



Sistema de monitorización continua IoT para la prevención contra sobrecargas mecánicas en motores de inducción de hasta 50 Nm y 3200 rpm.

**Emanuel Alexander Moreno A.
Daniel Andrés Marín A.**

Códigos:

10451912185
10441911085

Universidad Antonio Nariño

Programas de Ingeniería Mecánica y Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

**Sistema de monitorización continua IoT para la prevención contra sobrecargas mecánicas
en motores de inducción de hasta 50 Nm y 3200 rpm.**

**Emanuel Alexander Moreno A.
Daniel Andrés Marín A.**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Ingeniero Electrónico

Director (a):

PhD. Christian Erazo Ordoñez

Línea de Investigación:

Sistemas Dinámicos e Instrumentación

Universidad Antonio Nariño

Programas de Ingeniería Mecánica y Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

Sistema de monitorización continua IoT para la prevención contra sobrecargas mecánicas en motores de inducción de hasta 50 Nm y 3200 rpm,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de ingeniería mecánica y electrónica.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Agradecimientos

A mis queridos padres, quienes han sido la fuente inagotable de apoyo, amor y sacrificio a lo largo de este arduo proceso académico. Gracias por ser mi inspiración y por creer en cada paso que he dado hacia la culminación de este proyecto. Su respaldo incondicional ha sido la fuerza que me ha impulsado a superar desafíos y a alcanzar mis metas.

A mis valiosos compañeros de clase, quienes compartieron risas, desafíos y experiencias inolvidables durante este viaje. La colaboración y el intercambio de ideas enriquecieron mi aprendizaje e hicieron que cada obstáculo fuera más llevadero. Aprecio profundamente la amistad y camaradería que hemos construido.

A mis respetados docentes, cuya dedicación y conocimiento han sido la luz guía en mi camino académico. Gracias por su paciencia, orientación y por desafiarme a alcanzar estándares más altos. Cada lección impartida ha dejado una marca imborrable en mi formación.

Contenido

Resumen -----	9
Abstract -----	10
1. Introducción -----	11
1.1. Planteamiento del problema-----	12
1.2. Antecedentes-----	14
1.3. Objetivos-----	16
1.3.1. Objetivo general.-----	16
1.3.2. Objetivos específicos.-----	16
1.4. Justificación-----	17
1.5. Alcance-----	19
2. Fundamentos teóricos -----	20
2.1. Motores eléctricos de inducción.-----	20
2.1.1. Funcionamiento y partes de un motor eléctrico-----	20
2.1.2. Gráficas y curvas características de motores de inducción.-----	21
2.1.3. Causas de fallos en motores de inducción.-----	22
2.2. Sensor de torque-----	24
2.2.1. Tipos de sensores de torque-----	25
2.2.1.1. Rotativos o dinámicos-----	25
2.2.2. Principios de funcionamiento de un transductor-----	26
2.2.2.1. Piezo eléctrico-----	26
2.2.2.2. Galga extensiométrica-----	26
2.3. Tacómetro (Sensor de velocidad)-----	30
2.3.1. Principios de operación de un tacómetro.-----	30
2.3.1.1. Tacómetro de no-contacto-----	31
2.4. Normatividad y metrología-----	32
2.4.1. Clases de sensores de torque según su exactitud-----	33
2.5. Sistemas IIoT-----	34
2.5.1. Protocolo de comunicación HTTP.-----	34
2.5.2. Google App Script-----	35
3. Desarrollo metodológico -----	36
3.1. Diseño mecánico-----	37
3.1.1. Identificación de los requisitos-----	37
3.1.2. Selección de materiales: aspectos físicos y disponibilidad en el mercado-----	38
3.1.3. Diseño del eje-----	40
3.1.3.1. Partes del sensor-----	41
3.1.3.2. Esfuerzos y zona de deformación-----	41
3.1.3.3. Rodamientos y acoples-----	46

3.1.3.4. Anillos de comunicación y codificador-----	49
3.1.4. Diseño final-----	52
3.2. Diseño electrónico-----	52
3.2.1. Regulación de voltaje-----	53
3.2.2. Adquisición de señal de torque-----	54
3.2.3. Acondicionamiento-----	57
3.2.4. Ajuste de voltaje para ESP32-----	60
3.2.5. Adquisición de señal de velocidad-----	62
3.3. Construcción del sensor e implementación de sistema IoT-----	63
3.3.1. Construcción del sensor:-----	64
3.3.1.1. Construcción del eje-----	64
3.3.1.2. Construcción de los anillos y codificador-----	65
3.3.1.3. Ensamble-----	66
3.3.2. Implementación de microcontrolador-----	68
3.3.3. Sistema de almacenamiento de datos-----	69
3.3.3.1. Formato de informe de datos almacenados-----	70
3.4. Calibración y puesta a punto del sensor-----	71
3.4.1. Sistema palanca-----	72
3.4.1.1. Diseño de sistema de palanca-----	72
3.4.1.2. Pruebas de carga-----	75
3.4.2. Comparación directa de velocidad angular-----	76
3.5. Pruebas de funcionamiento-----	77
3.5.1. Montaje del sistema-----	77
3.5.2. Pruebas de ruido y perturbaciones-----	78
3.5.3. Pruebas de medición-----	79
3.5.4. Pruebas del sistema IoT-----	79
4. Resultados y análisis de resultados-----	80
4.1. Evaluación de los sistemas de medición-----	80
4.1.1. Calibración de los sensores-----	80
4.1.1.1. Resultados de la calibración del torquimetro-----	80
4.1.1.2. Resultados de la calibración del tacómetro-----	82
4.2. Evaluación del funcionamiento de la etapa de acondicionamiento-----	83
4.3. Evaluación de la efectividad del sistema-----	85
4.4. Evaluación de sistema de comunicación IoT-----	86
4.5. Verificación del sistema de almacenamiento de datos-----	87
5. Conclusiones-----	88
Referencias Bibliográficas-----	90

Lista de Figuras

Figura 1. Evolución Industria 4.0-----	11
Figura 2. Principales causas de fallas en motores eléctricos [7].-----	13
Figura 3. Mercado mundial de motores industriales: tasa de crecimiento por región.-----	14
Figura 4. Partes de un motor eléctrico [50].-----	21
Figura 5. Porcentaje de fallas en motores de inducción [10].-----	23
Figura 6. Símbolo de galga extensiométrica-----	26
Figura 7. Esquema de puente de wheatstone con galga extensiométrica-----	28
Figura 8. Esquema de puente completo de wheatstone con galgas extensiométricas-----	29
Figura 9. Ubicación de galgas extensiométricas en diferentes geometrías-----	30
Figura 10. Tacómetros de contacto y no contacto [26].-----	31
Figura 11. Principio de funcionamiento de los codificadores ópticos [27].-----	32
Figura 12. Partes y geometría del sensor.-----	41
Figura 13. Simulación y estudio de diseño utilizados. Captura tomada del programa SolidWorks.-----	42
Figura 14. Representación gráfica del eje en simulación (a)Esfuerzos de Von Mises, (b)Factor de seguridad y (c)Deformación unitaria.-----	45
Figura 15. Imagen de referencia de chumacera. (a) y acople (b) seleccionados [36].-----	47
Figura 16. Distribución de fuerzas en la cuña, y tamaño de cuña en función del diámetro del eje [37].-----	48
Figura 17. Ilustración de seguidor [38].-----	50
Figura 18. Piezas para los anillos de comunicación y codificador. (a) Vista de perfil. (b)Vista transversal.-----	50
Figura 19. Diseño de piezas de soporte para el seguidor y el lector óptico.-----	51
Figura 20. Diseño mecánico del transductor de torque.-----	52
Figura 21. Regulador de tensión LM2569 y diagrama de conexión.-----	53
Figura 22. Circuito de adquisición de señal con control de offset.-----	55
Figura 23. Hoja de datos AD620 [41].-----	55
Figura 24. Zona de trabajo real del amplificador AD620 con fuente simple.-----	56
Figura 25. Configuración de filtro pasa bajos, segundo orden.-----	58
Figura 26. Esquema de filtro pasa bajos de orden 6.-----	58
Figura 27. Diagrama final de filtro pasa bajos-----	59
Figura 28. Comportamiento del filtro en diagrama de Bode (Eje Y amplitud en dB, eje X frecuencia en Hz) 60	
Figura 29. Amplificador operacional en configuración restador-----	61
Figura 30. Circuito de ajuste para la señal de salida-----	61
Figura 31. (a) Comportamiento de amplificador con histéresis [42]., (b) Topología de un Schmitt trigger inversor no simétrico.-----	62
Figura 32. circuito de medición de velocidad-----	63
Figura 33. Piezas y material a maquinar. (a)Acople, (b)Chumacera y (c)Barra de SAE 4140.-----	64
Figura 34. Piezas maquinadas. (a)Acople maquinado y (b)Eje maquinado-----	65
Figura 35. Piezas impresas en resina 3D.-----	66
Figura 36. Fabricación de anillos de cobre. (a)Material base y (b)Anillos cortados.-----	66
Figura 37. Galgas extensiométricas instaladas en el eje.-----	67
Figura 38. Ensamble final.-----	68

Figura 39. Diagrama de bloques del sistema general.	68
Figura 40. Distribución de programas en los diferentes núcleos.	69
Figura 41. Formato del informe.	71
Figura 42. Diagrama de cuerpo libre de la palanca de medición.	73
Figura 43. Vista frontal de la palanca de medición.	74
Figura 44. Palanca ya fabricada y ensamblada. (a) vista frontal y (b) vista superior	74
Figura 45. Procedimiento de medición del transductor de torque.	75
Figura 46. Gráfica de salida analógica en V del sensor vs torque aplicado en Nm.	76
Figura 47. Gráfica sensor de velocidad vs patrón referencia.	77
Figura 48. Montaje para pruebas de funcionamiento. (a)Diagramas y (b)Fotográfica del montaje.	78
Figura 49. Motor con variador para prueba de ruido eléctrico.	79
Figura 50. Errores del sensor de velocidad con su incertidumbre.	83
Figura 51. Comparación de señal de salida adquirida mediante osciloscopio con modo FFT para análisis espectral.	84
Figura 52. Transmisión de datos a Google Sheets	86
Figura 53. Ubicación de almacenamiento de datos transmitidos.	87
APÉNDICE A	94
APÉNDICE B	96
APÉNDICE C	97
APÉNDICE D	107
APÉNDICE E	108

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de las galgas extensiométricas [28].	27
Tabla 2. Parámetros para la clasificación de torquímetros [27].	33
Tabla 3. Especificaciones del sensor.	37
Tabla 4. Comparación entre aceros y aleaciones de aluminio [32].	39
Tabla 5. Comparación entre materiales para fabricación del eje [33,34,35].	40
Tabla 6. Datos de estudio de diseño.	43
Tabla 7. Valores de simulación del estudio de diseño.	43
Tabla 8. Resultados de pruebas de tendencia de mallado.	44
Tabla 9. Requerimientos para selección de rodamientos.	46
Tabla 10. Comparación entre rodamiento en chumaceras.	47
Tabla 11. Dimensiones y material de la cuña.	49
Tabla 12. Tabla de aproximación Butterworth [43].	57
Tabla 13. Iteraciones de las distancias para la palanca de medición.	73
Tabla 14. Resultados de calibración del sensor de torque.	81
Tabla 15. Resultados de la caracterización del sensor para su clasificación.	81
Tabla 16. Resultados de calibración del sensor de velocidad.	82

Resumen

Este trabajo aborda el diseño y construcción de un sistema IoT para monitoreo continuo de torque y velocidad en motores de inducción, con el propósito de prevenir sobrecargas mecánicas. El sistema propuesto utiliza galgas extensiométricas y un codificador óptico para convertir variables físicas en señales eléctricas. Estas señales se capturan con un microcontrolador ESP32 y posteriormente se transmiten a una base de datos a través de protocolos IoT.

A través de ajustes y calibraciones, se maximiza la precisión, identificando desviaciones e incertidumbres. El sensor de torque logró tener las características de un torquímetro Clase 5 (DIN51309), y el de velocidad logra una precisión de $\pm 5\%$. La transmisión de datos a Google Sheets vía protocolos HTTP fue exitosa, almacenando variables en intervalos de 5 segundos a 150 Mb/s. Las pruebas demuestran la generación de informes que trazan el comportamiento del motor evaluado, validando el cumplimiento de las especificaciones esperadas del sistema.

Palabras clave: Monitorización, Transductor, IoT, Trazabilidad, Motor de inducción.

Abstract

This work presents the design and implementation of an IoT system for continuous monitoring of torque and speed in induction motors, aimed at preventing mechanical overloads. The proposed system utilizes strain gauges and an optical encoder to convert physical variables into electrical signals. These signals are captured by an ESP32 microcontroller and subsequently transmitted to a database through IoT protocols.

Through adjustments and calibrations, precision is optimized, identifying deviations and uncertainties. The torque sensor successfully meets the specifications of a Class 5 torque wrench (DIN 51309), while the speed sensor achieves an accuracy of $\pm 5\%$. Data transmission to Google Sheets via HTTP protocols is successful, storing variables at 5-second intervals with a transfer speed of 150 Mb/s. The tests demonstrate the generation of reports that trace the behavior of the evaluated engine, validating compliance with system specifications.

Keywords: Monitoring, Transducer, IoT, Traceability, Induction Motor.

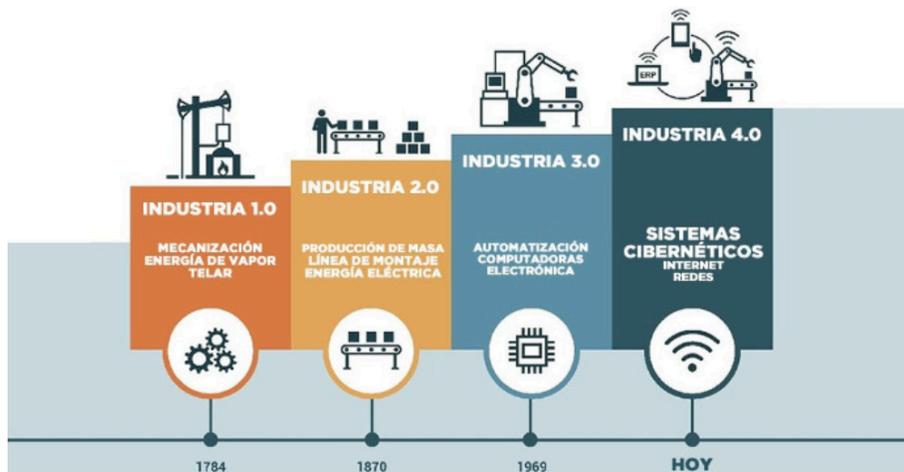
1. Introducción

En la industria, uno de los componentes más importantes para cualquier máquina alimentada por energía eléctrica, es su motor. Debido a su sencillez, eficacia, bajo costo, fácil instalación y mantenimiento, los motores de inducción se han convertido en el principal impulsor para las máquinas en procesos industriales [1].

Estudios realizados por “Industrial Energy Accelerator” confirman la gran importancia de los motores eléctricos en la actualidad, ya que cerca del 70% del consumo total de energía eléctrica en la industria se destina a alimentar los millones de motores eléctricos instalados en todo el mundo. Adicional a esto, estudios de mercado apuntan que los motores eléctricos tendrán un incremento de uso en la industria mundial, siendo el motor de inducción el predilecto para la mayoría de las aplicaciones [2].

Debido a la evaluación de las industrias, Figura 1, los motores eléctricos conectados por sistemas cibernéticos IoT han ganado aún más relevancia debido a su alto nivel de confiabilidad, además de su versatilidad en diversas aplicaciones y su baja huella de contaminación en comparación con los motores de combustión [2].

Figura 1. Evolución Industria 4.0



Nota: Tomado de: O. Rugama López, “Qué es la Industria 4.0 en pocas palabras”, LinkedIn, nov 2018.

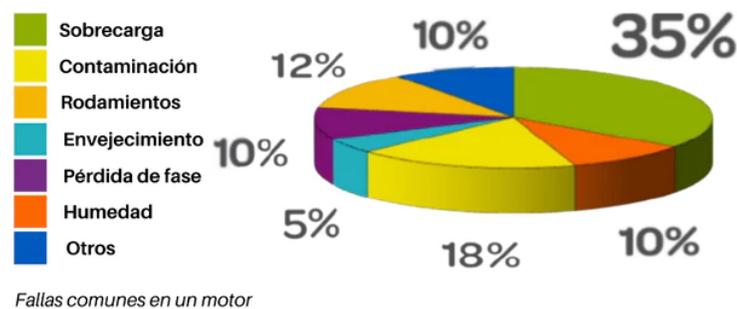
Sin embargo, cómo cualquier otro equipo, este no está exento de fallas o daños que puedan retrasar procesos o aumentar los costos en las industrias [3]; Por esta misma razón, es indispensable contar con sistemas de monitorización que sean oportunos, ayudando a identificar anomalías en el funcionamiento de los equipos para así tener mayor información a la hora de realizar los mantenimientos predictivos y preventivos. De esta forma, se logra aumentar cada uno de los indicadores asociados al funcionamiento óptimo del equipo [4].

