

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO PARA VISUALIZACIÓN DE PAR Y VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCIÓN.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica

AUTORES: GUILLERMO ALEJANDRO CASTRO MUÑOZ

DARWIN ANDRÉS CHACHA CRIOLLO

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE, Ph.D.

Cuenca – Ecuador 2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Guillermo Alejandro Castro Muñoz con documento de identificación N° 1105964637 y Darwin Andrés Chacha Criollo con documento de identificación N° 0107422651; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 29 de agosto de 2024

Atentamente,

Guillermo Alejandro Castro Muñoz

Colle

1105964637

Darwin Andrés Chacha Criollo

Jun Clarkin

0107422651

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

Nosotros, Guillermo Alejandro Castro Muñoz con documento de identificación Nº

1105964637 y Darwin Andrés Chacha Criollo con documento de identificación Nº

0107422651, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento

cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos

patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "Desarrollo de

un dispositivo para visualización de par y velocidad de motores de inducción." el

cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, en la

Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer

plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que

hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad

Politécnica Salesiana.

Cuenca, 29 de agosto de 2024

Atentamente,

Guillermo Alejandro Castro Muñoz

Sulle

1105964637

Darwin Andrés Chacha Criollo

Jun Clarkin

0107422651

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N°

0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi

tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO

PARA VISUALIZACIÓN DE PAR Y VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCIÓN.,

realizado por Guillermo Alejandro Castro Muñoz con documento de identificación

Nº 1105964637 y Darwin Andrés Chacha Criollo con documento de identificación

Nº 0107422651, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la

opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la

Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 29 de agosto de 2024

Atentamente,

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque, Ph.D.

0102257482

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque, mi tutor, por su invaluable guía, paciencia y apoyo a lo largo de este proyecto. Su conocimiento y orientación fueron fundamentales para la culminación exitosa de esta tesis.

También extiendo mi gratitud a todos los profesores de la carrera, quienes con su dedicación y enseñanza han contribuido significativamente a mi formación académica y profesional. Gracias por compartir su experiencia y sabiduría, y por fomentar en mí un espíritu crítico y de superación constante.

Finalmente, agradezco a mis compañeros de estudio, quienes con su compañerismo, y apoyo hicieron de esta etapa un proceso más llevadero y enriquecedor.

Guillermo Alejandro Castro Muñoz

Agradezco a mi tutor, el Ingeniero Flavio Quizhpi, por brindarme la orientación y el seguimiento necesarios para culminar mi trabajo de titulación con un proyecto de calidad.

Agradezco profundamente a mis compañeros de carrera, cuyo apoyo incondicional y colaboración fueron fundamentales para la creación de numerosos proyectos y trabajos. Estas experiencias no solo enriquecieron mis conocimientos, sino que también ayudaron a forjar en mí una identidad profesional sólida y un sentido de pertenencia.

Darwin Andrés Chacha Criollo

DEDICATORIAS

Dedicatoria de Guillermo Alejandro Castro Muñoz

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida y en la realización de esta tesis. Sin su apoyo incondicional, este logro no habría sido posible.

De manera especial, a mi papá, Guillermo, quien me acompaña desde el cielo, gracias por guiarme y apoyarme siempre, aun en la distancia. Agradezco a mi mamá, Paulina, por su infinita paciencia y constante apoyo en cada paso de mi camino. A mi hermana, María Auxiliadora, por estar siempre a mi lado, brindándome su cariño y apoyo incondicional.

A mis abuelitos, Genni Beatriz y Julio Aquiles, gracias por su amor, por ser un ejemplo de fortaleza y por haberme dado siempre su apoyo incondicional. Finalmente, a mi tía Lucy, gracias por estar presente en cada momento, por hacerme sentir mejor y por brindarme su apoyo a lo largo de toda mi vida.

Dedicatoria de Darwin Andrés Chacha Criollo

Dedico mi tesis a mis padres, Luz y Fabián, quienes han hecho todo lo posible y lo imposible para que esta meta se haga realidad. Gracias a su apoyo y guía, he logrado convertirme en la persona que soy hoy. También agradezco a mis hermanos, David y Thalía, quienes, junto a mis padres, han sido los cuatro pilares que me han mantenido firme en todo momento.

Dedico mi tesis a mi abuelo, Manuel Criollo, quien siempre me apoyó desde que tengo memoria. Gracias a sus consejos y sabiduría, forjé una identidad sólida y valiosa. Su recuerdo vivirá siempre en mi memoria.

Dedico mi tesis a mi pareja, Erika, quien ha sido mi apoyo constante en cada paso que he dado. Su aliento en los momentos más difíciles y su confianza en mí me han permitido enfrentar mis desafíos y proyectar la mejor versión de mí mismo. Dedico mi tesis a mis amigos de la universidad: Wiliam, Stiven, Génesis, Tatiana y Karen, con quienes compartí un sinfín de historias y anécdotas que siempre permanecerán en mi memoria como parte fundamental de mi crecimiento personal. Dedico mi tesis también a mis amigos de la infancia y del colegio: Daniel, Cristian, Brayan, Andrés, Kevin y Edisson, con quienes compartí innumerables momentos llenos de risas, anécdotas, aventuras y noches de celebración. Su amistad ha sido un pilar invaluable en mi vida.

Índice general

Ag	grade	cimien	tos	I
De	edica	torias		II
Ín	dice (Genera	I	IV
Ín	dice o	de figu	ras	VIII
Ín	dice o	de tabla	ıs	IX
Re	sume	en		X
Ał	strac	:t		ΧI
Ar	ntece	dentes		1
Ju	stifica	ación		3
Oł	ojetiv	os		4
In	trodu	ıcción		5
1.	Dise	eño del	Dispositivo	6
	1.1.	Sistem	aa en Bloques	6
			ntos Existentes en el Mercado	9
		1.2.1.	Medidor de Par	9
		1.2.2.	Sistema Encoder	13
	1.3.	Proces	ador del Dispositivo	16

ÍNDICE GENERAL V

	1.4.	Prestaciones del Dispositivo	19		
2. Proceso de Construcción			20		
	2.1.	Placa de Circuito Impreso	20		
		2.1.1. Circuito de la Placa PCB	20		
		2.1.2. Señales	22		
		2.1.3. Entradas y Salidas	24		
		2.1.4. Pistas	25		
	2.2.	Procesamiento	26		
		2.2.1. Algoritmos	27		
		2.2.2. Programación	32		
	2.3.	Diseño Estructural	33		
		2.3.1. Modelamiento PCB	33		
		2.3.2. Carcasa	34		
		2.3.3. Bornes	35		
		2.3.4. Display Lcd I2C	36		
3.	Prue	oas y Validación de Parámetros	38		
	3.1.	Prueba de PCB	38		
	3.2.	Cálculos de Par en Máquinas de Inducción	42		
	3.3.	Ensayos de Laboratorio	43		
		3.3.1. Prueba de Vacío	43		
		3.3.2. Prueba de Rotor Bloqueado	43		
		3.3.3. Analizador de Parámetros Eléctricos Monofásicos	44		
	3.4.	Comparación	46		
	3.5.	Ajustes y Calibración	47		
	3.6.		48		
4.	Con	lusiones y Trabajos Futuros	51		
Gl	Glosario				
Re	eferencias 5				

ÍNDICE GENERAL	VI
Apéndice	57
Apéndice A	57
Apéndice B	58
Apéndice D	60
Apéndice D	63

Índice de figuras

1.1.	Esquema del Funcionamiento del Proyecto en Bloques	7
1.2.	Galga Extensométrica [4]	10
2.1.	Pines para Conexión de Elementos	21
2.2.	Borneras para Conexión con las Señales de los Sensores	21
2.3.	Circuitos de Reducción de Voltaje y Tratamiento de Señales	22
2.4.	Señal del Sensor de Par	23
2.5.	Señal del Sensor de Par Regulada	23
2.6.	Señal del Encoder	23
2.7.	Señal del Sensor de Par Regulada	24
2.8.	Ancho de Pista para los 12 Voltios de Alimentación	26
2.9.	Cara Top Layer de la Placa	34
2.10.	Vista Frontal del Dispositivo	35
2.11.	Vistas Laterales	35
2.12.	Conectores de los Sensores de Par y Velocidad	36
3.1.	Señal de Ingreso.	40
3.2.	Señal Regulada	41
3.3.	Señal de Ingreso.	41
3.4.	Señal Regulada	42
3.5.	Diagrama de Conexión para la Prueba de Vacío y Rotor Bloqueado	44
3.6.	Diagrama de conexión para la Prueba de Carga	45
3.7.	Medición a Carga Media	46
3.8.	Prueba a Media Carga	49
3.9.	Gráfico Comparativo Par/Velocidad	50

Índice de Figuras	VIII	
-------------------	------	--

4.1.	Plano del Circuito del Dispositivo	58
4.2.	Cara Top Layer de la Placa	59
4.3.	Cara Bottom Layer de la Placa	59
4.4.	Vistas del Dispositivo en 3D	60
4.5.	Planos con Medidas Externas	61
4.6.	Planos con Medidas Internas	62
4.7.	Código de Programación Inicialización	63
4.8.	Código de Programación Interrupciones	64
4.9.	Código de Programación Setup	64
4.10.	Código de Programación Loop	65

Índice de tablas

1.1.	Especificaciones Técnicas del Sensor de Par Burster 8645 - 5075 [9]	12
1.2.	Especificaciones Técnicas del Encoder Rotativo E50S8-3600-3-T-24 [16]	16
1.3.	Comparativo de las Características Principales de las Tarjetas de	
	Desarrollo [17], [18]	17
1.4.	Características Esp32 [18]	18
2.1.	Entradas de Señal y Voltaje a través de los Bornes	24
2.2.	Salidas de las Señales a Través del DB9	25
2.3.	Ancho de Pistas Respecto a la Corriente [20]	25
2.4.	Relación Lineal del Sensor de Par	31
2.5.	Distribución de Pines de los Sensores	36
2.6.	Características Display Lcd I2C [24]	37
3.1.	Prueba de Voltajes	39
3.2.	Parámetros Registrados de las Pruebas Realizadas	45
3.3.	Pruebas de Carga	46
3.4.	Tabla Comparativa Velocidad Medida / Velocidad del Dispositivo	47
3.5.	Tabla Comparativa Par Calculado / Par Medido	47
3.6.	Pruebas de Carga	49
3.7.	Tabla Comparativa de Velocidad y Par Medidos vs Calculados	49
4.1.	Presupuesto del Provecto	57

Resumen

Se desarrolló un dispositivo electrónico para visualizar de manera precisa el par y la velocidad de motores eléctricos. Para ello, se utilizan dos sensores disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas: un codificador rotatorio E50S8-3800-3-T-24 de Autonics y un sensor de par 8645 de Burster. Estos sensores generan señales eléctricas que son adquiridas y procesadas por una placa de desarrollo Esp32, la cual interpreta las señales y calcula en tiempo real la velocidad y el par de los motores. Los datos procesados se presentan al usuario a través de una pantalla LCD.

El estudio incluye un diseño detallado, desde la selección de componentes hasta la ejecución de algoritmos para el procesamiento de las señales. Se realizaron pruebas exhaustivas para validar la precisión del dispositivo.

Este dispositivo tiene aplicaciones en entornos académicos, permitiendo a los usuarios monitorizar de manera eficiente el par y la velocidad de motores de inducción. Además, su diseño portátil facilita la integración en diferentes sistemas de control y monitorización.

Palabras clave: Codificador Rotatorio; Esp32; Motores Eléctricos; Placa De Desarrollo De Hardware; Sensor De Par.

Abstract

An electronic device was developed to accurately display the speed and torque of electric motors. For this purpose, two sensors available in the electrical machine lab are used: an Autonics E50S8-3800-3-T-24 rotary encoder and a Burster 8645 torque sensor. These sensors generate electrical signals that are acquired and processed by an Esp32 development board, which interprets the signals and calculates in real time the speed and torque of the motors. The processed data is presented to the user via an LCD display.

The study includes a detailed design, from component selection to the implementation of signal processing algorithms. Extensive testing was performed to validate the accuracy.

This device has applications in academic environments, allowing users to efficiently monitor the torque and speed of induction motors. In addition, its portable design facilitates integration into different control and monitoring systems.

Keywords: Electric Motors; Esp32; Hardware Development Board; Rotary Encoder; Torque Sensor.

Antecedentes

Asegurar mediciones precisas de la velocidad y el par en máquinas eléctricas rotativas es esencial para garantizar su óptimo rendimiento en entornos industriales, en donde se busca optimizar el aprovechamiento energético. La velocidad del motor refleja su capacidad para mantener un ritmo constante de funcionamiento, crucial en procesos que requieren un control preciso. Por otro lado, el par del motor indica su habilidad para realizar trabajos mecánicos eficientes, evitando sobrecargas que puedan resultar en fallos del sistema.

