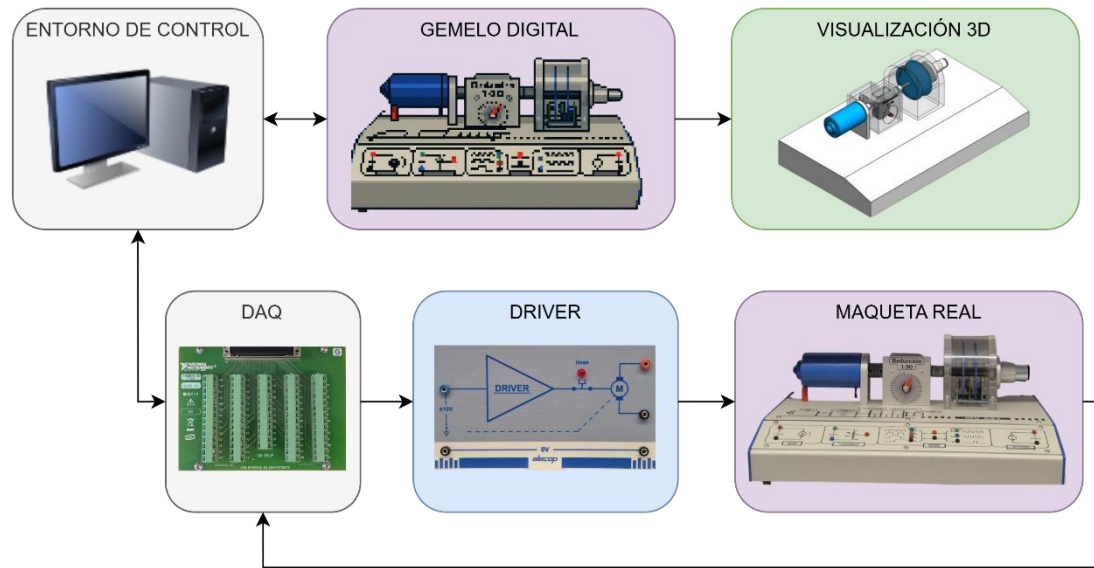


Figura 128: Modo de operación para la comparación entre gemelo digital y físico.

CAPÍTULO 6: IMPLANTACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de este trabajo. La información recopilada proviene tanto de las simulaciones realizadas como de las pruebas prácticas en el laboratorio. Además, se incluyen gráficos y representaciones visuales que facilitan la comprensión de los datos obtenidos.

6.2. PRUEBAS REALIZADAS

En este apartado se pretende exponer una batería de experimentos que validen el sistema al completo, tanto la maqueta virtual como el simulador. Para ello, se aplican distintas señales de actuación al motor real y al virtual y se comparan sus respuestas haciendo uso de la herramienta *Data Inspector* de Simulink. Esta comparación se puede llevar a cabo de dos formas. La primera de ellas consiste en importar al *Data Inspector* los datos capturados relativos al experimento real y compararlos con los del experimento virtual. La segunda forma implica exportar los datos del experimento virtual a un archivo *.mat* y compararlos con los del experimento real haciendo uso de un script desarrollado en Matlab. En este trabajo se han implementado ambas opciones, eligiéndose una u otra en función de la sencillez y adecuación al análisis requerido en cada caso.

Cabe resaltar al usuario que vaya a realizar experimentos con la maqueta MV-541 que, para un mismo experimento realizado en diferentes instantes de tiempo, por ejemplo, en diferentes días, se pueden obtener resultados ligeramente diferentes. Por ejemplo, para una consigna de 5 V, se tiene una variación en la respuesta de 0,1 V, es decir, del 2%.

Dado que las pruebas más complicadas de llevar a cabo son las relativas al control de posición y velocidad, en la Figura 129 se muestra un esquema que puede ayudar al usuario a comprender las conexiones a realizar para ejecutar correctamente estos experimentos. Nótese que el bloque “*DRIVER*” comprende tanto la etapa de potencia como el controlador PI.

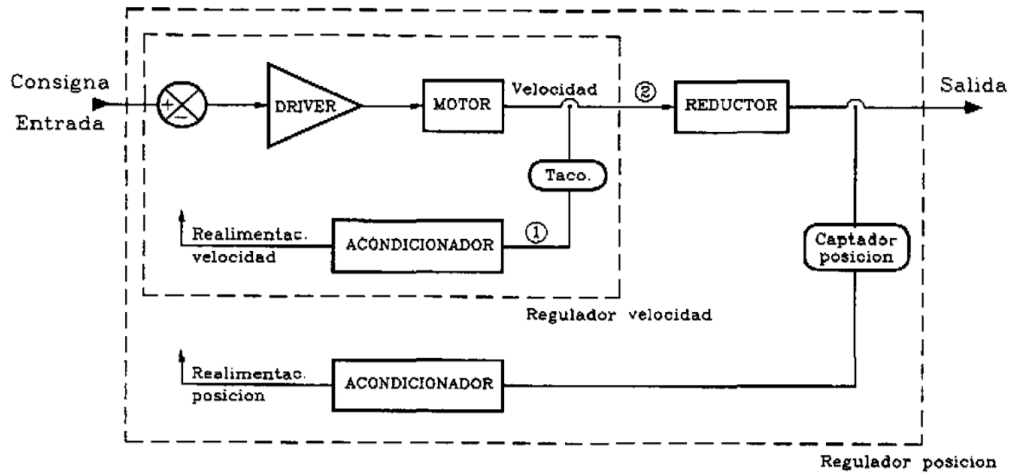


Figura 129: Esquema de ayuda para realizar un control de posición o velocidad.

6.2.1. RESPUESTA ANTE CONSIGNA TIPO ESCALÓN

La primera de las pruebas realizadas es una de las más sencillas, pues consiste en aplicar al motor una consigna de tipo escalón con valor igual a 5 V. En la Figura 130 se grafican tanto la velocidad del motor real como la del motor virtual.

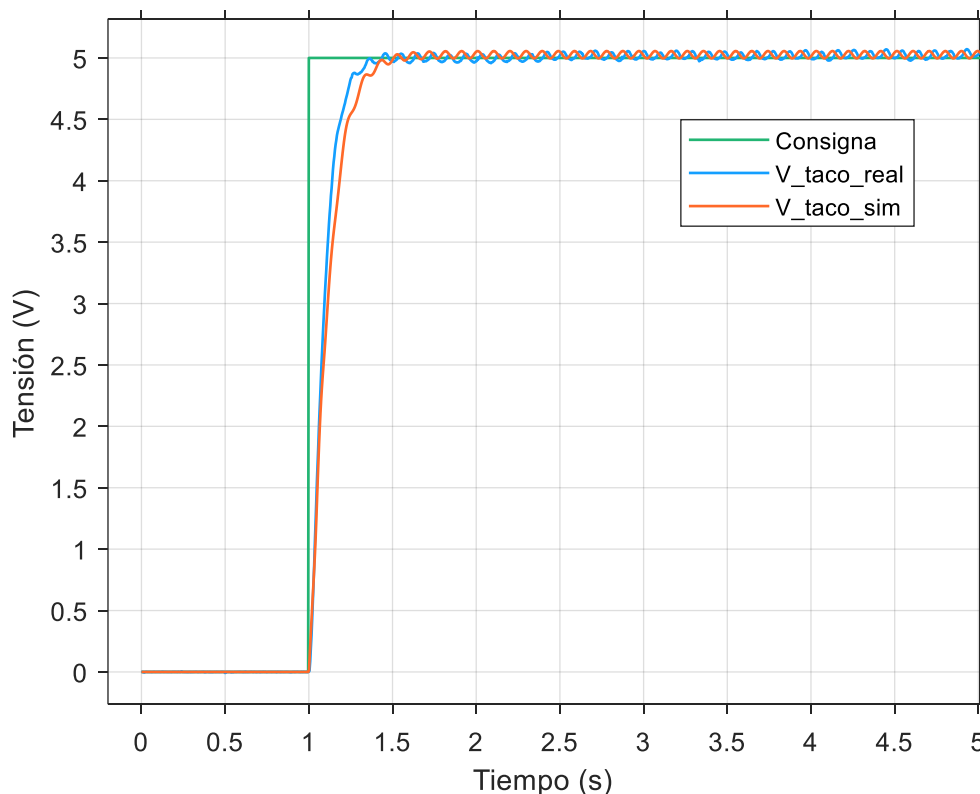


Figura 130: Velocidad del motor ante una consigna tipo escalón.

Para una mejor comparación entre las respuestas de ambos sistemas, se procede a graficar la diferencia entre ambas señales, obteniendo la gráfica de la Figura 131. Se observa que la mayor diferencia ocurre en la zona de transición, es decir, durante el régimen

transitorio de la señal. Sin embargo, en régimen estacionario apenas hay diferencia entre señales, quedando dentro del rango de tolerancia de 0,1 V.

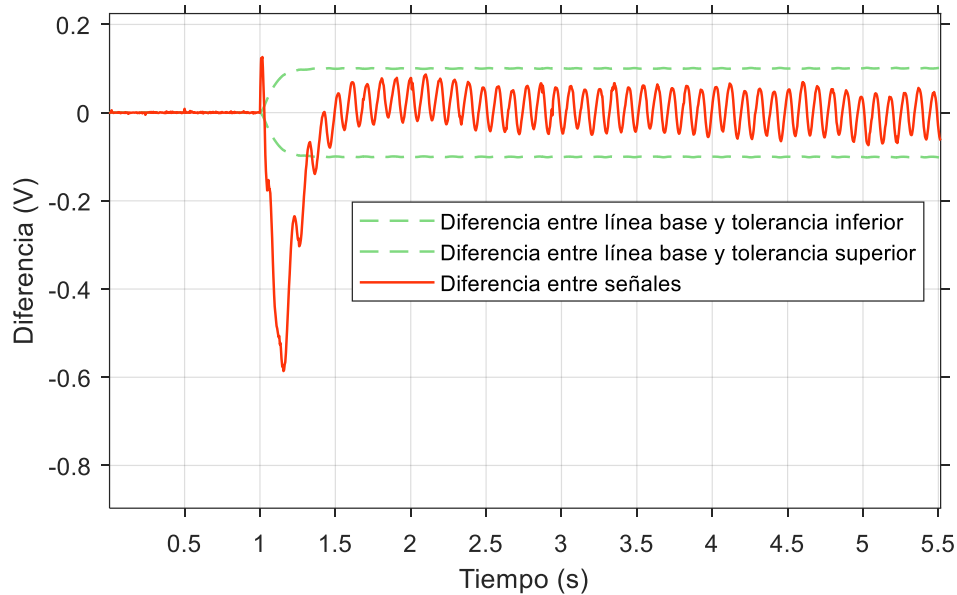


Figura 131: Diferencia de velocidades del motor real vs motor simulado ante consigna escalón.

En la Figura 132 se muestra el voltaje medido a través del captador potenciométrico, tanto el virtual como el real. Se observa que el potenciómetro simulado representa casi a la perfección al potenciómetro real. La zona muerta del potenciómetro es perfectamente visible y con bastante similitud a la real.

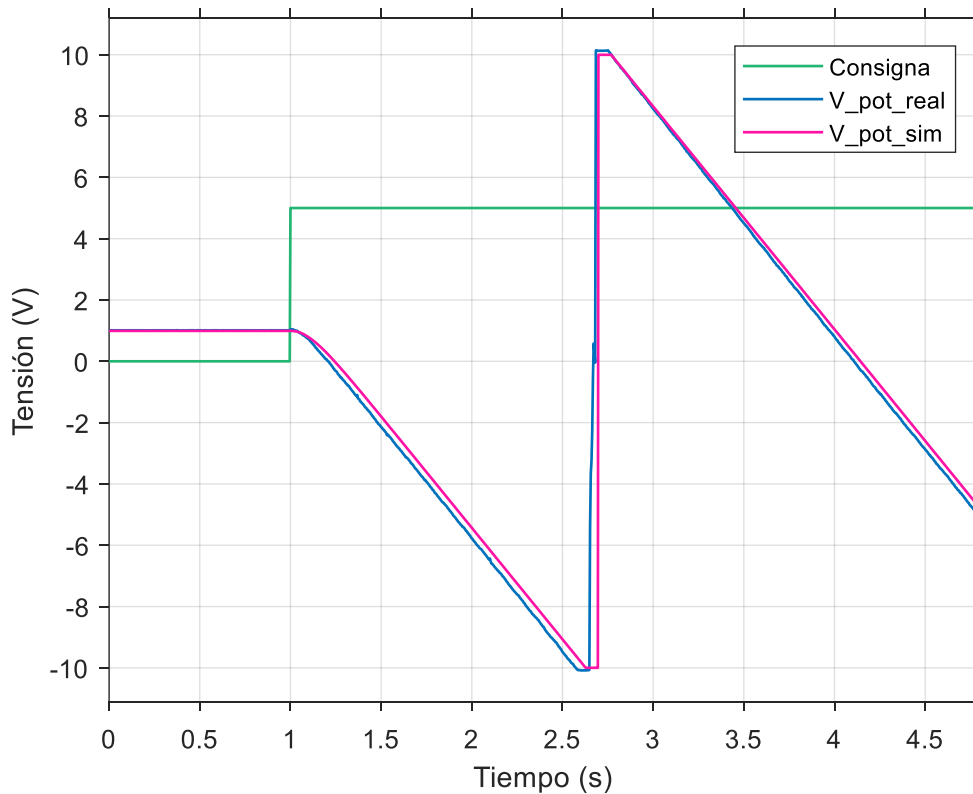


Figura 132: Posición del eje del motor ante una consigna tipo escalón.

En la Figura 133 se muestra el error entre ambas señales, observándose que se mantiene dentro de una banda de ± 1 V, salvo en el momento del cambio de polaridad, donde se alcanza una diferencia de -20 V. Esta discrepancia no es significativa, ya que es habitual que el cambio de polaridad no se produzca de forma perfectamente sincronizada. Durante el resto del experimento, la diferencia máxima entre las señales es de 0,4 V.

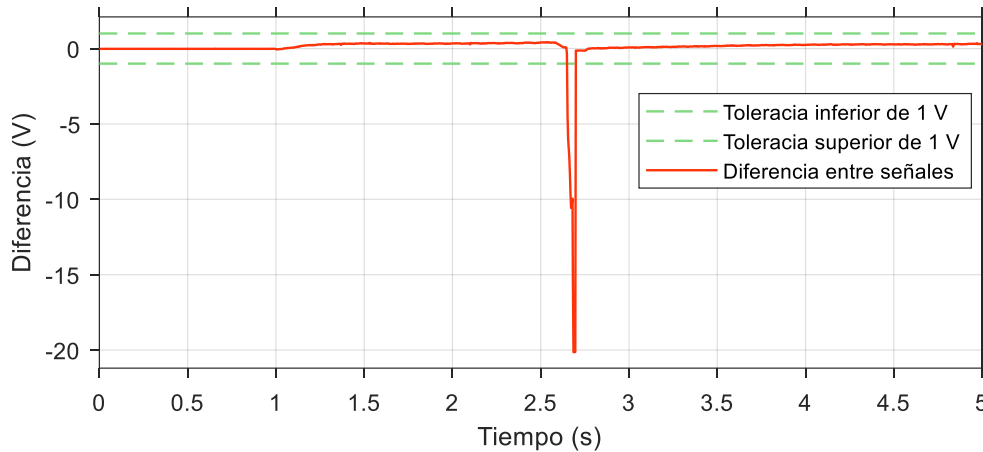


Figura 133: Diferencia de la señal de posición del motor real vs motor simulado ante consigna escalón.

Por otro lado, en la Figura 134 se muestra la señal digital del encoder real y del virtual. Se puede observar cómo ambas señales encajan en frecuencia y amplitud.

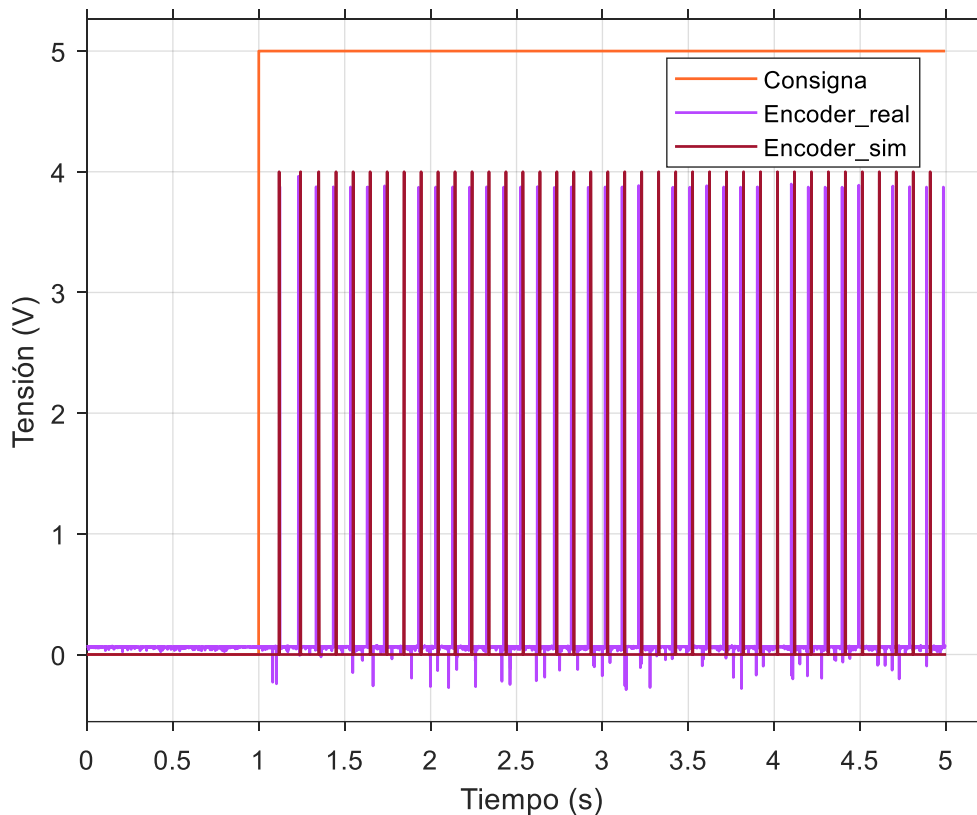


Figura 134: Pulsos del encoder virtual vs real ante una consigna tipo escalón.