No obstante, investigaciones recientes señalan que el 90% de las averías en maquinaria se originan a raíz de un funcionamiento anormal de sus componentes internos, generalmente causado por una operación deficiente y una falta de atención adecuada, ya sea debido a la falta de conocimiento o de recursos. Esto, en última instancia, se traduce en un aumento en la necesidad de mantenimiento correctivo y, en los casos más graves, en la sustitución completa del motor. Cualquiera de estas situaciones provoca un aumento de los costos, además de las paradas inoportunas que afectan a la productividad de las industrias. Por ende, es imprescindible la existencia de métodos o ensayos no destructivos que ayuden al diagnóstico de dichos aparatos para así identificar anomalías y poder ejecutar planes de acción para mitigar posibles fallos inoportunos [5].

1.1. Planteamiento del problema

En el 2021 una empresa distribuidora de motor eléctricos (FCM) publicó en su página oficial que según sus estadísticas internas de servicio de reparación, las fallas más comunes fueron debido a sobrecargas mecánicas, ver [figura 2](#). Aunque los motores eléctricos desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones, suelen verse afectados por problemas que incluyen mala instalación, sobrecargas, contaminación química, desgaste de rodamientos debido a vibraciones y fallos en el aislamiento debido al sobrecalentamiento. Estas fallas pueden tener un impacto económico significativo y, en algunos casos, suponer un riesgo para la seguridad [6].

Figura 2. Principales causas de fallas en motores eléctricos [7].



Nota: Tomada de: FCMsolutionsPeru. "EasyPact TVS : Fundamentos de la protección del motor".

Para abordar estos desafíos, y más donde el motor eléctrico es un componente indispensable para los procesos productivos, múltiples empresas de todo el mundo, han decidido implementar sistemas de monitorización continua IoT, esto se evidencia en el incremento de la inversión de los motores eléctricos inteligentes [2].

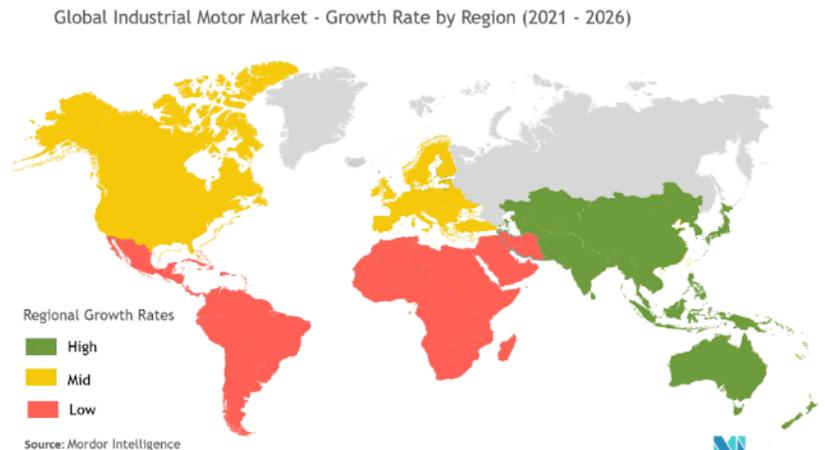
Estos sistemas de uso remoto permiten una supervisión en tiempo real del estado de los motores, identificando anomalías y tendencias antes de que se conviertan en problemas graves. Al medir parámetros claves como temperatura, vibraciones, etc; los sistemas de monitorización proporcionan información esencial para el mantenimiento predictivo y permiten intervenciones planificadas antes de que se produzcan fallas críticas. Además, alertan de inmediato ante condiciones anormales, reduciendo el tiempo de inactividad no planificado y mejorando la eficiencia operativa [8].

Adicionalmente, la medición de variables específicas, como el torque demandado al motor y la velocidad de giro a la que opera, ofrece una valiosa perspectiva para identificar posibles situaciones de sobrecarga donde la potencia demandada por el sistema sea mayor a la potencia que puede ofrecer el motor instalado, lo cual podrían generar desgastes crónicos en el equipo. Asimismo, permite evaluar si el motor empleado es el adecuado para el proceso, posibilitando ajustes o mejoras en la configuración del equipo para optimizar su rendimiento y prolongar su vida útil [8].

1.2. Antecedentes

Es evidente que los motores de inducción tienen gran importancia en la industria global, como se ilustra en la [Figura 3](#). El uso de este tipo de motor se debe a varias ventajas clave en comparación con otros tipos de motores, como su asequibilidad: tanto en términos de adquisición como de mantenimiento, su robustez y su diseño. Además, estos motores tienen la capacidad de funcionar como generadores de energía eléctrica, lo que hace que sean la elección preferida en muchas aplicaciones.

Figura 3. Mercado mundial de motores industriales: tasa de crecimiento por región.



Nota: Tomado de: Mordor Intelligence. (2021). “Mercado de motores industriales: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronósticos (2023 - 2028)”

En el año 2015, dos estudiantes de la facultad de tecnología mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, realizaron el diseño y construcción de un dispositivo que permite medir la variación del momento en relación con un eje. Este dispositivo incluye componentes como una llave de torque analógica, un bastidor, un volvedor, una copa ecualizable y una celda de carga; y se utilizó para demostrar cómo cambia el momento cuando el brazo de la llave se inclina a ángulos distintos a 90° con respecto al eje en cuestión. Los resultados obtenidos en el proyecto proporcionaron una base

sólida para futuras investigaciones y aplicaciones relacionadas con la medición de momentos en sistemas mecánicos [9].

En 2020, en la Universidad Tecnológica Nacional - facultad de ingeniería electrónica, ubicada en Buenos Aires, se realizó un proyecto que se centra en el desarrollo de un sistema de monitoreo predictivo para monitorear en tiempo real el estado de estos motores, detectar cualquier anomalía o fallo potencial, y proporcionar diagnósticos precisos para la toma de decisiones informadas en cuanto a mantenimiento y reparaciones. Esto puede incluir el uso de sensores, técnicas de análisis de datos y algoritmos específicos para identificar patrones de comportamiento anormal en los motores y, por lo tanto, prevenir problemas mayores, reducir el tiempo de inactividad y optimizar la eficiencia energética [10].

En el mismo año, un estudiante de maestría en ingeniería de la Universidad EAFIT, desarrolló un transductor de torque de bajo costo con capacidad para transmitir datos en tiempo real a múltiples dispositivos a través de protocolos de comunicación de Internet de las Cosas (IoT). El proceso involucró la investigación bibliográfica, la definición de parámetros de diseño, la selección de un microcontrolador óptimo, el diseño conceptual y la resolución de modelos matemáticos relacionados con el torque. Además, se llevaron a cabo simulaciones de elementos finitos para validar el diseño y se generaron planos de fabricación [11].

En el año 2022, se publicó un artículo en la revista científica “Mobile Networks and Applications”, en el cual se introduce el desarrollo de un sistema de Internet Industrial de las Cosas (IIoT) de bajo costo diseñado especialmente para llevar a cabo el monitoreo en tiempo real de motores eléctricos. Este sistema tiene la capacidad de recopilar datos de vibración en tiempo real de motores eléctricos y realizar análisis de vibración tanto en el dominio temporal como en el de frecuencia, lo que lo convierte en una herramienta idónea para la detección de anomalías operativas y el desarrollo de modelos de mantenimiento predictivo [12].

Según Sudharani Potturi y el Dr. Rajashekar P. Mandi, de la EEE (Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica) de la Universidad REVA en Bangalore, la incorporación de la tecnología de Internet de las cosas (IoT) en sistemas industriales ha revolucionado la supervisión y el control de equipos críticos como los motores de inducción. Por ello, realizaron un estudio crítico que analiza en profundidad la aplicación de IoT en el monitoreo y control de motores de inducción, destacando sus beneficios clave, como el monitoreo en tiempo real, el control remoto y el mantenimiento predictivo [13].

No obstante, se resaltan desafíos como la seguridad de datos y la compatibilidad en la integración de IoT. Este enfoque prometedor promete mejorar la eficiencia energética, reducir los tiempos de inactividad y prolongar la vida útil de los motores, pero se enfatiza la necesidad de abordar las preocupaciones de seguridad y optimizar el proceso de integración para su éxito en diversas industrias.

Empresas como FUTEK, ha dedicado años de investigación en el desarrollo y la creación de transductores que puedan ayudar a medir variables como el torque y la velocidad, brindando una gama de productos para diversas aplicaciones, en ramas como la ingeniería aeroespacial, ingeniería biomédica, procesos de generación eléctrica, entre otras [14].

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general.

Diseñar y construir un sistema de monitorización continua IoT para la prevención contra sobrecargas mecánicas en motores de inducción de hasta 50 Nm y 3200 rpm.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Diseñar un transductor clase 5 que permita la medición del torque a través del uso de galgas extensiométricas de tipo uniaxial con una resolución de 0.1 Nm, y que a su vez posibilite la

instalación de un codificador para la medición de la velocidad angular con resolución de 1 rpm y una precisión mínima del 5%.

- Diseñar circuito de acondicionamiento que suministre alimentación, filtre y adapte las señales obtenidas por los sensores a una apta para su lectura mediante el uso de un ADC.
- Construir el transductor en base al diseño mecánico implementando un sistema microcontrolado para el procesamiento y transmisión de las señales adquiridas por medio de un sistema IoT con velocidades de hasta 150 Mb/s, para su posterior almacenamiento a través de Google App Script.
- Montar bancos de prueba destinados a realizar procedimientos de calibración para estimar y corregir las desviaciones en la medición del torque (Con un sistema de palanca) y la velocidad (realizando una comparación directa con patrón referencia).
- Realizar pruebas de funcionamiento del sistema mediante el uso de un montaje con dos motores en serie, para comprobar que el sistema pueda medir torques de hasta 50 Nm y velocidades hasta 3200 rpm.

1.4. Justificación

En Colombia, durante los últimos años, las industrias se han interesado en los métodos de predicción de fallas para motores eléctricos, ya que la creciente implementación de sistemas de mantenimiento ha dejado ver que la predicción y detección temprana de fallas en los equipos genera aumentos de productividad, eficiencia y la disminución de costos por reprocesamiento de productos, paradas de planta, reparación o cambio de equipos [15].

Los diversos métodos y estudios que se han generado para la detección de fallas en motores de inducción, se han centrado en la investigación de análisis de señales de voltaje, corriente, sonido o vibración, los cuales tiene como finalidad el desarrollo de predicción de fallas, relacionando los

espectros de frecuencia mediante la transformada de Fourier, EMD (la descomposición de modo empírico), la transformada de Wavelet, entre otras [16].

Sin embargo, estos métodos no son los únicos, variables como la potencia, el torque y la velocidad, se han dejado de lado pese a que con el seguimiento de estas variables se puede realizar el análisis no solo del estado del motor, sino también de la máquina o mecanismos que este impulsa [6].

Para poder realizar un correcto análisis mediante el monitoreo del torque y la velocidad a las cuales el motor trabaja habitualmente, es necesaria la adquisición de un transductor confiable y robusto que pueda sensor de manera exacta y precisa cada una de dichas variables.

Pese a esto, en el mercado son escasos los sistemas completos de adquisición de señales y monitorización que cuenten con la capacidad de datalogger, es decir, que permita mantener una trazabilidad del comportamiento de estas variables y almacenarlas para su posterior análisis [17]. Por otro lado, estos sensores no involucran comunicaciones basadas en tecnologías IoT de la industria 4.0 lo cual limita las capacidades de los sensores durante la operación [18].

Por ello, en este trabajo se propone la creación de un sistema de monitorización continua de torque y velocidad para motores de inducción con capacidades de hasta 50 Nm, el cual brinde la posibilidad de visualizar y almacenar las mediciones realizadas, garantizando así la capacidad de mantener la trazabilidad del mensurando.

Mediante la implementación de protocolos de comunicación IoT, se permite la visualización de los datos de forma remota, con el fin de disponer de los mismos desde cualquier lugar donde se encuentre.

La existencia de un sistema de monitoreo continuo, el cual tenga la capacidad de almacenar los parámetros más esenciales de cualquier motor en una base de datos de fácil acceso, sería de gran ayuda para la toma de decisiones a la hora de realizar cualquier tipo de planeación relacionado con la

maquinaria. Además se esperaría que el sistema fuese compacto y de fácil acceso para la mayoría de las industrias.

1.5. Alcance

El proyecto tiene como expectativas desarrollar un sistema que abarque el mayor rango posible de medición de torque y velocidad para motores de inducción de hasta 5 hp, dando alcance a gran parte de las maquinarias que sean propulsadas por estos tipos de motores.

Para esto, se espera que el transductor de torque y velocidad pueda tener la capacidad de resistir par torsional de hasta 50 Nm y alcanzar velocidades cercanas a los 3200 rpm. Como la finalidad de este proyecto es monitorear y dar herramientas al usuario para la prevención contra sobrecargas mecánicas, para el sistema no será prioritario buscar una alta exactitud a la hora de medir las variables, aunque sí se espera alcanzar una buena sensibilidad.

A lo largo del documento se hará mención al término “calibración”, el cual hace referencia a que el sistema será ajustado y evaluado en base a los procedimientos empleados por los laboratorios acreditados. A pesar de buscar la máxima rigurosidad, no se tiene la intención de utilizar equipos certificados para llevar a cabo una calibración acreditada por un ente estatal. En resumen, el equipo será evaluado y ajustado según dichos procedimientos, pero no se someterá a una calibración con certificación acreditada.

En el caso del sistema de monitoreo se espera tener una visualización remota de las variables con una tasa de refresco no mayor a los 5 segundos, de igual modo se pretende que se puedan almacenar paquetes de datos durante un periodo de 15 días.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Motores eléctricos de inducción.

Los motores eléctricos son componentes fundamentales en numerosos usos, tanto en la industria, el comercio como en nuestros hogares. Su principal tarea es transformar la electricidad en movimiento, lo que los hace esenciales en una variedad de dispositivos, desde electrodomésticos hasta maquinaria industrial [19].

Un motor de inducción es un tipo común de motor eléctrico que opera mediante la interacción de campos magnéticos rotativos. Está compuesto principalmente por dos componentes esenciales: el estator y el rotor. El estator alberga bobinas o devanados que se conectan a una fuente de corriente alterna (CA). Cuando se aplica esta corriente alterna, se genera un campo magnético giratorio en el interior del motor, mientras que el rotor, la parte móvil del motor, se coloca dentro de este campo magnético rotativo [21].

Cuando el rotor interactúa con el campo magnético rotativo del estator, se inducen corrientes eléctricas en el rotor, lo que genera su propio campo magnético. La interacción entre estos campos magnéticos induce una fuerza que hace que el rotor gire, lo que a su vez crea movimiento mecánico. La velocidad de rotación del rotor depende de la frecuencia de la corriente alterna suministrada al estator y del número de polos en el motor [21].

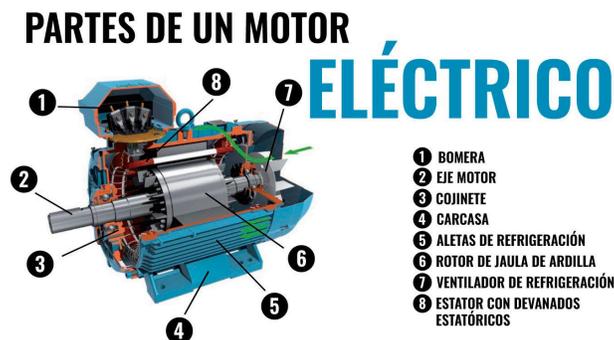
2.1.1. Funcionamiento y partes de un motor eléctrico

El estator contiene bobinas de alambre a través de las cuales se hace circular corriente alterna, generando un campo magnético rotativo. Este campo magnético induce corrientes en el rotor, generando así un segundo campo magnético que interactúa con el del estator, impulsando al rotor a girar y produciendo movimiento mecánico. No se necesita conexión eléctrica directa al rotor, lo que

hace que los motores de inducción sean robustos y de bajo mantenimiento. Además, el diseño simplificado del motor de inducción lo hace ampliamente utilizado en diversas aplicaciones, desde electrodomésticos hasta sistemas industriales.

Las partes principales de un motor de inducción incluyen el estator, compuesto por bobinas de alambre y laminaciones magnéticas, que generan el campo magnético rotatorio; el rotor, que puede ser de jaula de ardilla o de rotor bobinado, y responde a las corrientes inducidas en el estator para generar movimiento; y el sistema de soporte y carcasa que alberga y protege estas partes. Además, se utilizan rodamientos para facilitar el giro del rotor y un sistema de ventilación para mantener el motor a una temperatura adecuada durante su funcionamiento, cada una de las partes mencionadas, se encuentran en la [figura 4](#) [50].

Figura 4. Partes de un motor eléctrico [50].



2.1.2. Gráficas y curvas características de motores de inducción.

Para un motor de inducción, algunas de las gráficas más importantes que se utilizan para su análisis y monitoreo incluyen: [22].

- El gráfico de **velocidad frente al tiempo** refleja las variaciones en la velocidad del motor desde su arranque hasta alcanzar su velocidad nominal. Su importancia radica en proporcionar una visión detallada del comportamiento dinámico del motor, permitiendo un análisis preciso de su desempeño durante diferentes fases de operación.