Además, la medición precisa de la velocidad, especialmente en el contexto operativo y dinámico de los motores de inducción reviste una importancia fundamental en el ámbito del diagnóstico de averías. Dicha medida proporciona información crucial para la identificación y comprensión de los patrones de funcionamiento anómalos generados por las irregularidades mecánicas o eléctricas en los motores. Por ende, el conocimiento preciso de la velocidad de rotación constituye un componente indispensable en el proceso de evaluación diagnóstica, permitiendo una detección temprana y una intervención eficaz ante posibles fallos, lo que impacta directamente en la mejora del rendimiento y la vida útil de los motores [1].

En el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana de la sede Cuenca, se evidencia una carencia significativa en dispositivos para la visualización de par y velocidad. En este contexto, se resalta que en el año 2018 se desarrolló una plataforma educativa con motores de inducción, destinada a realizar pruebas de control, la cual posibilita el monitoreo de par y velocidad. Sin embargo, es importante señalar que esta plataforma está principalmente orientada hacia la investigación y el estudio de sistemas más complejos. Esta orientación hacia la investigación y sistemas más complejos, limita la accesibilidad y la utilidad práctica

ANTECEDENTES 2

de la plataforma para aplicaciones más específicas o de menor escala [2]. Esta limitación compromete la capacidad del laboratorio para proporcionar una formación integral y efectiva a estudiantes y profesionales en formación, quienes podrían beneficiarse significativamente de la disponibilidad de dispositivos más adecuados para la visualización y análisis de par y velocidad en sistemas eléctricos de menor complejidad. Esta situación genera la necesidad de crear una solución que elimine esta carencia, proporcionando un dispositivo que ofrezca visualización de par y velocidad, adaptado a las necesidades prácticas del laboratorio y facilitando experiencias de aprendizaje más enriquecedoras.

Justificación

La falta de un dispositivo accesible para la visualización de parámetros como par y velocidad representa un obstáculo para el adecuado desarrollo de los estudiantes en el ámbito de la ingeniería. Esta carencia no solo limita la accesibilidad y la utilidad práctica de la plataforma didáctica con motores de inducción presente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana para aplicaciones más específicas o de menor escala, sino que también compromete la capacidad del laboratorio para proporcionar una experiencia educativa completa.

Por tanto, generar una solución que permita cubrir este vacío es evidente. La implementación de un dispositivo dedicado a la visualización de par y velocidad, adaptado a las necesidades prácticas del laboratorio, representa una respuesta adecuada a esta necesidad. Este dispositivo no solo mejorará la experiencia de aprendizaje, sino que también incrementará la calidad de la enseñanza en el laboratorio de máquinas eléctricas, ayudando a formar profesionales competentes y calificados en el ámbito de la ingeniería electrónica y eléctrica.

Además, este dispositivo no solo tendrá un impacto significativo en el ámbito educativo, sino que también podría beneficiar al sector industrial. Al ofrecer una herramienta accesible y económica para el monitoreo, permitirá a las empresas realizar un seguimiento más preciso y eficiente del rendimiento de sus motores de inducción, lo que podría resultar en una disminución de costos y un incremento en la productividad. La implementación de este dispositivo también abre las puertas para el monitoreo remoto de motores eléctricos, lo que incrementa su utilidad y su aplicación en distintos entornos industriales. Esta contribución adicional a la industria resalta aún más la importancia del desarrollo de este dispositivo.

Objetivos

Objetivo General

 Desarrollar un dispositivo para visualización de par y velocidad de motores de inducción.

Objetivos específicos:

- Selecionar los componentes adecuados para la construcción del dispositivo de visualización de par y velocidad.
- Realizar el diseño de un sistema integral que incluya las características del circuito para la adaptación de las señales obtenidas de los sensores de par y velocidad, así como la programación necesaria para la adquisición y visualización eficiente de dichas señales.
- Construir el prototipo del dispositivo, considerando los requisitos prácticos para su utilización en el laboratorio de Máquinas Eléctricas.
- Validar el funcionamiento del dispositivo mediante pruebas experimentales en los motores de inducción a los cuales esta diriguido, asegurando su precisión y fiabilidad en la visualización de par y velocidad

Introducción

El monitoreo preciso de la velocidad y el par en motores eléctricos es esencial para su rendimiento óptimo en aplicaciones industriales y educativas. Sin embargo, el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana carece de un dispositivo accesible para visualizar estos parámetros, lo que limita la formación práctica de los estudiantes. Para resolver esta carencia, se desarrolló un dispositivo que mide y muestra en tiempo real la velocidad y el par de motores de inducción, utilizando un codificador rotatorio y un sensor de par, procesados a travéz una placa Esp32. Este dispositivo ayuda a la comprensión del funcionamiento básico de los motores eléctricos, mejorando la experiencia de aprendizaje.

Además, el dispositivo tiene aplicaciones industriales, ofreciendo una solución económica para el seguimiento en tiempo real de magnitudes y parámetros de motores eléctricos, lo que permite detectar fallos tempranos y optimizar el mantenimiento preventivo. Esto contribuye a extender la vida útil de los motores, reduciendo costos operativos y beneficiando tanto al sector educativo como a la industria.

Capítulo 1

Diseño del Dispositivo

Este capítulo aborda el diseño del dispositivo propuesto para la visualización del par y la velocidad de motores de inducción. Se ofrece una descripción exhaustiva de los componentes esenciales del sistema, abarcando desde la conceptualización inicial hasta la selección de los elementos específicos que integran el dispositivo.

1.1. Sistema en Bloques

Para el desarrollo del dispositivo para la visualización del par y la velocidad, es esencial descomponer el sistema en bloques funcionales. Cada bloque representa un componente crítico que, en conjunto, conforma un sistema cohesivo y eficiente. Esta metodología no solo facilita la comprensión y el diseño del dispositivo, sino que también permite una integración más sencilla y un diagnóstico más efectivo en caso de fallos.

En la Figura 1.1, se ve el sistema dividido en los seis bloques que lo componen. Cada bloque desempeña un papel fundamental y específico para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo. Posteriormente, se presenta una descripción de cada uno de los bloques.

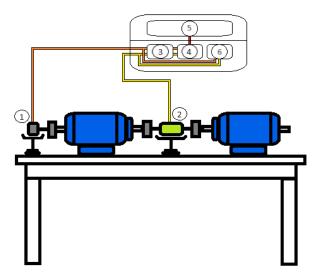


Figura 1.1: Esquema del Funcionamiento del Proyecto en Bloques.

Bloque 1: Encoder Óptico

Un encoder óptico es un dispositivo que convierte el movimiento rotacional en señales digitales adecuadas para el procesamiento por un microcontrolador. Este encoder utiliza un disco con ranuras, junto al circuito de detección óptica para generar pulsos en función del movimiento del eje del motor. El encoder óptico está acoplado al eje del motor de inducción. Conforme el eje rota, el disco ranurado del encoder interrumpe un haz de luz emitido por un LED, el cual es detectado por un sensor. Cada interrupción del haz de luz genera un pulso digital. Al contar el número de pulsos en un período de tiempo determinado, es posible calcular la velocidad de rotación del motor.

Bloque 2: Medidor de Par

Un medidor de par es un dispositivo que convierte la fuerza torsional ejercida sobre el eje del motor en una señal eléctrica que puede ser procesada por un microcontrolador. Dado que la señal generada por el medidor de par es analógica, es necesario realizar una conversión y procesamiento adecuados para que el sistema pueda interpretarla correctamente. El medidor de par está instalado en el eje del motor. Cuando el motor aplica fuerza torsional, el sensor de par detecta esta fuerza y genera una señal de voltaje que es proporcional a la fuerza aplicada.

Bloque 3: Regulación de Señales

La regulación de señales se enfoca en ajustar las señales analógicas a niveles de voltaje que puedan ser manejados de manera segura y precisa por el microcontrolador escogido. Además, se utilizan seguidores de tensión para reducir la pérdida de señal y asegurar que los datos sean transmitidos al microcontrolador sin distorsiones. Este bloque es fundamental para el funcionamiento adecuado del sistema, ya que asegura que las señales analógicas sean procesadas con precisión por el microcontrolador, permitiendo que el dispositivo realice mediciones exactas del par y la velocidad del motor.

Bloque 4: Adqusición y Programación

El bloque de adquisición y programación es esencial para el procesamiento de las señales analógicas ajustadas y su conversión en datos útiles para la visualización y el control del motor. En esta fase, un microcontrolador se encarga de la recolección de datos, su procesamiento y la programación de las funciones del dispositivo. En este proyecto, se ha optado por el microcontrolador ESP32, conocido por sus capacidades avanzadas y su versatilidad. Este bloque resulta fundamental para el funcionamiento del dispositivo, ya que transforma las señales medidas en información utilizable y gestiona la interfaz de usuario para una visualización eficaz de los parámetros del motor.

Bloque 5: Visualización

El bloque de visualización es fundamental para la interacción del usuario con el dispositivo, presenta los parámetros obtenidos a través por las mediciones del par y la velocidad del motor de manera clara y comprensible. Este componente es responsable de exhibir la información procesada de tal forma que el usuario pueda monitorear y analizar en tiempo real el torque y la velocidad de giro del motor.

Bloque 6: Bypass para las Señales de los Sensores

En este bloque se proporciona una ruta alternativa para las señales originales generadas por los sensores, permitiendo su utilización en aplicaciones futuras. Este bloque garantiza que las señales analógicas provenientes del medidor de par y del encoder óptico estén disponibles como salidas adicionales, facilitando su integración con otros sistemas o dispositivos según sea necesario. Esta función es esencial para la adaptabilidad del dispositivo, ya que permite que las señales de los sensores sean accesibles para aplicaciones y análisis futuros. Una implementación efectiva del bypass asegura que el sistema pueda evolucionar y ajustarse a nuevas necesidades sin comprometer la integridad de las señales originales.

1.2. Elementos Existentes en el Mercado

1.2.1. Medidor de Par

Los sensores de medición de par son fundamentales en aplicaciones donde es necesario evaluar la fuerza rotacional aplicada a un eje, como en motores o sistemas de transmisión. Estos sensores transforman la torsión en una señal eléctrica que puede ser monitoreada y analizada en tiempo real. Existen diversas variantes de sensores de par, como los basados en galgas extensiométricas, ópticos o magnéticos, cada uno con características específicas en cuanto a precisión, rango de medición y sensibilidad. En este proyecto, se emplea un sensor de par lineal que produce una señal analógica proporcional al par aplicado. Es necesario realizar un proceso de calibración para asegurar que las mediciones reflejen con precisión el par real, lo cual es esencial para el correcto funcionamiento del dispositivo y la exactitud en la visualización de los datos.

El sensor de par funciona principalmente mediante una galga extensométrica, dispositivo el cual transforma la deformación mecánica en variación de resistencia eléctrica. Esta galga, que generalmente consiste en una fina lámina metálica, se adhiere a la superficie de un componente que se deforma cuando se aplica una fuerza de torsión o par. Al experimentar torsión, la galga se deforma junto con el componente, y esta deformación provoca un cambio en su resistencia eléctrica. Este cambio en la

resistencia es directamente proporcional a la magnitud del par aplicado. Utilizando un circuito de Wheatstone, la alteración en la resistencia se transforma en una señal que puede ser interpretada, para reflejar con precisión el par aplicado. Este principio de operación hace que la galga extensométrica que se muestra en la figura 1.2 sea una herramienta confiable para la medición de fuerzas como el par en aplicaciones industriales y científicas [3].

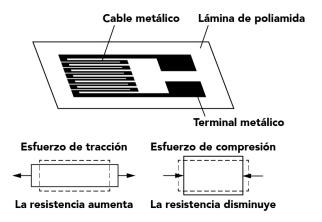


Figura 1.2: Galga Extensométrica [4].

Modelos Disponibles

Sensor de Par Rotativo Lorenz DR2 / DR20

El sensor de par rotativo Lorenz DR2 / DR20 es un instrumento preciso para medir el par, con un rango de medición que abarca desde 1 Nm hasta 500 Nm. Este sensor está clasificado en la clase 0.1, lo que asegura una alta precisión en las lecturas. Utiliza tecnología extensométrica para su salida de par, garantizando mediciones exactas. Además, el sensor proporciona información sobre velocidad y ángulo a través de un encoder interno que emite señales TTL incrementales, lo que permite un monitoreo detallado del movimiento. El sensor está diseñado con un formato de doble eje macho, facilitando su integración en sistemas mecánicos [5].