6.2.2. RESPUESTA ANTE CONSIGNA TIPO RAMPA

En este experimento, la consigna que se aplica al motor es una señal tipo rampa que comienza en -10 V y finaliza en 10 V. En la Figura 135 se grafican tanto la velocidad del motor real como la del motor virtual, donde se observa que la zona muerta y la saturación coinciden con los datos reales.

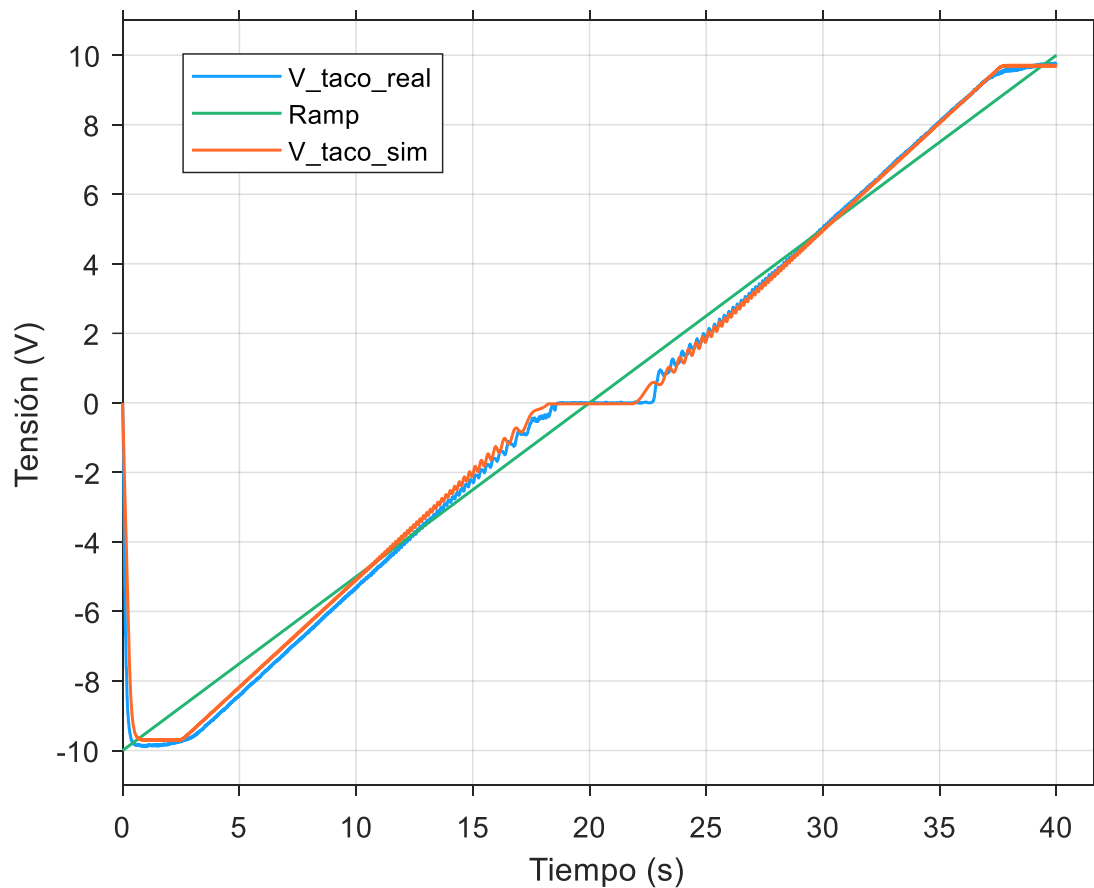


Figura 135: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo rampa ascendente.

De nuevo, para una mejor comparación entre los sistemas bajo pruebas, se procede a graficar la diferencia, obteniendo la gráfica de la Figura 136. Se observa que la mayor diferencia ocurre en la zona de transición, es decir, durante el régimen transitorio de la señal. Sin embargo, en régimen estacionario apenas hay diferencia, estando dentro de la banda de 0,5 V.

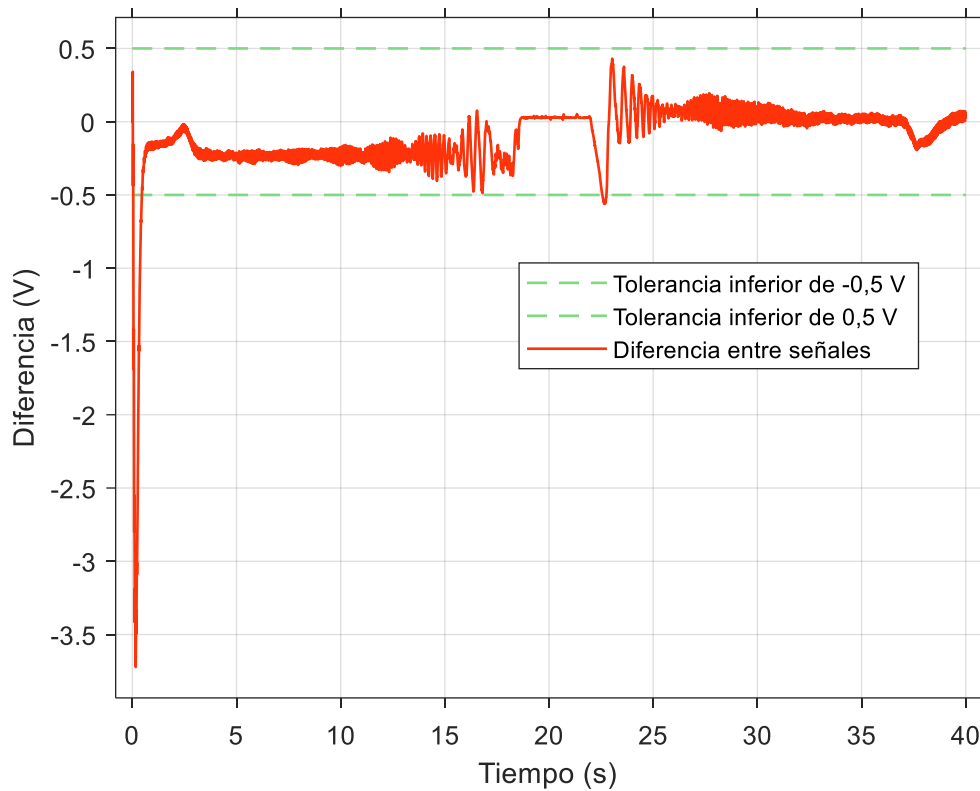


Figura 136: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs motor simulado ante consigna rampa ascendente.

En la Figura 137 se grafican los resultados del mismo experimento, pero con una rampa descendente. Sin embargo, esta vez se decide graficar la primera mitad, es decir, desde 10 V hasta 0 V, con el objetivo de poder visualizar con mayor detalle ambas respuestas. Al igual que en el anterior, se observa que la zona muerta y la saturación coinciden con los datos reales.

Por otro lado, en la Figura 138 se muestra la diferencia de las respuestas de ambos sistemas. Se aprecia que el error se mantiene dentro de los márgenes de tolerancia, salvo durante el estado transitorio.

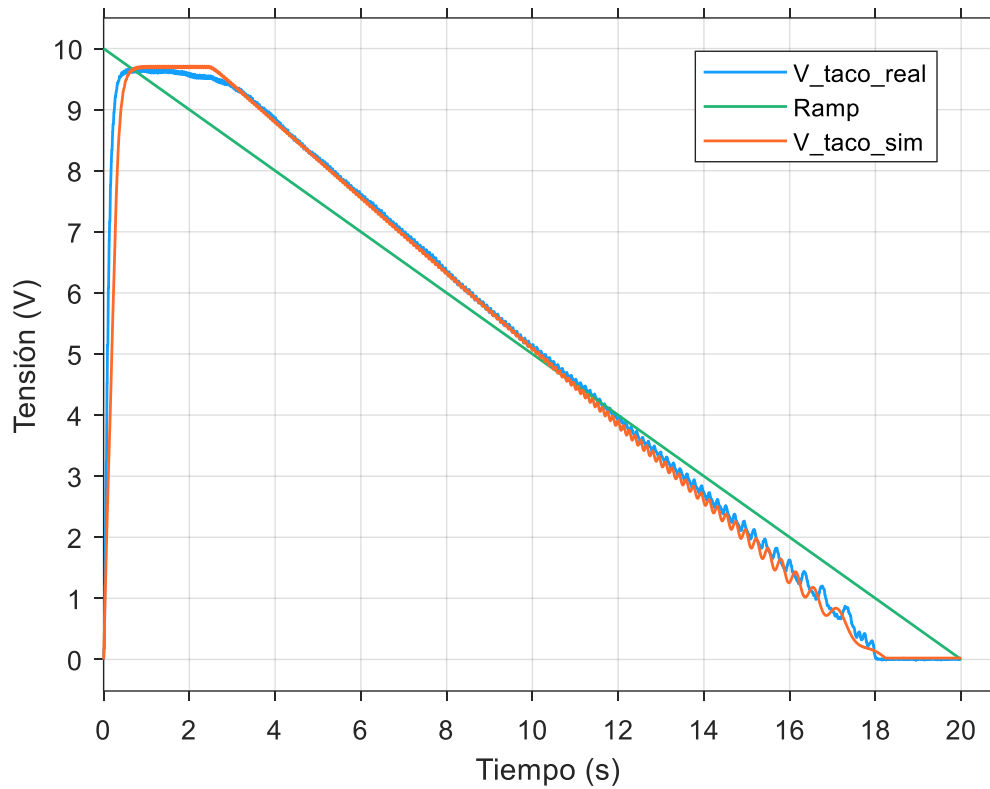


Figura 137: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo rampa descendente.

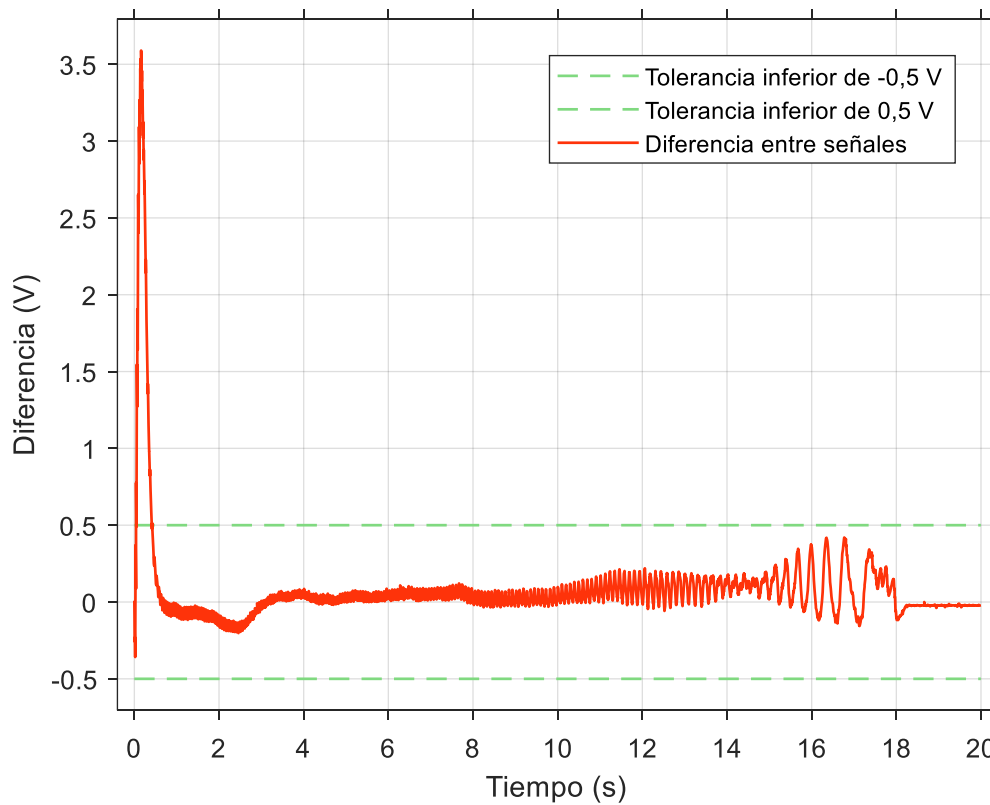


Figura 138: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs motor simulado ante consigna rampa descendente.

6.2.3. RESPUESTA ANTE CONSIGNA TIPO RAMPA ESCALONADA

En este experimento, la consigna del motor es una rampa escalonada ascendente, desde -10 V hasta 10 V (Figura 139). Este tipo de experimento permite un mejor análisis del comportamiento del motor para cada valor de consigna. La similitud entre la señal de velocidad real y simulada indica una buena correspondencia entre el gemelo digital y el comportamiento del sistema físico.

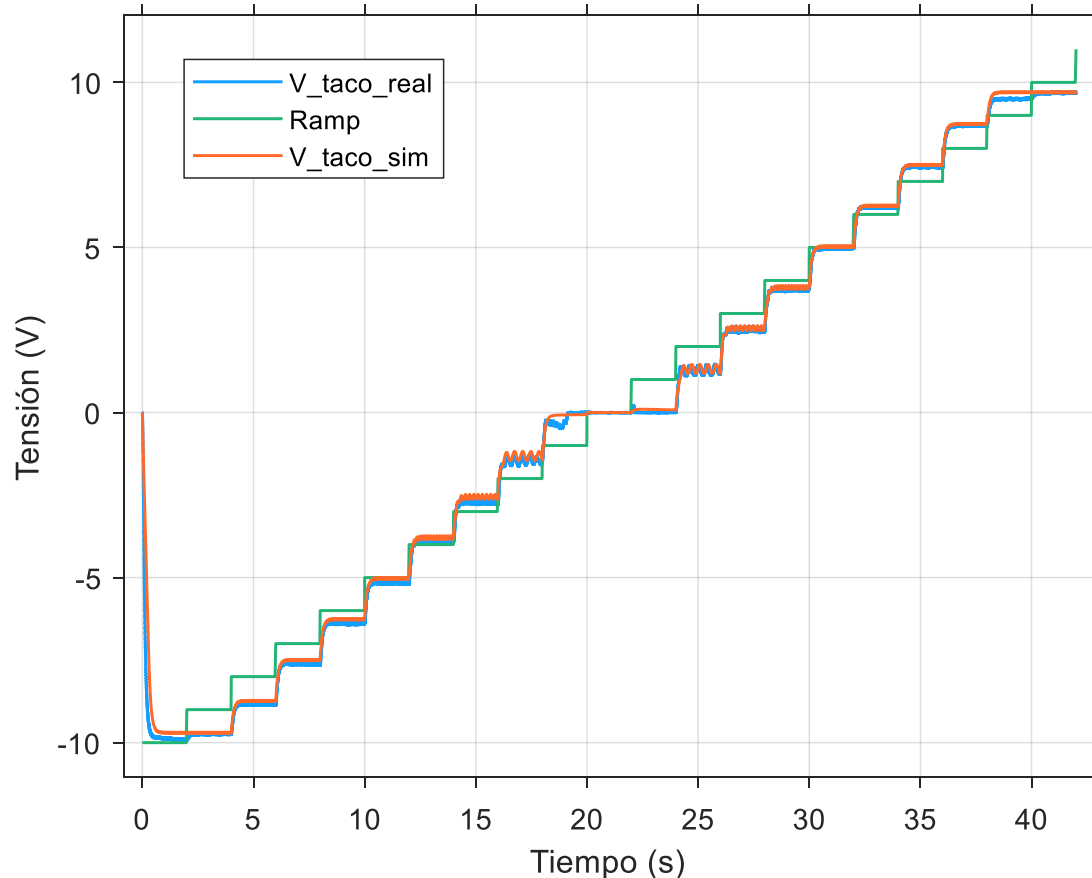


Figura 139: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo rampa escalonada ascendente.