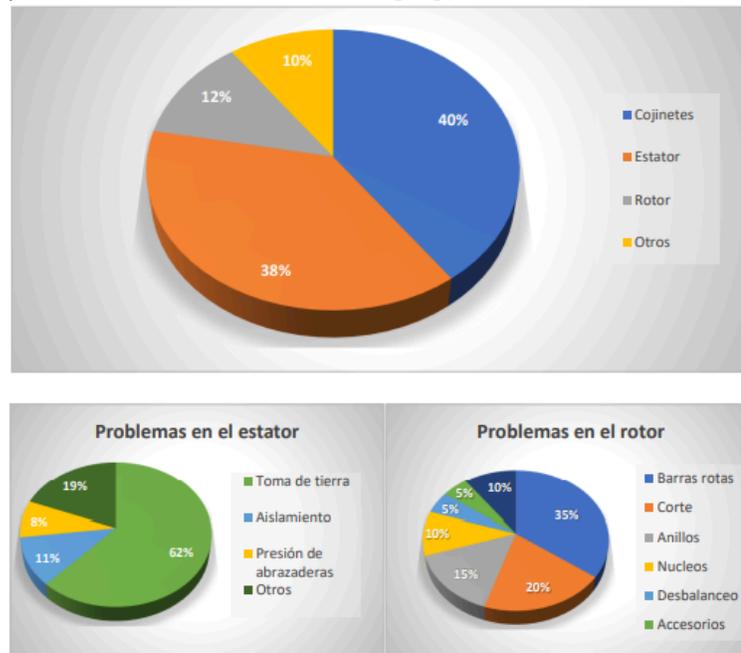
- La gráfica de **par vs velocidad** es crítica para evaluar la eficiencia, capacidad de carga y comportamiento dinámico de un motor eléctrico.

Esta representación visual muestra cómo cambia la fuerza de torsión producida por el motor a medida que varía su velocidad de rotación, lo que permite identificar el punto óptimo de eficiencia, evaluar su capacidad para manejar diferentes cargas y comprender su comportamiento durante el arranque y la aceleración. Además, ayuda a prevenir situaciones de sobrecarga y a optimizar el rendimiento del motor, lo que es fundamental para diseñar sistemas seguros y eficientes en diversas aplicaciones industriales y comerciales.

2.1.3. Causas de fallos en motores de inducción.

Los motores de inducción, aunque son altamente confiables, están sujetos a posibles fallas que pueden tener origen eléctrico o mecánico. Estas fallas pueden causar interrupciones imprevistas en los procesos industriales, lo que requiere detener la maquinaria para llevar a cabo tareas de mantenimiento o reemplazar el motor en caso de daños irreparables. Cada parada no programada puede resultar en una reducción significativa o incluso en la detención total de la producción o actividades, lo que implica costos y pérdidas importantes [10].

Figura 5. Porcentaje de fallas en motores de inducción [10].



Nota: Tomado de: R. E. Marse, J. D. Schroeder, “Monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos trifásicos”, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná, Buenos Aires, 2020.

Como se observa en la [figura 5](#), las fallas más frecuentes suelen presentarse en los rodamientos o cojinetes, el rotor y el estator. En cuanto a las causas de fallas en el estator, estas pueden dividirse en tres categorías principales: causas térmicas, eléctricas y mecánicas [10].

- En el ámbito térmico, variaciones en la tensión de suministro, desequilibrios en la tensión de fase, arranques repetidos en cortos intervalos y sobrecargas pueden elevar la temperatura del estator y afectar su rendimiento.
- Las causas eléctricas incluyen la relación entre la vida útil del aislante del bobinado y las sobretensiones aplicadas, así como el efecto corona que puede surgir cuando la tensión excede ciertos valores críticos. Además, las sobretensiones de corta duración y las oscilaciones de corriente pueden dañar la aislación de las espiras del estator.
- En el ámbito mecánico, los movimientos de las espiras debido a las corrientes generadas al arrancar el motor pueden provocar vibraciones y cortocircuitos. También, el contacto entre el

estator y el rotor puede ser causado por problemas en los rodamientos, desalineación o desviación del eje.

Las causas de fallas en el rotor pueden clasificarse en términos de temperatura, efectos magnéticos, dinámica y factores mecánicos [10].

- En cuanto a las causas térmicas, las fallas pueden originarse por sobrecargas térmicas, especialmente durante el arranque o en condiciones de bloqueo del rotor, y por desbalances térmicos que pueden surgir en la fabricación o durante la operación.
- Las causas magnéticas están relacionadas con las fuerzas electromagnéticas, las cuales pueden afectar el rotor debido al cuadrado de la corriente, generando deflexiones. Además, desbalances electromagnéticos pueden surgir debido a factores como el centrado del rotor.
- En el ámbito dinámico, las solicitudes dinámicas pueden exceder los límites de diseño del motor debido a operaciones que involucran torques excesivos en el eje o velocidades excesivas.
- En las causas mecánicas, las fallas también pueden deberse al desprendimiento de chapas o al ajuste incorrecto del eje del rotor.

2.2. Sensor de torque

De acuerdo con las definiciones establecidas por Logicbus, los transductores de torque son dispositivos diseñados para la conversión de energía mecánica en señales eléctricas. Este proceso se logra convencionalmente mediante la utilización de galgas extensiométricas que experimentan deformaciones cuando se someten a torsión. Por otro lado, un sensor de torque se define como un tipo específico de transductor que transforma la torsión mecánica aplicada en su entrada en una señal eléctrica en su salida. Es importante señalar que estos sensores de torque son a menudo referidos como transductores de torque en la terminología técnica [23].

2.2.1. Tipos de sensores de torque

En cuanto a la tecnología empleada en estos sensores, se pueden distinguir dos categorías principales: sensores de torque de reacción y sensores de torque de rotación. Los sensores de torque de reacción se utilizan para medir torques estáticos, donde la aplicación de torsión es utilizada mayormente para sistema de fijación como tornillos y tuercas. Por otro lado, los sensores de torque de rotación se emplean para medir torques dinámicos y en movimiento, donde la torsión varía con el tiempo, además permite hacer la lectura a medida que el objetivo está en rotación. Estas dos variantes de sensores de torque se adaptan a diferentes aplicaciones y permiten una medición precisa de los esfuerzos torsionales en sistemas mecánicos [23].

2.2.1.1. Rotativos o dinámicos

Los sensores de torque dinámicos se destacan por su diseño que facilita la rotación libre de un eje central en relación con el cuerpo del sensor. En la superficie de este eje central se ubica un conjunto de galgas extensiométricas u otros transductores, que son dispositivos sensibles a las deformaciones mecánicas. La transmisión de datos desde estos sensores se logra a través del uso de anillos y escobillas deslizantes, un sistema que permite la transferencia de señales eléctricas a medida que el eje central experimenta su rotación [11].

Estos transductores de torque dinámicos desempeñan un papel fundamental en la verificación en tiempo real de la variación del torque, lo que facilita la estimación precisa de la potencia consumida por equipos de bombeo hidráulico durante su funcionamiento. Esto, para garantizar un monitoreo continuo y eficiente de la operación de estos equipos, contribuyendo así a su mantenimiento y funcionamiento óptimos [11].

2.2.2. Principios de funcionamiento de un transductor

2.2.2.1. Piezo eléctrico

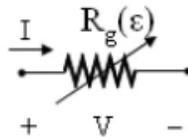
Un transductor de torque piezoeléctrico funciona mediante el principio piezoeléctrico aplicado a la medición de torsión o fuerza de giro. En este dispositivo, un material piezoeléctrico, como cristales cerámicos o polímero el cual genera una carga eléctrica en respuesta a una deformación mecánica, se configura para detectar la torsión aplicada al eje [24].

Cuando el eje gira, el material piezoeléctrico experimenta una deformación mecánica debido al torque, generando una carga eléctrica proporcional. Esta carga eléctrica se convierte en una señal de salida que, después de ser amplificada y procesada electrónicamente, proporciona una medición precisa del torque aplicado. Los transductores de torque piezoeléctricos se utilizan en aplicaciones que requieren una detección de torsión precisa y una respuesta rápida, como en sistemas de control de motores y ensayos de materiales [24].

2.2.2.2. Galga extensiométrica

Las galgas extensiométricas se fundamentan en el principio piezoresistivo, que se refiere a la propiedad de ciertos materiales de alterar su resistencia al flujo de electrones cuando experimentan deformaciones lineales. En otras palabras, estos sensores responden a la tensión mecánica generada por una fuerza aplicada [11].

Figura 6. Símbolo de galga extensiométrica



(Ecuación 1)

(Ecuación 2)

(Ecuación 3)

$$R_g = R_0(1 + K \cdot \varepsilon) \quad ; \quad K = \frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\mu + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \quad ; \quad \varepsilon = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Nota: Tomado de: Universitat Politècnica de València - UPV. *Galgas Extensiométricas: Funcionamiento y Circuitos de Medida* | | UPV. (26 de septiembre de 2011) [Video en línea].

Estas galgas suelen estar compuestas por láminas delgadas de materiales semiconductores que se adhieren a las superficies de los elementos que se desean medir en términos de deformación. Su función principal radica en la conversión de los esfuerzos mecánicos en señales eléctricas, lo que permite posteriormente su análisis y evaluación. Este proceso es esencial en aplicaciones donde se requiere cuantificar y comprender las fuerzas y tensiones que afectan a componentes y estructuras.

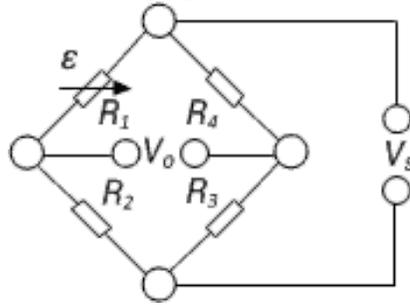
Tabla 1. Clasificación de las galgas extensiométricas [28].

	Hilo y lámina	Semiconductor	Capa gruesa
Factor de galga	2	50-60	10-20
Resistencia	120, 350, 600, 1000 Ω	Más de 500 Ω	Más de 10 k Ω
Linealidad	$\pm 0.1\%$ hasta 1000 $\mu\epsilon$ y 1% hasta 10000 $\mu\epsilon$	$\pm 1\%$ hasta 1000 $\mu\epsilon$	$\pm 1\%$ hasta 1000 $\mu\epsilon$
T. de ruptura	25000 $\mu\epsilon$	5000 $\mu\epsilon$	5000 $\mu\epsilon$
Fatiga	10^7 ciclos	10^6 ciclos	10^6 ciclos
Efecto Temp.	Medio	Alto	Medio

Nota: Tomado de: Universitat Politècnica de València - UPV. *Galgas Extensiométricas: Funcionamiento y Circuitos de Medida* | | UPV. (26 de septiembre de 2011) [Video en línea].

El puente de Wheatstone es un circuito que permite calcular el valor de una resistencia desconocida o convertir variaciones de resistencia en sensores de tipo resistivo en una señal de voltaje, se compone de 4 resistencias donde una o más son variables, los valores de resistencia deben ser idénticos en ambas ramas para conseguir la condición de estabilidad, cualquier cambio en la resistencia variable se verá reflejado en una variación del voltaje entre las terminales de voltaje V_0 [29].

Figura 7. Esquema de puente de wheatstone con galga extensiométrica



Cada rama se compone de un divisor de tensión donde el voltaje de salida obedece a la relación:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

Vs: Voltaje de alimentación.

Vo: Voltaje de salida.

La condición de estabilidad se obtiene cuando el voltaje de salida en el divisor de voltaje de la rama 1 (R1 y R2) es igual al voltaje de salida de la rama 2 (R3 y R4), dando como resultado un voltaje medido en Rg igual a cero.

Si existe una diferencia de voltajes entre las ramas 1 y 2, el voltaje resultante a la salida puede ser calculado usando la siguiente expresión:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Para poder realizar la medición de los cambio de la resistencia de la galgas excenciomatricas, convencionalmente, se realiza un puente de Wheatstone, en el caso de utilizar un puente con solo una galga, como se muestra en la [figura 7](#), la ecuación sería:

$$V_0 = \frac{k\varepsilon}{2(2+k\varepsilon)} V_s \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

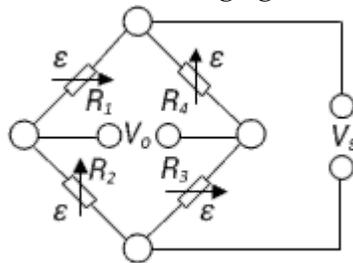
k: Factor de galga. (Es una constante propia de cada galga, este valor lo da el fabricante)

ε: Deformación unitaria a la cual está expuesta la galga.

Sin embargo, esta configuración está limitada debido a que las señales pueden desviarse por cambios de temperatura en el material, lo cual genera dilataciones y produce falsas señales de deformación por esfuerzo. Asimismo, la sensibilidad de la galga no es lineal, ya que ϵ está tanto arriba y abajo de la ecuación, y al ser la variable de entrada, siendo constantes k y V_s , el comportamiento de la magnitud de salida no será lineal con respecto a la deformación; así mismo su magnitud es un cuarto de la alimentación, debido a que el factor de la galga está dividiendo.

Para contrarrestar dichos inconvenientes, se utiliza el puente completo de Wheatstone, ver [figura 8](#), que consiste en el uso de 4 galgas extensiométricas, con el fin de eliminar todas señales por las deformaciones por temperatura, así como amplificar las señales por deformación por esfuerzos.

Figura 8. Esquema de puente completo de wheatstone con galgas extensiométricas

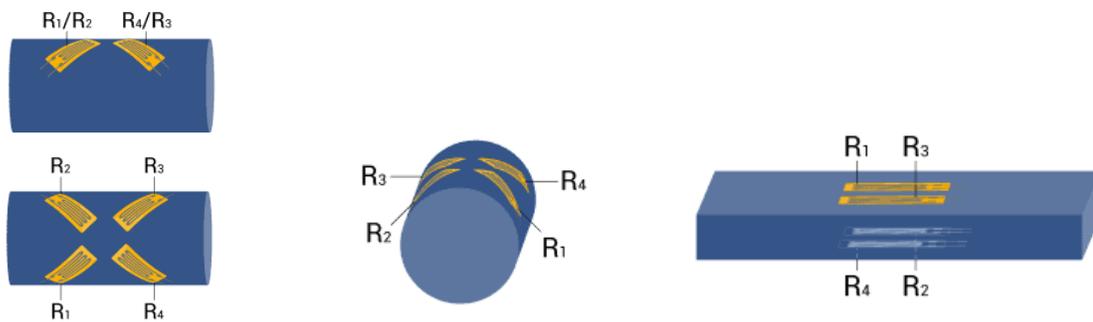


$$V_0 = k\epsilon V_s \text{ (Ecuación 6)}$$

En comparación a la configuración del puente de Wheatstone con solo una galga, el puente completo de Wheatstone no tiene ninguna influencia por cambios de temperatura. Además, su señal de salida V_0 es lineal en función de la deformación ϵ ya que k y V_s al ser constante, con un despeje sencillo se evidencia que la ecuación es la ecuación de una recta, siendo la pendiente el producto de k y V_s .

En comparación con otras configuraciones, la configuración del puente completo de Wheatstone presenta la mayor sensibilidad de todas. Dicha configuración puede ser utilizada tanto para la medición de deformación en geometrías paralelepípedas como en geometrías cilíndricas, ver [figura 9](#) [29].

Figura 9. Ubicación de galgas extensiométricas en diferentes geometrías



Nota: Tomado de: “El puente de Wheatstone | Galgas extensométricas”. HBM.

2.3. Tacómetro (Sensor de velocidad)

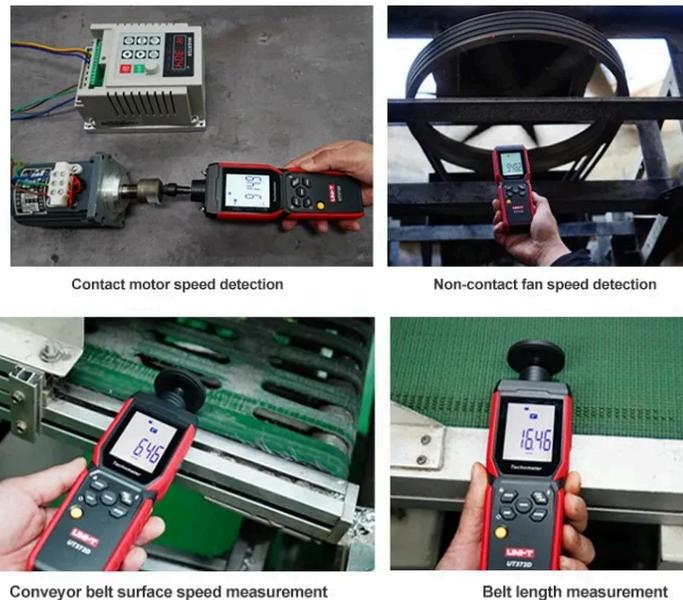
Un tacómetro se puede definir como un dispositivo diseñado para medir la frecuencia de rotación de un componente en operación dinámica, así como las velocidades de superficies y extensiones lineales. La palabra tacómetro proviene del griego y se compone de dos elementos lingüísticos: "takhos", que significa "rapidez", y "metron", sinónimo de medida [25].

Su aplicación abarca una amplia variedad de sectores industriales, incluyendo motores eléctricos, motores de combustión interna, molinos, bandas transportadoras y turbinas, entre otros. El tacómetro resulta especialmente valioso en procesos donde se busca conocer y controlar la frecuencia de rotación. Permite a los operarios detectar pérdidas o fluctuaciones, señales de posibles problemas, y además facilita la operación de la máquina dentro de intervalos de seguridad confiables y óptimos de eficiencia, previamente establecidos. [25].

2.3.1. Principios de operación de un tacómetro.

Los tacómetros se pueden clasificar por su principio de operación; Actualmente en el mercado existen dos grandes tipos: de contacto y no-contacto tal y como se muestra en la [figura 10](#).