■ Sensor de Par Rotativo Burster 8661

El Sensor de Par Rotativo 8661 ofrece un rango de medición que abarca desde 0 hasta 1000 Nm, adaptándose a diversas necesidades. Su alta linealidad, con

una precisión inferior al 0.05%, asegura mediciones precisas y consistentes. La salida de señal de 0 a 10 V facilita su integración con otros sistemas de medición, y el sensor también permite la medición del ángulo, lo que lo hace aún más versátil. Además, su relación calidad-precio es excelente. Gracias a su transmisión sin contacto, el sensor ofrece un funcionamiento casi sin necesidad de mantenimiento y una alta resistencia a fallos [6].

Sensor de Par Rotativo HBK T21WN

El Sensor de Par Rotativo T21WN destaca por su alta precisión con una clase HBM de 0.2. Es capaz de medir pares en un rango que va desde 0.1 Nm hasta 200 Nm y soporta velocidades de rotación de hasta 20,000 rpm. Incluye un sistema integrado que mide tanto la velocidad de rotación como el ángulo de rotación, generando 360 impulsos por cada revolución para ofrecer una medición precisa. Su diseño compacto facilita su integración en diversos sistemas [7].

Sensor de Par Rotativo Kistler 4509A

El Sensor de Par Rotativo Kistler 4509A proporciona una precisión de medición del 0.2 % FSO a un costo competitivo. Emplea un sistema de puente completo con galgas extensométricas para asegurar mediciones precisas del par. Su construcción robusta asegura una larga durabilidad. Además, el sensor es reconocido por su confiabilidad y su sencillez de uso[8].

Sensor de Par Rotativo Burster 8645 - 5075

El sensor de par Burster 8645 - 5075 destaca por su transmisión sin contacto, que reduce el desgaste y minimiza el mantenimiento, lo que aumenta su durabilidad. Proporciona un gran rango de medición de ±75 Nm, lo que lo convierte en una herramienta muy versátil. Su diseño compacto y bajo momento de inercia proporcionan mediciones precisas y estables. Además, la posibilidad de detectar velocidad y ángulo agrega funcionalidad adicional. Comparado con otros sensores, el Burster 8645 - 5075 proporciona una gama más amplia y una mayor resistencia a fallos, siendo una opción superior para el dispositivo.

Sensor de Par 8645 - 5075

El sensor modelo 8645 de la marca Burster representa una solución avanzada para la medición precisa de par en diversas aplicaciones industriales. Este dispositivo se distingue por su empleo de una tecnología de detección sin contacto, lo que significa que no requiere de elementos físicos en contacto directo con la superficie medida, garantizando así una mayor durabilidad y fiabilidad en las mediciones. Se característica por su capacidad para convertir el par mecánico en una señal eléctrica. Esto se logra mediante la identificación de variaciones en un campo magnético inducidos por la aplicación de torque. En la tabla 1.1 se presentan sus características técnicas.

Parámetro	Valor	Unidad
Rango de Medición	±75	Nm
Error Lineal Relativo	±1	% F.S
Tensión de Alimentación	6 - 15	VDC
Corriente	0.01	A
Salida	0.5 - 4.5	VDC
Salida (0 Nm)	2.5	VDC
Resistencia de Salida	50	Ohm
Frecuencia de Corte	1	kHz
Resolución	0.1	% F.S
Velocidad de Rotación	5000	min^{-1}
Fuerza Axial	2600	N
Fuerza Lateral	300	N
Momento de Flexión	41.7	Nm

Tabla 1.1: Especificaciones Técnicas del Sensor de Par Burster 8645 - 5075 [9].

1.2.2. Sistema Encoder

Los encoders son fundamentales para medir revoluciones en motores y sistemas rotativos, transformando el movimiento mecánico en señales eléctricas que se pueden analizar y contabilizar. Hay dos tipos principales de encoders: incrementales y absolutos. Los encoders incrementales producen una serie de pulsos eléctricos a medida que el eje gira, lo que permite calcular la velocidad de rotación contando estos pulsos en un periodo de tiempo determinado. En contraste, los encoders absolutos ofrecen una posición angular específica para cada punto de rotación, proporcionando información precisa tanto de la posición como de la velocidad. En aplicaciones que demandan control de velocidad y posición, como en motores de inducción, los encoders ópticos son frecuentemente utilizados por su alta resolución y precisión. Estos dispositivos utilizan un disco con perforaciones que interrumpe un haz de luz, generando pulsos eléctricos que indican la velocidad del eje.

Codificadores Rotativos

Incremental

Los encoders incrementales registran un número específico de pulsos por cada vuelta completa del eje. Contando estos pulsos o midiendo la duración de los intervalos entre ellos, se pueden obtener datos precisos sobre la velocidad y el ángulo del eje. Los encoders incrementales con dos canales, que emiten señales desfasadas 90° entre sí, permiten identificar la dirección de rotación, lo que facilita el control preciso del posicionamiento bidireccional del eje. Además, algunos modelos de encoders incrementales cuentan con un tercer canal que proporciona una señal de referencia por cada vuelta completa. Esta señal adicional se utiliza para establecer un ciclo de referencia o medir la longitud en aplicaciones que requieren una posición de referencia exacta [10].

Absoluto

Los encoders absolutos proporcionan un valor único y codificado para cada posición del eje. En aplicaciones de posicionamiento, estos encoders son ventajosos porque liberan al controlador de la necesidad de realizar cálculos

complejos y reducen los costos al no requerir componentes de entrada adicionales. También, permiten que el sistema mantenga la posición actual del eje incluso después de una pérdida de energía o un reinicio, eliminando la necesidad de recalibrar el punto de referencia. Los encoders absolutos pueden transmitir la información de posición a la electrónica de análisis a través de múltiples cables en paralelo o, alternativamente, mediante protocolos e interfaces estandarizados en sistemas en serie [11].

Modelos Disponibles

■ Encoder Incremental ENI58IL-S10QA5-1250UD2-RMY:01

El Encoder Incremental ENI58IL-S10QA5-1250UD2-RMY:01 presenta una carcasa de 58 mm de diámetro, lo que lo hace una alternativa compacta para una variedad de aplicaciones. Está equipado con un eje sólido y una brida rectangular para un montaje seguro. Con una resolución de 1250 pulsos por revolución, proporciona mediciones precisas del movimiento. La interfaz RS 422 facilita una comunicación eficiente y estable con otros equipos. Además, incorpora la tecnología BlueBeam para asegurar la máxima precisión en las mediciones, y su configuración de fase A antes de B, cuando se observa hacia el eje, permite una detección precisa de la dirección de rotación [12].

■ Encoder Incremental 10-***1

El Encoder Incremental 10-***1 cuenta con una carcasa estándar de 58 mm de diámetro, adecuada para aplicaciones industriales. Ofrece una alta resolución de hasta 5000 impulsos por revolución, garantizando mediciones precisas. Está disponible con diferentes opciones de montaje, como brida servo, brida cuadrada o brida de sujeción, y puede personalizarse con bridas y ejes especiales bajo solicitud. Este modelo está fabricado en acero inoxidable para mayor durabilidad y resistencia, y opera en un rango de voltaje de 10 V a 30 V, con salidas en contrafase que son resistentes a cortocircuitos [13].

• Encoder Incremental Elap Rev

El Encoder Incremental de Alta Resolución ELAP REV ofrece una impresionante resolución de hasta 50,000 pulsos por vuelta y una frecuencia máxima de hasta 400 kHz, lo que permite realizar mediciones con gran precisión y velocidad. Está disponible con niveles de señal HTL de 8-30 V o TTL de 5 V. Su carcasa de aluminio con clasificación IP65 asegura una alta protección contra polvo y humedad. El disco de cristal del encoder está grabado con los pulsos necesarios para alcanzar la resolución requerida. Además, este encoder es capaz de manejar velocidades de rotación de hasta 400 kHz y proporciona señales típicas de encoders, como los canales ABZ, en niveles de señal HTL o TTL [14].

Encoder Incremental Sick Ag 1036720

El Encoder Incremental DFS60B-S4PA10000 de Sick AG está diseñado con un paso eléctrico de 90° y ofrece interfaces TTL/HTL para flexibilidad en la conexión. Dispone de seis canales y se conecta mediante un conector macho M23 de 12 pines. Su eje sólido con brida de sujeción tiene un diámetro de 10 mm. Además, el encoder cuenta con un grado de protección de tipo IP65 en el eje y IP67 en la carcasa, garantizando una alta resistencia al polvo y al agua [15].

■ Encoder Incremental E50S8 - 3600 - 3 - T - 24

El encoder E50S8 - 3600 - 3 - T - 24 de Autonics es un dispositivo altamente preciso, diseñado para medir la velocidad de rotación con gran efectividad. Con una resolución de 3600 pulsos por vuelta, proporciona una detección muy detallada de los cambios en la rotación, lo cual es fundamental para aplicaciones que requieren alta exactitud. Su salida incremental TTL garantiza una comunicación exacta y confiable con otros equipos. En comparación con otros encoders, el E50S8 - 3600 - 3 - T - 24 destaca por su resolución superior, lo que resulta en una medición más exacta de la velocidad de rotación.

Encoder Rotativo E50S8 - 3600 - 3 - T - 24

El encoder rotativo óptico E50S8-3600-3-T-24 de la marca Autonics es un dispositivo altamente sofisticado diseñado para proporcionar mediciones precisas de posición angular en una amplia variedad de aplicaciones industriales. Este encoder

cuenta con una resolución de 3600 pulsos por revolución, lo que garantiza una alta precisión en la captura de movimientos rotativos. Las características de este encoder se detallan en la tabla 1.2.

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro	50	mm
Diametro del Eje	8	mm
Resolución	3600	P/rev
Numero de Revoluciones Máximas	5000	rpm
Tipo de Salida	Totem Pole Out	_
Frequencia Máxima	300	kHz
Tensión de Alimentación	12 - 24	VDC
Tensión de Salida en Alto	12 - 24	VDC
Tensión de Salida en Bajo	0.4	VDC
Corriente de Salida en Alto	10	mA
Corriente de Salida en Bajo	30	mA

Tabla 1.2: Especificaciones Técnicas del Encoder Rotativo E50S8-3600-3-T-24 [16].

1.3. Procesador del Dispositivo

Para la elección del procesador más adecuado para este proyecto, se tomaron en cuenta varios tipos de placas de desarrollo, seleccionando las más conocidas. Estas placas cuentan con bibliotecas y software libres para realizar cualquier tipo de programación, además de poseer las características necesarias para cumplir con los requisitos del dispositivo. Por esta razón, la tabla 1.3 indica las características correspondientes a cada uno y su precio:

Características	Arduino UNO	Beaglebone	Raspberry Pi 4	ESP32 DevKitC V4
Lugar de Desarrollo	Interaction Design Institute Ivrea, Italy	Texas Instruments	Reino Unido, Raspberry Pi Foundation	Espressif Systems
Memoria Flash	32KB Memoria Flash	2GB Memoria Flash	_	4MB Memoria Flash
Memoria	Additional SD or Micro SD shield	512MB RAM, External microSD	8GB RAM, External Micro SD	520KB SRAM
Velocidad de Procesamiento	16 MHz	1 GHz	1.5 GHz	240 MHz
Unidad de Procesamiento	Atmega 328p	ARM Cortex-A8, 32-Bit	Broadcom BCM2711B0, quad-core Cortex-A72	ESP32-D0WD
Conexión a Internet	Módulo adicional, Wi-Fi	Puerto Ethernet	Wi-Fi 2.4GHz / 5GHz, Bluetooth 5.0, BLE, Puerto Ethernet	Max 150 Mbps Wi-Fi
GPIO	14 digital I/O pins (6 PWM outputs)	92	GPIO 40 pines, 2 x Micro HDMI, 2 x USB 2.0, 2 x USB 3.0	UART, SPI, I2C, PWM, ADC, DAC, GPIO
Software	Arduino IDE, external	Linux, Debian	S.O. Debian, Linux	MicroPython, LUA, Arduino
Voltaje de Operación	5 V	5 V	5 V	5 VDC
Costo Promedio	\$22 USD	\$50 USD	\$129 USD	\$15

Tabla 1.3: Comparativo de las Características Principales de las Tarjetas de Desarrollo [17], [18].

De acuerdo con la tabla 1.3, el Raspberry Pi 4 sería la opción ideal debido a sus características superiores. Sin embargo, su alto costo lo hace inviable para una producción a gran escala, ya que los costos se dispararían. En cambio, el Arduino UNO cumple con los requisitos a un costo más bajo, pero sus características son inferiores

en comparación con otras placas y, además, hay muchas opciones basadas en Arduino en el mercado.