En la Figura 140 se observa que la diferencia entre las señales de ambos sistemas se encuentra dentro del margen de tolerancia, no superando los 0,5 V en ambos sentidos, excepto para el estado transitorio cuando se aplica la consigna de -10 V. Por tanto, la respuesta del modelo a este experimento es adecuada.

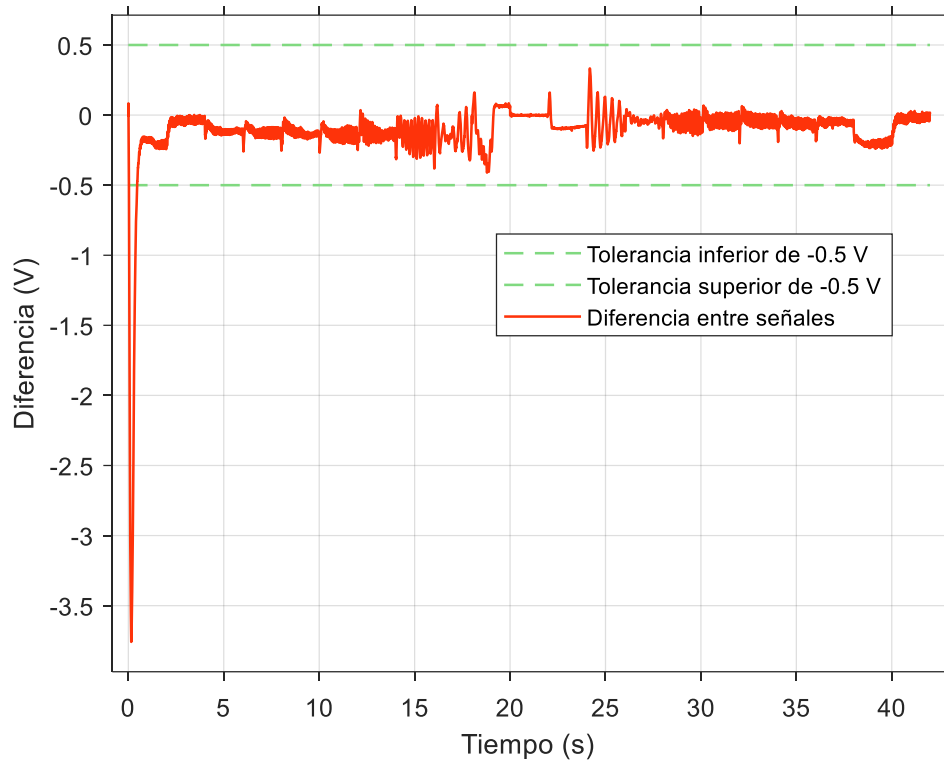


Figura 140: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado ante consigna escalonada ascendente.

Una vez más, se decide graficar en la Figura 141 las respuestas para un rango comprendido entre 10 V y 0 V para tener mayor claridad sobre las señales.

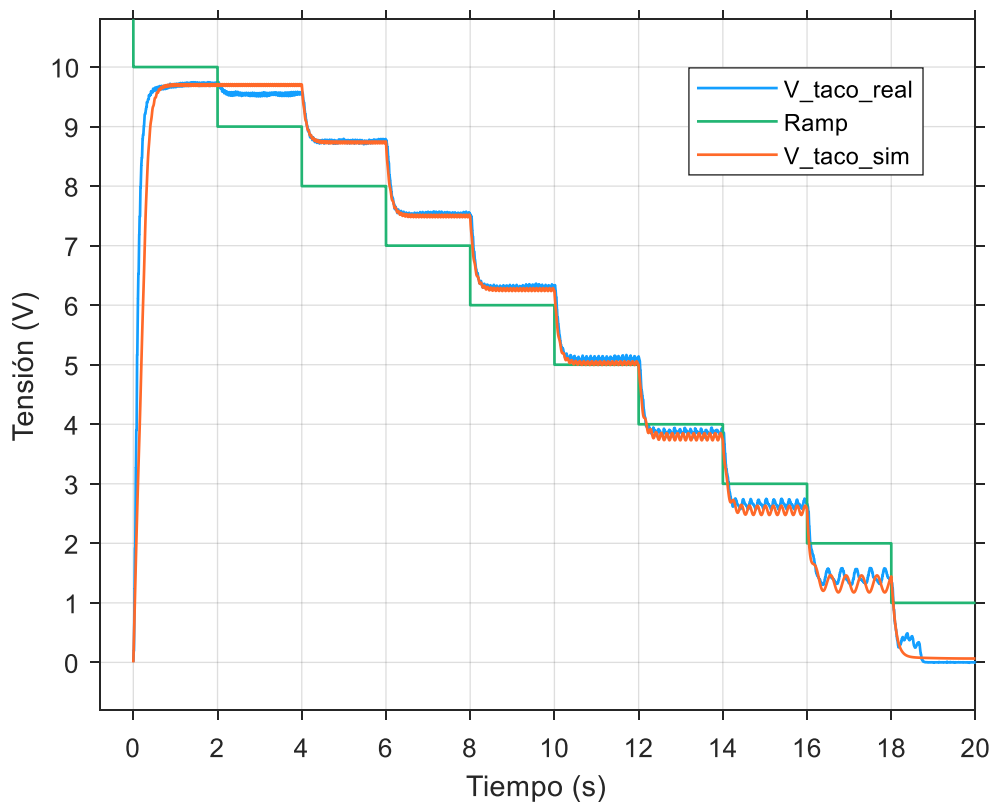


Figura 141: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo rampa escalonada descendente.

Se observa que el comportamiento del motor virtual reproduce con precisión la respuesta del motor real, especialmente en la zona lineal comprendida entre 4 V y 8 V, donde ambos sistemas muestran una respuesta prácticamente idéntica. En la Figura 142 se muestra la diferencia de ambas señales, no superando el margen de tolerancia de 0,5 V, excepto en el régimen transitorio.

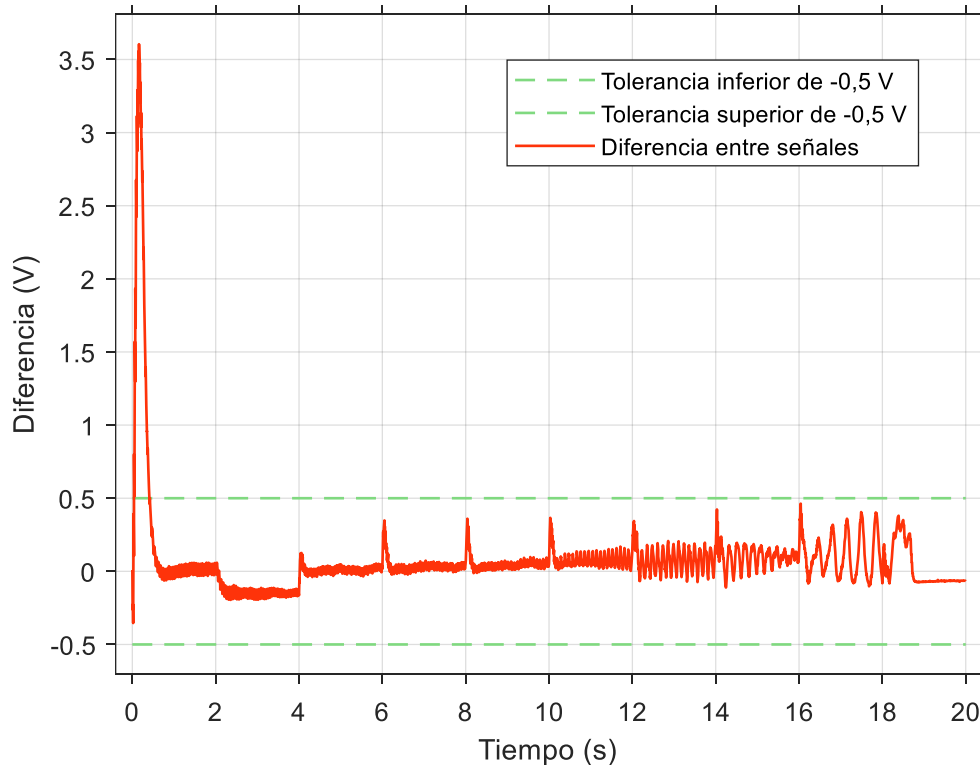


Figura 142: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado ante consigna escalonada descendente.

6.2.4. RESPUESTA ANTE CONSIGNA TIPO SENOIDAL

En este experimento, la consigna del motor es una señal senoidal con amplitud 5 V y frecuencia 0,5 rad/s. En la Figura 143 se muestra la velocidad del motor real y virtual, donde se observa la presencia de la zona muerta. Cabe destacar que, para voltajes negativos, la velocidad del motor virtual no se asimila tanto al motor real en comparación a voltajes positivos. Sin embargo, el error de la velocidad entre ambos sistemas no supera en ningún caso el límite de 0,5 V(Figura 144).

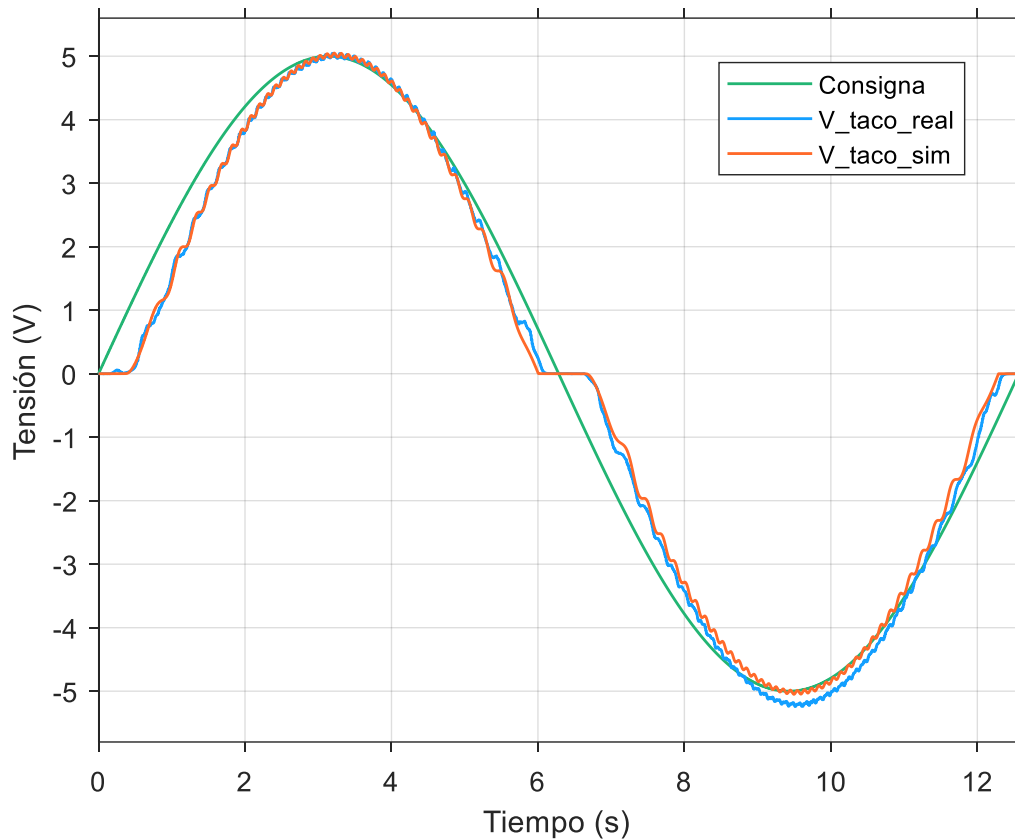


Figura 143: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo senoidal con amplitud 5 V.

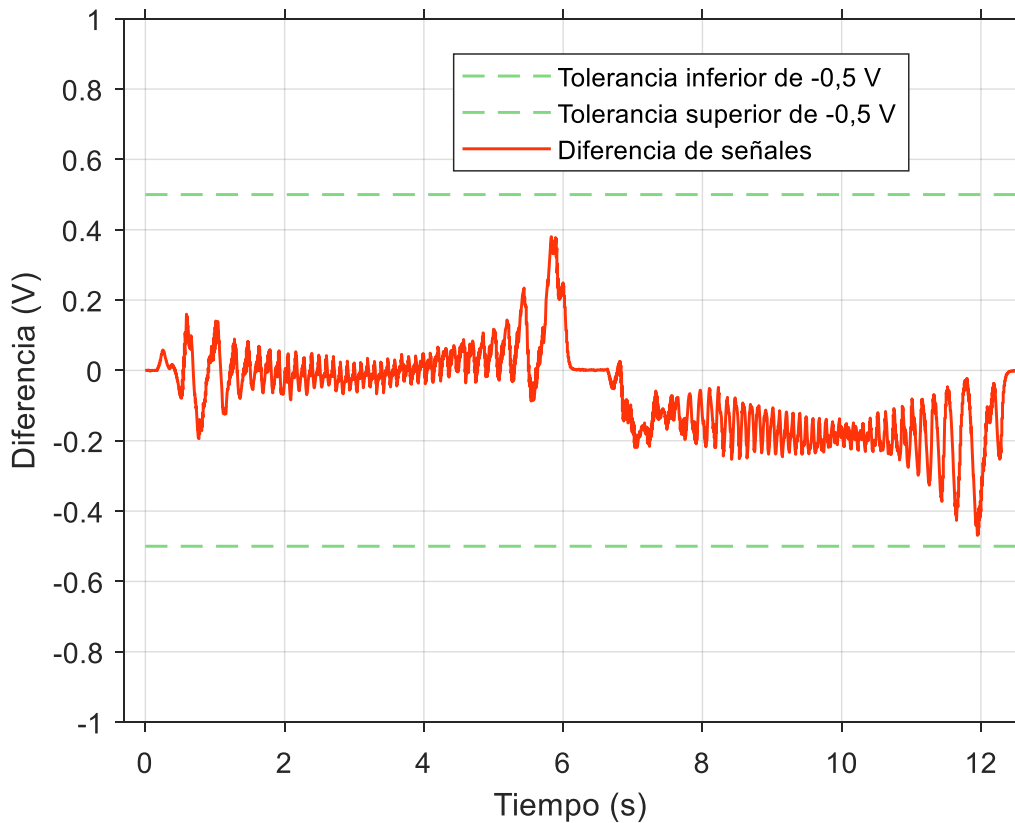


Figura 144: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado ante consigna senoidal de 5 V.

De igual modo, se realiza el mismo experimento, pero cambiando la amplitud de la señal senoidal a 10 V, y se obtienen los resultados mostrados en la Figura 145. Esta vez se puede observar la presencia de la saturación de la velocidad en torno al valor de consigna igual a 9 V.

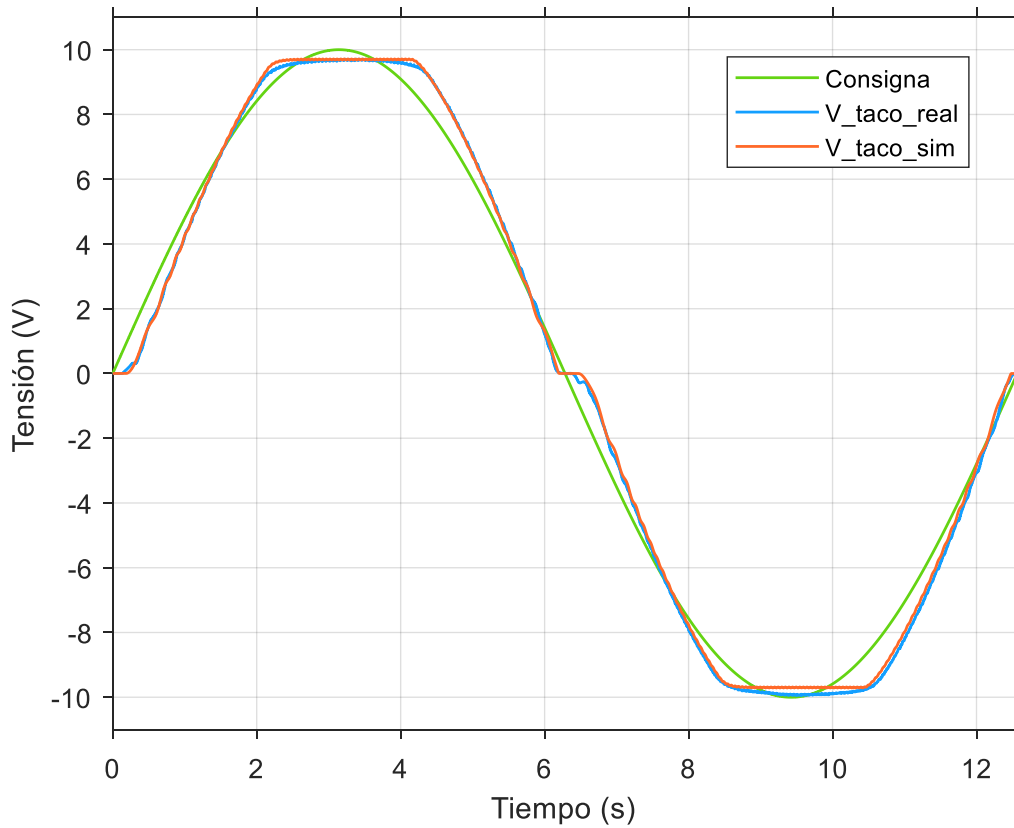


Figura 145: Respuesta del motor real vs virtual ante entrada tipo senoidal con amplitud 10 V.