Figura 10. Tacómetros de contacto y no contacto [26].



Nota: Tomada de: Uni-Trend Technology, “Test & Measurement Tools and Solutions” , UT372D 2 in 1 Tachometer.

2.3.1.1. Tacómetro de no-contacto

Los tacómetros de no-contacto, como se muestra en la [figura 10](#), son dispositivos diseñados para medir la velocidad de rotación de un objeto sin la necesidad de establecer contacto físico directo con él. Este tipo de tacómetro resulta particularmente útil en situaciones donde el contacto directo con el objeto no es factible, práctico o seguro [25].

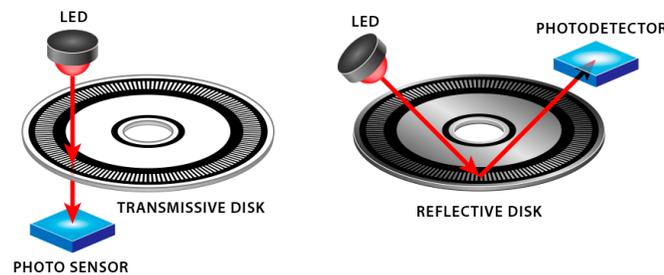
Estos tacómetros de no-contacto se componen de un codificador capaz de emitir, recibir o percibir señales en forma de pulsos. Estos pulsos son medidos para determinar la frecuencia entre ellos, permitiendo así calcular la velocidad del objeto o elemento en medición. Existen varios tipos de codificadores, clasificables según su principio de funcionamiento. En la actualidad, los fabricantes de este tipo de instrumentos ofrecen diversas opciones basadas en tres principios de funcionamiento fundamentales, lo cuales son:

Codificador óptico: Estos codificadores han sido el método predominante en las últimas décadas y continúan siendo líderes en precisión, exactitud y resolución, gracias a su asequibilidad,

facilidad de fabricación e instalación, y alto nivel de confiabilidad. Los codificadores ópticos emplean sensores para detectar la luz que atraviesa un disco (transmisiva) o se refleja en él (reflectante), tal y como se muestra en la [figura 11](#) [27].

En los codificadores ópticos transmisivos, una rueda lógica con perforaciones intercaladas regula el paso de la luz, generando señales para el sensor óptico. Cuando el sensor recibe luz, el codificador emite una señal alta; en cambio, cuando la luz se bloquea por una línea en la rueda lógica, se emite una señal baja. En los discos codificadores reflectantes, el principio es similar, pero ahora son las líneas alternas entre reflectantes y no reflectantes las que determinan el paso o bloqueo del haz de luz [27].

Figura 11. Principio de funcionamiento de los codificadores ópticos [27].



Nota: Tomada de: US Digital Motion Control Products, “What’s the difference between optical, magnetic and capacitive encoders?” Blog, Agosto, 2019.

2.4. Normatividad y metrología

Un transductor de torque dinámico es un instrumento que mide dos magnitudes físicas independientes: el par torsional y la velocidad angular. La evaluación de este dispositivo debe llevarse a cabo de manera independiente para cada uno de los sistemas de medición asociados. En el caso del sistema de medición de torque, se considera apropiado seguir las normas europeas DIN 51309 y Euramet cg-14 para llevar a cabo el procedimiento de calibración. Esto se debe a que al medir el torque mediante galgas extensiométricas, es necesario utilizar normas o guías específicas diseñadas para instrumentos electrónicos [30].

Es importante destacar que, a pesar de ser un transductor dinámico capaz de medir el par torsional en movimiento, los institutos de metrología actualmente recomiendan realizar mediciones de manera estática por razones de seguridad y facilidad.

En lo que respecta al sistema de medición de velocidad angular, actualmente no existen normas o directrices específicas para la calibración de tacómetros ópticos. Sin embargo, entidades extranjeras e internacionales, como el CEMAN a través de sus guías METAS, y la organización ISO, ofrecen estándares y guías que proporcionan un marco interpretativo para establecer un método en un procedimiento de calibración [30].

2.4.1. Clases de sensores de torque según su exactitud

Según la DIN 51309, los sensores que permiten la medición de par torsional o toque, se pueden clasificar según criterios de repetibilidad y reproducibilidad relativa, resolución, variación de punto cero y linealidad.

Tabla 2. Parámetros para la clasificación de torquímetros [27].

Class	maximum admissible values of the parameters in %					Lower limit of the measuring range in % M_A	Calibration torque Relative expanded measurement uncertainty ^a in % $W_{KE} = k \cdot w_{KE}$
	Relative reproducibility $\frac{b}{Y}$	Relative repeatability $\frac{b'}{Y}$	Relative zero deviation $\frac{f_0}{Y_E}$	Relative reversal error $\frac{h}{Y}$	Relative indication or interpolation deviation $\frac{f_q}{Y}$ or $\frac{f_a}{Y}$		
0.05	0.050	0.025	0.0125	0.063	± 0.025	$\geq 4\,000 r$	0.010
0.1	0.10	0.05	0.025	0.125	± 0.05	$\geq 2\,000 r$	0.020
0.2	0.20	0.10	0.050	0.250	± 0.10	$\geq 1\,000 r$	0.040
0.5	0.50	0.25	0.125	0.63	± 0.25	$\geq 400 r$	0.10
1	1.0	-	0.25	1.25	± 0.5	$\geq 200 r$	0.20
2	2.0	-	0.50	2.50	± 1.0	$\geq 100 r$	0.40
5	5.0	-	1.25	6.25	± 2.5	$\geq 40 r$	1.0

^a The relative expanded measurement uncertainty of the calibration torque corresponds, according to [2], to twice the standard deviation ($k = 2$) and is determined by combining the random and the systematic measurement deviations of the torque calibration facility.

En el [apéndice A](#) se encuentran fracciones de la norma DIN 51309 donde se explica qué significa cada uno de los términos y métodos para calcular cada una de los parámetros.

2.5. Sistemas IIoT

El Internet Industrial de las Cosas (IIoT) se presenta como la pieza clave en la Cuarta Revolución Industrial, con el potencial de transformar sectores que representan el 62% del PIB en países del G20, como la manufactura, la energía y la alimentación. A diferencia del Internet de las Cosas (IoT), centrado en servicios para consumidores, el IIoT se enfoca en aumentar la seguridad y eficiencia en entornos industriales [47].

El IIoT se compone de dispositivos conectados, una red de conectividad, servicios informáticos y una interfaz para operarios. Sus aplicaciones actuales abarcan desde vehículos autónomos para transporte interno hasta la optimización del rendimiento de máquinas, reducción de errores humanos, mejoras en logística y distribución, para esto, los sistemas IIoT requieren sensores e instrumentación, la cual sean compatible para dicha tecnología [47].

Con una inversión global que superó los 300.000 millones de dólares en 2019 y proyectando duplicarse para 2025, el IIoT se posiciona como el principal impulsor para la productividad e innovación en la próxima década, prometiendo ser esencial en la transformación industrial [48].

2.5.1. Protocolo de comunicación HTTP.

Desde el punto de vista de las comunicaciones, el protocolo HTTP se basa en los servicios de conexión TCP/IP. En este contexto, un proceso servidor escucha en un puerto de comunicaciones TCP (con un valor predeterminado de 80), esperando las solicitudes de conexión de los clientes web. Una vez establecida la conexión, el protocolo TCP se encarga de mantener una comunicación sin errores y facilitar el intercambio de datos [39].

HTTP opera mediante operaciones de solicitud/respuesta, donde un cliente establece conexión con un servidor y envía un mensaje con los datos de la solicitud. El servidor responde con un mensaje

similar, incluyendo el estado de la operación y su posible resultado. Cada operación puede adjuntar un objeto o recurso identificado por su URL [39].

Los recursos u objetos intercambiados se clasifican por su descripción MIME, permitiendo la transferencia de cualquier tipo de dato sin preocuparse por su contenido. La comunicación se realiza en modo binario, byte a byte, y la identificación MIME facilita el tratamiento adecuado de los datos por parte del receptor [39].

Las principales características del protocolo HTTP son:

- La comunicación se realiza con caracteres de 8 bits, permitiendo la transmisión de cualquier tipo de documento.
- Permite la transferencia de objetos multimedia identificados por su clasificación MIME.
- Emplea tres verbos básicos (GET, POST y HEAD) para la interacción cliente-servidor.
- Cada operación HTTP implica una conexión con el servidor, aunque el mecanismo HTTP Keep Alive permite mantener activa la conexión para transacciones sucesivas.
- No mantiene un estado entre transacciones; cada petición es tratada como una operación independiente.
- La identificación de cada objeto se realiza a través de la información de situación al final de la URL.

En cada petición, el cliente accede a una URL, decodifica sus partes, establece una conexión TCP/IP con el servidor, realiza la petición y recibe la respuesta, cerrando la conexión TCP al finalizar el proceso, a menos que se utilice el modo HTTP Keep Alive para mantener la conexión activa durante un periodo de tiempo [39].

2.5.2. Google App Script

Google Apps Script es una plataforma en la nube que capacita a los usuarios para crear scripts, automatizando tareas y personalizando productos de Google como Sheets, Docs y Drive. Su

integración fluida con diversos servicios de Google simplifica la automatización de flujos de trabajo, la creación de complementos personalizados y la ejecución eficiente de tareas repetitivas, eliminando la necesidad de instalar software adicional. Esta herramienta versátil mejora la eficiencia al permitir a los usuarios desarrollar soluciones adaptadas a sus necesidades [31].

En el ámbito del desarrollo de IoT, Google Apps Script juega un papel crucial al permitir la automatización de tareas, la integración con servicios en la nube de Google, notificaciones en tiempo real, control remoto de dispositivos, generación de informes y visualizaciones, así como el desarrollo de complementos personalizados para productos de Google. Estas capacidades proporcionan una gestión eficiente de dispositivos IoT, facilitan el análisis de datos y posibilitan la creación de interfaces personalizadas para el control y monitoreo remoto [31].

3. Desarrollo metodológico

Para la realización de este Trabajo Integral de Grado (TIG), se ha diseñado una metodología basada en el enfoque CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar, Operar). Este enfoque se centra en el desarrollo de las habilidades y competencias necesarias para que los ingenieros puedan gestionar todo el ciclo de vida de un sistema o producto, desde la concepción inicial de la idea hasta la fase de construcción e implementación.

Con el propósito de aplicar esta metodología, el proyecto se estructuró en cinco fases distintas. La fase de Concepción se abordó en el anteproyecto del TIG, donde se presentó la idea y se resaltó su relevancia. La etapa de Diseño se aplicó durante las dos primeras fases de la metodología, abarcando tanto los aspectos mecánicos, como la selección de materiales, diseño de geometría, análisis de esfuerzos y deformaciones, como los aspectos electrónicos, que incluyen la especificación de componentes, protocolos de comunicación y otros elementos críticos.

La fase de implementación se desarrolló en las dos etapas siguientes, implicando la construcción y puesta en marcha del banco de pruebas, así como la identificación de los

procedimientos adecuados para la calibración y ajuste del sensor. Por último, en la fase final, la de Operación, se llevaron a cabo pruebas en el sensor ya montado en un motor y una carga, con el objetivo de evaluar su rendimiento y detectar posibles mejoras.

3.1. Diseño mecánico

3.1.1. Identificación de los requisitos

En el proceso de diseño del instrumento, se garantizó el cumplimiento de los rigurosos estándares de precisión asociados a un torque de clase 5, tal como se detalló en la [tabla 2](#). Para lograr este objetivo, se identificó cuidadosamente el principio físico de funcionamiento más apropiado para este fin. Para ello, se tuvo en cuenta que el instrumento debía ser versátil, permitiendo una medición precisa de torque en un amplio rango, desde 5 Nm hasta 50 Nm, al mismo tiempo que facilitara la medición de la velocidad de giro del sistema, que podía alcanzar hasta 3200 rpm.

Tabla 3. Especificaciones del sensor.

Parámetros	Torque	Velocidad angular
Límite superior	5	0
Límite inferior	50	3200
División de escala / Resolución	0,1	0,1
Unidad	Nm	rpm
Principio de funcionamiento	Puente de Wheatstone con galgas extensiométricas	Tacómetro óptico transmisor

Nota: Fuente propia

Al basarnos en la información recopilada, la metodología se centró en el diseño del sensor de acuerdo con las especificaciones detalladas en la [tabla 3](#), previamente mostrada. Es importante destacar que, dado que este sensor estaba destinado para su uso en motores de inducción, no se anticipó que estuviera sometido a cargas cíclicas ocasionadas por cambios de velocidad o de giro, ya

fueran constantes o dinámicas. En cambio, se preveía que el sensor se encontraría bajo cargas constantes.

3.1.2. Selección de materiales: aspectos físicos y disponibilidad en el mercado

Después de identificar los parámetros y requisitos del sensor, el primer paso en el proceso de diseño implicó determinar las propiedades esenciales necesarias en el material. Dado que se optó por medir el torque a través de la deformación utilizando galgas extensiométricas, el material seleccionado debió cumplir con varios criterios fundamentales.

En primer lugar, el material tuvo que ser capaz de soportar los esfuerzos generados por la torsión y, al mismo tiempo, tener la capacidad de deformarse lo suficiente para obtener una fácil lectura por medio de las strain gauges. Además, era crucial que tuviera un módulo de elasticidad lo más bajo posible y que fuera capaz de recuperarse de la deformación. También debía ser de fácil maquinabilidad y poseer una resistencia moderada a la corrosión.

Luego de evaluar estas consideraciones, el acero se destacó como la elección más adecuada para esta aplicación. Esto debido a su resistencia a la fatiga, a la corrosión y facilidad de maquinado. Una aleación de aluminio fue otra opción que se consideró, pero tal y como se muestra en la [tabla 4](#). Al realizar una comparación detallada entre los aceros y las aleaciones de aluminio, se confirmó que los aceros presentaron propiedades más favorables para la fabricación del sensor. Estas ventajas incluyen un mayor límite elástico, una resistencia superior a la fatiga y la corrosión, un coeficiente de dilatación térmica más adecuado, así como una mayor resiliencia. Estas cualidades aseguran que el material no sólo resista las cargas aplicadas, sino que también mantiene su integridad con el paso del tiempo.

Tabla 4. Comparación entre aceros y aleaciones de aluminio [32].

	Aceros	A. Aluminio
		
Propiedades		
Peso específico	Alto	Bajo
Punto de fusión	Alta	Baja
Coefficiente de dilatación térmica	Baja	Alta
Resistencia eléctrica	Baja	Alta
Resistencia a la tracción	Alta	Baja
Límite elástico	Alta	Baja
Módulo elástico	Media-Alta	Baja
Límite de fatiga	Alta	Muy baja
Tenacidad	Alta	Baja
Resiliencia	Alta	Baja
Maquinabilidad	Buena	Sencilla
R. Corrosión	Alta	Media

Nota: Fuente propia

Una vez que se confirmó que los aceros eran la elección óptima para la fabricación del sensor, nos adentramos en la búsqueda de aleaciones disponibles en el mercado. En primer lugar, se consideró el uso de un acero ampliamente utilizado en diversas industrias para componentes automotrices, ejes, cigüeñales y otras aplicaciones, el SAE 4140. [33].

Otro aspecto que se evaluó fueron las aleaciones de alto contenido en silicio y magnesio, conocidas en la nomenclatura SAE como 9XXX. Estas aleaciones son ideales para la fabricación de resortes, muelles, herramientas de impacto y otras aplicaciones similares, debido a su excelente resiliencia y bajos módulos de elasticidad, así como su capacidad de recuperación tras deformación [34]. Finalmente, también se consideraron las aleaciones al carbono no resulturizado, categorizadas en la nomenclatura SAE como 10XX. Estas aleaciones son comúnmente utilizadas en la fabricación de ejes, pasadores, bridas y otros componentes industriales [35].

Para tomar la decisión más acertada en la selección del material, se tuvieron en cuenta diversas propiedades mecánicas, la disponibilidad en el mercado, la posibilidad de compra a granel, el

precio y otros factores relevantes; Para esto, en la [tabla 5](#), se compararon cada una de los aspectos a considerar para la selección del acero más adecuado .

Tabla 5. Comparación entre materiales para fabricación del eje [33,34,35].

SAE	1020	4140	9260
Composición química	Carbono (C): 0,18/0,23 Manganeso (Mn): 0,30/0,60 Fósforo Max. (P): 0,040 Azufres Max. (S): 0,050 Silicio(Si): 0,15/0,30	Carbono (C): 0,38/0,43 Manganeso (Mn): 0,75/1,00 Fósforo Max. (P): 0,035 Azufres Max. (S): 0,040 Silicio (Si): 0,15/0,35 Cromo (Cr): 0,80/1,10 Molibdeno (Mo): 0,15/0,25	Carbono (C): 0,55/0,65 Manganeso (Mn): 0,70/1,00 Fósforo Max. (P): 0,040 Azufres Max. (S): 0,040 Silicio(Si): 1,80/2,20
Resistencia a la tracción	393/540 Mpa	590/785 Mpa	600/680 Mpa
Límite elástico	310 Mpa	500 Mpa	380 Mpa
Dureza Brinell	180/220	210/240	190/210
Precio	Bajo	Bajo	Alto
Disponibilidad	Alta	Alta	Baja

Nota: Fuente propia

Luego de considerar cada una de las opciones, concluimos que el acero SAE 4140 fue la elección más apropiada para nuestro sensor, dadas sus cualidades mecánicas, disponibilidad en el mercado y costo adecuado para nuestro proyecto. Cabe destacar que un factor importante que influyó en la decisión fue la recomendación técnica de un asesor de la empresa Dimecol Ltda, una empresa con más de 50 años de trayectoria en el mercado metalmeccánico, el cual destacó la aleación por sus buenas propiedades a la resistencia a la torsión.