Por lo tanto, el ESP32 se presenta como la mejor opción. Ofrece un buen equilibrio entre precio y características, además es perfecta para proyectos que necesitan la adquisición de datos a través de ADC y el uso de rutinas de interrupciones, gracias a su amplia capacidad de despliegue, soporte para ADC de alta resolución, gestión eficiente de interrupciones, potente procesamiento multitarea, conectividad Wi-Fi y Bluetooth, y bajo coste. Adicionalmente, permite la visualización directa de datos en diversos tipos de pantallas, facilitando así la verificación y configuración en tiempo real del sistema [19].

Todas estas características hacen que el ESP32 sea una placa de desarrollo altamente efectiva para la supervisión en tiempo real de parámetros como la velocidad de rotación y el par de los motores eléctricos. Además, los protocolos que integra permiten la posibilidad de incorporar este monitoreo en el marco de la Industria 4.0.

En la tabla 1.4 se muestran las principales características del Esp32 DevKitC V4 que será utilizado en el proyecto.

Modelo	Esp32 DevKitC V4	
Núcleo	Esp32 - D0wd	
Tensión de Alimentación	5 VDC	
Corriente	80 mA - 500 mA	
Tensión Max en GPIO	3.3 VDC	
Frecuencia de Reloj	240 MHz	
Wifi	Max 150 Mbps	
Bluetooth	4.2	
Interfaz de Comunicación	UART, SPI, I2, PWM, ADC, DAC, GPIO	
Software de Programación	MicroPython, LUA, Arduino	

Tabla 1.4: Características Esp32 [18].

19

1.4. Prestaciones del Dispositivo

Las prestaciones que ofrece el dispositivo son diversas, destacándose las siguientes:

- Monitoreo Eficiente: Permite la medición precisa del par y la velocidad de los motores de inducción.
- Portabilidad: Su diseño compacto facilita la integración en diversos sistemas de control y monitorización.
- Aplicaciones Académicas: Ideal para entornos educativos, proporcionando datos precisos para el estudio y análisis de motores eléctricos.
- **Replicabilidad:** El diseño del sistema de circuitos utiliza componentes de bajo costo y es fácil de entender, lo que facilita su replicación.
- Conector DB9: Proporciona salidas puras de las señales de los sensores,
 permitiendo su uso en otros proyectos o investigaciones.

Capítulo 2

Proceso de Construcción

2.1. Placa de Circuito Impreso

En la siguiente sección se presenta la conexión y la disposición de los componentes de la placa PCB que permiten la adquisición de las señales de par y velocidad.

2.1.1. Circuito de la Placa PCB

El diseño se realizó en el software Altium Designer, y cuenta con tres áreas principales. La primera área, detallada en la figura 2.1, contiene un grupo de pines hembra: dos de 19 pines y seis de 5 pines. Los dos pines grandes son para la conexión con el ESP32, mientras que los seis pines adicionales son para conexiones de propósito general. Además, hay un grupo de pines hembra destinado a la conexión del LCD. Finalmente, se muestra la conexión de la tierra entre los pines y las dos entradas a los pines del ESP32 para la adquisición de las señales de par y velocidad, con una resistencia pull down de 10k a cada señal de entrada.

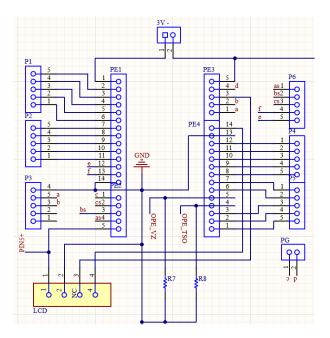


Figura 2.1: Pines para Conexión de Elementos.

En la figura 2.2, se observa la segunda área, la cual cuenta con cinco borneras de tornillo. Tres de estas borneras están destinadas a las señales entregadas por el encoder, y las otras dos a las señales proporcionadas por el sensor de par, cada una con su respectivo divisor de tensión para ajustar la señal según el voltaje requerido.

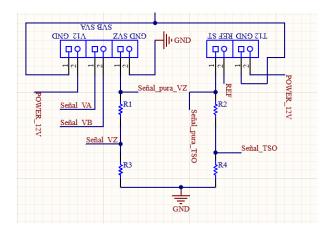


Figura 2.2: Borneras para Conexión con las Señales de los Sensores.

En la última área se encuentra una bornera de 12 voltios de alimentación con los dos circuitos de reducción de voltaje: uno con el regulador LM7805 para obtener 5V, que alimenta el ESP32, y otro con el regulador LM317 para proporcionar los 2.5V de referencia necesarios para el sensor de par. Además, se incluyen dos integrados LM324N con sus respectivos amplificadores operacionales internos, diseñados para

regular la tensión de cada señal y evitar pérdidas durante la transmisión. Finalmente, dos señales iran al esp32 y todas las demás señales se conectan a un conector DB9 para su posterior utilización en cualquier aplicación técnica. Todas estas conexiones se muestran en la figura 2.3 .

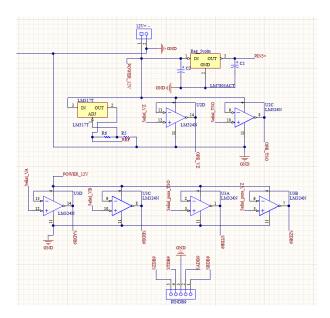


Figura 2.3: Circuitos de Reducción de Voltaje y Tratamiento de Señales.

2.1.2. Señales

El tratamiento y análisis de las señales generadas por los sensores es un aspecto crucial en la validación y optimización de los sistemas de medición. En este contexto, se utilizó el software Multisim para simular el comportamiento de las señales desde su origen, es decir, la señal pura proveniente de los sensores, hasta las señales resultantes luego de ser procesadas por los bloques de regulación o tratamiento.

Sensor de Par

Para iniciar, se considera la señal proveniente del sensor de par. En la simulación, dicha señal analógica se representa mediante una señal constante de 4.5 voltios, simulando así el valor máximo de voltaje que el sensor puede proporcionar, como se muestra en la figura 2.4.

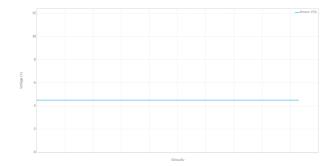


Figura 2.4: Señal del Sensor de Par.

Posteriormente, al realizar la simulación en Multisim, se obtuvo la señal resultante del circuito de regulación, la cual se muestra en la figura 2.5.

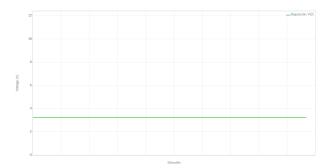


Figura 2.5: Señal del Sensor de Par Regulada.

Encoder

Luego, se considera la señal proveniente del encoder. En la simulación, dicha señal se representa mediante una señal cuadrada de 12 voltios, simulando así el valor máximo de voltaje que el sensor puede proporcionar, como se muestra en la figura 2.6.

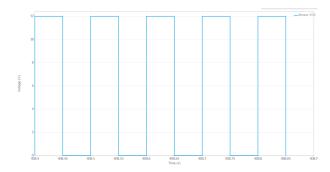


Figura 2.6: Señal del Encoder.

Posteriormente, al realizar la simulación en Multisim, se obtuvo la señal resultante del circuito de regulación, la cual se muestra en la figura 2.7.

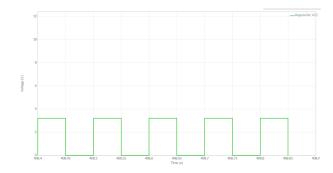


Figura 2.7: Señal del Sensor de Par Regulada.

2.1.3. Entradas y Salidas

La tabla 2.1 muestra todas las entradas y salidas que se encuentran en la placa del dispositivo.

Nº	Nombre de la Bornera	Descripción
1	3V -	Terminal de tierra (GND) asociado con los 3 voltios del ESP32.
2	12V +	Terminal de 12V de alimentación del sistema.
3	T12 GND	Terminal de tierra (GND) asociado con los 12 volts de el sensor de par.
4	REF ST	Terminal de referencia del sensor de par y terminal de señal del sensor par.
5	V12 GND	Terminal de tierra (GND) asociado con los 12 volts del enconder.
6	GND SVZ	Terminal de tierra (GND) asociado con la señal de velocidad Z.
7	SVB SVA	Terminales de la señal de velocidad B y A.

Tabla 2.1: Entradas de Señal y Voltaje a través de los Bornes.

El dispositivo incluye un bypass que ofrece una ruta alternativa para las señales

originales emitidas por los sensores, facilitando su aplicación en futuros desarrollos. Estas señales se transmiten a través de un conector DB9, empleando cinco terminales, cuyas especificaciones se detallan en la tabla 2.2.

Nº	Nombre del Pin	Descripción
1	SZDB9	Terminal de la señal de velocidad Z.
2	STDB9	Terminal de la señal de par.
3	GND	Terminal de tierra (GND).
4	SADB9	Terminal de la señal de velocidad A.
5	SBDB9	Terminal de la señal de velocidad B.

Tabla 2.2: Salidas de las Señales a Través del DB9.

2.1.4. Pistas

Para reducir al máximo el ruido causado por las impedancias de los componentes electrónicos y la proximidad de las pistas en la placa, es esencial considerar las medidas adecuadas para cada pista. A continuación, se presenta la tabla 2.3, que sirve como referencia para determinar el ancho de las pistas en función de las necesidades del diseño.

Ancho de Pista	Corriente Máxima
4 mm	10 A
2 mm	5 A
1.5 mm	4 A
1 mm	3 A
0.5 mm	2 A
0.2 mm	0.5 A

Tabla 2.3: Ancho de Pistas Respecto a la Corriente [20].

La distancia mínima entre pistas varía según la tensión que deben soportar, siendo 0,3 mm adecuada para tensiones de 5V a 10V.

Teniendo en cuenta estas normas y que se tiene una bateria de 12 a 2A, se decidió usar un ancho de pista de 1 mm para las conexiones de 12 V como se observa en la figura 2.8, de 0.7 mm para las conexiones de 5 V que alimentan al ESP32 y al LCD, y de 0.5 mm para los pines generales del ESP32.



Figura 2.8: Ancho de Pista para los 12 Voltios de Alimentación.

Los planos tanto del circuito completo como del diseño de las pistas se encuentran en el **Apéndice B**.

2.2. Procesamiento

A continuación se presenta el desarrollo y la descripción del código necesario para la obtención de los parámetros de par y velocidad en motores de inducción, elementos fundamentales para el monitoreo y control óptimo de dichos motores. Se detallan dos algoritmos esenciales:

- El primero para la determinación de la velocidad de rotación, basado en la gestión de interrupciones para asegurar una lectura precisa y en tiempo real del sensor de velocidad.
- El segundo para la obtención del par, que se enfoca en el procesamiento de una señal analógica proveniente del sensor de par, con un énfasis en la manipulación y análisis de la señal para el cálculo del par motor.

Para la visualización de los parámetros de par y velocidad en el LCD 16x2, se ha empleado la librería LiquidCrystal_I2C [21], que optimiza la comunicación entre el

ESP32 y la pantalla. Esta librería permite actualizar la información en tiempo real de manera sencilla, ofreciendo una interfaz clara y accesible para el usuario.

2.2.1. Algoritmos

Algoritmo para la Obtención de la Velocidad de Rotación

En el algoritmo 1, se establecen las variables y constantes necesarias para el funcionamiento del procedimiento de medición de la velocidad de rotación del motor de inducción.

Algoritmo 1 Definir Variables y Constantes

- 1 encoderPin; Pin del encoder (entrada digital).
- 2 pulseCount; Contador de pulsos.
- 3 rpm; Variable para almacenar la velocidad en RPM.
- 4 pulsesPerRevolution; Número de pulsos por revolución del encoder.
- 5 lastTime; Tiempo del último cálculo (milisegundos).
- 6 debounceDelay; Tiempo de debounce para la señal del encoder (milisegundos).
- 7 lastPulseTime; Tiempo del último pulso registrado (volátil).

En el algoritmo 2, se introduce la función de interrupción onPulse, la cual se activa con cada pulso del encoder. Se obtiene el tiempo actual y, si el tiempo transcurrido desde el último pulso es mayor o igual al tiempo de debounce, se incrementa el contador de pulsos y se actualiza lastPulseTime.

Este manejo evita el rebote de la señal del encoder, asegurando la precisión de la medición.

Algoritmo 2 Función de Interrupción onPulse

Inicio:

- Step 1 Obtener el tiempo actual en milisegundos.
- Step 2 Si el tiempo desde el último pulso es mayor o igual al tiempo de debounce: Incrementar el contador de pulsos.

Actualizar lastPulseTime con el tiempo actual.