En la Figura 146 se muestra el error entre la velocidad de ambos sistemas, no superándose el valor de 0,5 V marcado por el margen de tolerancia. Se concluye que el gemelo digital representa fielmente las no linealidades del motor real, como saturación y zona muerta.

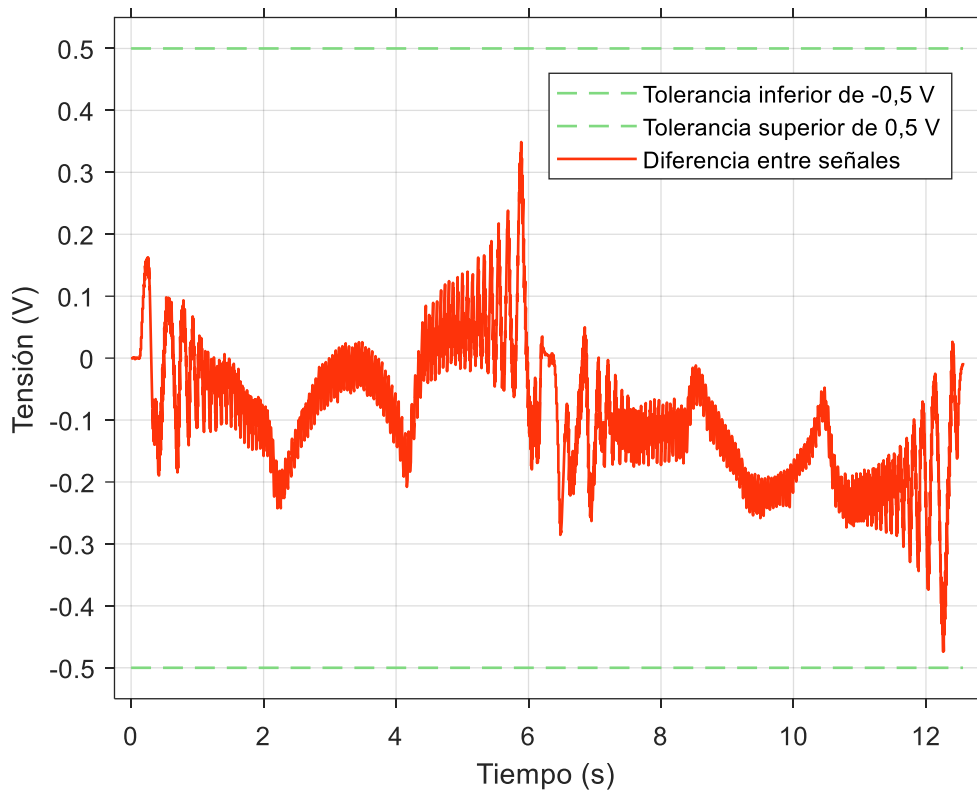


Figura 146: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado ante consigna senoidal de 10 V.

6.2.5. COMPARACIÓN CONTROL PI EN POSICIÓN

En este experimento se compara la respuesta del motor real y virtual en un control PI en posición. Para ello, se aplica una consigna tipo escalón pasando de 2 V a 5 V. La posición inicial del eje del motor es de 180° , correspondiente a una señal de 5 V, considerando que el captador potenciométrico está alimentado con 10 V en la borna asociada a 360° y 0 V en la borna de 0° . Por tanto, se debe establecer este valor de ángulo inicial en el gemelo digital modificando la variable *Theta_reductora*. El esquema experimental realizado para este experimento es el mostrado en la Figura 147:

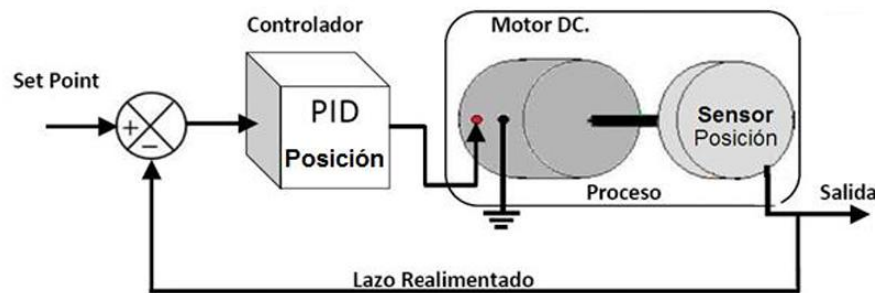


Figura 147: Esquema de control en posición.

El esquema Simulink realizado para capturar los datos de velocidad, posición y consigna correspondientes a este experimento se muestra en la Figura 148. Este esquema es una versión simplificada del modo de operación "Control mediante entorno virtual", realizado con el fin de mejorar la claridad en este trabajo.

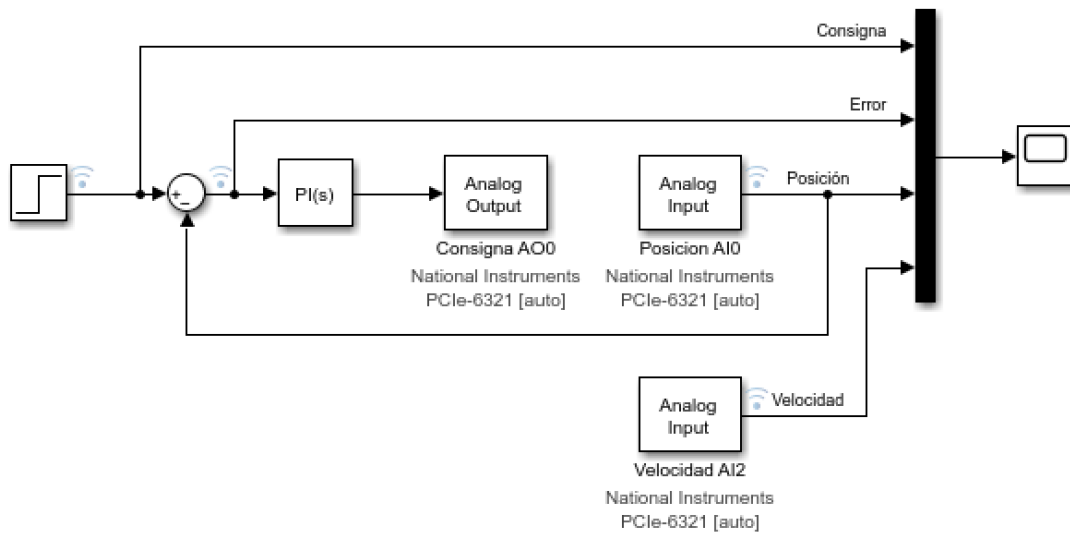


Figura 148: Esquema de adquisición de datos para control PI en posición.

A su vez, se realiza el mismo experimento con el gemelo digital. El esquema de control es el mostrado en Figura 149. Se puede observar que se ha incluido un pequeño *delay* de 0,001 segundos para la señal de consigna y de realimentación (posición) para evitar posibles bucles algebraicos y, por consiguiente, problemas en la simulación.

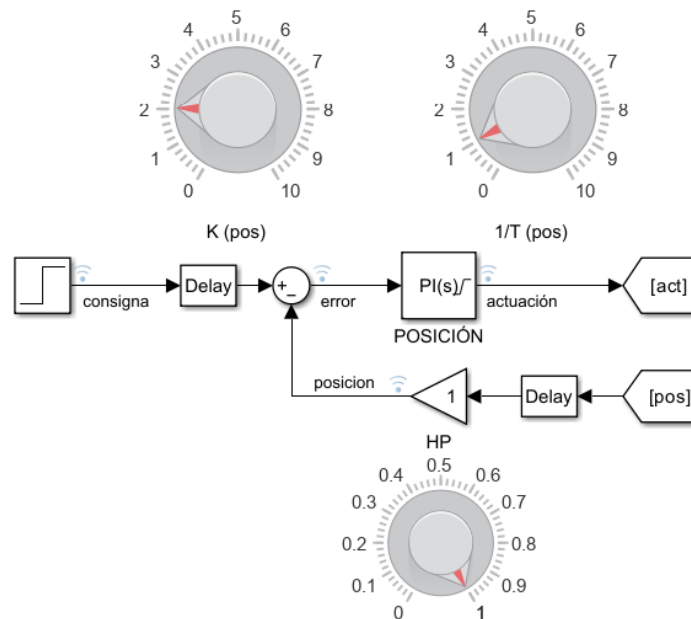


Figura 149: Esquema de control PI en posición.

A continuación, se dividen los resultados obtenidos en diferentes figuras. Primero, se muestra la evolución de la posición del eje del motor, expresada en voltios. En la Figura 150, se observa cómo la respuesta simulada se aproxima bastante a la real. Cabe resaltar que, para tiempos de simulación mayores a 16 segundos, el control PI corrige el error en régimen permanente, para conseguir alcanzar la consigna dada de valor 5 V. En general, el motor virtual reproduce fielmente el comportamiento del motor real, con diferencias de señal que se mantienen dentro del margen de tolerancia de 0,5 V (Figura 151).

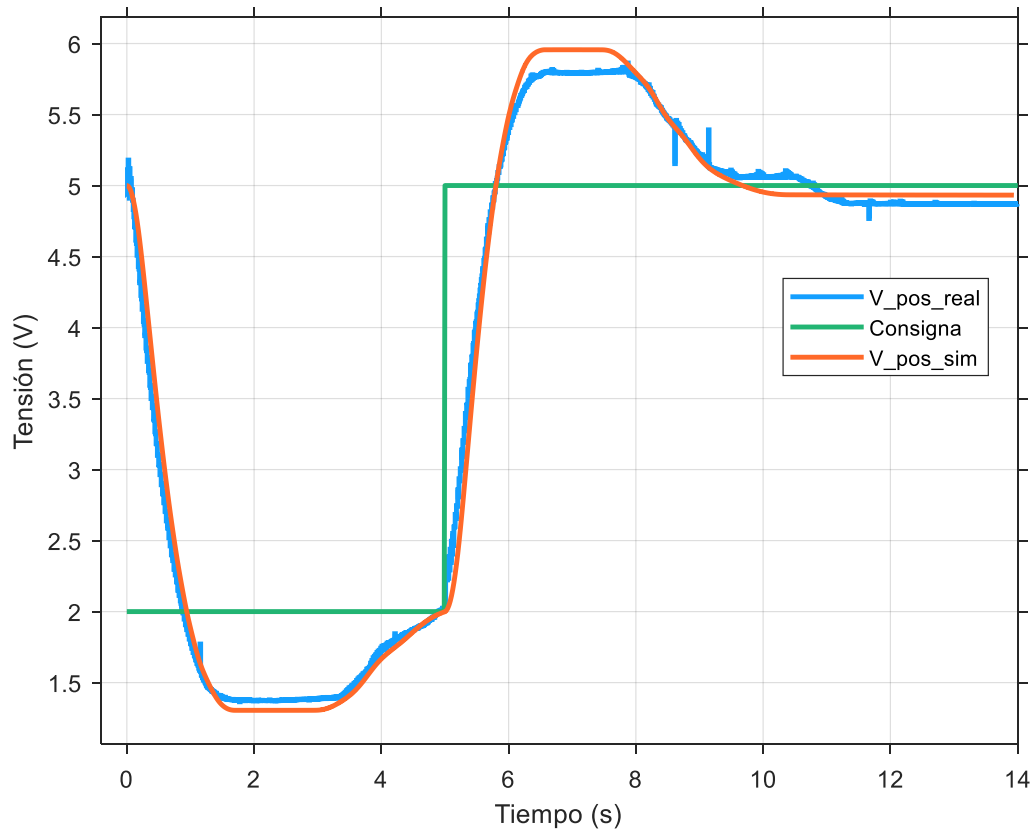


Figura 150: Respuesta de la posición del motor ante un control PI.

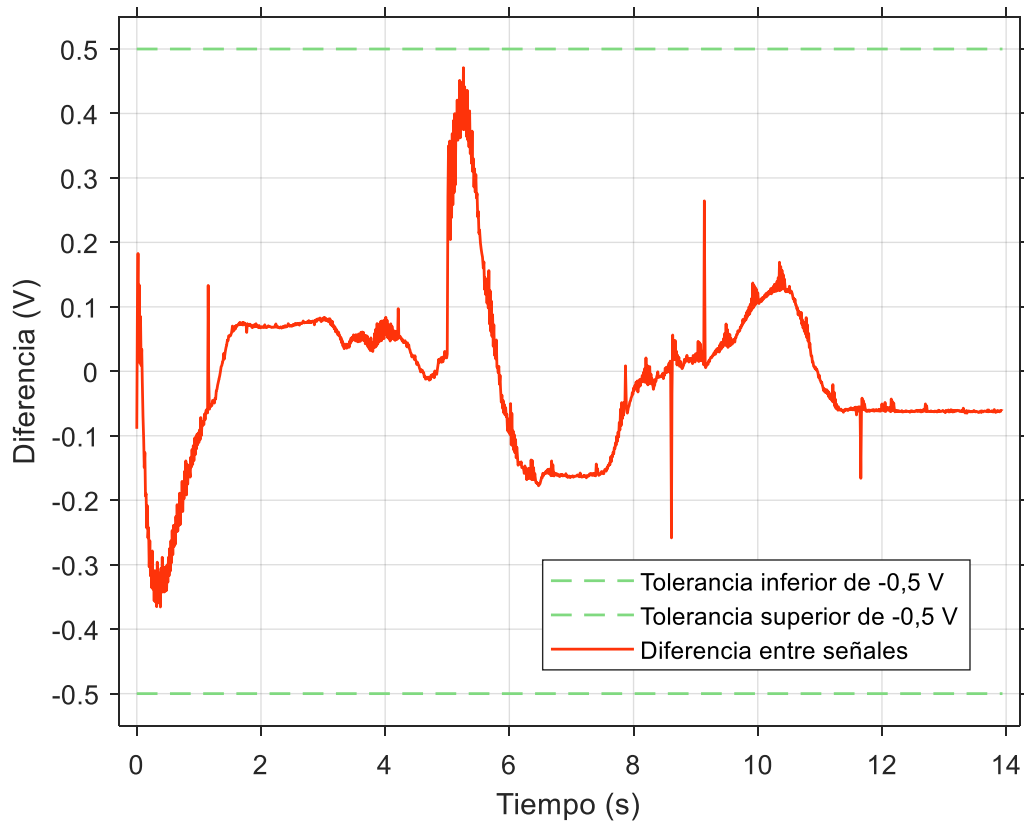


Figura 151: Diferencia de la señal de posición del motor real vs simulado en el control PI de posición.

En cuanto a la evolución de la velocidad del eje del motor, la Figura 152 muestra una pequeña diferencia que supera los 1,5 V en los cambios de consigna (Figura 153).

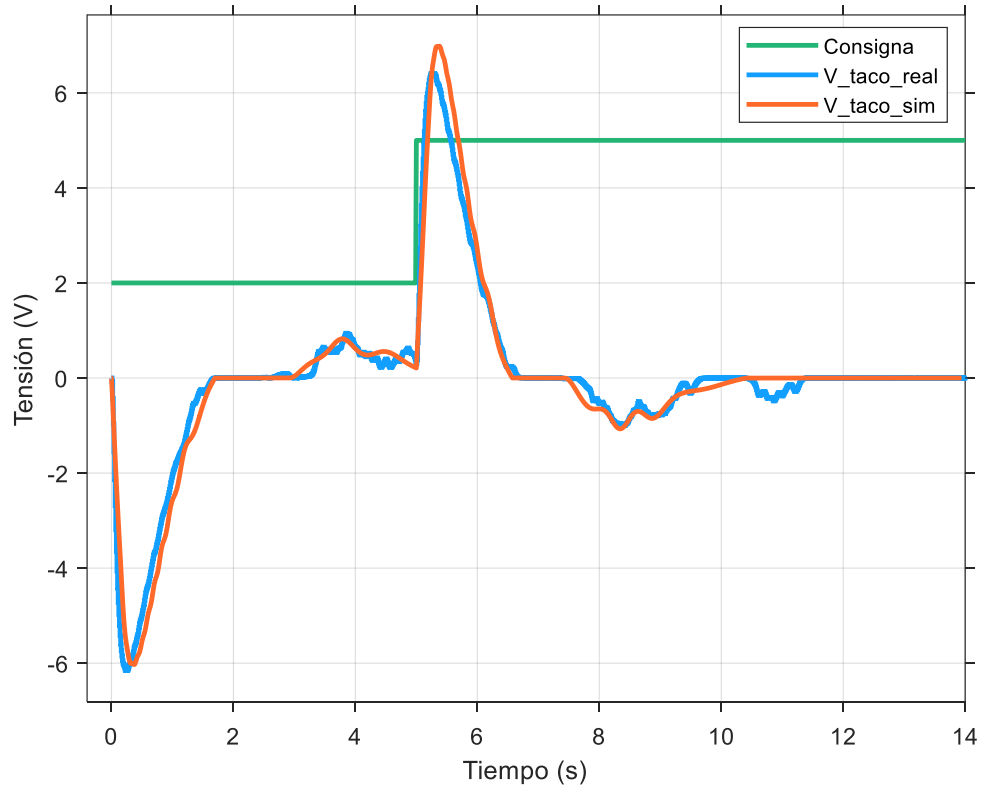


Figura 152: Respuesta de la velocidad del motor en el control de posición.