3.1.3. Diseño del eje

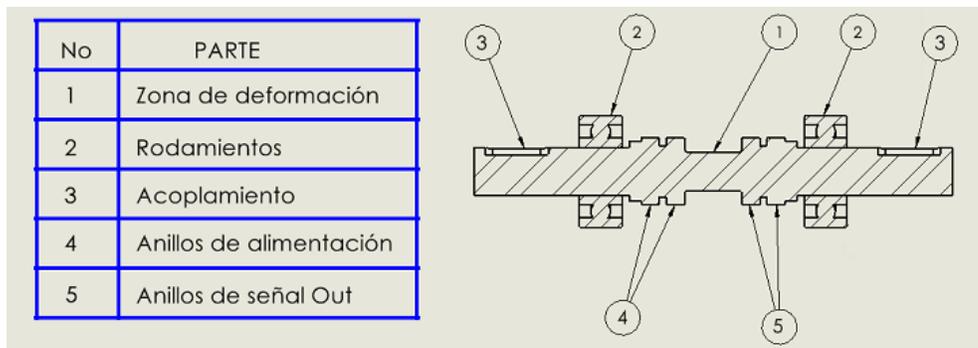
Posterior a la selección del material con el que se construiría el sensor, se procedió a determinar la geometría más adecuada para llevar a cabo la medición del torque mediante galgas extensiométricas uniaxiales, así como la medición de la velocidad de giro a través de un codificador. Para lograrlo, se comenzó por identificar las partes que compondrían el sensor.

3.1.3.1. Partes del sensor

Una vez se identificaron los principios físicos que se utilizarían para la medición de las variables, se determinaron las partes esenciales que debía tener el eje del sensor. Entre estas, se encontraba una zona de deformación destinada a la instalación de las galgas extensiométricas, que permitiera así la configuración de un puente completo de Wheatstone. Además, el eje debía disponer de una superficie que posibilite las conexiones mediante anillos para la transferencia de las señales de salida del puente y su alimentación.

Otra parte fundamental del eje fue la zona donde se instaló el codificador para el encoder óptico. Asimismo, se tuvo en cuenta el mecanismo de sujeción y acoplamiento que se usaría para unir el sensor con el motor y la carga. Una vez identificadas las partes del eje, en la [figura 12](#) se elaboró un plano esquemático en el que se consideraron todas las componentes necesarias para el eje.

Figura 12. Partes y geometría del sensor.



Nota: Fuente propia

3.1.3.2. Esfuerzos y zona de deformación

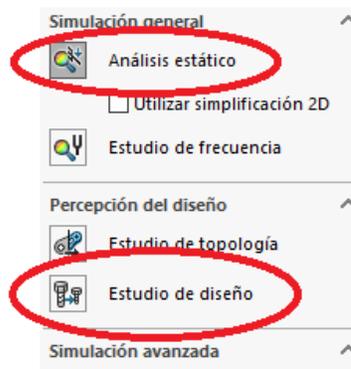
Para poder terminar la deformación máxima en la zona de deformación del sensor, lo primero que se realizó fue identificar cuáles son las especificaciones dadas por el fabricante de las galgas extensiométricas.

Una vez identificada la deformación máxima que la galga puede soportar, establecida en un límite de 20000 $\mu\epsilon$ para las galgas serie BF, se procedió a evaluar la máxima deformación que el material seleccionado puede experimentar antes de sufrir una falla.

En el proceso, se emplearon las herramientas de diseño proporcionadas por el programa SolidWorks para determinar el diámetro adecuado capaz de soportar una carga de 50 Nm, asegurando simultáneamente un factor de seguridad mínimo de 3. La elección de este factor de seguridad se basó en la consideración previa de que el sensor no estará sujeto a cargas de choque, ni a ciclos de carga o cambios bruscos de giro, como se mencionó anteriormente.

Cabe destacar que el sensor está fabricado con una aleación de acero, confiriéndole resistencia a la corrosión. Además, el entorno previsto para la utilización del instrumento no presenta condiciones ambientales que puedan derivar en fallos.

Figura 13. Simulación y estudio de diseño utilizados. Captura tomada del programa SolidWorks.



Teniendo en cuenta lo anterior, se programaron los siguientes parámetros en el estudio de diseño:

Tabla 6. Datos de estudio de diseño.

(a) Parámetros de material y carga. (b) Restricciones para simulador de diseño .

Material	
AISI	4140
Límite elástico	460 MPa
Límite a la tracción	731 MPa
Carga	
Magnitud	50 Nm
Tipo de carga	Torsión

Criterios de diseño:
Factor de seguridad ≥ 3
Deformación $\leq 0,002$ m/m
Deformación $\geq 0,0005$ m/m
Variables de diseño:
Diámetros zona de deformación
Diámetro entre 10 mm a 30 mm
Intervalos de 1 mm

Nota: Fuente propia (a)

(b)

Es importante resaltar que en las librerías de SolidWorks, el material AISI 4140 tiene un límite elástico de 460 MPa, el cual difiere de los 500 MPa que se había planteado inicialmente, sin embargo, este valor al ser más bajo que el inicial no tendría ninguna repercusión negativa, ya que haría que el diseño sea más conservador, el cual tendría menor probabilidad de falla.

El estudio de diseño implica la modelación de una geometría específica (ver [Figura 12](#)), la parametrización de condiciones iniciales (ver [Tabla 6a](#)) y la aplicación de restricciones que representan los objetivos deseados. Finalmente, se define el rango e intervalo para evaluar la variable clave: el diámetro de la zona de deformación (ver [Tabla 6b](#)).

Tabla 7. Valores de simulación del estudio de diseño.

		Actual	Inicial	Escenario 1	Escenario 2	.....	Escenario 6	Escenario 7	Escenario 8	.....
Radio Zona D		15mm	15mm	5mm	5.5mm	.....	7.5mm	8mm	8.5mm	.....
Deformación unitaria1	(0.000500 ~ 0.002000)	3,706e-04	3,706e-04	1,996e-03	1,561e-03	.....	6,440e-04	5,474e-04	4,721e-04	.....
Factor de seguridad mínimo1	< 3.000000	4,987e+00	4,987e+00	8,100e-01	1,011e+00	.....	2,483e+00	2,883e+00	3,600e+00	.....

Nota: Fuente propia

Luego de realizar el estudio de diseño, tal y como se evidencia en la [tabla 7](#), se identificó que el diámetro más apropiado para el diseño, es de 16 mm al aproximarse mejor a las restricciones establecidas, se llevó a cabo una prueba de tendencia de mallado. Esta prueba consiste en analizar los valores de la simulación de análisis estático al variar la calidad de la malla, desde un mallado grueso hasta uno fino. Posteriormente, se examinan estos datos para determinar las condiciones de mallado óptimas que conduzcan a los resultados definitivos, los resultados de este proceso se encuentran tabulados en la [tabla 8](#).

Tabla 8. Resultados de pruebas de tendencia de mallado.

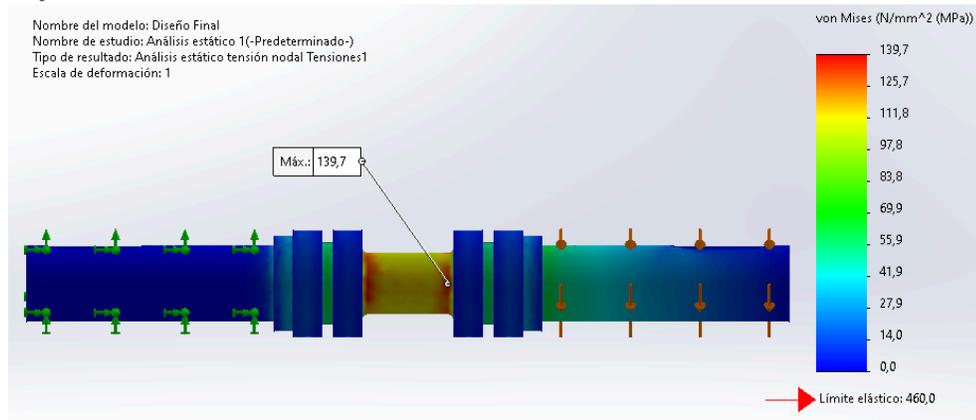
Malla Estandar	Tamaño mallado (mm)	Tensión Max (MPa)	Factor de seguridad	Deformación unitaria
<i>Gruesa</i>	8	150,3	3,1	0,000480
<i>Gruesa- Fina</i>	6,5	154,2	3	0,000466
<i>Media</i>	5	156,5	2,9	0,000501
<i>Media- Fina</i>	3,5	155,8	3	0,000515
<i>Fina</i>	2	158,9	2,9	0,000558
Promedio		155,14	2,98	0,000504
Desviación estandar		3,19	0,084	0,0000356

Nota: Fuente propia

Por último, el software realiza una representación gráfica de cómo se distribuyen los esfuerzos en el eje cuando está siendo sometido a una torsión de 50 Nm, tal y como se muestra en la [figura 14a](#). Además de esto, en la [figura 14b](#), el programa nos resalta cuál es la zona crítica de falla, la cual tiene un factor de seguridad mayor a 3 como se tenía planeado.

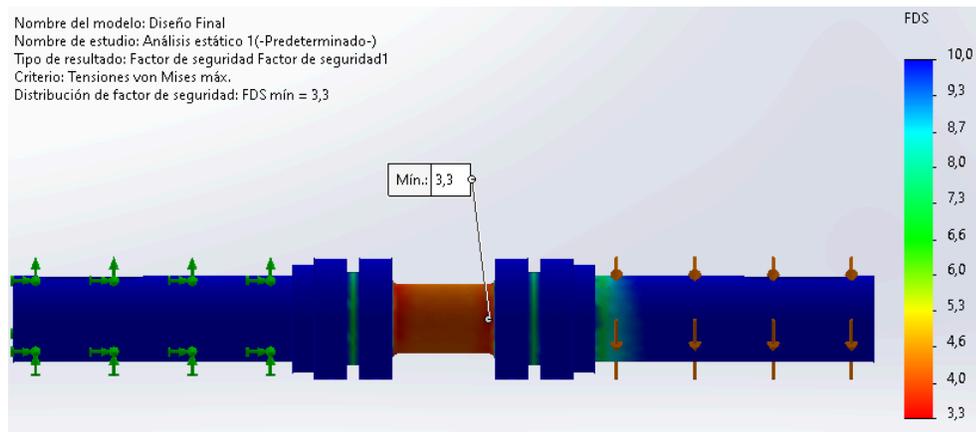
De igual manera, como se ve en los resultados de la simulación de la zona de deformación, [figura 13c](#), se logró determinar que se presentarán deformaciones unitarias adecuadas para que las galgas excéntricas puedan realizar una correcta medición.

Figura 14. Representación gráfica del eje en simulación (a) Esfuerzos de Von Mises, (b) Factor de seguridad y (c) Deformación unitaria.



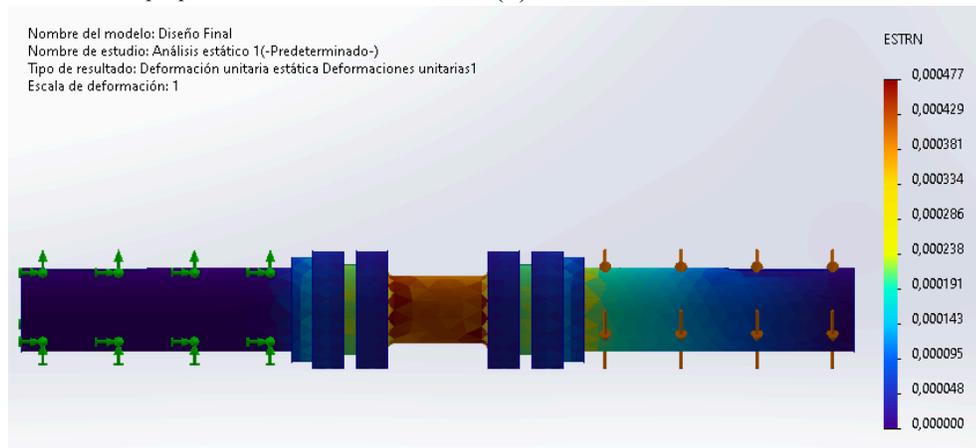
Nota: Fuente propia

(a)



Nota: Fuente propia

(b)



Nota: Fuente propia

(c)

3.1.3.3. Rodamientos y acoples

Una vez definida la zona de deformación, se procedió a seleccionar los rodamientos y acoples a utilizar. Para el caso del rodamiento, los requerimientos a tener en cuenta fueron tabulados en la [tabla 9](#):

Tabla 9. *Requerimientos para selección de rodamientos.*

Rodamientos	
Diámetro interno	20 mm
Ancho	< 35 mm
Tipo de rodamiento	De bolas una sola hilera
Velocidad límite	> 3200 rpm
Carga máxima	> 10 N
Método de sujeción	Ajuste deslizante (H6 o H7)
	Prisioneros

Nota: Fuente propia

Los requisitos mencionados surgieron de un diseño preliminar en el que se evaluó las dimensiones esperadas para la geometría del sensor. Estos parámetros establecieron límites para las dimensiones del rodamiento, optando por un rodamiento de bolas de una sola hilera para lograr un diseño estandarizado. Además, se asumió que el sensor no estaría sometido a cargas axiales.

Antes de elegir el tipo de rodamiento, por conveniencia se decidió realizar pruebas utilizando un rodamiento ya acoplado en una chumacera. Considerando los aspectos más importantes, los cuales quedaron tabulados en la [tabla 10](#), se llegó a la conclusión de que la mejor opción, tras evaluar diversas alternativas en el mercado, sería el uso de una chumacera modelo UCP204. Esta podría ser de la marca SKF, reconocida por su alta calidad, o de la marca C.G.T., ofreciendo una alternativa de menor costo sin comprometer las prestaciones necesarias.

Tabla 10. Comparación entre rodamiento en chumaceras.

Marca	Modelo	Diámetro Interno	Carga Estática	Ancho	Tipo	Sujeción	Características Principales
SKF	UCP204	20mm	6.7 kN	31mm	Bolas	Prisioneros a 90°	Alta calidad, prestigio en el mercado.
C.G.T.	UCP204	20mm	5.5 kN	31mm	Bolas	Prisioneros a 90°	Alternativa de bajo costo manteniendo prestaciones satisfactorias.

Nota: Fuente propia

Ya que el sensor es para un sistema de un proyecto universitario, se optó por la alternativa más económica, chumacera referencia UCP204 marca C.G.T, ver [figura 15a](#).

Figura 15. Imagen de referencia de chumacera. (a) y acople (b) seleccionados [36].

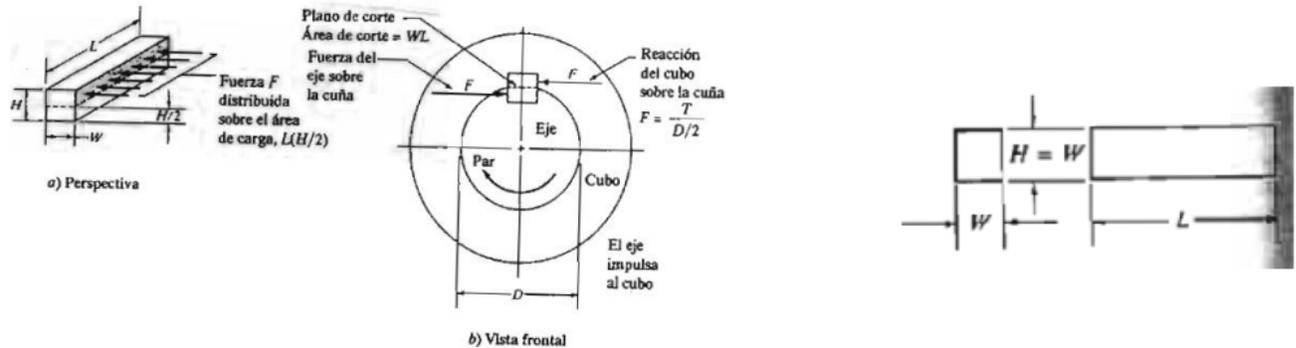


Para el caso del acople, se optó por el uso de un acople flexible tipo estrella, ver [figura 15b](#); Gracias a sus presentaciones, como lo son, la capacidad de absorber vibraciones, la resistencia a cargas medias y altas, permite cierto grado de desalinización ya sea angular o de deslizamiento, fácil instalación y mantenimiento y bajo costo.

Dicho acople se unirá al eje por medio de una cuña y un prisionero, el prisionero tendrá la función de limitar el movimiento del acople de manera axial con respecto al eje. Por otra parte, la cuña será la encargada de acoplar y transmitir la potencia del eje al acople flexible. Para esto, por medio del procedimiento del libro de diseño de elementos de máquinas de Robert L. Mott 4 edición, capítulo 11, diseño de cuñas, pág. 494, se realizó el diseño de la cuña [37].

Lo primero que se realizó fue identificar que tipo de cuña es la adecuada para el eje, para esto por medio de una tabla que se encuentra en la [figura 16](#) se determinaron las dimensiones transversales de la cuña.