Fin

En la función Setup 3, se inicializa la comunicación serial a 115200 baudios y se configura encoderPin como entrada. Adicionalmente, se establece una interrupción en encoderPin para invocar la función onPulse en el flanco ascendente, lo que permite manejar la detección de pulsos en tiempo real. Finalmente, se inicializa lastTime con el tiempo actual en milisegundos.

Algoritmo 3 Función Setup

Inicio:

- Step 1 Inicializar la comunicación serial a 115200 baudios.
- Step 2 Configurar encoderPin como entrada.
- Step 3 Configurar una interrupción en encoderPin para llamar a onPulse en el flanco ascendente.
- Step 4 Inicializar lastTime con el tiempo actual en milisegundos.

Fin

En la función Loop, el algoritmo 4, se obtiene el tiempo actual en milisegundos y se calcula el intervalo transcurrido desde el último cálculo. Si el tiempo desde el último cálculo es mayor o igual a 1000 mS o 1 S, se determina la velocidad en RPM empleando la fórmula indicada en el algoritmo 4 y se restablece el contador de pulsos a 0, se actualiza lastTime y se imprime la velocidad en RPM. Este procedimiento asegura mediciones precisas al gestionar el tiempo de debounce para prevenir lecturas incorrectas.

Algoritmo 4 Función Loop

Inicio:

- Step 1 Obtener el tiempo actual en milisegundos.
- Step 2 Calcular el tiempo transcurrido desde el último cálculo.
- Step 3 Si el tiempo desde el último pulso es mayor o igual a 1000 mS:

Calcular la velocidad en RPM: $rpm = \frac{pulseCount \times 60,0}{pulsesPerRevolution}$.

Reiniciar el contador de pulsos a 0

Actualizar lastTime con el tiempo actual.

Imprimir la velocidad en RPM.

Fin

Algoritmo para la Obtención de Par

En el algoritmo 5, se definen las variables y constantes requeridas para el cálculo del par a partir de la señal analógica proporcionada por el sensor.

Algoritmo 5 Definir Variables y Constantes

- 1 sensorPin; Pin del sensor analógico (entrada).
- 2 sensorValue; Valor leído del sensor.
- 3 offSet; Desviación ajustada.
- 4 numSamples; Número de muestras para el cálculo del offset.
- 5 voltajeIn; Voltaje transformado leído del sensor.
- 6 resistorO; Resistencia del resistor de referencia.
- 7 resistorT; Resistencia del resistor de medición.
- 8 par; Conversión de señal eléctica a par.

En la función Setup, que se observa en el algoritmo 6, se inicia la comunicación serial a 115200 baudios y se inicia la variable sum en cero para almacenar las lecturas del sensor. Posteriormente, se leen múltiples valores del sensor (numSamples), los cuales se convierten a voltaje y se ajustan conforme a la configuración del circuito. Cada valor transformado se suma a sum, y una vez completadas las lecturas, se calcula

el promedio del offset. Finalmente, el offset se ajusta para determinar el valor final que se empleará en el Loop.

En la función Setup, se toma un número predeterminado de muestras de la señal del sensor con el motor sin carga o apagado para determinar un valor de offset. Este proceso es esencial para calibrar las mediciones del sensor, ya que el offset calculado corrige cualquier desviación inicial y mejora la precisión de las lecturas del sensor durante el funcionamiento del motor.

Algoritmo 6 Función Setup

Inicio:

Step 1 Inicializar la comunicación serial a 115200 baudios.

Step 2 Inicializar sum en 0.

Step 3 Para cada i desde 0 hasta numSamples - 1:

Leer el valor del sensor en sensor Value.

Calcular el voltaje: voltaje = $\left(\frac{\text{sensorValue}}{4095,0}\right) \times 3,3$.

Transformar el voltaje: voltaje $In = voltaje \times \left(\frac{resistorO + resistorT}{resistorT}\right)$.

Sumar voltajeIn a sum.

Esperar 10 milisegundos.

Step 4 Calcular el offset: offSet = $\frac{\text{sum}}{\text{numSamples}}$.

Step 5 Ajustar offSet a 2.5 - offSet.

Fin

En la función Loop, el algoritmo 7, se lee continuamente el valor del sensor, se convierte a voltaje y se ajusta con el offset previamente calculado. Si el voltaje está en el rango esperado (0.5V a 4.5V), rango el cual el sensor trabaja, se calcula y muestra el par en Newton-metros. Si el voltaje está fuera de rango, se muestra un mensaje de "Fuera de Rango".

Algoritmo 7 Función Loop

Inicio:

Step 1 Leer el valor del sensor en sensorValue.

Step 2 Calcular el voltaje: voltaje =
$$\left(\frac{\text{sensorValue}}{4095,0}\right) \times 3,3$$
.

Step 3 Transformar el voltaje: voltajeIn = voltaje
$$\times \left(\frac{\text{resistorO} + \text{resistorT}}{\text{resistorT}}\right)$$
.

Step 4 Si voltajeIn está entre 0.5 y 4.5:

Calcular el par:par =
$$37.5 \times (\text{voltajeIn} + \text{offSet}) - 93.75$$
.

Imprimir el par en Newton-metros.

Step 5 De lo contrario:

Imprimir "Fuera De Rango".

Fin

La fórmula empleada para convertir voltaje a par se fundamenta en la relación lineal del sensor, que presenta un pequeño margen de error, como se detalla en la tabla de calibración. Dado que el sensor ofrece una señal como se observa en la tabla 2.4, la fórmula se deriva para mapear estas lecturas de voltaje a los valores de par correspondientes. Esta ecuación lineal ajusta el voltaje medido a un rango de par, considerando los puntos de referencia conocidos del sensor para proporcionar una conversión precisa entre voltaje y par.

Par (Nm)	Voltaje (V)
-75	0.5
0	2.5
75	4.5

Tabla 2.4: Relación Lineal del Sensor de Par.

El cálculo del offset en el código constituye una etapa fundamental para garantizar la precisión y estabilidad de las mediciones obtenidas del sensor de par. El sensor Burster, al igual que otros sensores analógicos, puede experimentar variaciones en su salida debido a factores como la temperatura ambiental, el ruido eléctrico y otras interferencias externas.

Al promediar un conjunto de muestras del voltaje de salida del sensor en ausencia de par aplicado (es decir, cuando el par debería ser de 0 Nm), se obtiene un valor de referencia más fiable. Este valor promedio se compara con la referencia nominal de 2.5 V, que corresponde a 0 Nm en el sensor. Mediante el ajuste del offset, se corrige cualquier desviación provocada por estas variaciones, lo que permite que las mediciones subsecuentes reflejen con mayor exactitud el par real aplicado.

Este proceso de calibración es esencial para mantener la consistencia en las lecturas del sensor y optimizar la fiabilidad del dispositivo, especialmente en condiciones ambientales variables.

2.2.2. Programación

La programación del dispositivo se realizó en Visual Studio Code, que utiliza el lenguaje de programación tipo C++. Este software proporcionó una plataforma robusta para escribir, depurar y gestionar el código, mientras que el C++ permitió una implementación eficiente de los algoritmos y una integración efectiva con el hardware del microcontrolador. A través de este proceso, se logró convertir los conceptos teóricos en un software funcional, optimizando la adquisición y visualización de datos para el dispositivo.

Visual Studio Code es un software ampliamente utilizado y versátil que proporciona un conjunto extenso de herramientas para la escritura y gestión de código. Su interfaz intuitiva y adaptable facilita el desarrollo de software al ofrecer funciones como resaltado de sintaxis, autocompletado y depuración avanzada. Compatible con numerosos lenguajes de programación y respaldado por una amplia colección de extensiones, Visual Studio Code es particularmente adecuado para proyectos de programación complejos, incluidos los desarrollos para microcontroladores [22]. Su capacidad para integrar herramientas de control de versiones y su compatibilidad con diferentes plataformas hacen de Visual Studio Code una opción destacada para la programación del dispositivo en este proyecto.

Programar en C++ para el ESP32 brinda ventajas considerables, tales como un control preciso sobre el hardware y una eficiencia optimizada. Este lenguaje permite realizar operaciones a bajo nivel y emplear programación orientada a objetos, lo que

facilita la creación de software robusto y modular. Asimismo, C++ ofrece acceso a una extensa variedad de bibliotecas y frameworks, lo que acelera la integración de funcionalidades avanzadas y maximiza el rendimiento del microcontrolador [23].

En el apéndice D se muestran imágenes del código en Visual Studio Code desarrollado para el ESP32. Estas imágenes ilustran la implementación de los algoritmos de adquisición, procesamiento y visualización de datos, facilitando la comprensión del funcionamiento del software y su integración con el hardware del dispositivo.

2.3. Diseño Estructural

Después de tener la placa con la forma y las medidas adecuadas, se realizó el diseño del dispositivo donde estarán todas las partes del sistema de medición.

2.3.1. Modelamiento PCB

La PCB fue diseñada en forma rectangular, que resultó ser la más adecuada para la integración de todos los componentes, garantizando un espacio suficiente entre ellos. El ESP32 se ubicó en el centro de la placa, dado que es el componente principal del sistema. Además, se cortaron los bordes para mejorar la seguridad, evitando posibles cortocircuitos y protegiendo al usuario. También se añadieron cuatro agujeros pasantes para tornillos M3, facilitando el montaje de la placa. Las dimensiones de la placa son 82.8 mm de largo, 65.8 mm de ancho y 2 mm de alto. La figura 2.9, detalla el diseño de la cara superior de la placa.

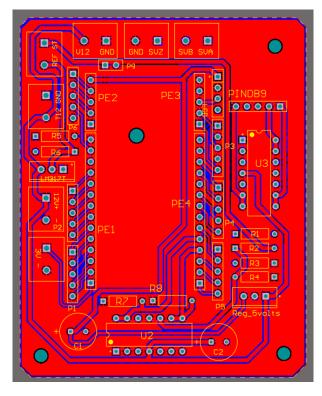


Figura 2.9: Cara Top Layer de la Placa.

2.3.2. Carcasa

Para el diseño de la carcasa, tanto la parte que contiene los componentes como la tapa, se decidió que la forma sea rectangular. De esta manera, la placa PCB estará junto a la batería, y los conectores de entrada y salida se ubicarán en los laterales del dispositivo, logrando una mejor distribución. Las dimensiones del dispositivo son 112.804 mm de ancho, 139.706 mm de largo y 80 mm de alto, con tornillos M3 para cada agujero.

Con las medidas ya especificadas, la distribución se realizó de la siguiente manera:

- **Vista frontal (Figura 2.10)**: La placa PCB y la batería, ambas de forma rectangular, se encuentran dispuestas de manera horizontal.
- Vista lateral derecha (Figura 2.11): Aquí se encuentran el pin de carga, el interruptor para el encendido y un buzzer de propósito general.
- **Vista lateral izquierda (Figura 2.11)**: Se ubican los dos conectores GX16 para los

sensores, tanto de toque como de par y también el conector DB9.

■ **Tapa (Figura 2.10)**: Se diseñó el espacio adecuado para acoplar el LCD y un LED de propósito general o de encendido.

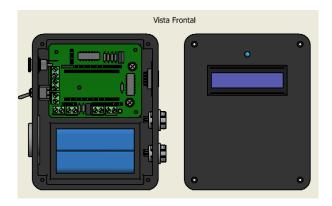


Figura 2.10: Vista Frontal del Dispositivo.



Figura 2.11: Vistas Laterales.

Los planos completos del dispositivo, con sus respectivas mediciones y vistas adicionales, se encuentran en el **Apéndice C**.

2.3.3. Bornes

Los bornes o conectores seleccionados se escogieron en base a los que ya estaban predeterminados en los sensores, siguiendo las mismas distribuciones de pines y conexiones. A continuación, se presenta la designación de cada pin.

En la figura 2.12, se puede observar la distribución de los pines en los bornes correspondientes a los sensores de par y velocidad. En la tabla 2.5, se indica el número de pin y su funcionalidad, para el sensor de par y para el encoder óptico respectivamente.

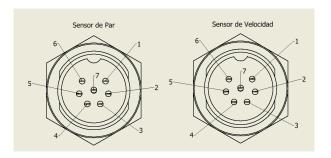


Figura 2.12: Conectores de los Sensores de Par y Velocidad.

Nº	Sensor de Par	Sensor de Velocidad				
1	Positivo	Salida A				
2	Salida	Salida B				
3	Tierra	Salida Z				
4	Azul	Positivo				
5	Ref	Tierra				
6	Libre	F.G				
7	Libre	Libre				

Tabla 2.5: Distribución de Pines de los Sensores.