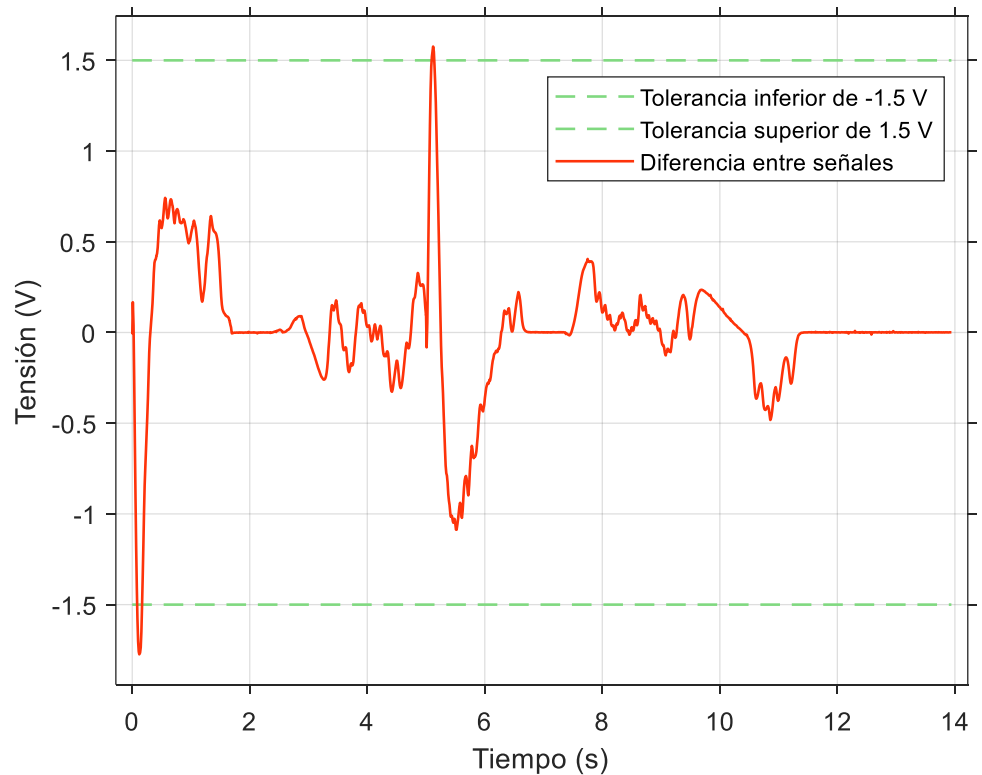


Figura 153: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado en el control PI de posición.

En este caso también se valida la precisión del motor virtual frente al real.

En cuanto al error correspondiente al lazo de control (Figura 154), se tiene el mismo razonamiento que en anteriores comparaciones. El motor virtual reproduce con fidelidad el comportamiento del real. Además, las diferencias no superan los 0,5 V (Figura 155), lo que confirma la precisión del modelo en el seguimiento de la consigna.

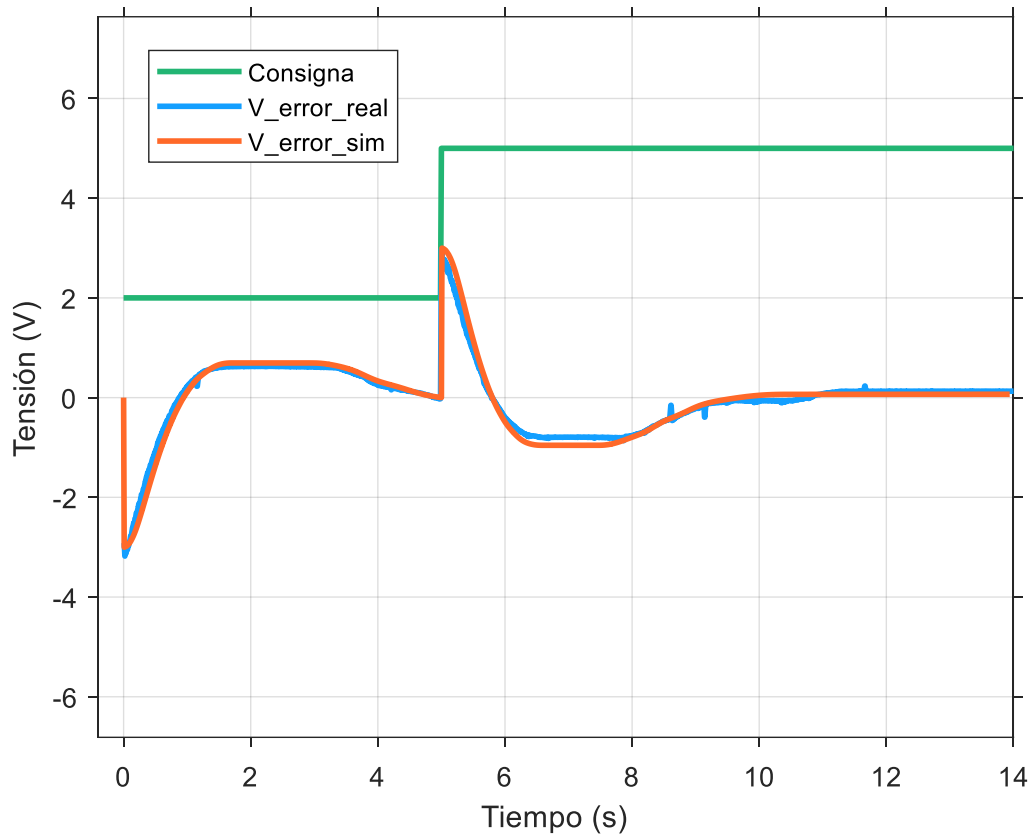


Figura 154: Respuesta del error de control en el control de posición.

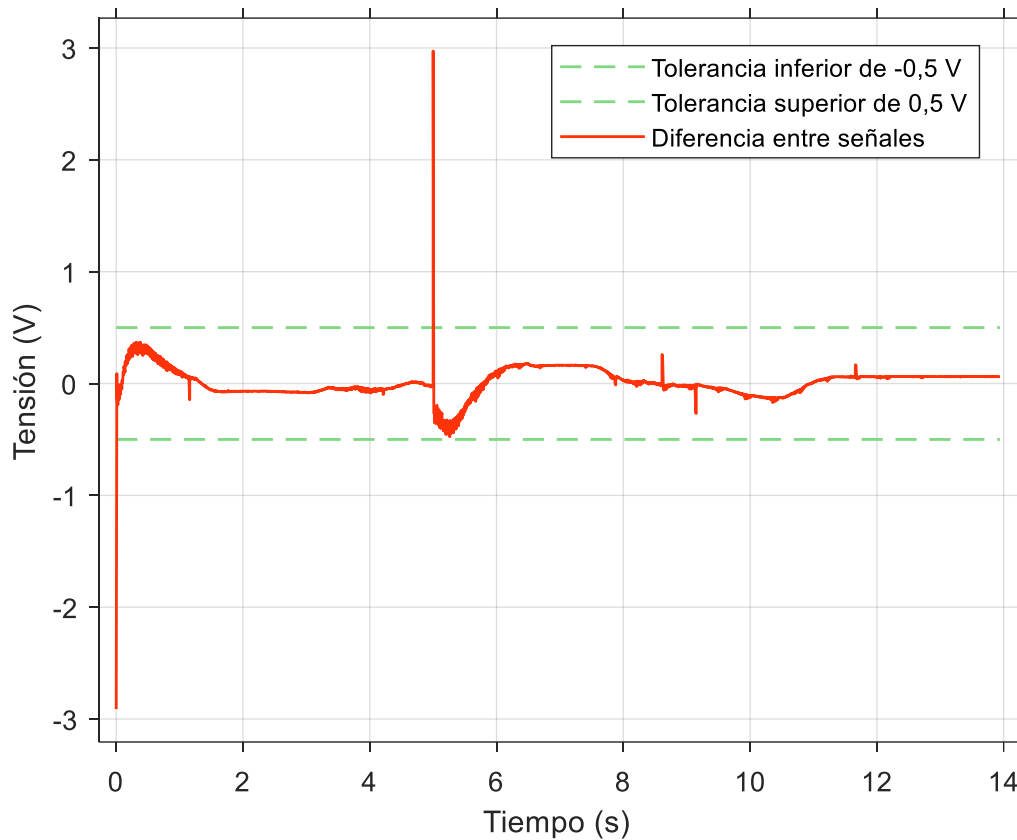


Figura 155: Diferencia de la señal de error del motor real vs simulado en el control PI de posición.

6.2.6. COMPARACIÓN CONTROL PI EN VELOCIDAD

En este experimento se compara la respuesta del motor real y virtual en un control PI en velocidad. Para ello, se toma como referencia el esquema mostrado en la Figura 156:

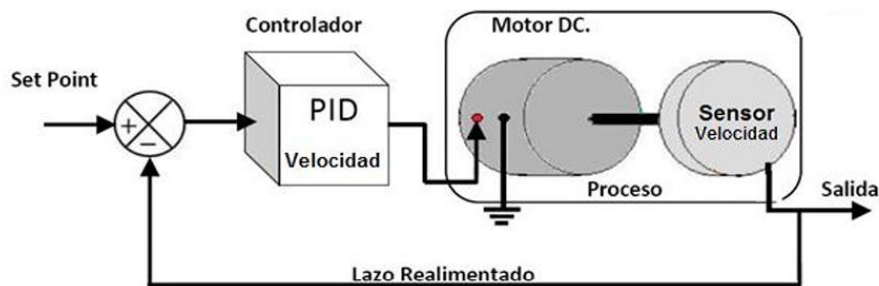


Figura 156: Esquema de control PID en velocidad.

Para obtener los datos de la respuesta en velocidad ante una consigna tipo escalón de 4 V, se utiliza el diagrama simplificado de adquisición de datos de la Figura 157.

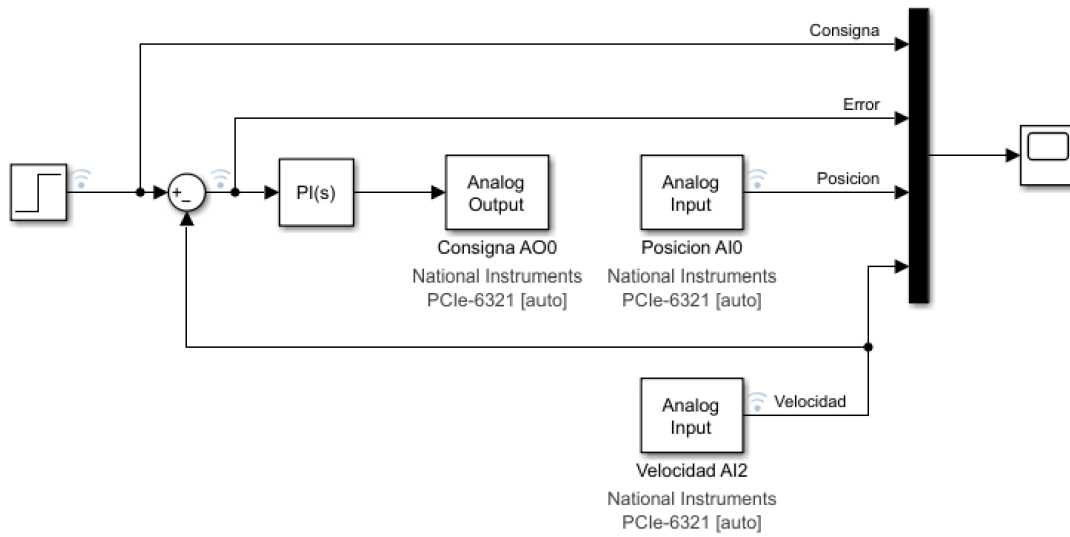


Figura 157: Esquema de adquisición de datos para control PI en velocidad.

Una vez se tienen los datos experimentales reales, se procede a obtener los correspondientes a la simulación. Para ello, se realiza el mismo experimento, pero con el gemelo digital de la maqueta. El esquema de control implementado es el mostrado en la Figura 158:

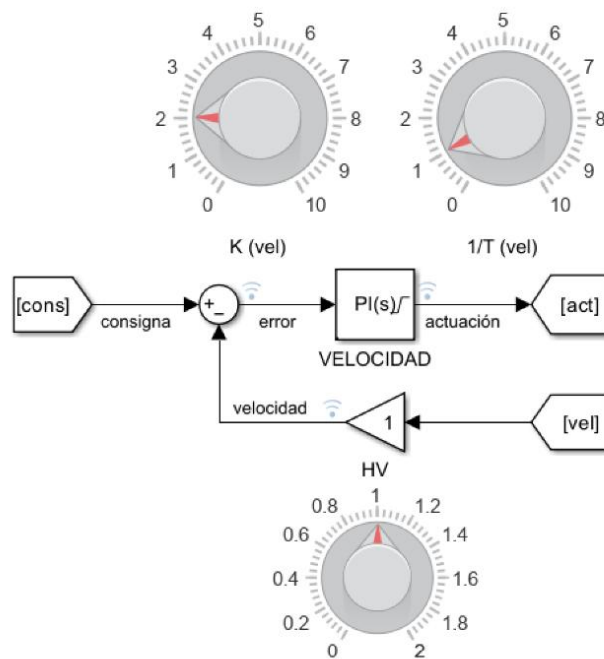


Figura 158: Esquema de control PI en velocidad.

Una vez ejecutada esta configuración, se obtienen los datos correspondientes y se comparan ambos resultados, tal y como se muestra en la Figura 159. Se observa que el gemelo digital representa fielmente el comportamiento del gemelo físico. En la Figura 160 se observa que la diferencia entre señales está dentro del margen de tolerancias.

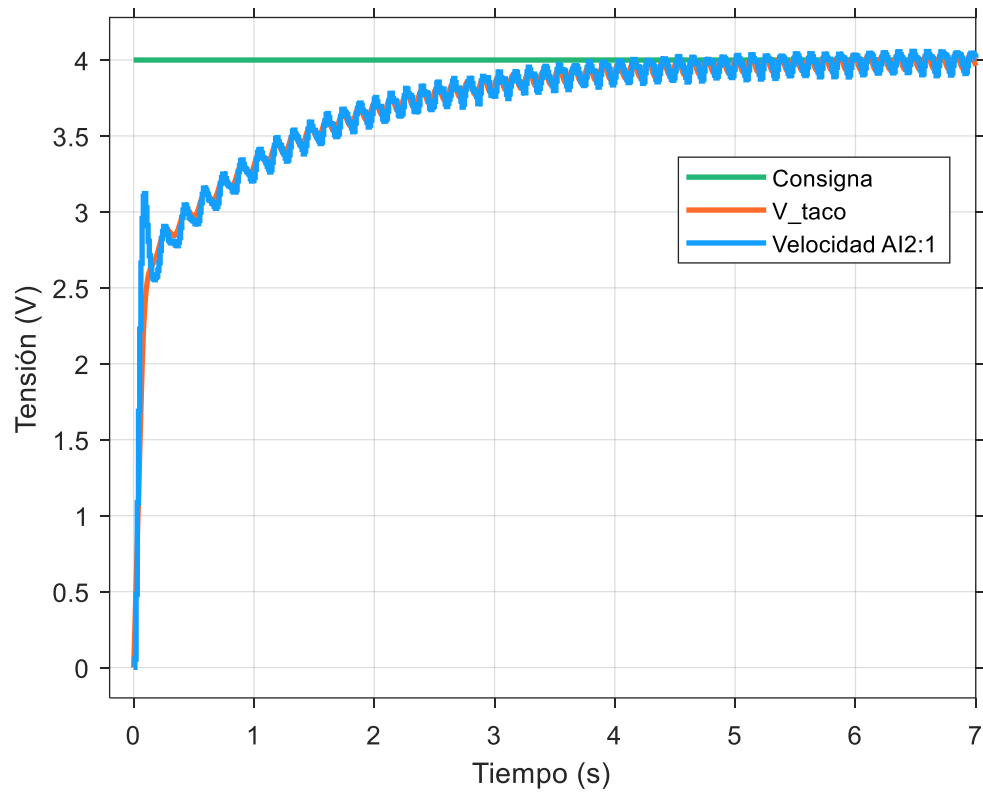


Figura 159: Respuesta de la velocidad del motor ante un control PI de velocidad.