Figura 16. Distribución de fuerzas en la cuña, y tamaño de cuña en función del diámetro del eje [37].



Tamaño nominal del eje		Tamaño nominal de la cuña		
		Altura, H		
Más de	Hasta	Ancho, W	Cuadrada	Rectangular
5/16	7/16	3/32	3/32	
7/16	9/16	1/8	1/8	3/32
9/16	7/8	3/16	3/16	1/8
7/8	1 1/4	1/4	1/4	3/16
1 1/4	1 3/8	5/16	5/16	1/4
1 3/8	1 3/4	3/8	3/8	1/4
1 3/4	2 1/4	1/2	1/2	3/8
2 1/4	2 3/4	5/8	5/8	7/16
2 3/4	3 1/4	3/4	3/4	1/2
3 1/4	3 3/4	7/8	7/8	5/8
3 3/4	4 1/2	1	1	3/4
4 1/2	5 1/2	1 1/4	1 1/4	7/8
5 1/2	6 1/2	1 1/2	1 1/2	1

Nota: Tomado del Libro: Robert L. Mott, "Diseño de elementos de máquinas", cuarta edición, capítulo 11 "Cuñas, acoplamiento y sellos", página 495, tabla 11-1, editorial Pearson, 2006.

Para el caso en cuestión, en donde el eje tendrá un diámetro D de 20 mm (0.787 pulgadas), el ancho W tendría un valor de 3/16 pulgadas (4.76 mm) y como se utiliza una cuña cuadrada, la altura H sería de 1/8 pulgada (3.17 mm). Una vez determinado el tamaño de la cuña, se procedió a calcular la longitud L por medio del siguiente modelo de fuerzas (Ver [figura 16](#)). Teniendo presente, que el torque máximo ejercido T será de 50 Nm, el factor de seguridad N se tomara de 3, y la resistencia de fluencia S_y del acero AISI 1020 CD es de aproximadamente 352 MPa .

La ecuación para poder determinar la longitud es: $L = \frac{4 T N}{D W S_y}$ (Ecuación 8)

Figura 16. *Distribución de carga en la cuña [37].*

Una vez calculado la longitud, el diseño de la cuña quedaría con los parámetros de la [tabla 11](#):

Tabla 11. *Dimensiones y material de la cuña.*

Ancho x Altura (WxH)	Longitud (L)	Material
3/16 x 1/8 Pulgadas	18 mm	Acero AISI 1020

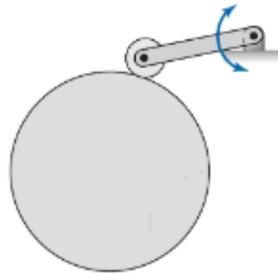
3.1.3.4. Anillos de comunicación y codificador.

Uno de los elementos fundamentales para el funcionamiento óptimo del sensor son los anillos de comunicación y el codificador, desempeñando un papel vital en el transductor. En el caso de los anillos de comunicación, su tarea principal consiste en la alimentación y recepción de señales analógicas del puente de Wheatstone. Sin embargo, estas conexiones presentan la particularidad de no ser estáticas debido a la rotación del eje, lo que demanda que las conexiones posibiliten la transferencia de señal entre un punto en movimiento y otro estático.

Para abordar este desafío, se diseñó una pieza que se montaría en el sensor, permitiendo la instalación de dos anillos conductores para la alimentación del puente y otros dos para la salida analógica. Esta pieza debía, además, aislar estos anillos entre sí y de la estructura metálica del eje.

Simultáneamente, se diseñó otra pieza que facilita la instalación de un seguidor de contacto (ver [figura 17](#)), manteniéndose estática y permitiendo las conexiones con el microcontrolador.

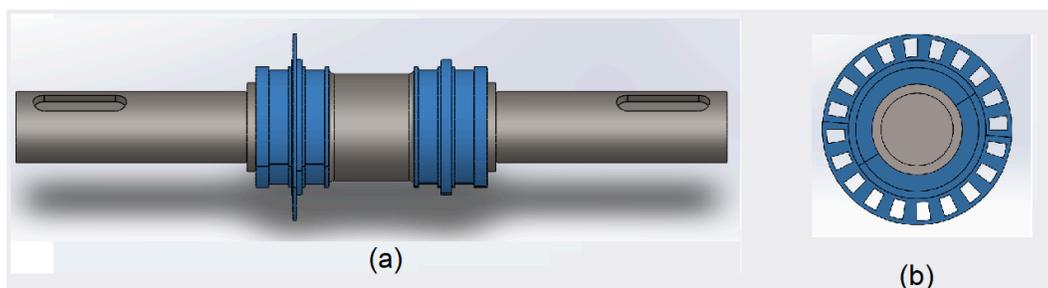
Figura 17. Ilustración de seguidor [38].



Adicional a los anillos de comunicación, el sensor requiere un codificador o disco dentado para medir la velocidad de giro mediante un sensor óptico. Por lo tanto, una de las piezas, además de satisfacer los requisitos mencionados previamente, debe incorporar el disco dentado. A su vez, el soporte estático debe contar con una estructura para posicionar el lector óptico, que permanecerá estático.

Una vez identificados los requerimientos para las piezas complementarias del sensor, se procedió a modelarlas mediante el software Solidworks. Inicialmente, se diseñaron las dos piezas que irían en el eje del sensor, instalándose en los extremos de la zona de deformación para facilitar las conexiones entre el puente de Wheatstone y los anillos.

Figura 18. Piezas para los anillos de comunicación y codificador. (a) Vista de perfil. (b) Vista transversal.

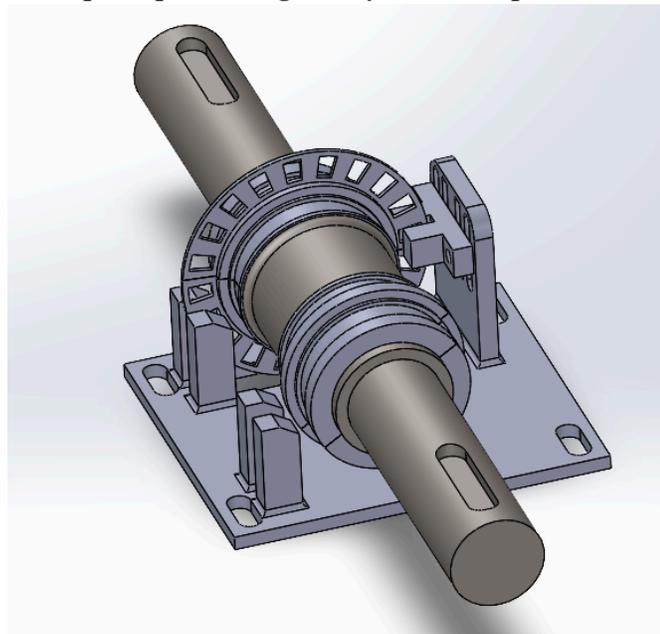


Las piezas diseñadas constan de dos elementos (ver [figura 18](#)), cada uno con dos ranuras para los anillos conductores. Una de estas piezas incorpora el disco dentado con 20 perforaciones. La

elección de este número de perforaciones se basó en el código lógico del sistema de medición de velocidad.

Con las piezas destinadas al montaje en el eje completas, se procedió al diseño del elemento estático que sostendría los seguidores y el lector óptico. Se ideó una superficie que cuenta con cuatro soportes, uno para cada seguidor, y un quinto soporte que permite ajustar la altura donde se posicionará el lector.

Figura 19. Diseño de piezas de soporte para el seguidor y el lector óptico.



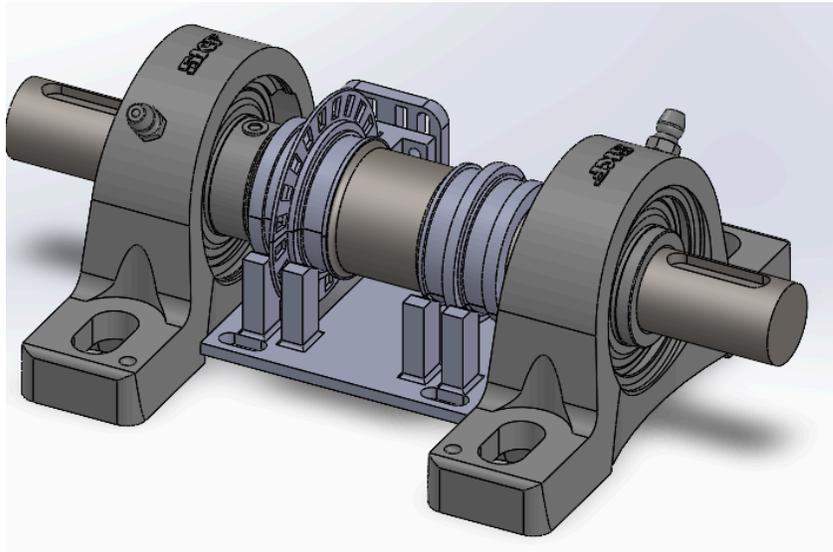
Una vez finalizados los diseños, se procedió a seleccionar el material con el cual se construirán dichas piezas. Para esto, se le dio prioridad al hecho de que este debe tener la capacidad de ser un soporte no conductor, para poder así aislar los anillos conductores. Cabe resaltar que, dichas piezas no van a estar sometidos a esfuerzos de gran magnitud.

Con todo lo anterior, preferiblemente, el material más idóneo para la fabricación de las piezas podría ser un polímero, el cual tenga una mediana resistencia. Por tal motivo, se optó por el uso del ABS como materia prima de fabricación.

3.1.4. Diseño final.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el diseño mecánico del transductor de torque se puede apreciar en la [figura 20](#).

Figura 20. Diseño mecánico del transductor de torque.



3.2. Diseño electrónico

El funcionamiento óptimo del prototipo depende de la unión entre los sistemas mecánico y electrónico, para el caso del último, posee diferentes bloques con funciones propias donde cada una de ellas es importante y su armonía nos garantiza resultados precisos y fiables. El bloque electrónico se divide en dos circuitos digitales y uno analógico, uno se encarga de medir la velocidad del motor, el otro es el microcontrolador, considerado el cerebro de todo el sistema, y por último un circuito de acondicionamiento analógico constituido por varias etapas que tratan y transforman una señal eléctrica de mínima amplitud a otra con las características necesarias para su lectura por el microcontrolador.

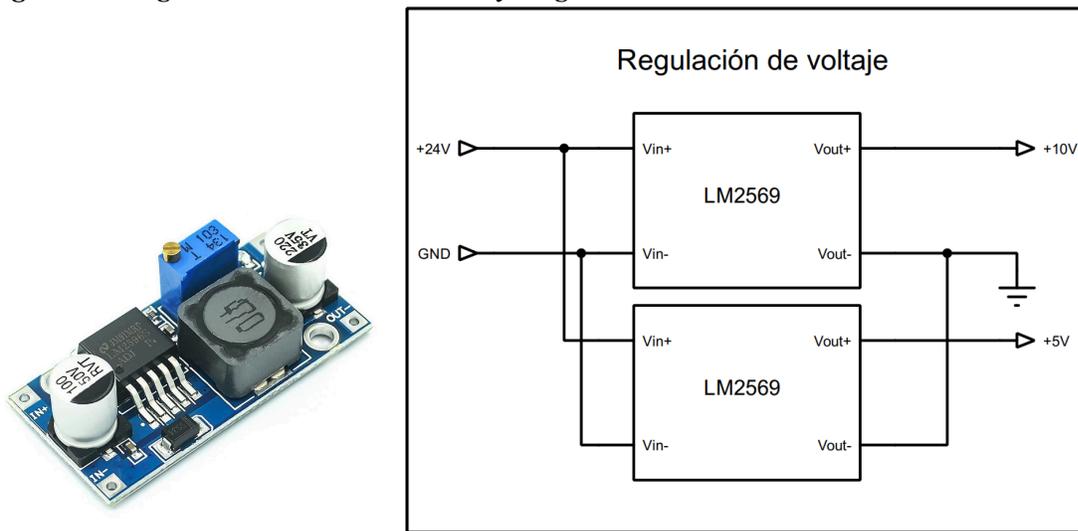
En la presente sección se explica de forma general el proceso de diseño para cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

3.2.1. Regulación de voltaje.

Debido a que el circuito utiliza dos niveles de tensión distintos se debe ajustar el voltaje de entrada a los óptimos para cada etapa. En el mercado existen dos tipos de reguladores de voltaje: Lineales y conmutados, los primeros son sencillos de implementar pero tienen una baja eficiencia, disipando la energía no utilizada en forma de calor, esto limita la entrega de corriente y hace necesario el uso de disipadores o etapas de potencia adicionales. Se optó por el método de regulación por conmutación para ambas etapas de alimentación ya que soporta mayores niveles de tensión y corriente con una eficiencia superior al 90% y una buena estabilidad en la tensión de salida, ajustando automáticamente la misma aunque la tensión de entrada sufra variaciones.

El modelo seleccionado es el LM2596 que acepta voltajes de entrada de hasta 35 V y una corriente de 3 A, uno de ellos se configuró para entregar una tensión de salida de 10 V que alimenta las fases de adquisición y acondicionamiento de señal. El segundo módulo se configura para entregar una tensión de salida de aproximadamente 5 V a la etapa digital, dicho valor es el recomendado para el regulador incluido dentro de la tarjeta de desarrollo.

Figura 21. Regulador de tensión LM2569 y diagrama de conexión.



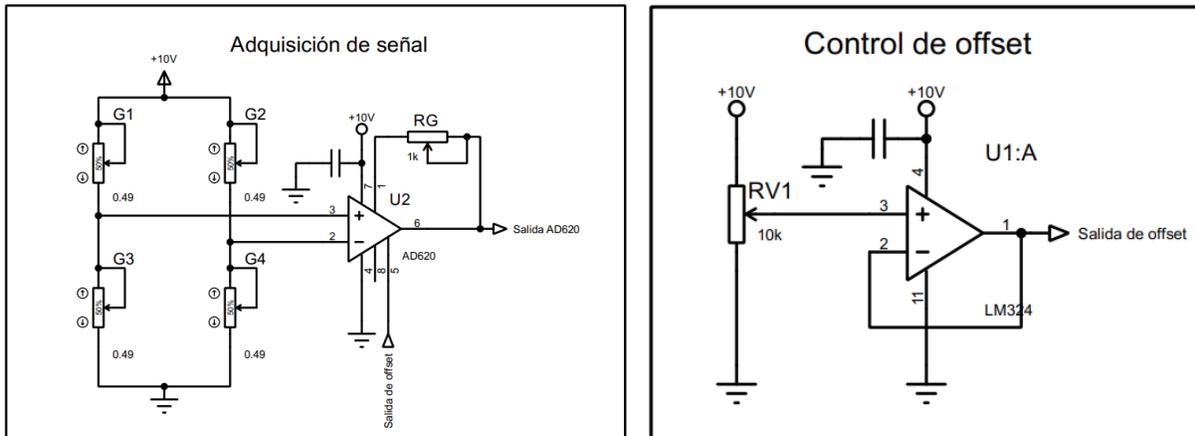
3.2.2. Adquisición de señal de torque.

La señal de torque se produce al aparecer una deformación en el eje, dicho cambio se mide mediante el uso de 4 galgas extensiométricas de 350Ω en configuración de puente de Wheatstone activo como se vio en la [figura 8](#). Las señales emitidas por el puente de Wheatstone consisten en una pequeña variación de voltaje que se encuentra en el orden de los milivoltios (mV) que para este caso puede ser calculada mediante el uso de la ecuación presente en la [figura 8](#), teniendo en cuenta la deformación de cada galga debido al torque ejercido sobre el eje se obtiene un rango de variación de tensión de 7.8 mV, para su correcta adquisición y tratamiento es necesario el uso de amplificadores especializados como lo son los de instrumentación por su alto rechazo de ruido en modo común.

Dicho lo anterior, se utilizó un amplificador de instrumentación AD620 dado a su alto nivel de comercialización, siendo este fácil de encontrar y ligeramente más económico que otras opciones de la competencia como la serie de amplificadores INA.

El AD620 es un amplificador diseñado para funcionar con fuente simétrica, es decir +/- Vcc, sin embargo en este proyecto se utiliza una fuente simple para la alimentación de todas las etapas del circuito, por ello se hace necesario establecer un GND virtual, que no es más que un nivel de offset en el voltaje de salida que actuará como punto cero o de referencia para la señal de entrada. El nivel de offset se establece aplicando el voltaje deseado en el pin 5 del AD620 mediante el uso de un amplificador de propósito general LM324. Esta etapa también cumple un papel importante a la hora de nivelar la señal de entrada, estableciendo esta en cero aunque tenga algún nivel DC en un inicio. La elección del LM324 se debe a que dicha referencia posee 4 amplificadores en un solo encapsulado, lo que permite implementar tanto esta etapa como la de filtración usando un solo integrado. Además, está diseñado para su uso con fuente simple.

Figura 22. Circuito de adquisición de señal con control de offset.



Dado que el AD620 no se considera Rail to Rail, existe una caída de voltaje tanto en V+ como en V- cuando el amplificador satura, al consultar el datasheet se obtiene el dato “Output swing” que corresponde a la caída de voltaje cuando el amplificador llega a saturación.

Figura 23. Hoja de datos AD620 [41].