2.3.4. Display Lcd I2C

El uso de una pantalla LCD 16x2 para la visualización de datos es fundamental en el diseño del dispositivo, ya que permite una interacción directa y sencilla con el usuario final. Este tipo de pantalla, que puede mostrar 16 caracteres en cada una de sus dos líneas, proporciona una solución eficiente y compacta para presentar información crucial en tiempo real. A diferencia de otros tipos de pantallas de alta resolución,

cuyo costo es elevado, este LCD tiene un valor sumamente bajo y es perfectamente adecuado para la función de mostrar caracteres numéricos. En la tabla 2.6, se muestran características generales del display Lcd I2C.

Color de Caracteres	Blanco
Fondo	Azul
Número de Caracteres	Dos Filas de 16
Tensión de Alimentación	5 VDC
Protocolo de Comunicación	I2C

Tabla 2.6: Características Display Lcd I2C [24].

Capítulo 3

Pruebas y Validación de Parámetros

3.1. Prueba de PCB

Para asegurar el funcionamiento adecuado del dispositivo, se llevaron a cabo diversas pruebas en la PCB (Placa de Circuito Impreso). Primero, se midió la continuidad de las conexiones para verificar que estuvieran bien hechas y sin interrupciones. A continuación, se midieron los voltajes de alimentación para asegurar que cada componente recibiera el voltaje adecuado. Finalmente, se observaron las señales de entrada y salida para comprobar que su comportamiento fuera el esperado. Estos pasos fueron cruciales para confirmar la integridad y el rendimiento de la PCB, asegurando que cumpliera con las especificaciones del diseño.

Prueba de Continuidad

La prueba de continuidad es una de las primeras y más fundamentales pruebas realizadas en la PCB para asegurar que todas las conexiones eléctricas estén correctamente establecidas. Utilizando un multímetro en modo de continuidad, se verificaron las pistas y conexiones entre los componentes para detectar cualquier interrupción o cortocircuito. Esta prueba es crucial porque cualquier discontinuidad en las conexiones puede impedir el funcionamiento correcto del circuito. Durante la prueba, se colocaron las sondas del multímetro en los puntos de conexión de la PCB; un pitido continuo indicaba una conexión adecuada, mientras que la ausencia de sonido señalaba una interrupción que necesitaba ser corregida. Realizar esta prueba

garantiza que la base del circuito sea sólida, permitiendo que todas las señales y alimentaciones fluyan correctamente entre los componentes.

La prueba de continuidad confirmó que todas las conexiones eléctricas de la PCB estaban correctamente establecidas, sin interrupciones ni cortocircuitos. Utilizando un multímetro, se verificó la integridad de las pistas y conexiones, asegurando un flujo ininterrumpido de señales y energía entre los componentes, lo que garantiza un funcionamiento confiable del dispositivo.

Prueba de Medición de Voltaje

La prueba de voltajes de alimentación es esencial para confirmar que todos los componentes de la PCB reciben el voltaje adecuado para su funcionamiento. Se midió la alimentación general de la placa para asegurar que la fuente de alimentación principal proporcionara el voltaje correcto. Luego, se verificó la alimentación del sensor de par, incluyendo su referencia de 2.5 V, para garantizar su precisión y funcionamiento adecuado. La alimentación del encoder, la del LCD, y la del ESP32 también se midieron, asegurando que cada uno operara dentro de sus especificaciones de voltaje. Además, se comprobó la alimentación de los circuitos operacionales utilizados, ya que cualquier discrepancia en sus voltajes podría afectar la precisión y el rendimiento del dispositivo. Estas mediciones detalladas aseguraron que todos los componentes críticos recibieran la energía necesaria, evitando problemas de funcionamiento relacionados con el suministro de energía.

Prueba	Voltaje Esperado (V)	Voltaje Medido (V)
Alimentación General	12	12.34
Alimentación Sensor de Par	12	12.34
Referencia Sensor de Par	2.5	2.49
Alimentación Encoder	12	12.34
Alimentación LCD	5	4.97
Alimentación Esp32	5	4.96
Alimentación Circuitos Operacionales	12	12.43

Tabla 3.1: Prueba de Voltajes.

3.1. PRUEBA DE PCB 40

Como conclusión de la prueba de voltajes de alimentación, en la tabla 3.1, se constató que todos los componentes de la PCB recibían el voltaje adecuado dentro de los rangos de operación permitidos. La alimentación general de la placa fue verificada y se encontró estable, proporcionando una base sólida para el resto de las mediciones. El sensor de par y su referencia de 2.5 V, el encoder, el LCD, el ESP32, y los circuitos operacionales recibieron los voltajes correctos, garantizando su funcionamiento óptimo. Estos resultados positivos aseguran que la alimentación de todos los componentes es confiable, evitando problemas operativos y asegurando la estabilidad y precisión del dispositivo en su conjunto.

Prueba de Comportamiento de Señales

Esta prueba se centra en verificar si el comportamiento de las señales de entrada, al pasar por el bloque de tratamiento, es el esperado. El objetivo de este bloque es regular las señales a valores compatibles con el ESP32. Para realizar esta evaluación, se utilizó un osciloscopio para medir las formas de onda y comprobar que las señales se ajustaran adecuadamente a los niveles admitidos por el microcontrolador. Esta prueba es importante para asegurar el comportamiento las señales y que el procesamiento de datos se realice según las especificaciones.

Señal Pura del Encoder (Figura 3.1): Para realizar la prueba de la señal del encoder, se conectó una fase del encoder a la entrada del bloque de tratamiento de señales. Mediante el uso de un osciloscopio, se visualizó primero la señal pura generada por el sensor antes de su tratamiento.

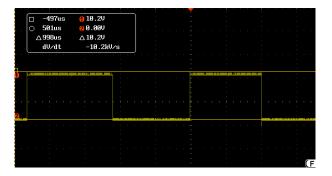


Figura 3.1: Señal de Ingreso.

■ Señal luego del Regulamiento del Encoder (Figura 3.2): Luego, se conectó el

3.1. PRUEBA DE PCB 41

osciloscopio a la salida del bloque de tratamiento de señales y se observó el comportamiento de la señal después de pasar por el procesamiento.

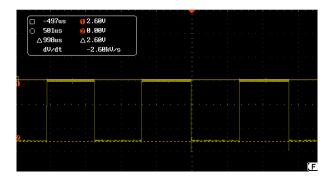


Figura 3.2: Señal Regulada.

Señal Pura del Sensor de Par (Figura 3.3): Para evaluar la señal pura proveniente del sensor de par, se conectó una fuente de voltaje de corriente continua, ajustada a 4.5 voltios, a la entrada del bloque de regulación. Luego, se observó la señal resultante en el osciloscopio.

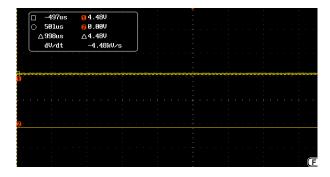


Figura 3.3: Señal de Ingreso.

Señal luego del Regulamiento del Sensor de Par (Figura 3.4): Luego, se conectó el osciloscopio a la salida del bloque de tratamiento de señales y se verificó que el comportamiento de la señal era el adecuado. Esto permitió confirmar que la fase de tratamiento estaba funcionando correctamente y que la señal de salida cumplía con los parámetros esperados.

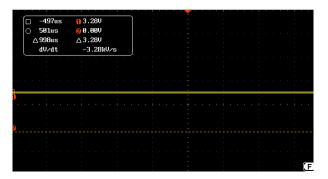


Figura 3.4: Señal Regulada.

La prueba del comportamiento de las señales, se verificó que las señales de entrada, después de pasar por el bloque de tratamiento, cumplían con los valores esperados. Las mediciones realizadas con el osciloscopio confirmaron que las señales se regularon adecuadamente a los niveles admitidos por el ESP32. Estos resultados aseguran que el bloque de tratamiento está funcionando correctamente y que el dispositivo maneja las señales de manera precisa y eficiente.

3.2. Cálculos de Par en Máquinas de Inducción

En este apartado se presentan todas las fórmulas necesarias para calcular el par de manera correcta. A continuación, se detallan las fórmulas utilizadas:

Fórmula de Potencia Mecánica (Pmech):

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{in}} - P_o - P_{ce} \quad watts(W) \tag{3.1}$$

Donde:

- *P*_{in}: Potencia de entrada eléctrica.
- P_o : Pérdidas en el núcleo.
- P_{ce} : Pérdidas en el cobre.

Fórmula de Velocidad Angular (ω):

$$\omega = 2\pi \times \frac{\text{RPM}}{60} \quad (rad/s) \tag{3.2}$$

Donde:

■ RPM: velocidad del motor en revoluciones por minuto.

Fórmula de Par (*M*):

$$M = \frac{Pmec}{\omega} \quad (Nm)$$

Donde:

- P_{mech} : Potencia mecánica.
- ω : Velocidad angular.

3.3. Ensayos de Laboratorio

Para realizar las pruebas necesarias para calcular el par, es fundamental comprender los conceptos de la prueba de vacío y la prueba de rotor bloqueado. A continuación, se presentan breves explicaciones de cada prueba, junto con instrucciones sobre la correcta conexión del analizador de parámetros eléctricos monofasicos 380801-NIST para visualizar los parámetros de potencia, corriente y voltaje.

3.3.1. Prueba de Vacío

En la prueba de vacío, se energiza el motor de inducción, con su voltaje nominal sin aplicar ninguna carga, permitiendo que el motor gire libremente. Bajo estas condiciones, el rotor alcanza una velocidad cercana a la velocidad de sincronismo, lo que resulta en un deslizamiento mínimo entre la velocidad de sincronismo y la velocidad mecánica del rotor [25].

3.3.2. Prueba de Rotor Bloqueado

Se lleva a cabo impidiendo el giro del rotor del motor. Con el rotor bloqueado, se procede a alimentar con un voltaje variable trifásico hasta que circule la corriente nominal de placa. Utilizando las fórmulas asociadas al método Aron, se determina el factor de potencia y otros parámetros para determinar el Par del motor [25].

3.3.3. Analizador de Parámetros Eléctricos Monofásicos

Para asegurar una correcta utilización de los analizadores de parámetros eléctricos monofásicos de la universidad, se proporciona los siguientes diagramas de conexión.

El diagrama que se presenta en la figura 3.5, representa la conexión empleada para realizar las pruebas de vacío y rotor bloqueado en un motor de inducción. Es importante señalar que la configuración del circuito permanece igual en ambas pruebas, diferenciándose solo en la condición de carga aplicada al motor, designada como T_L .

En la prueba de vacío, el par T_L es igual a 0, lo que significa que no se ejerce ninguna carga sobre el eje del motor, permitiendo que el rotor gire sin oposición. Esta situación corresponde a una operación sin carga.

En contraste, durante la prueba de rotor bloqueado, el par T_L se asume como infinito debido a que el rotor se inmoviliza físicamente para impedir su movimiento. Esta condición crea un escenario en el cual el motor intenta arrancar, con el rotor inmovilizado, lo que resulta fundamental para evaluar parámetros como la corriente de arranque y la resistencia del estator en situaciones extremas.

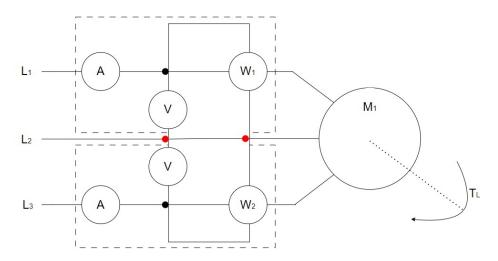


Figura 3.5: Diagrama de Conexión para la Prueba de Vacío y Rotor Bloqueado.

En la figura 3.6, se presenta la conexión empleada para llevar a cabo las pruebas de carga en un motor de inducción. Como se puede observar en la figura 3.6, al diagrama original se incorpora un motor adicional, alimentado por una fuente de corriente continua (DC) variable. Este motor funciona como un electrofreno, cuya capacidad de frenado varía según el voltaje aplicado.

El electrofreno crea una oposición al movimiento del motor, lo que permite que el par, representado como T_L , se pueda ajustar según la fuerza que contrarresta el giro del motor principal. Esto facilita la realización de diferentes pruebas de carga en el motor bajo distintas condiciones de resistencia.

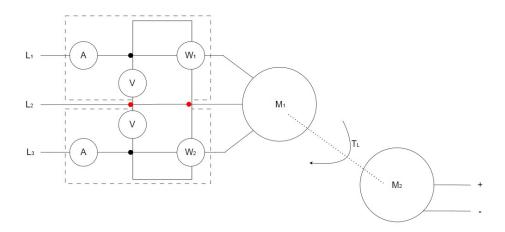


Figura 3.6: Diagrama de conexión para la Prueba de Carga.