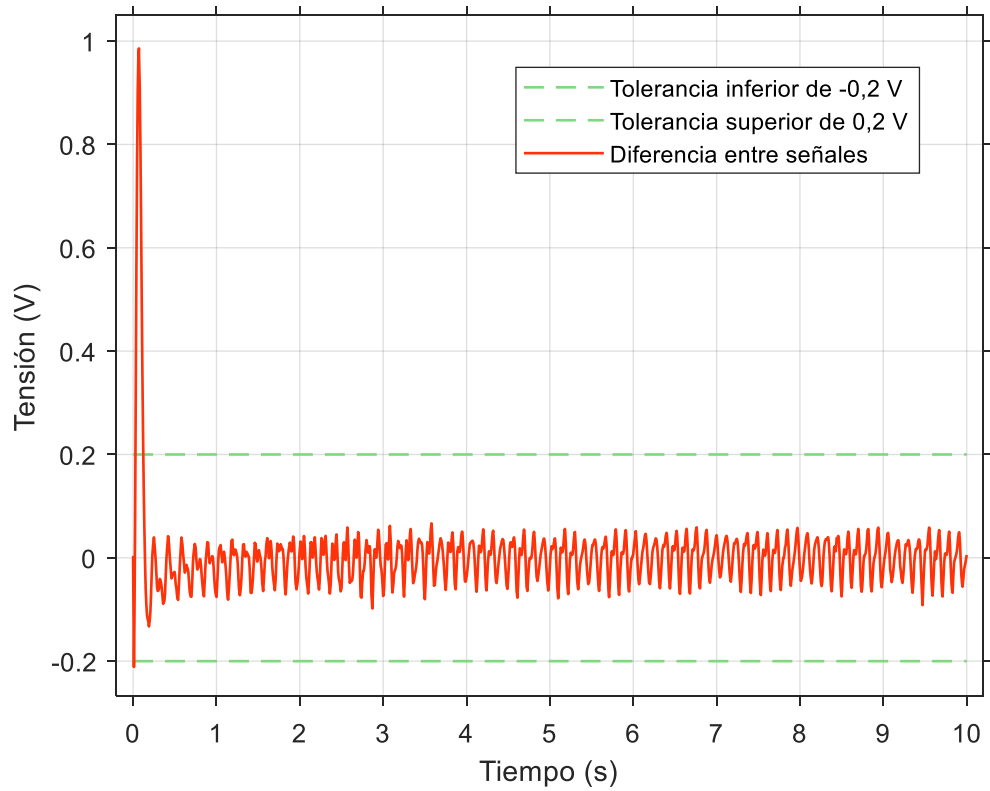


Figura 160: Diferencia de la señal de velocidad del motor real vs simulado en el control PI de velocidad.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto se ha demostrado la viabilidad y utilidad de implementar un gemelo digital de un motor de CC como herramienta para un laboratorio virtual orientado a la docencia, la simulación y el análisis de sistemas físicos. Se ha logrado cumplir con el objetivo principal del trabajo, crear un entorno funcional que permita replicar, controlar y visualizar el comportamiento dinámico del sistema tanto en su versión física como digital.

El sistema desarrollado permite no solo simular el motor en un entorno virtual, sino también interactuar con el motor real mediante una interfaz de usuario diseñada en Simulink, visualizar su comportamiento en 3D con Simscape Multibody y registrar datos para su posterior análisis. Asimismo, se han incorporado múltiples modos de operación del gemelo digital, desde configuraciones básicas hasta esquemas avanzados de control dual, lo que ofrece un alto grado de versatilidad y adaptación a distintos escenarios educativos o de investigación.

Además, se ha puesto especial atención en la usabilidad y claridad del entorno desarrollado, con el fin de facilitar su uso a estudiantes y otros usuarios. La alineación visual y funcional entre el gemelo físico y su equivalente digital ha sido una prioridad a lo largo de todo el diseño.

Este proyecto ha supuesto un reto apasionante y muy formativo, donde he podido integrar distintas disciplinas como el modelado físico, el control automático, la adquisición de datos y la simulación avanzada. Considero que el resultado no solo representa un logro personal, sino también una aportación al ámbito de la Industria 4.0 y la educación en ingeniería, al facilitar la accesibilidad a entornos de laboratorio sin necesidad de presencia física ni dependencia del hardware real.

Confío en que este trabajo pueda servir como punto de partida e inspiración para futuros desarrollos que continúen explorando las posibilidades de los gemelos digitales en la mejora del aprendizaje, el mantenimiento predictivo, la eficiencia de los sistemas y la transformación digital de la industria.

7.2. TRABAJOS FUTUROS

Existen diversas líneas de mejora y ampliación que podrían abordarse a partir del presente trabajo. Entre ellas, destaca la posibilidad de aplicar métodos avanzados de identificación de parámetros, como redes neuronales o algoritmos genéticos, con el objetivo de ajustar el modelo del motor con mayor precisión y adaptabilidad a distintos casos reales.

También se considera interesante mejorar la apariencia gráfica del modelo en Simscape Multibody, optimizando su representación para facilitar la comprensión visual del sistema por parte del usuario. En paralelo, el desarrollo de una interfaz mediante MATLAB Web App permitiría modificar parámetros del sistema directamente desde un navegador web, lo que aumentaría la usabilidad del laboratorio virtual.

Otra línea de trabajo sería la integración de sensores inerciales, como el módulo MPU-6050, con el fin de medir vibraciones en el motor real. Esta información permitiría complementar el análisis dinámico del sistema con datos útiles para tareas de diagnóstico, contribuyendo así a aumentar la fidelidad del gemelo digital.

En cuanto al acceso remoto y la conectividad, se plantea la implementación de un sistema basado en microcontroladores, como el ESP32, que permita recoger datos de velocidad y posición directamente desde el hardware, enviarlos a la nube mediante protocolos como MQTT, y alimentar con ellos el modelo 3D en Simulink para su visualización y control desde cualquier lugar. A diferencia del sistema de escritorio remoto, esta solución no requiere la presencia de un PC junto al hardware, lo que aporta una mayor flexibilidad y portabilidad al entorno de simulación.

Finalmente, se propone como extensión la incorporación de tecnologías de realidad virtual y aumentada. Mediante el uso de entornos desarrollados en Unity3D, sería posible simular la interacción física con el sistema, como la conexión de cables o el ajuste de parámetros. Además, mediante el uso de códigos QR, se podría acceder a la visualización del modelo 3D desde dispositivos móviles, facilitando el acceso y la comprensión del sistema.

Estas propuestas no solo permitirían ampliar la funcionalidad del sistema desarrollado, sino que también abrirían nuevas posibilidades de aplicación en ámbitos educativos, industriales y de investigación, en línea con los principios de accesibilidad, digitalización y mejora continua que definen el paradigma de la Industria 4.0.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alecop S. Coop., «Manual de usuario y prácticas - Alecop».
- [2] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Sistemas de Control Moderno*, 10.^a ed. Pearson Educación, ISBN: 978-8420544014, 2005.
- [3] M. Alfonso Pernia, «Conceptos Básicos de Máquinas de corriente continua», 2011. Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/235752021>
- [4] Devendra K. Chaturvedi, *Modeling and Simulation of Systems using Matlab and Simulink*. CRC Press, ISBN: 978-1-4398-0672-2, 2010.
- [5] S. N. Vukosavic, *Electrical Machines*. Springer, 2012. Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.springer.com/series/6403>
- [6] C. Julían, S. Rosas, J. Edinson, y M. Ordoñez, «Controlador Electrónico para Articulaciones Rotoides», 2015.
- [7] M. N. Alejandro, J. E. Sánchez Madrigal, y A. A. Gemayel, «Red neuronal para la caracterización no lineal de un motor de corriente directa», *12º Congreso Nacional de Mecatrónica*, 2013.
- [8] C. Duarte, «Algoritmo PSO para identificación de parámetros en un motor DC System identification of a DC motor using PSO algorithm», *Revista Facultad de Ingeniería ...*, ene. 2010, Accedido: 3 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/103233920/Algoritmo_PSO_para_identificaci%C3%B3n_de_par%C3%A1metros_en_un_motor_DC_System_identification_of_a_DC_motor_using_PSO_algorithm
- [9] P. Muñoz y A. Vallecillo, «¿Qué es un Gemelo Digital? Una Propuesta de Arquitectura para su Implementación», 2023.
- [10] M. Baquoh Sánchez, «Análisis cinemático y dinámico de la suspensión de un formula student a partir de su modelo 3D mediante Simulink-Simscape», 2022.
- [11] S. L. Gregorio, «Laboratorio Virtual de Electrónica basado en Unity», 2021.
- [12] Lesics, «DC Motor, how it works?» Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.lesics.com/dc-motor-working.html>

- [13] S. J. Chapman, *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*, 5.^a ed. McGraw-Hill, ISBN: 0073529540, 2011.
- [14] J. Fraile Mora, *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*, 6.^a ed. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., ISBN: 978-8448161125, 2008.
- [15] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., y S. D. Umans, *MAQUINAS ELÉCTRICAS*, 6.^a ed. MCGraw-Hill, ISBN: 970104052X, 2003.
- [16] Festo Didactic, *Permanent magnet DC motor. Student manual 86357-00*. Lab-Volt, 2011.
- [17] Mohammed Z Salah, «Parameters Identification of a Permanent Magnet DC Motor», 2009.
- [18] B. Kuo, *Sistemas de Control Automático*, 7.^a ed. Prentice Hall Hispanoamericana, ISBN: 968-880-723-0, 1996.
- [19] A. Hughes y B. Drury, *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*, 5.^a ed. Newnes, ISBN: 978-0128189252, 2019.
- [20] N. Nise, *Control Systems Engineering*, 6.^a ed. John Wiley & Sons, ISBN: 0470547561, 2010.
- [21] H. Moore, *MATLAB ® para ingenieros*. Pearson Educación, ISBN: 978-9702610823, 2007.
- [22] MathWorks, «DC Motor Model - MATLAB & Simulink - MathWorks España». Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/sps/ug/example-modeling-a-dc-motor.html>
- [23] MathWorks, «Simscape - MATLAB». Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/simscape.html>
- [24] S. Fadlo, N. Rabbah, y A. A. Elmahjoub, «Physical modeling approach for a differential guide mobile robot using simscape», en *2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science, ICECOCS 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., dic. 2020. doi: 10.1109/ICECOCS50124.2020.9314422.
- [25] E. Bauzano Núñez, «Práctica 2: Introducción al equipo Alecop», 2023.
- [26] MathWorks, «Control de motores de CC». Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/sps/ug/dc-motor-control.html>
- [27] MathWorks, «Linear Electric Actuator (Motor Model)». Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/sps/ug/linear-electric-actuator-motor-model.html>
- [28] Salcedo y López, «Capítulo II.-Resonancia», 1995.

- [29] E. Ruiz González, «Práctica de Resonancia», 2022.
- [30] MathWorks, «Worm and Gear Constraint». Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/sm/ref/wormandgearconstraint.html>
- [31] MathWorks, «Rotational Multibody Interface». Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/simscape/ref/rotational-multibodyinterface.html>
- [32] T. Communications, «NI 632x Specifications», 2010.

ANEXOS

ANEXO A: DETALLES TÉCNICOS Y CÓDIGOS UTILIZADOS

A.1. NOMENCLATURA MOTOR DE CC

En la Tabla 8 se muestra la nomenclatura empleada para designar las variables y parámetros del motor de CC.

NOMBRE DE LA VARIABLE	SÍMBOLO	UNIDADES
Constante de par	k_i	$\left[\frac{N \cdot m}{A}\right]$
Constante de fuerza contraelectromotriz	k_b	$\left[\frac{V}{rad/s}\right]$
Constantes de par y de fuerza <i>c.e.m.</i> en el S.I.	k	–
Desplazamiento del motor	$\theta_m(t)$	$[rad]$
Velocidad angular	$\omega_m(t)$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$
Velocidad angular en el dominio s y en rpm	$\Omega_m^{rpm}(t)$	$[rpm]$
Tensión aplicada en los bornes del motor	$e_a(t)$	$[V]$
Fuerza contraelectromotriz	$e_b(t)$	$[V]$
Par del motor	$T_m(t)$	$[N \cdot m]$
Par de carga debido a la fricción	$T_L(t)$	$[N \cdot m]$
Corriente de la armadura	$i_a(t)$	$[A]$
Resistencia de la armadura	R_a	$[\Omega]$
Inductancia de la armadura	L_a	$[H]$
Inercia del motor	J_m	$[kg \cdot m^2]$
Coefficiente de fricción viscosa	B_m	$[N \cdot m \cdot s]$

Tabla 8: Nomenclatura empleada en el motor de CC.

A.2. PINOUT TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

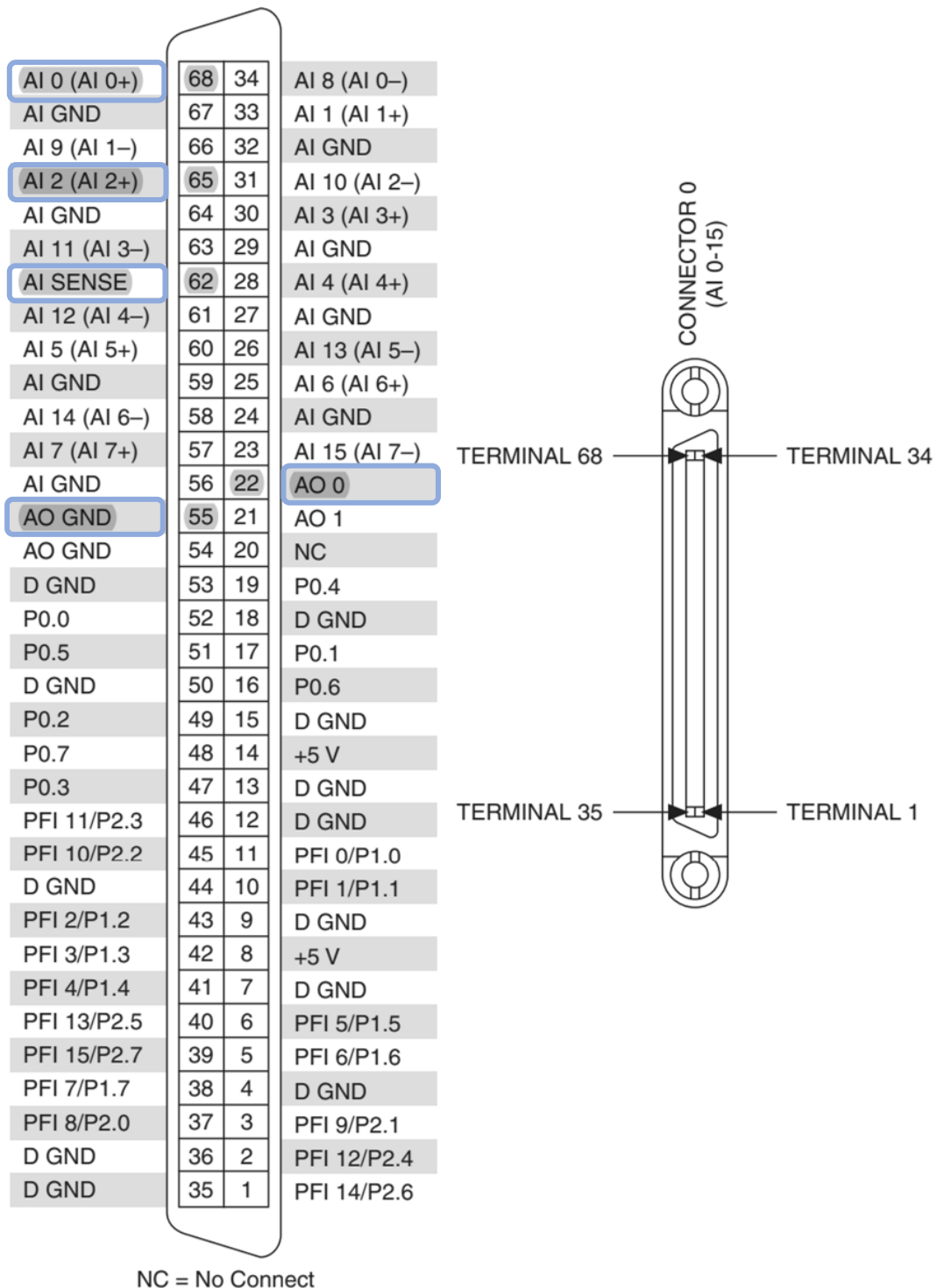


Figura 161: NI PCIe6321 Pinout. [32]

A.3. CÁLCULO DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE LA TACODINAMO

En este apartado se procede a calcular el valor promedio del factor de conversión de la tacodinamo. Primeramente, se escoge el experimento donde se aplica una serie de escalones desde 0 V hasta 10 V. Para cada valor del escalón se realiza el procedimiento visto en el apartado Parámetros Característicos del Captador de Velocidad.

El proceso de determinar el periodo entre pulsos se realiza creando “*data tips*” para asegurarse de coger dos sucesivos (x_1 y x_2). Realizarlo por código en Matlab podría inducir a fallos pues para altas velocidades no aparecen todos los pulsos. Para eliminar el rizado y obtener la tensión media que proporciona la tacodinamo se ha empleado el código del anexo A.4. Código Matlab - Valor Medio de Voltaje.