AD620											
Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Common-Mode Rejection											
Ratio DC to 60 Hz with 1 k Ω Source Imbalance	$V_{CM} = 0\text{ V to } \pm 10\text{ V}$										
G = 1		73	90		80	90		73	90		dB
G = 10		93	110		100	110		93	110		dB
G = 100		110	130		120	130		110	130		dB
G = 1000		110	130		120	130		110	130		dB
OUTPUT											
Output Swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 2.3\text{ V}$ to $\pm 5\text{ V}$	$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		V
Overtemperature	$V_S = \pm 5\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$	$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.3$		V
Overtemperature		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		V
Overtemperature		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$		$-V_S + 2.3$	$+V_S - 1.5$		V
Short Circuit Current			± 18			± 18			± 18		mA

Teniendo en cuenta lo anterior y tras realizar pruebas de saturación al dispositivo con una alimentación de 10 V, se obtuvieron valores de saturación 9.26 V en Vcc y 0.687 V en GND.

Figura 24. Zona de trabajo real del amplificador AD620 con fuente simple.



Con el fin de aprovechar el mayor rango de voltaje posible, se calculó la ganancia del amplificador para amplificar la señal de entrada (11.5 mV a máximo torque) en un valor entre 330 a 500 veces mediante la fórmula:

$$G = \frac{49400}{R_g} + 1$$

G representa la ganancia del amplificador y R_g la resistencia que debe conectarse entre los pines 1 y 8 del integrado para establecer la ganancia deseada. Al aplicar la fórmula se obtienen valores de resistencia entre 100 Ω y 130 Ω .

El voltaje de salida esperado debe oscilar entre 1 V y 9 V que se encuentra dentro de la llamada “Zona útil”. En la práctica se optó por el uso de un trimmers para la resistencia de ganancia del AD620 y la etapa de offset con el fin de realizar los respectivos ajustes. La razón de optar por parámetros ajustables es permitir ajustes o calibraciones del equipo durante las pruebas fuera del simulador y así encontrar el valor de salida óptimo.

3.2.3. Acondicionamiento.

La señal de torque se considera un nivel DC que representa el nivel de dicha fuerza ejercido sobre el eje, en simulaciones la señal se observa de forma clara y limpia pero en la realidad existen gran cantidad de interferencias que pueden perjudicar en gran medida la fiabilidad de la señal obtenida por la etapa de adquisición. Dado a que el circuito de adquisición se encuentra conectado muy cerca de una carga inductiva se espera que el nivel de ruido inducido sea tal que la señal de salida se distorsione notablemente, por ende, se diseña un filtro pasa bajo de orden superior para, en caso de ser necesario, mitigar el ruido mencionado anteriormente con una respuesta lo más cercana posible a la ideal.

La frecuencia de corte fue establecida mediante pruebas físicas, acercando el circuito de adquisición de señal a un motor en funcionamiento controlado por un variador, dado que el variador utiliza señales PWM para poner en funcionamiento el motor, se presentaron picos en las frecuencias de 20 kHz y sus respectivos armónicos dentro de las mediciones realizadas ([figura 48](#)), por ende, se selecciona 18 kHz con el fin de eliminar el mayor ruido posible. Para el diseño del filtro de sexto orden se empleó [la tabla de aproximación Butterworth](#) con el fin de conseguir una respuesta de salida suave y sin sobreimpulso u oscilaciones.

Tabla 12. Tabla de aproximación Butterworth [43].

Orden	Aproximación Butterworth									
	Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3		Etapa 4		Etapa 5	
	kLP1	QLP1	kLP2	QLP2	kLP3	QLP3	kLP4	QLP4	kLP5	QLP5
2	1.0000	0.7071	----	----	----	----	----	----	----	----
3	1.0000	1.0000	1.0000	----	----	----	----	----	----	----
4	1.0000	0.5412	1.0000	1.3065	----	----	----	----	----	----
5	1.0000	0.6180	1.0000	1.6182	1.0000	----	----	----	----	----
6	1.0000	0.5176	1.0000	0.7071	1.0000	1.9319	----	----	----	----
7	1.0000	0.5550	1.0000	0.8019	1.0000	2.2471	1.0000	----	----	----
8	1.0000	0.5098	1.0000	0.6013	1.0000	0.9000	1.0000	2.5628	----	----
9	1.0000	0.5321	1.0000	0.6527	1.0000	1.0000	1.0000	2.8785	1.0000	----
10	1.0000	0.5062	1.0000	0.5612	1.0000	0.7071	1.0000	1.1013	1.0000	3.1970

La tabla de aproximación Butterworth presenta los valores de los coeficientes necesarios para diseñar un filtro del orden deseado utilizando etapas de filtros de orden 1 o 2 (véase la [figura 25](#)) y que su unión ([figura 26](#)) mantenga el tipo de respuesta seleccionada.

Figura 25. Configuración de filtro pasa bajos, segundo orden.

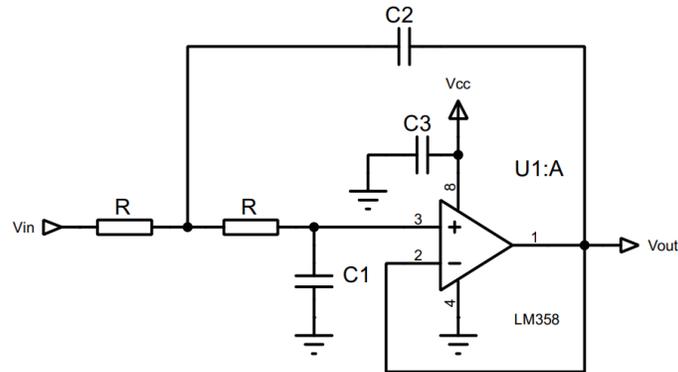
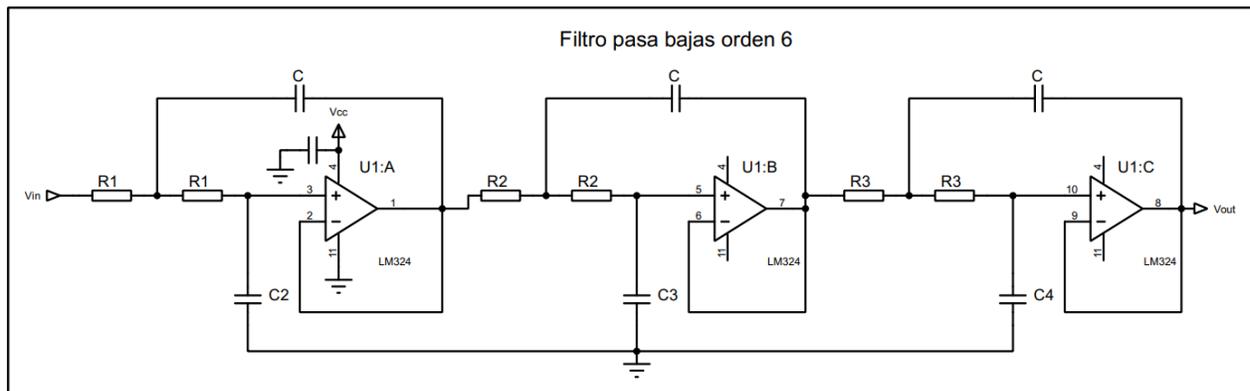


Figura 26. Esquema de filtro pasa bajos de orden 6.



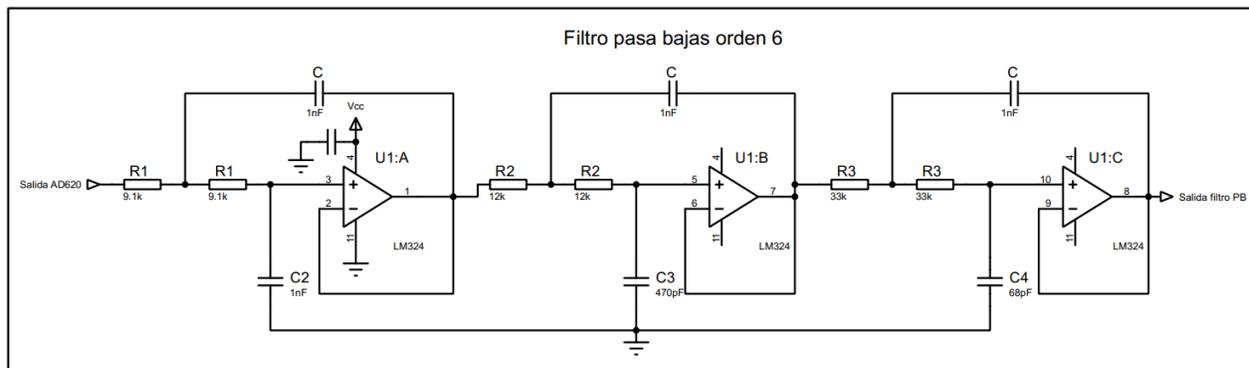
EL procedimiento de diseño se realiza mediante las ecuaciones de diseño $Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$

(Ecuación 9) y $fc = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}}$ (Ecuación 10) donde Q es el factor de calidad del filtro que indica el nivel

de pendiente en la respuesta del filtro, mayores niveles de Q se obtiene una mejor aproximación a la

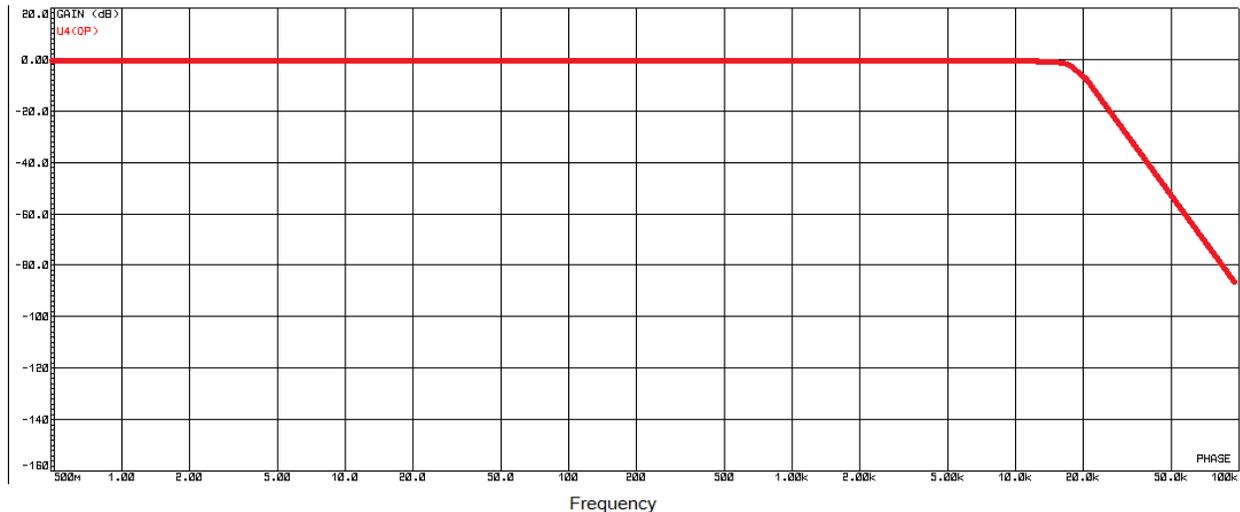
respuesta de un filtro ideal pero con el costo de tener oscilaciones en frecuencias cercanas a la de corte, por el contrario, bajos valores de Q dan una respuesta sin oscilaciones pero menos agresiva para cortar las frecuencias posteriores a la de corte. Los filtros Butterworth son aquellos con una respuesta más suave en todo su rango ([figura 28](#)), los valores de Q a utilizar nos los brinda la tabla de aproximaciones vista anteriormente. La variable C hace referencia a los condensadores del montaje, C2 (C en la figura 26) se asume con valores comerciales ya que estos elementos son los más difíciles de ajustar en caso de obtener otros valores, en este caso se escoge 1 nF, los demás se calculan despejando C1 en la **ecuación (1)** y reemplazando el Q específico de cada etapa. Por último, la R representa los resistores, estos se calculan mediante la **ecuación (2)** y se aproximan al valor comercial más cercano. Tras realizar los cálculos para una frecuencia de corte de 18 kHz obtenemos el circuito presentado en la [figura 27](#).

Figura 27. Diagrama final de filtro pasa bajos



Una vez calculados los valores de los elementos pasivos se debe comprobar que los resultados sean los esperados, para ello se realiza un análisis de frecuencia al filtro, lo que corrobora que la respuesta y frecuencia de corte corresponden con las deseadas. Los resultados se evidencian en la [figura 28](#).

Figura 28. Comportamiento del filtro en diagrama de Bode (Eje Y amplitud en dB, eje X frecuencia en Hz)



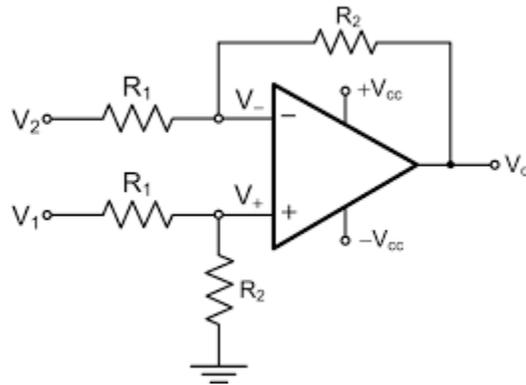
3.2.4. Ajuste de voltaje para ESP32

Por último se ajusta el voltaje de salida a los niveles óptimos permitidos por el microcontrolador ESP32, que van de 0 V a 3.3 V como máximo. El procedimiento se realiza mediante un divisor de tensión o potenciómetro que reduce la variación de voltaje de 8 V a 3.3 V y un restador activo con ganancia unitaria para ajustar el offset de la GND virtual de 5 V a 1.65 V. Se utiliza la referencia LM358 ya que esta, al igual que el LM324, está diseñada para funcionar con fuente simple, su salida puede alcanzar un nivel mínimo de 20 mV y un máximo de $V_{cc} - 1.2$ V, con una alimentación de 5 V resulta perfecto para funcionar como un método de protección contra sobrevoltaje en la entrada del microcontrolador ya que la salida alcanza un nivel máximo de 3.8 V y este último es reducido a 3.3 V gracias a un diodo zener de referencia 1N4728A.

El diseño del restador se realiza utilizando la topología mostrada en la [figura 29](#) cuya función de salida queda expresada mediante la ecuación $V_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$ (Ecuación 11). Asumiendo que

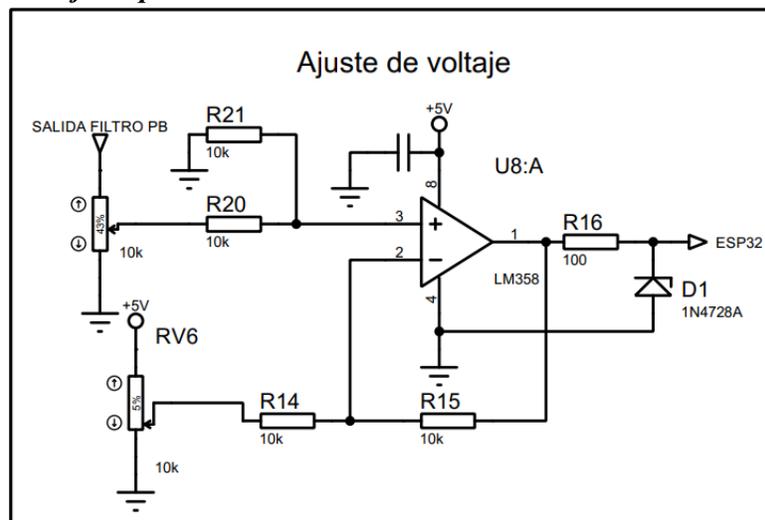
todas las resistencias son iguales, obtenemos una ganancia unitaria, lo que significa que la salida refleja la resta de las dos señales de entrada $V_o = v_2 - v_1$ (Ecuación 12).

Figura 29. Amplificador operacional en configuración restador



Por último, dado que el sistema es capaz de medir la deformación mecánica en ambos sentidos, la señal de salida de esta etapa es un nivel DC cuyo punto cero es 1.65 V, con ello en mente, el rango de voltaje que se entrega al microcontrolador varía entre 20 mV hasta 3.3 V, siendo los valores menores a 1.65 V el torque ejercido en un sentido y los valores mayores representan el otro sentido. El circuito final se representa en la [figura 30](#).

Figura 30. Circuito de ajuste para la señal de salida

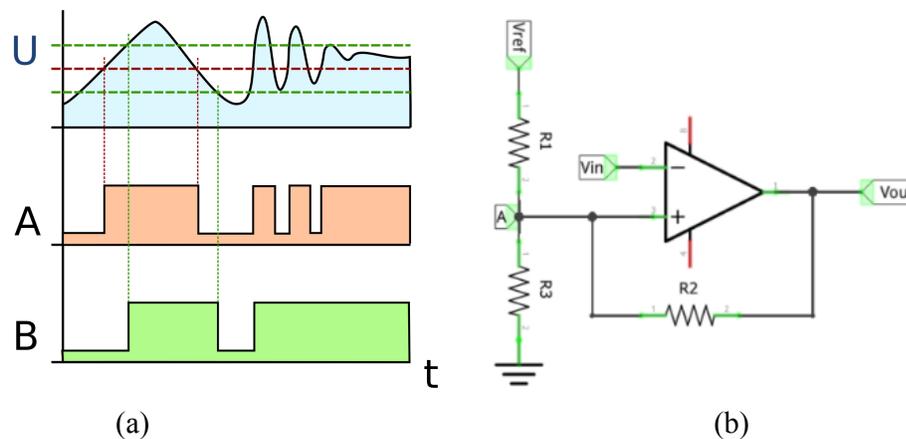


3.2.5. Adquisición de señal de velocidad

La medición de RPM se realiza mediante la incorporación de un encoder óptico constituido por una rueda con 20 ranuras fijada en el eje y un par emisor receptor que permanecen estáticos en la base. El método utilizado para medir la velocidad se basa en el uso de interrupciones externas y temporizadores para medir el tiempo transcurrido entre cada ranura y con ello calcular las RPM aproximadas. El motivo de la selección de las 20 ranuras se debe a su difusión comercial, entre más ranuras posea el disco, mejor precisión tiene el sistema al momento de medir la velocidad, pero acarrea un aumento en los requerimientos y potencia del microcontrolador, además de necesitar procedimientos más costosos para la fabricación del disco con muchas ranuras, por ende, 20 ranuras nos da un equilibrio y la posibilidad de conseguir repuestos más fácilmente.