Primero se realizó la prueba de vacío, conectando el motor a un voltaje trifásico fijo de valor nomial sin aplicar carga mecánica en su eje, permitiendo que alcanzara su velocidad nominal en condiciones de vacío. Posteriormente, se realizó la prueba de rotor bloqueado, asegurando que el eje estuviera inmovilizado mecánicamente mediante una pinza. La tabla 3.2, registra los valores obtenidos durante las pruebas.

Pruebas	W1	W2	PT	QT	V (Rpm)	if1	if3	V1-2	V2-3
En vacío	750	-612	138	2359.05	1799	6.28	6.24	210	210
Rotor Bloqueado	466	-78.1	387.9	942.40	0	13.41	13.63	43.8	44.4

Tabla 3.2: Parámetros Registrados de las Pruebas Realizadas.

Siguiendo esta línea, se realizó una serie de pruebas con un motor bajo

carga para calcular las variaciones de par en función de las diferentes corrientes suministradas.

Con todos los parámetros obtenidos, se realizaron los cálculos necesarios utilizando las fórmulas de la sección 3.2 para obtener los valores de par, como se muestra en la tabla 3.3.

Rpm	W1	W2	V12	V23	I1	I2	Pe	Po	Pce	Pmec	Par
1799	750	-612	210	210	6.28	6.24	138	138	0	0	0
1796	1363	-22.6	210	207	7.58	7.00	1340.4	138	191.63	1010.77	5.38
1794	1490	108	209	206	7.99	7.39	1598	138	213.21	1246.79	6.64
1789	1877	437	208	204	9.52	8.70	2314	138	299.36	1876.64	10.00

Tabla 3.3: Pruebas de Carga.

Se realizaron cuatro toma de muestras por parte del dispositivo. La figura 3.7 indica un ejemplo de medición realizado por el dispositivo.



Figura 3.7: Medición a Carga Media.

3.4. Comparación

Para validar la funcionalidad del sistema, se realizó una comprobación de la velocidad utilizando un tacómetro proporcionado por los laboratoristas de la universidad. En total, se realizaron 4 pruebas, obteniendo los valores presentados en la tabla 3.4.

Prueba	Velocidad(Tacómentro)	Velocidad(Dispositivo)
1	1799	1796.04
2	1796	1798.44
3	1794	1795.90
4	1789	1788.77

Tabla 3.4: Tabla Comparativa Velocidad Medida / Velocidad del Dispositivo.

Para validar la precisión del dispositivo en la medición del par en el motor, se realizaron pruebas con carga que permitieron determinar el par real. Estos valores calculados se compararon con los valores medidos por el dispositivo en cada prueba. En la tabla 3.5, se observa una comparación entre los valores de par calculados y los valores medidos por el dispositivo para la visualización de par.

Prueba	Par Calculado (Nm)	Par Medido (Nm)
1	0	0.00
2	5.38	5.49
3	6.64	6.67
4	10.00	10.18

Tabla 3.5: Tabla Comparativa Par Calculado / Par Medido

Una vez analizados y comparados el par y la velocidad reales con los valores medidos por el dispositivo, se determinó que el dispositivo presenta una precisión del 75 %. Por lo tanto, se procederá a realizar los ajustes y calibraciones respectivas.

3.5. Ajustes y Calibración

El ajuste y calibración del dispositivo son esenciales para garantizar la precisión en las mediciones de par y velocidad. Para la velocidad, el ajuste se basa en la

3.6. PRUEBAS FINALES

48

lectura precisa del encoder al eliminar posibles ruidos o señales falsas. En cuanto al

configuración del tiempo de antirrebote en las interrupciones, lo que asegura una

par, la calibración se realiza tomando un número de muestras con el motor apagado,

lo que permite generar el offset necesario para establecer el punto de referencia en 0

Nm. Además, durante la visualización del par, se aplica un promedio a un conjunto

determinado de muestras para suavizar las lecturas y mejorar la estabilidad de los

datos mostrados. Este enfoque asegura que el dispositivo proporcione mediciones

confiables y precisas en sus aplicaciones. Para la primera prueba estos parámetros

fueron los siguientes:

Tiempo de Antirebote: 5 MicroSegundos

Número de Muestras OffSet: 100 Muestras

Número de Muestras Promedio: 5 Muestras

Una vez realizadas las primeras pruebas, se llevó a cabo un ajuste y

recalibración de estos valores para acercarse más a los parámetros deseados, dando

como resultado los siguientes parámetros:

Tiempo de Antirebote: 2 MicroSegundos

Número de Muestras OffSet: 10000 Muestras

Número de Muestras Promedio: 7 Muestras

Pruebas Finales 3.6.

Con las correcciones y calibraciones aplicadas al código del dispositivo, se

realizaron nuevamente las pruebas, obteniendo los valores mostrados en la tabla 3.6.

Rpm	W1	W2	V12	V23	I1	I2	Pe	Ро	Pce	Pmec	Par
1799	750	-612	210	210	6.28	6.24	138	138	0	0	0
1796	1375	-59.6	210	208	7.59	7.07	1315.4	138	103.737	1073.663	5.71
1794	1502	75.8	208	207	7.99	7.58	1577.8	138	114.624	1325.176	7.06
1789	1887	405	209	206	9.52	8.71	2292	138	163.283	1990.7173	10.63

Tabla 3.6: Pruebas de Carga.

Se realizaron nuevamente la toma de muestras por parte del dispositivo siendo la de media carga la que se presenta en la figura 3.8.



Figura 3.8: Prueba a Media Carga.

Entonces, al comparar los valores reales con los proporcionados por el dispositivo, se obtienen los resultados presentados en la tabla 3.7.

	Velo	cidad	Par	
Prueba	Tacómentro (RPM)	Dispositivo (RPM)	Calculado (Nm)	Medido (Nm)
1	1799	1798.76	0	0.02
2	1796	1797.40	5.71	5.70
3	1794	1793.55	7.06	7.06
4	1789	1787.82	10.63	10.61

Tabla 3.7: Tabla Comparativa de Velocidad y Par Medidos vs Calculados.

Una vez realizadas las pruebas finales, se determinó que el dispositivo tiene una precisión del 98 %, lo que lo hace una herramienta fiable y efectiva para medir el

par y la velocidad de un motor trifásico. Con los datos obtenidos, se elaboró la gráfica presentada en la figura 3.9. La cual muestra el par en relación con la velocidad de rotación. La velocidad de rotación está expresada en revoluciones por minuto (rpm) y el par en Newton-metro (Nm).

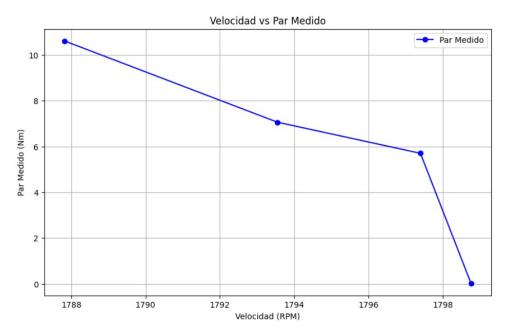


Figura 3.9: Gráfico Comparativo Par/Velocidad.

Capítulo 4

Conclusiones y Trabajos Futuros

La creación de un dispositivo para medir el par y la velocidad de los motores presentó un desafío significativo que requirió un compromiso intenso y un arduo trabajo. El dispositivo cuenta con un diseño sobrio y elegante, lo que lo hace visualmente atractivo y funcionalmente accesible. Su diseño compacto y robusto facilita su transporte seguro entre diferentes ubicaciones.

Además, el proyecto proporcionó un conocimiento más profundo en áreas clave como la conversión y el tratamiento de señales, y el diseño electrónico y la gestión de sistemas eléctricos en motores de inducción. Se incorporaron técnicas avanzadas para evitar caídas de voltaje que podrían afectar la precisión de las mediciones, especialmente en la velocidad, donde se emplearon tacómetros para validar los resultados. Estos avances aseguran que el dispositivo no solo sea eficiente en su funcionamiento, sino también confiable en la precisión de sus mediciones.

El dispositivo ofrece una ventaja significativa al ser simple y fácil de usar, como se mencionó anteriormente. Fue construido con componentes accesibles y sencillos, lo que permite ser replicado a un costo considerablemente más bajo en comparación con otros dispositivos similares que miden los parámetros de par y velocidad. Esta característica lo convierte en una opción económica y eficiente, sin comprometer la calidad de las mediciones, lo que lo diferencia de otros equipos cuyo costo puede ser bastante elevado.

Como proyectos futuros, el dispositivo ofrece una amplia gama de posibilidades. Al utilizar un ESP32 como controlador principal, se pueden desarrollar

sistemas avanzados que permitan la monitorización remota a través de la creación de una nube de base de datos de parámetros máquinas de inducción o el desarrollo de una aplicación móvil que notifique al usuario sobre cualquier novedad en el motor. Además, es posible añadir más sensores del mismo tipo o de bajo voltaje para proporcionar un monitoreo continuo y detallado del motor en tiempo real.

Glosario

I2C Circuito Inter-Integrado – Inter-Integrated Circuit.

LCD Pantalla de Cristal Líquido – Liquid Crystal Display.

OLED Diodo Orgánico de Emisión de Luz – Organic Light-Emitting Diode.

RPM Revoluciones Por Minuto – Revvolutions Per Minute.

TFT Transistor de Película Fina – Thin-Film Transistor.

Referencias

- [1] X. Chen y Z. Feng, «Tacholess Speed Estimation for Rotating Machinery Fault Diagnosis of Induction Motor Drivetrain,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, n.º 4, págs. 4704-4713, 2024. DOI: 10.1109/TPEL.2023.3349138.
- [2] M. Jose y U. Jaime, «Diseño y construcción de una plataforma didáctica con motores de inducción para pruebas de control,» Universidad Politécnica Salesiana, 2018. dirección: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15555.
- [3] FUTEK, Sensor de Par, Accessed on 04, 2024, 2014. dirección: https://www.futek.com/sensor-de-par.
- [4] J. X. Zhang y K. Hoshino, Molecular sensors and nanodevices: principles, designs and applications in biomedical engineering. Academic Press, 2018.
- [5] Lorenz, DR-20, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.lorenz-messtechnik.de/english/products/rotating_slipring/dr-20.php.
- [6] Burster, 8661, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.burster.com/en/torque-sensors/p/detail/8661.
- [7] HBK, Transductor de par T21WN, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.hbm.com/es/7343/transductor-de-par-t21wn-con-extremos-de-eje-cilindricos/?product_type_no=Transductor%20de%20par%20T21WN%20con%20extremos%20de%20eje%20cil%C3%ADndricos.
- [8] Kistler, 4509A, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.kistler.com/INT/es/cp/sensor-de-par-de-reaccion-4509a/P0001334.
- [9] B. Sensors y P. Instruments, TYP 8645/8646, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.burster.com/en/?tx_kesearch_pi1%5Bsword%5D=8645&id=64.

REFERENCIAS 55

[10] PEPPERL+FUCHS, Encoders incrementales, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_197.htm?view= productgroupoverview.

- [11] PEPPERL+FUCHS, Encoders absolutos, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.pepperl-fuchs.com/spain/es/classid_196.htm.
- [12] PEPPERL+FUCHS, Encoder incremental ENI58IL, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_197.htm?view=productdetails&prodid=130651.
- [13] PEPPERL+FUCHS, Encoder incremental 10-***1, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_197.htm?view=productdetails&prodid=2977.
- [14] E. REV, Rev520, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://sensores-de-medida.es/catalogo/encoder-incremental-de-alta-resolucion-elap-rev/.
- [15] S. Ag, Encoder incremental, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.sick.com/cl/es/catalog/productos/sensores-motion-control/encoders-incrementales/dfs60/dfs60b-s4pa10000/p/p293310.
- [16] A. Corporation, *E50S8-3600-3-T-24*, Accessed on 04, 2024, 2024. dirección: https://www.autonics.com/model/A2500000319.
- [17] D. Varela, A. Espinoza y A. Cabrera, *Tarjetas de desarrollo*, Accessed on 04, 2024, 2018. dirección: https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/sistdig/tarjetas-de-desarrollo/.
- [18] E. Systems, Esp32, Accessed on 04, 2024, 2023. dirección: https://docs.espressif. com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html#.
- [19] M. Babiuch, P. Foltýnek y P. Smutný, «Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing,» en 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2019, págs. 1-6. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765944.
- [20] M. Bellido y G. Cano, Normas Básicas y Recomendaciones en el Diseño de PCBs, Accessed on 04, 2024, Octubre de 2023. dirección: https://www.dte.us.es/docencia/etsii/gii-ic/laboratorio-de-desarrollo-hardware/temas/Tema5NormasPCB/at_download/file.

REFERENCIAS 56

[21] F. de Brabander, *LiquidCrystal*_I2C, Accessed on 04, 2024. dirección: https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C.