En la siguiente tabla se muestran los valores para cada valor de consigna:

FACTOR DE CONVERSIÓN TACODINAMO						
<i>Consigna(V)</i>	$x_1(s)$	$x_2(s)$	$T(s)$	$V_{mtaco}(V)$	$w_m(rpm)$	$K_{taco}(V/rpm)$
1	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,000000	0,00000000
2	17,190	17,553	0,3623	1,3189	165,608612	0,00796396
3	27,006	27,200	0,1941	2,5257	309,119011	0,00817064
4	38,005	38,136	0,1306	3,7239	459,418070	0,00810569
5	43,917	44,015	0,0984	4,9309	609,756098	0,00808668
6	54,679	54,759	0,0794	6,1455	755,667506	0,00813254
7	62,075	62,139	0,0648	7,3792	925,925926	0,00796954
8	67,934	67,990	0,0558	8,5891	1075,268817	0,00798786
9	76,885	76,937	0,0521	9,4313	1151,631478	0,00818951
10	87,448	87,498	0,0501	9,6585	1197,604790	0,00806485
					$K_{taco\ media}$	0,00807459

Tabla 9: Valores medidos para calcular el promedio del factor de conversión de la tacodinamo.

Resaltar que para calcular el valor promedio de este factor no se ha tenido en cuenta los valores correspondientes a la consigna de 1 voltio, pues no es representativa.

A.4. CÓDIGO MATLAB - VALOR MEDIO DE VOLTAJE

En este anexo se muestra el código en Matlab realizado para obtener el voltaje medio que proporciona la tacodinamo, consiguiendo eliminar el rizado que presenta.

```

%% CÓDIGO PARA GENERACIÓN DE VELOCIDAD MEDIA (TACODINAMO)

% Se carga el archivo a analizar
clear;
archivo = 'archivo.mat';
load(archivo);

% Se cargan los datos de la tensión de la tacodinamo
datos = data{1}{1}.Values;
V_taco = datos.Data(:, 3); % Tacodinamo
tiempo = datos.time;

% Se define un inicio y fin según lo que dure el step (con un margen)
t_inicio = 2;
t_fin = 5;

% Se guardan los índices y se crea el tramo de tiempo con sus valores
indices = find(tiempo >= t_inicio & tiempo <= t_fin);
t_tramo = tiempo(indices);
V_taco_tramo = V_taco(indices);

% Se realiza la media de la tensión de la tacodinamo
V_taco_media = mean(V_taco_tramo);
fprintf('El valor de V_taco medio es %f V\n', V_taco_media)

% Se identifican los picos máximos y mínimos por encima y por debajo
del
% voltaje medio de la tacodinamo
[Vmax0, t_max0] = findpeaks(V_taco_tramo, t_tramo, 'Min-
PeakHeight', V_taco_media);
[Vmin0, t_min0] = findpeaks(-V_taco_tramo, t_tramo, 'MinPeakHeight', -
V_taco_media); % Se cambia el signo para detectar los mínimos
Vmin0 = -Vmin0;

% Se realiza la media de los picos máximos y mínimos
Vmax_media = mean(Vmax0);
Vmin_media = mean(Vmin0);

% Se establece un umbral para descartar mínimos o máximos locales
threshold = (Vmax_media - Vmin_media) / 2;

% Se identifican de nuevo máximos y mínimos estableciendo el umbral
para
% obtener mayor precisión a la hora de determinar máximos y mínimos
[Vmax, t_max] = findpeaks(V_taco_tramo, t_tramo, 'MinPeakProminence',
threshold);
[Vmin, t_min] = findpeaks(-V_taco_tramo, t_tramo, 'MinPeakProminence',
threshold); % Se cambia el signo para detectar los mínimos
Vmin = -Vmin;

```

```

% Se calcula el número de picos y se crea la variable de Voltaje pico
a
% pico
n_picos = min(length(Vmax), length(Vmin));
Vpp = zeros(1, n_picos);

% Se realiza bucle for para calcular Voltaje pico a pico
for i = 1:n_picos
    Vpp(i) = Vmax(i) - Vmin(i);
end

% Se realiza la media del Voltaje pico a pico
Vpp_medio = mean(Vpp);

% Se crean las gráficas
p1=figure('Name','Tensión Media Tacodinamo','NumberTitle','off');
figure(p1)
miax = axes;
set(miax, 'FontSize', 9);
stairs(t_tramo, V_taco_tramo, 'Color', [33, 131, 128]./255, 'Line-
eWidth', 1);
hold on;

% Se grafica la Tensión media de la tacodinamo
plot(t_tramo, repmat(V_taco_media, size(t_tramo)), 'Color', [237, 177,
32]./255, 'LineWidth', 1);

% Se marcan los máximos y mínimos calculados
plot(t_max, Vmax, 'ro', 'MarkerSize', 5);
plot(t_min, Vmin, 'go', 'MarkerSize', 5);
% Si se quiere visualizar los primeros máximos y mínimos
%plot(t_max0, Vmax0, 'ro', 'MarkerSize', 5);
%plot(t_min0, Vmin0, 'go', 'MarkerSize', 5);
cu=legend('V_{taco}', 'V_{media-taco}', 'Máximos', 'Mínimos', 'Loca-
tion', 'NorthEast');
set(cu, 'FontSize', 9, 'Orientation', 'Horizontal', 'EdgeCol-
or', 'None', 'Color', 'None', 'Position', [0.181802152625072
0.557401716236714 0.785714282065022 0.528846140664358], 'FontAn-
gle', 'italic')
xlabel('Tiempo [s]', 'FontAngle', 'normal')
ylabel('Tensión [V]', 'FontAngle', 'normal')
xlim([t_inicio t_fin])
ylim([V_taco_media-Vpp_medio*3 V_taco_media+Vpp_medio*3])
box off
grid on
set(miax, 'FontSize', 9, 'GridLineStyle', ':', 'FontName', 'Times New
Roman')

```

A.5. CÓDIGO MATLAB - GENERACIÓN GRÁFICA AMPLITUD VIBRACIÓN

```
%% CÓDIGO PARA GENERACIÓN DE LA GRÁFICA DE AMPLITUD DE LA VIBRACIÓN VS
VELOCIDAD DEL MOTOR
```

```
x = [1.3, 2.5, 3.7, 4.95, 6.2, 7.46, 8.7, 9.5, 9.65]; % Valores de ve-
locidad media del motor
y = [0.287, 0.16, 0.123, 0.065, 0.05, 0.043, 0.033, 0.033, 0.031]; %
Valores de la amplitud pico-pico de la vibración
```

```
% Se convierten los valores de voltaje a rad/s:
```

```
x = x * (2*pi)/(60*K_taco);
y = y * (2*pi)/(60*K_taco);
```

```
% Se crea la gráfica x vs y
```

```
p1=figure('Name','Gráfica velocidad motor vs vibración','Num-
berTitle','off');
figure(p1)
miax = axes;
set(miax, 'FontSize', 9);
plot(x, y, 'Color', [33, 131, 128]./255, 'LineWidth', 1, 'Marker', 'o');
hold on
cu=legend('V_{taco / delta}', 'Location', 'NorthEast');
set(cu, 'FontSize', 9, 'Orientation', 'Horizontal', 'EdgeCol-
or', 'None', 'Color', 'None', 'Position', [0.181802152625072
0.557401716236714 0.785714282065022 0.528846140664358], 'FontAn-
gle', 'italic')
xlabel('Velocidad motor [rad/s]', 'FontAngle', 'normal')
ylabel('Variación pico a pico de la vibración [rad/s]', 'FontAn-
gle', 'normal')
xlim([0 130])
ylim([0 4])
box off
grid on
set(miax, 'FontSize', 9, 'GridLineStyle', ':', 'FontName', 'Times New
Roman')
```

```
%% ESTIMACIÓN DE FUNCIONES
```

```
% Ajuste exponencial decreciente
```

```
exp_func = @(a, b, x) a * exp(-b * x);
exp_model = fittype('a * exp(-b * x)', 'independent', 'x', 'coeffi-
cients', {'a', 'b'});
initial_guess_exp = [1, 1];
options_exp = fitoptions('Method', 'NonlinearLeastSquares',
'StartPoint', initial_guess_exp, 'Lower', [0, 0]);
[exp_fit, gof_exp] = fit(x', y', exp_model, options_exp);
```

```
% Ajuste de potencia
```

```
power_func = @(a, b, x) a * (x .^ -b);
```

```

power_model = fittype('a * x^(-b)', 'independent', 'x', 'coefficients', {'a', 'b'});
initial_guess_power = [1, 1];
options_power = fitoptions('Method', 'NonlinearLeastSquares', 'StartPoint', initial_guess_power);
[power_fit, gof_power] = fit(x', y', power_model, options_power);

% Ajuste logarítmico
log_x = log(x);
log_params = polyfit(log_x, y, 1);
log_func = @(a, b, x) a * log(x) + b;

% Valores ajustados para cada función
y_exp_fit = exp_func(exp_fit.a, exp_fit.b, x);
y_power_fit = power_func(power_fit.a, power_fit.b, x);
y_log_fit = log_func(log_params(1), log_params(2), x);

% Gráfico de los datos y los ajustes
p1=figure('Name','Experimento','NumberTitle','off');
figure(p1)
miax = axes;
set(miax, 'FontSize', 9);
scatter(x, y, 'filled', 'k'); % Datos experimentales (sólo puntos)
hold on
plot(x, y_exp_fit, 'r', 'LineWidth', 2); % Exponencial
plot(x, y_power_fit, 'b', 'LineWidth', 2); % Potencia
plot(x, y_log_fit, 'g', 'LineWidth', 2); % Logarítmico
hold on
cu=legend('Datos','Ajuste Exponencial','Ajuste de Potencia','Ajuste Logarítmico','Location','NorthEast');
set(cu,'FontSize',9,'Orientation','Vertical','EdgeColor','None','Color','None','Position',[0.181802152625072 0.557401716236714 0.785714282065022 0.528846140664358],'FontAngle','italic')
xlabel('Velocidad motor [rad/s]','FontAngle','normal')
ylabel('Variación pico a pico de la vibración [rad/s]','FontAngle','normal')
xlim([0 130])
ylim([0 4])
box off
grid on
set(miax,'FontSize',9,'GridLineStyle',':','FontName','Times New Roman')

% Cálculo del Error Cuadrático Medio (MSE) para cada ajuste
mse_exp = mean((y - y_exp_fit) .^ 2);
mse_power = mean((y - y_power_fit) .^ 2);
mse_log = mean((y - y_log_fit) .^ 2);

% Mostrar los resultados
fprintf('Parámetros ajustados (Exponencial):\n');
fprintf('a = %.4f\n', exp_fit.a);
fprintf('b = %.4f\n', exp_fit.b);
fprintf('Ecuación: y = %.4f * exp(-%.4f * x)\n', exp_fit.a, exp_fit.b);

```

```
fprintf('Error cuadrático medio (MSE) Exponencial: %.6f\n', mse_exp);

fprintf('\nParámetros ajustados (Potencia):\n');
fprintf('a = %.4f\n', power_fit.a);
fprintf('b = %.4f\n', power_fit.b);
fprintf('Ecuación: y = %.4f * x^(-%.4f)\n', power_fit.a, power_fit.b);
fprintf('Error cuadrático medio (MSE) Potencia: %.6f\n', mse_power);

fprintf('\nParámetros ajustados (Logarítmico):\n');
fprintf('a = %.4f\n', log_params(1));
fprintf('b = %.4f\n', log_params(2));
fprintf('Ecuación: y = %.4f * log(x) + %.4f\n', log_params(1), log_pa-
rams(2));
fprintf('Error cuadrático medio (MSE) Logarítmico: %.6f\n', mse_log);
```

A.6. ARCHIVO PRECONF_MULTIBODY.M DEL ESQUEMA EN SIMSCAPE MULTIBODY

```
% Simscape(TM) Multibody(TM) version: 23.2

% This is a model data file derived from a Simscape Multibody Import
XML file using the smimport function.
% The data in this file sets the block parameter values in an imported
Simscape Multibody model.
% For more information on this file, see the smimport function help
page in the Simscape Multibody documentation.
% You can modify numerical values, but avoid any other changes to this
file.
% Do not add code to this file. Do not edit the physical units shown
in comments.

%%VariableName:smiData

%===== RigidTransform =====%

%Initialize the RigidTransform structure array by filling in null val-
ues.
smiData.RigidTransform(5).translation = [0.0 0.0 0.0];
smiData.RigidTransform(5).angle = 0.0;
smiData.RigidTransform(5).axis = [0.0 0.0 0.0];
smiData.RigidTransform(5).ID = "";

%Translation Method - Cartesian
%Rotation Method - Arbitrary Axis
smiData.RigidTransform(3).translation = [-35.000000000000007 -
33.499999999999986 0]; % mm
smiData.RigidTransform(3).angle = 2.0943951023931957; % rad
smiData.RigidTransform(3).axis = [0.57735026918962584
0.57735026918962584 0.57735026918962562];
smiData.RigidTransform(3).ID = "B[Base-2:-:Eje_Corona-3]";

%Translation Method - Cartesian
%Rotation Method - Arbitrary Axis
smiData.RigidTransform(4).translation = [7.1054273576010019e-15 -
5.3290705182007514e-15 35.000000000000007]; % mm
smiData.RigidTransform(4).angle = pi; % rad
smiData.RigidTransform(4).axis = [1 1 0];
smiData.RigidTransform(4).ID = "F[Base-2:-:Eje_Corona-3]";

%Translation Method - Cartesian
%Rotation Method - Arbitrary Axis
smiData.RigidTransform(5).translation = [0 0 0]; % mm
smiData.RigidTransform(5).angle = pi/2; % rad
smiData.RigidTransform(5).axis = [1 0 0];
smiData.RigidTransform(5).ID = "RootGround[Base-2]";

%===== Solid =====%
```

%Center of Mass (CoM) %Moments of Inertia (MoI) %Product of Inertia (PoI)

%Initialize the Solid structure array by filling in null values.

```
smiData.Solid(3).mass = 0.0;
smiData.Solid(3).CoM = [0.0 0.0 0.0];
smiData.Solid(3).MoI = [0.0 0.0 0.0];
smiData.Solid(3).PoI = [0.0 0.0 0.0];
smiData.Solid(3).color = [0.0 0.0 0.0];
smiData.Solid(3).opacity = 0.0;
smiData.Solid(3).ID = "";
```

%Inertia Type - Custom

%Visual Properties - Simple

```
smiData.Solid(1).mass = 0.034932785913460128; % kg
smiData.Solid(1).CoM = [2.8600618194415343e-05 0.021137272244447551
0.22223039978826459]; % mm
smiData.Solid(1).MoI = [8.6582279965129736 8.6523215191408944
9.4748927331278949]; % kg*mm^2
smiData.Solid(1).PoI = [0.025833767712091976 -4.2237455084022999e-05
1.861852598632702e-06]; % kg*mm^2
smiData.Solid(1).color = [0.792156862745098 0.81960784313725488
0.9333333333333335];
smiData.Solid(1).opacity = 1;
smiData.Solid(1).ID = "Eje_Corona*:Predeterminado";
```

%Inertia Type - Custom

%Visual Properties - Simple

```
smiData.Solid(2).mass = 17.255267129382752; % kg
smiData.Solid(2).CoM = [47.739533077872991 -108.16091844113234 -
44.963569753684581]; % mm
smiData.Solid(2).MoI = [523048.29621299717 656359.15583109669
182001.94285837369]; % kg*mm^2
smiData.Solid(2).PoI = [500.28553989879413 114.99853700770657
11329.925525388526]; % kg*mm^2
smiData.Solid(2).color = [0.792156862745098 0.81960784313725488
0.9333333333333335];
smiData.Solid(2).opacity = 1;
smiData.Solid(2).ID = "Base*:Predeterminado";
```

%Inertia Type - Custom

%Visual Properties - Simple

```
smiData.Solid(3).mass = 0.070110070318214535; % kg
smiData.Solid(3).CoM = [-0.21234969093871878 0.33584988499181695 -
86.581570692516763]; % mm
smiData.Solid(3).MoI = [338.6542299230187 339.63019043141895
52.639115433208005]; % kg*mm^2
smiData.Solid(3).PoI = [0.54529018447548516 -0.39562189020553468
0.33096224227233234]; % kg*mm^2
smiData.Solid(3).color = [0.792156862745098 0.81960784313725488
0.9333333333333335];
smiData.Solid(3).opacity = 1;
smiData.Solid(3).ID = "Eje_Sinfin_Encoder*:Predeterminado";
```

```
%===== Joint =====%
%X Revolute Primitive (Rx) %Y Revolute Primitive (Ry) %Z Revolute
Primitive (Rz)
%X Prismatic Primitive (Px) %Y Prismatic Primitive (Py) %Z Prismatic
Primitive (Pz) %Spherical Primitive (S)
%Constant Velocity Primitive (CV) %Lead Screw Primitive (LS)
%Position Target (Pos)

%Initialize the RevoluteJoint structure array by filling in null val-
ues.
smiData.RevoluteJoint(2).Rz.Pos = 0.0;
smiData.RevoluteJoint(2).ID = "";

% Ángulo del tornillo envuelto (0°, 360°)
theta_tornillo_env = mod(1/K_reductora * Theta_reductora, 360);

% Inicialización de ángulos - tornillo sinfín y corona
smiData.RevoluteJoint(1).Rz.Pos = theta_tornillo_env; % deg
smiData.RevoluteJoint(1).ID = "[Base-2:-:Eje_Sinfin_Encoder-3]";

smiData.RevoluteJoint(2).Rz.Pos = Theta_reductora; % deg
smiData.RevoluteJoint(2).ID = "[Base-2:-:Eje_Corona-3]";
```