- [22] Microsoft, *Visual Studio Code*, Accessed on 04, 2024. dirección: https://code.visualstudio.com/.
- [23] I. Plauska, A. Liutkevičius y A. Janavičiūtė, «Performance evaluation of c/c++, micropython, rust and tinygo programming languages on esp32 microcontroller,» *Electronics*, vol. 12, n.º 1, pág. 143, 2022.
- [24] W. ELECTRONICS, Lcd, Accessed on 04, 2024. dirección: https://www.waveshare.com/w/upload/4/4d/LCD1602_I2C_Module.pdf.
- [25] D. Rojas González y J. Rincón Contreras, «Implementación de un Laboratorio Remoto para la Realización de Pruebas de Vacío y Rotor Bloqueado en Motores Eléctricos,» 2023, págs. 14-15. dirección: https://repository.usta.edu.co/handle/11634/48632.

Apéndice

Apéndice A: Presupuesto

En la tabla 4.1 se presenta el presupuesto utilizado para el desarrollo del dispositivo destinado a la visualización de par y velocidad en motores de inducción.

		Cantidad	Descripción del elemento	Costo Unitario	Costo Total
Cubren los estudiantes		1	Placa de Desarrollo.	\$ 20.00	\$ 20.00
	1	Lcd 20x4 Modulo Serial I2c.	\$ 15.00	\$ 15.00	
	1	Rollo de filamento para impresora 3D.	\$ 25.00	\$ 25.00	
	2	Placa de circuito impreso.	\$ 15.00	\$ 30.00	
	1	Carcasa en impresión 3D.	\$ 35.00	\$ 35.00	
	1	Batería portátil de 9 voltios.	\$ 10.00	\$ 10.00	
	esti	480 h	Mano de Obra interna y externa.	\$ 5.00	\$ 2,400.00
	Varios	Cables, borneras y conectores.	\$ 25.00	\$ 25.00	
	Varios	Resistencias, condensadores, etc.	\$ 15.00	\$ 15.00	
		SI	\$ 2,575.00		
Cubre la institución	u	1	Encoder E50S80-3600-3-T-24	\$ 690.00	\$ 690.00
	1	Sensor par Burster 8645-5075	\$ 2,691.54	\$ 2,691.54	
	30 h	Laboratorio Máquinas Eléctricas	\$ 40.00	\$ 1,200.00	
	ii		\$ 4,581.54		
TOTAL DEL PROYECTO					\$ 7,156.54

Tabla 4.1: Presupuesto del Proyecto

Apéndice B: Planos del Circuito y Placa PCB

En el siguiente apéndice, se presentan los esquemas y el diseño de la placa PCB, realizado en el software Altium.

- Plano del Circuito del Dispositivo (Figura 4.1).
- Cara Top Layer de la Placa (Figura 4.2).
- Cara Bottom Layer de la Placa (Figura 4.3).

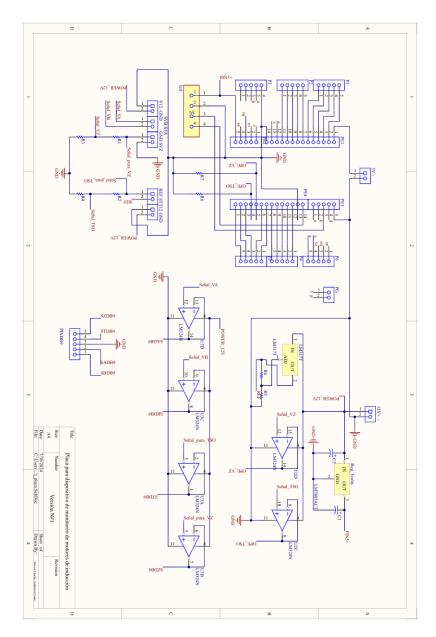


Figura 4.1: Plano del Circuito del Dispositivo.

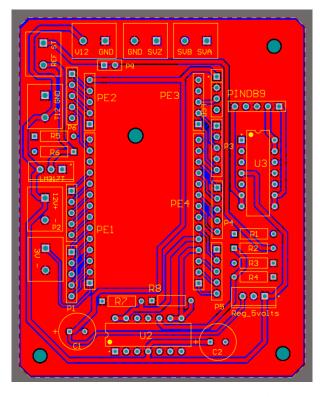


Figura 4.2: Cara Top Layer de la Placa.

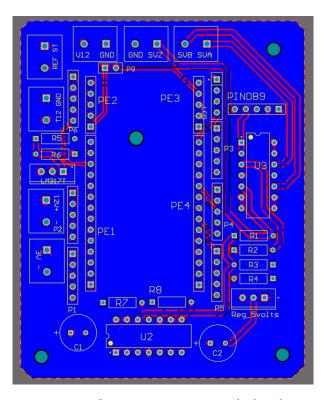


Figura 4.3: Cara Bottom Layer de la Placa.

Apéndice C: Planos del Dispositivo

A continuación, se presentan los planos del dispositivos, diseñado en el software Inventor.

- Vista del Dispositivo en 3D (Figura 4.4).
- Planos con Medidas Externas (Figura 4.5).
- Planos con Medidas Internas (Figura 4.6).

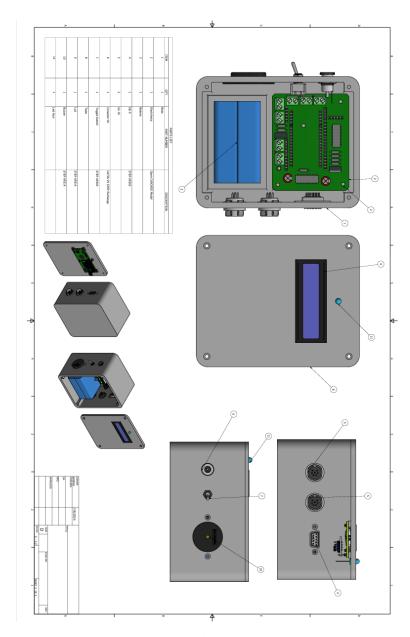


Figura 4.4: Vistas del Dispositivo en 3D.

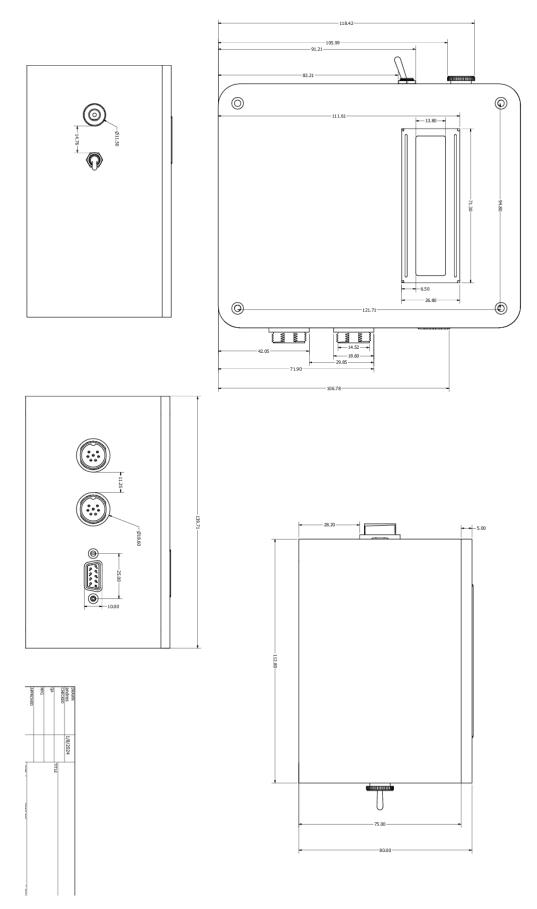


Figura 4.5: Planos con Medidas Externas.

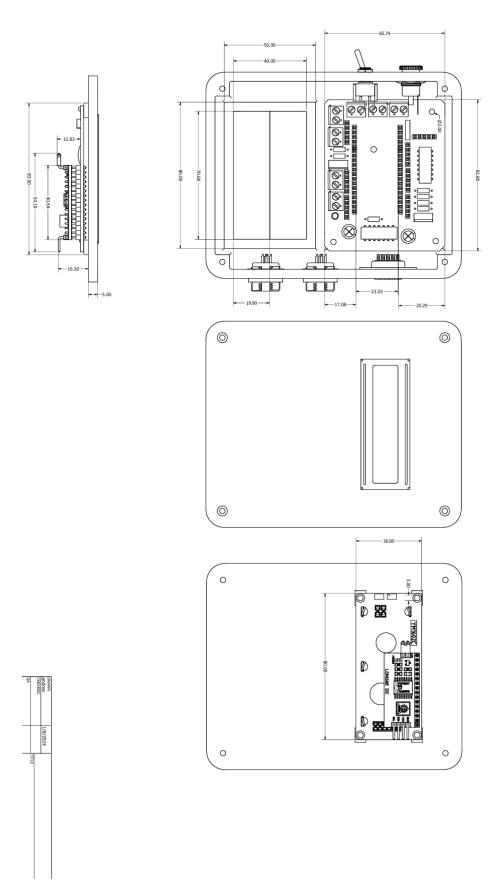


Figura 4.6: Planos con Medidas Internas.

Apéndice D: Código de Programación

A continuación, se presenta el código desarrollado en Visual Studio Code, estructurado en cuatro partes principales para facilitar su comprensión.

- Inicialización de Variables (Figura 4.7).
- Interrupciones (Figura 4.8).
- Setup (Figura 4.9).
- Loop (Figura 4.10).

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
const int sensorPin = 33;
int sensorValue = 0;

float par;
float par_prom;
float par_sum;
float offSet = 0;
const int numSamples = 10000;
const int numSamples_D = 7;
double voltajeIn = 0;
double resistorO = 384;
double resistorT = 993;

const int encoderPin = 32;
const int encoderPinD = 25;

volatile unsigned long pulseCount = 0;
volatile float rpm = 0;
const int pulsesPerRevolution = 2685;
unsigned long lastTime = 0;
const unsigned long debounceDelay = 2;
volatile unsigned long lastPulseTime = 0;
hw_timer_t *timer = NULL;
```

Figura 4.7: Código de Programación Inicialización.

```
void IRAM_ATTR onPulse() {
   unsigned long currentTime = micros();
   if (currentTime - lastPulseTime >= debounceDelay) {
      if (digitalRead(encoderPin) == HIGH && digitalRead(encoderPinD) == LOW) {
        pulseCount++;
      }
      lastPulseTime = currentTime;
   }
}
void IRAM_ATTR onTimer() {
   rpm = (pulseCount * 60.0) / pulsesPerRevolution;
   pulseCount = 0;
}
```

Figura 4.8: Código de Programación Interrupciones.

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
   // Lcd
  lcd.init();
lcd.backlight();
   lcd.clear();
   lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Par:");
  lcd.setCursor(13, 0);
lcd.print("Nm");
   lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Vel:");
  lcd.setCursor(13, 1);
lcd.print("Rpm");
   lastTime = micros();
   // Par
  float sum = 0;
   for (int i = 0; i < numSamples; i++) {
      sensorValue = analogRead(sensorPin);
     sensorvatue = anarogneau(sensorrin);
float voltaje = (sensorValue / 4095.0) * 3.3;
float voltajeIn = voltaje * ((resistorO + resistorT) / resistorT);
sum = sum + voltajeIn;
delay(10);
  offSet = (sum / numSamples);
offSet = 2.5 - offSet;
   // Velocidad
  pinMode(encoderPin, INPUT_PULLDOWN);
pinMode(encoderPinD, INPUT_PULLDOWN);
   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoderPin), onPulse, RISING);
   timer = timerBegin(0, 80, true);
timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true);
   timerAlarmWrite(timer, 1000000, true);
timerAlarmEnable(timer);
```

Figura 4.9: Código de Programación Setup.

```
void loop() {
   // Par
  float par_sum = 0;
int validSamples = 0;
   for (int i = 0; i < numSamples_D; i++) {
      sensorValue = analogRead(sensorPin);
float voltaje = (sensorValue / 4095.0) * 3.3;
float voltajeIn = voltaje * ((resistorO + resistorT) / resistorT);
      if (voltajeIn >= 0.5 \&\& voltajeIn <= 4.5) {
        float par = 37.5 * (voltajeIn + offSet) - 93.75;
validSamples++;
par_sum += par;
   par_prom = par_sum / validSamples;
   unsigned long currentTime = micros();
unsigned long elapsedTime = currentTime - lastTime;
   if (elapsedTime >= 1000000) {
      lastTime = currentTime;
     lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print(" ");
     lcd.setCursor(5, 0);
lcd.print(" ");
      lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print(rpm);
      lcd.setCursor(5, 0);
lcd.print(par_prom);
}
```

Figura 4.10: Código de Programación Loop.