A.7. CÓDIGO MATLAB – CARGA DE PARÁMETROS

```

% Parámetros del Motor CC %%
%-----%

Ra = 2.1;           % Resistencia de la armadura [Ohm]

La = 1.988;        % Inductancia de la armadura [mH]

K = 0.08508;       % Constante de fuerza contraelectromotriz
[V*s/rad]

B = 1.382e-4;      % Constante de fricción viscosa del motor [N*m*s]

tau_m = 0.098;     % Constante de tiempo mecánica

J = (tau_m * K^2)/(Ra); % Momento de inercia del rotor [kg*m^2]

Iarr = 0.6;         % Intensidad de arranque [A]

Tf = Iarr*K;       % Torque de fricción de Coulomb [N*m]

%% Parámetros captador potenciométrico
%-----%

K_reductora = 1/30; % Índice de reducción de la reductora

R_total = 9.77;     % Resistencia total del potenciómetro en kOhms

ZM_pot = 17.5;     % Zona muerta del potenciómetro en grados

Right_pot = 360-ZM_pot/2; % Entrada para el cursor en el puerto R

Left_pot = ZM_pot/2; % Entrada para el cursor en el puerto L

Theta_reductora = 180; % Ángulo inicial de la reductora en grados

offset_pot = 4;    % Desfase entre potenciómetro y reductora

%% Parámetros Consigna 547
%-----%

I_max = 2;         % Limitador de corriente del PWM [A]

PWM_freq = 2.24;   % Frecuencia PWM (kHz)

PWM_out = 16.2;    % Amplitud del voltaje de salida del PWM

Input_100_Duty_Cycle = 11.39; % Voltaje de entrada para el 100% del
Duty Cycle

PWM_sat = 8.78;    % Voltaje de entrada para saturación del PWM

%% Parámetros Consigna 547

```

```
%-----%  
K_taco = 8.07e-3;      % Constante de conversión de la tacodinamo  
[V/rpm]  
  
%% Parámetros vibración de la velocidad  
%-----%  
  
% Ajuste de la función de vibración  $y = a*x-b$  -- (MSE=0.01875)  
  
a_pot = 70.434;  
b_pot = 1.0329;  
  
% Ajuste de la función de vibración  $y = a*exp(-b*x)$  -- (MSE=0.02912)  
a_exp = 5.5449;  
b_exp = 0.0264;  
  
sat_vib_max = 3.72; % Amplitud máxima de la vibración en rad/s  
sat_vib_min = 0.4; % Amplitud mínima de la vibración en rad/s
```

A.8. CÓDIGO MATLAB – GRÁFICA PWM

```

%% Código generación gráfica Duty Cycle del PWM (recta lineal)

%%-----
% Valores obtenidos en laboratorio
x = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]; % Voltaje de entrada al
driver
y = [0, 1.52, 2.97, 4.40, 5.75, 7.12, 8.54, 9.86, 11.30, 11.90, 12.20,
12.30]; % Voltaje de salida del driver

% Se grafican los valores de laboratorio
p1=figure('Name','Experimento','NumberTitle','off');
figure(p1)
miax = axes;
set(miax, 'FontSize', 9);
plot(x, y, 'Color', [33, 131, 128]./255, 'LineWidth', 1, 'Marker', 'o');
hold on
cu=legend('V_{OUT / IN}', 'Location', 'NorthEast');
set(cu, 'FontSize', 9, 'Orientation', 'Horizontal', 'EdgeCol-
or', 'None', 'Color', 'None', 'Position', [0.181802152625072
0.557401716236714 0.785714282065022 0.528846140664358], 'FontAn-
gle', 'italic')
xlabel('Tensión de entrada al driver [V]', 'FontAngle', 'normal')
ylabel('Tensión media de la señal PWM [V]', 'FontAngle', 'normal')
xlim([0 11])
ylim([0 14])
box off
grid on
set(miax, 'FontSize', 9, 'GridLineStyle', ':', 'FontName', 'Times New
Roman')

% Ajuste del polinomio en la zona lineal (se escoge entre x=0 y x=6)
x_lineal = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6];
y_lineal = [0, 1.52, 2.97, 4.40, 5.75, 7.12, 8.54];
grado = 1;
coeficientes = polyfit(x_lineal, y_lineal, grado); % Ajuste lineal:
[pendiente, intersección]
pendiente = coeficientes(1);
interseccion = coeficientes(2);

% Resolver para y = 16.2 (PWM_out)
y_objetivo = 16.2;
x_objetivo = (y_objetivo - interseccion) / pendiente;

% Mostrar resultado
disp(['El valor de x para y = ', num2str(y_objetivo), ' es: ',
num2str(x_objetivo)]);

% Evaluar el polinomio en el rango de x para graficarlo
x_eval = linspace(min(x_lineal), x_objetivo, 100); % Puntos para eva-
luar
y_eval = polyval(coeficientes, x_eval);

```

```
% Se grafica el ajuste lineal junto con el punto objetivo
p2=figure('Name','Ajuste lineal','NumberTitle','off');
figure(p2)
miax = axes;
set(miax,'FontSize',9);
plot(x,y,'Color',[33,131,128]./255,'LineWidth',1,'Marker','o');
hold on
plot(x_eval,y_eval,'Color',[216,17,89]./255,'LineWidth',1,'Display-
Name','Ajuste lineal');
plot(x_objetivo,y_objetivo,'kx','MarkerSize',10,'LineWidth',2,
'DisplayName','Punto calculado');
cu=legend('V_{OUT / IN}','Ajuste lineal','Punto objetivo','Loca-
tion','NorthEast');
set(cu,'FontSize',9,'Orientation','Horizontal','EdgeCol-
or','None','Color','None','Position',[0.181802152625072
0.557401716236714 0.785714282065022 0.528846140664358],'FontAn-
gle','italic')
xlabel('Tensión de entrada al driver [V]','FontAngle','normal')
ylabel('Tensión media de la señal PWM [V]','FontAngle','normal')
xlim([0 12])
ylim([0 18])
box off
grid on
set(miax,'FontSize',9,'GridLineStyle',':','FontName','Times New
Roman')
```


ANEXO B: DOCUMENTO DE LA PRÁCTICA PROPUESTA

PRÁCTICA: INTRODUCCIÓN AL GEMELO DIGITAL DEL EQUIPO ALECOPI

En esta práctica se va a trabajar con el gemelo digital del equipo Alecop MV-541 para el control de un motor de corriente continua. Este gemelo digital consta de dos elementos: la maqueta virtual y el entorno de control (Figura 162).

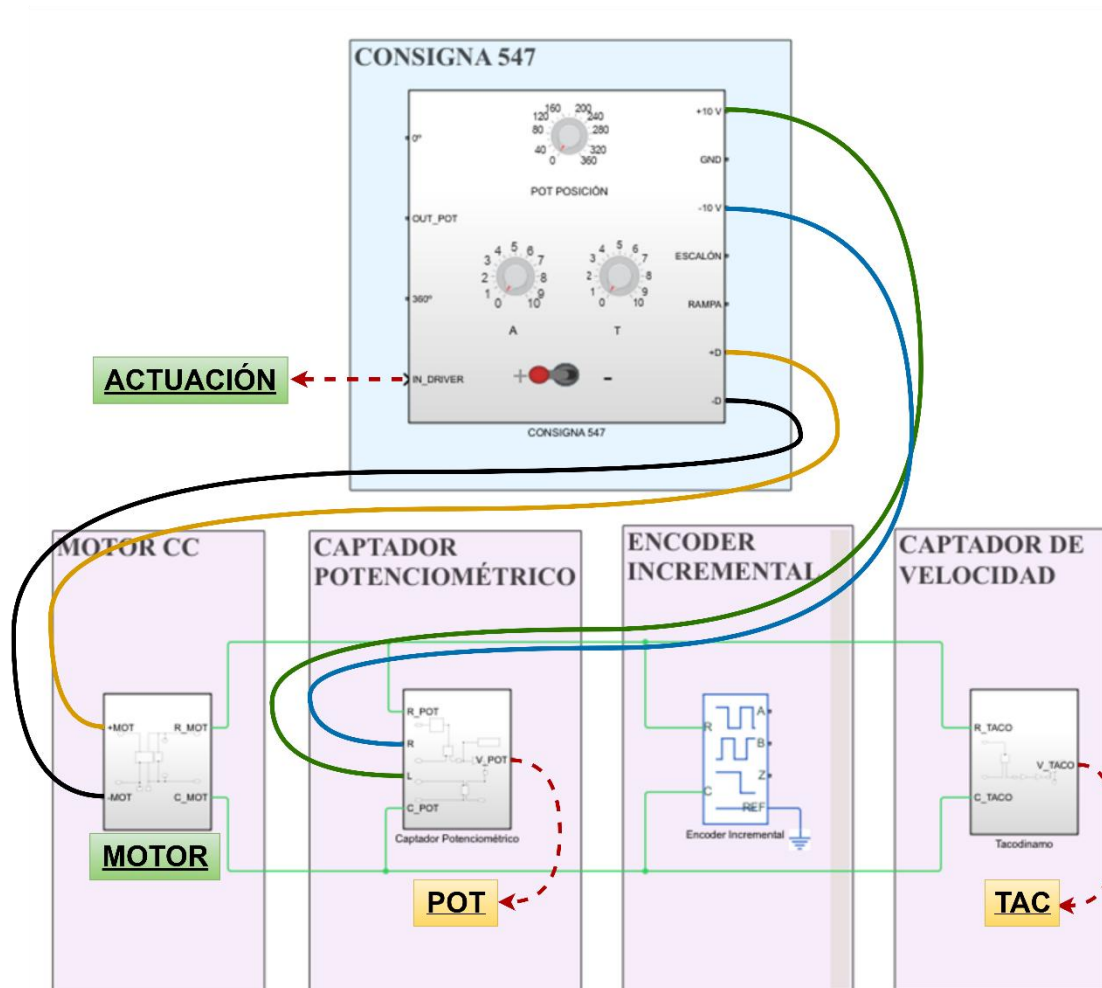


Figura 162: P0 - Módulo virtual CONSIGNA 547 (azul) y maqueta virtual (magenta).

El componente principal de la maqueta virtual es el motor de corriente continua (MOTOR), al cual se le han acoplado en su eje, de izquierda a derecha, los siguientes elementos: un sensor potenciométrico (POT) conectado a una reductora 1:30, un encoder incremental y un tacómetro (TAC).

Por otro lado, se dispone de un entorno de control el cual permite actuar sobre el sistema. En esta práctica se utilizará el módulo de control **CONSIGNA 547**, el cual incorpora conectores para aplicar señales de consigna tipo escalón o rampa, así como un potenciómetro que permite definir orientaciones del motor.

ANTES DE EMPEZAR

- ✓ Ejecutar los archivos de configuración inicial *Parameters_MotorCC.m* y *Pre-Conf_Multibody.m*.
- ✓ Desde *Simulink* → *Configuration Parameters* → *Solver Options* → *Type*, establecer el valor a *Variable-step* y, el *Max Step Size* en $1e-3$.

Conexión del equipo virtual Alecop

Para que el equipo virtual funcione correctamente, es necesario realizar una serie de conexiones entre componentes, tal y como se representa en la Figura 162. Algunas de estas conexiones son de tipo físico, es decir, pertenecen al entorno Simscape, mientras que otras pertenecen al entorno Simulink. Para realizar una conversión entre dominios se deben utilizar herramientas como sensores o fuentes de voltaje, entre otros. Además, para poder visualizar las señales en puntos de interés, se pueden utilizar bloques como *display* o *scope*. Las citadas herramientas se muestran en Figura 163:

HERRAMIENTAS

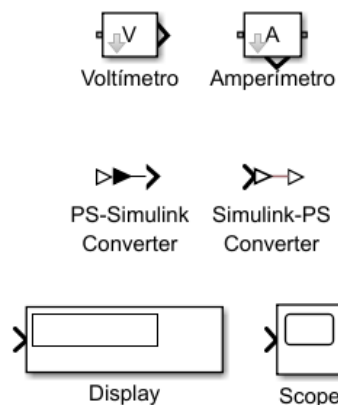


Figura 163: P0 - Herramientas de conversión y visualización de señales.

En este apartado previo, se pide realizar el conexionado entre los distintos componentes con ayuda de la Tabla 10 y conectar las señales de interés (entrada y salida) a las herramientas de visualización.

ETIQUETA	CONECTOR	SEÑAL	RANGO
ACTUACIÓN	IN_DRIVER → entrada +D → alimentación -D → alimentación	Consigna y alimentación de la etapa de potencia al MOTOR	±10 V
MOTOR	+MOT → alimentación -MOT → alimentación	Alimentación desde la etapa de potencia	±10 V
POT	R → alimentación L → alimentación V_POT → medida de salida	Medida proporcionada por el potenciómetro (posición)	±10 V
TAC	V_TACO → medida de salida	Medida proporcionada por el tacómetro (velocidad)	±10 V

Tabla 10: P0 - Conexiones del equipo virtual.

Configurar Simulink

Una vez finalizado el conexionado, se procederá a configurar el sistema de tal modo que actúe como modelo de medición del motor. Para ello, se requiere:

1. Consigna y visualización de señal:
 - Establecer como consigna una señal senoidal con amplitud de 5 V y frecuencia de 1 rad/s, utilizando el bloque *Sine Wave*.
 - Agrupar las señales de interés utilizando un multiplexor y visualizarlas con el bloque *scope* (Figura 164).
 - Activación de *Logging* en la señal multiplexada. Pulsar botón derecho la señal de salida del multiplexor y establecer *Log Selected Signal*.

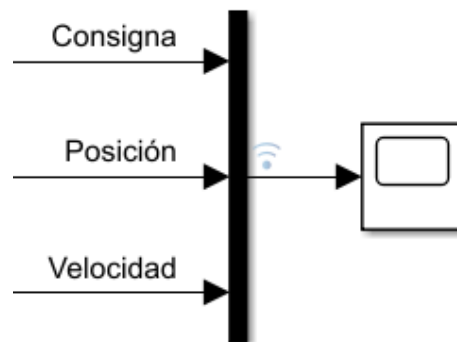


Figura 164: P0 - Agrupación de señales de interés utilizando un multiplexor.

2. Ejecutar la simulación y guardar los resultados generados a un archivo de tipo *.mat* para su posterior representación gráfica en Matlab. Para ello, deben seguirse los siguientes pasos:
 - Hacer clic en el icono de *Logging* asociado a la señal de salida del multiplexor.
 - En la ventana *Simulator Data Inspector*, seleccionar todas las señales que aparecen en la lista.
 - Hacer clic en *Export* y, en la nueva ventana, elegir la opción *Work area, excluding archive* y luego introducir el nombre del archivo en el que se guardarán los datos.
 - Desde Matlab, utilizar la función *load* para abrir el fichero exportado y representar gráficamente la consigna, la posición y la velocidad del sistema.

3. A partir de los resultados obtenidos en el punto anterior, se debe determinar la zona muerta del motor. Para ello, es necesario identificar los intervalos en los que la velocidad del motor es nula pese a aplicar una señal de voltaje como consigna. Medir los voltajes positivos u_{zm}^+ y negativos u_{zm}^- a partir de los cuales el motor comienza a girar. (SUGERENCIA: Puede reutilizarse el experimento anterior, modificando los parámetros de la señal senoidal aplicada). Finalmente, completar la Tabla 11 calculando la media de los valores obtenidos.

4. Establecer en 30° la orientación del eje de la reductora. Para ello, debe modificar el parámetro "*Theta_reductora*" que se encuentra en el archivo "*Parameters_MotorCC*". A continuación, introducir una consigna nula al motor, es decir, cambiar el valor de amplitud de la señal senoidal a 0 V. Por último, medir la tensión del potenciómetro asociado y repetir para los ángulos de la Tabla 12.

5. Realizar un ajuste lineal de los datos recogidos en la Tabla 12 utilizando la función *polyfit*, con el fin de obtener los coeficientes K_{pr} y K_{or} . Estos coeficientes deben cumplir la relación $\theta_r = K_{pr}\theta_p + K_{or}$, donde θ_p es la lectura del potenciómetro en voltio y θ_r la posición angular en grados del eje de la reductora. Verificar gráficamente con la función *polyval* si la relación entre la tensión y el ángulo del potenciómetro es lineal. Completar la Tabla 13 con los resultados obtenidos.

	u_{zm}^+	u_{zm}^-
1		
2		
3		
4		
Media		

Tabla 11: P0 - Identificación de la zona muerta

Posición (°)	Posición (V)	Posición (°)	Posición (V)
30		210	
60		240	
90		270	
120		300	
150		330	
180		360	

Tabla 12: P0 - Relación tensión-posición.

K_{pr} (°/V)	K_{or} (°/V)

Tabla 13: P0 - Coeficientes de ajuste lineal para la relación tensión-posición.