El circuito encargado de realizar el registro de la velocidad se basa en un amplificador en configuración comparador con histéresis o mejor conocido como Schmitt Trigger (véase la figura 31), esto último para reducir los cambios de estado no deseados debido a ruido dentro de la señal, de este modo la señal que se le entrega al microcontrolador es más estable y consistente.

Figura 31. (a) Comportamiento de amplificador con histéresis [42]., (b) Topología de un Schmitt trigger inversor no simétrico.

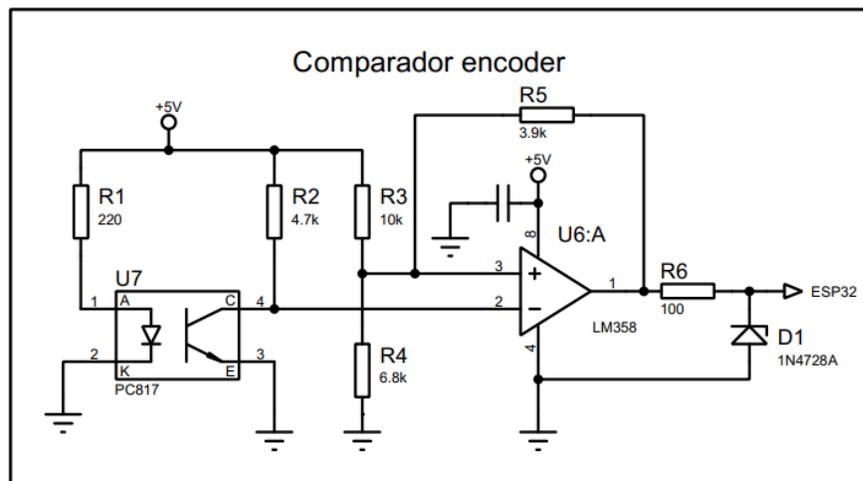


El cálculo de los límites superior e inferior obedecen a las ecuaciones $H_{high} = \frac{V_{cc} * R_3}{(R_1 || R_2) + R_3}$

(Ecuación 12) y $H_{low} = \frac{V_{cc} * (R_3 || R_2)}{(R_3 || R_2) + R_1}$ (Ecuación 13), las operaciones representadas con los símbolos “||”

representan el paralelo entre las dos resistencias, aplicando las ecuaciones obtenemos un umbral inferior de 1 V y uno superior de 3.54 V pero debido a que el amplificador en la realidad presenta una caída de tensión en su estado alto, altera los resultados del umbral superior, reduciéndolo a 3 V. El esquema completo de esta etapa se puede apreciar en la figura 32.

Figura 32. circuito de medición de velocidad



3.3. Construcción del sensor e implementación de sistema IoT

El proceso de construcción del sistema de monitoreo se llevó a cabo en tres etapas: Construcción del sensor en base al diseño mecánico preestablecido, implementación del sistema microcontrolado con sus respectivas etapas de acondicionamiento y finalmente el diseño de los algoritmos de recepción, almacenamiento y presentación de datos mediante un formato para informes quincenales utilizando Google Apps Script.

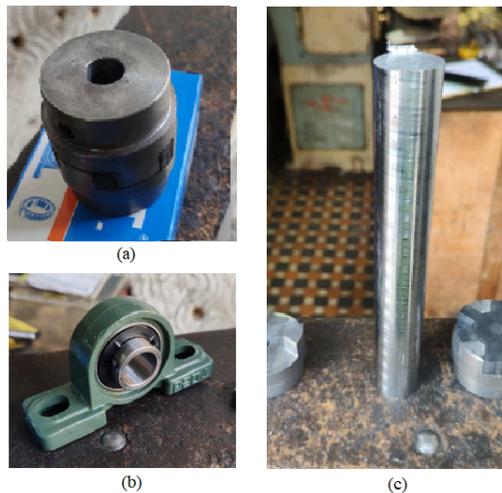
3.3.1. Construcción del sensor:

La construcción del sensor se dividió en tres partes. En la primera etapa, se llevó a cabo la construcción del eje. En la segunda, se fabricaron los anillos y piezas plásticas necesarias. Por último, se completó el proceso con el ensamblaje final del sensor.

3.3.1.1. Construcción del eje

En el proceso de construcción del eje, se adquirió de una barra de acero SAE 4140 con un diámetro de 1 y 1/4 de pulgada y una longitud de 210 mm, a través de la empresa Dimecol Ltda. Además, se adquirieron las chumaceras y los acoples necesarios. Con los materiales en mano, se llevó a cabo la fabricación del eje y la adaptación de los acoples conforme al diseño mecánico, mediante un centro de mecanizado.

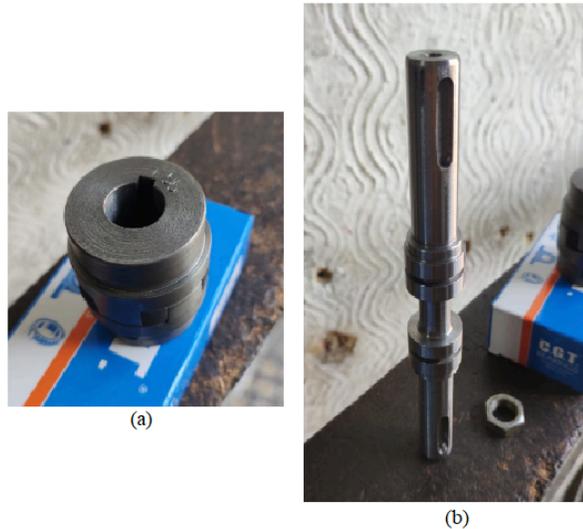
Figura 33. Piezas y material a maquinar. (a)Acople, (b)Chumacera y (c)Barra de SAE 4140.



En el centro de mecanizado, se utilizaron máquinas y herramientas como el torno, que desempeñó un papel crucial en la maquinación de la mayor parte del eje y en la realización del mandrinado para el acople. Además, se empleó una fresadora universal para generar los cuñeros en

los acoples y las chavetas en el eje, durante el procesos de maquinado, siempre se aseguró la más alta precisión y la calidad durante los procesos de fabricación.

Figura 34. Piezas maquinadas. (a) Acople maquinado y (b) Eje maquinado



3.3.1.2. Construcción de los anillos y codificador

En la manufactura de los anillos y el codificador, se optó por la técnica de fabricación aditiva mediante impresión 3D en resina debido a la complejidad del diseño y la inviabilidad económica de la fundición por moldes. Se escogió la resina en lugar del filamento por su capacidad para proporcionar un acabado superficial de alta calidad con una resolución de hasta 0.05 mm, en comparación con los 0.14 mm de resolución máxima del filamento. Es importante señalar que las resoluciones mencionadas hacen referencia al espesor de la capa de la impresión, los datos fueron proporcionados por las empresas que ofrecen este servicio. Por otro lado, el material a utilizar es la resina ABS ya que esta cumple de manera satisfactoria con todos los requisitos de diseño, en especial una mayor resistencia al calor y esfuerzos mecánicos.

Figura 35. Piezas impresas en resina 3D.



En el caso de los anillos conductores, están fabricados a base de partes recicladas de sistemas de refrigeración, específicamente filtros de humedad ya desechados. La elección de estos filtros se debe a composición de cobre, un excelente conductor eléctrico con alta resistencia al calor y la fricción, haciéndolo ideal para su aplicación. El proceso de fabricación implicó el corte de dichos filtros, obteniendo anillos con un diámetro similar al deseado. Además, esta decisión también tuvo el propósito de brindar una segunda vida útil a los filtros, contribuyendo así a la reutilización de materiales.

Figura 36. Fabricación de anillos de cobre. (a) Material base y (b) Anillos cortados.



(a)



(b)

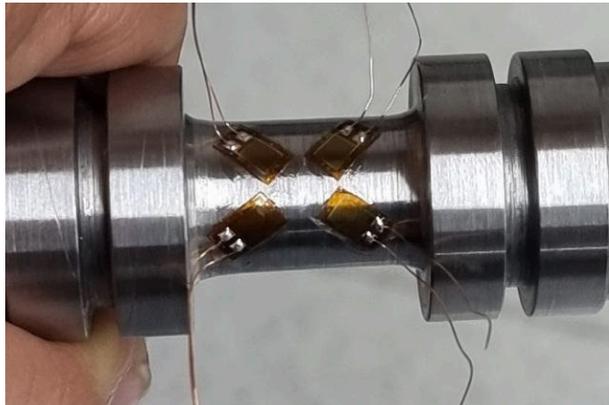
3.3.1.3. Ensamble

Tras la fabricación de cada componente, se da inicio al proceso de ensamblaje del sensor. En esta fase no solo se integraron las piezas previamente fabricadas, también se fijaron las galgas extensiométricas en la zona de deformación del eje.

Siguiendo un orden cronológico, como primera tarea se instalan las galgas extensiométricas con el uso del pegamento instantáneo Loctite super bonder pincel [44]. La elección de este adhesivo se basa en la recomendación de los diferentes fabricantes de las galgas extensiométricas, quienes sugieren el uso de pegamentos de cianoacrilato o metacrilato. Esto asegura una fijación confiable y consistente de las galgas extensiométricas en el área designada del sensor [45].

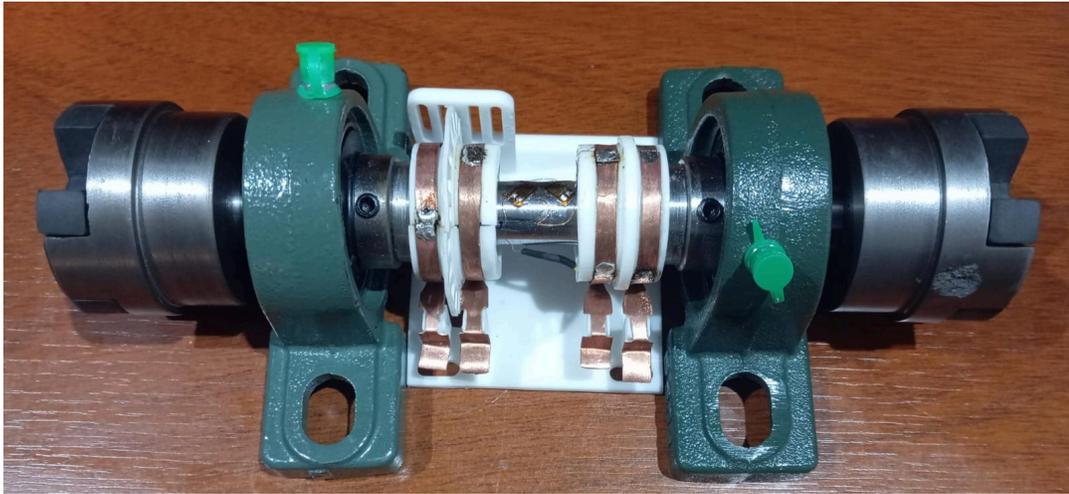
El proceso de instalación de las galgas extensiométricas inicia con la preparación del eje, para ello se siguen los siguientes pasos: limpieza de la superficie con alcohol isopropílico, pulido de la zona destinada a las galgas, marcación de la orientación y posición de cada galga, y finalmente, se adhieren las galgas asegurándose de que estas quedan firmes en toda su extensión. Este enfoque metódico garantiza una instalación precisa y robusta de las galgas extensiométricas en el sensor.

Figura 37. Galgas extensiométricas instaladas en el eje.



Por otro lado, al igual que con las galgas, las piezas en resina se adhirieron al eje usando pegamento instantáneo, una vez ensamblada la estructura, se realizan las conexiones entre las galgas y los anillos de cobre para su alimentación y transmisión de señal.

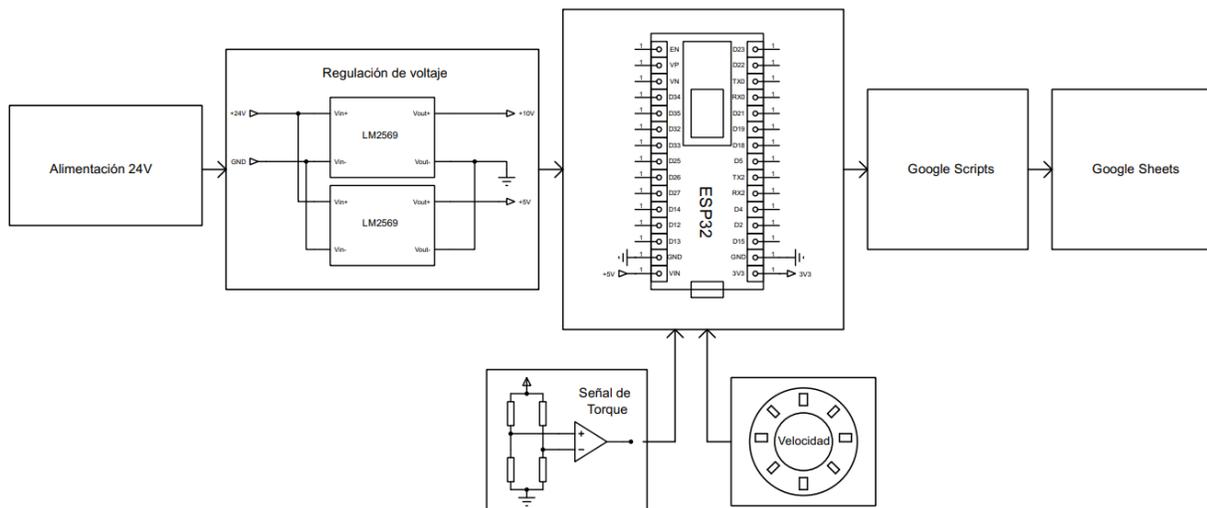
Figura 38. Ensamble final.



3.3.2. Implementación de microcontrolador

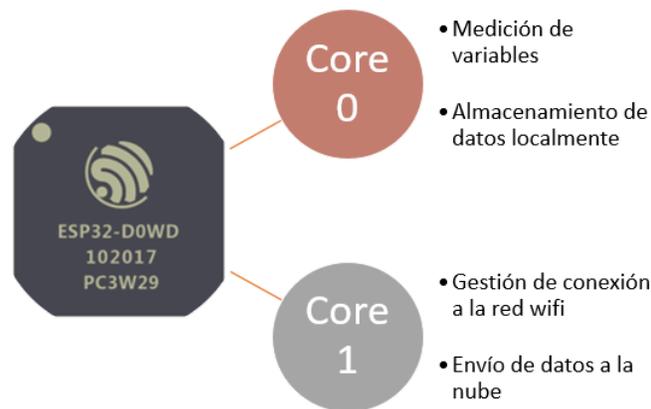
El microcontrolador ESP32 es el cerebro del sistema, encargado de leer las señales provistas por el sensor, posee un ADC de 12 bits de resolución para leer con mejor fidelidad la señal de torque, dos núcleos a 240 MHz de velocidad para registrar las numerosas interrupciones producidas por el encoder y realizar las diferentes tareas de forma rápida. Además, integra conectividad WIFI para enviar los datos en forma de paquetes a la nube mediante protocolo HTTP, el diagrama de bloques ilustrado en la [figura 39](#) muestra a grandes rasgos el diseño del sistema.

Figura 39. Diagrama de bloques del sistema general.



El microcontrolador posee dos núcleos independientes llamados “Cores” que se encargan de tareas específicamente asignadas, para este caso el Core 0 se encarga de la lectura continua de los datos proporcionados por las etapas de acondicionamiento de torque y velocidad, el ADC toma lecturas a una frecuencia de 50 Hz, por otro lado, la señal de velocidad al funcionar por el método de interrupciones, toma una medida cada vez que el haz de luz es visible por el fototransistor. El Core 1 tiene la función de gestionar la conexión a internet, es decir, la conexión con la red WIFI, y preparar muestras de los datos obtenidos para realizar el envío a Google App Script.

Figura 40. Distribución de programas en los diferentes núcleos.



3.3.3. Sistema de almacenamiento de datos

El sistema de transmisión y almacenamiento de datos se compone de dos bloques importantes, por un lado se encuentra la etapa electrónica, encargada de la recolección, procesamiento y transmisión de los datos, y por otro lado se encuentra el bloque de software, que se encarga de recibir los datos, organizarlos y almacenarlos por un tiempo determinado, para su uso en analíticas e informes.

Los datos se transmiten mediante protocolo HTTPS a Google Script, el cual recibe y clasifica los datos según el nombre de su variable, dentro de los datos transmitidos se encuentra la velocidad del motor, torque aplicado a la carga, estado actual del motor y si aplica, el estado de alarma.

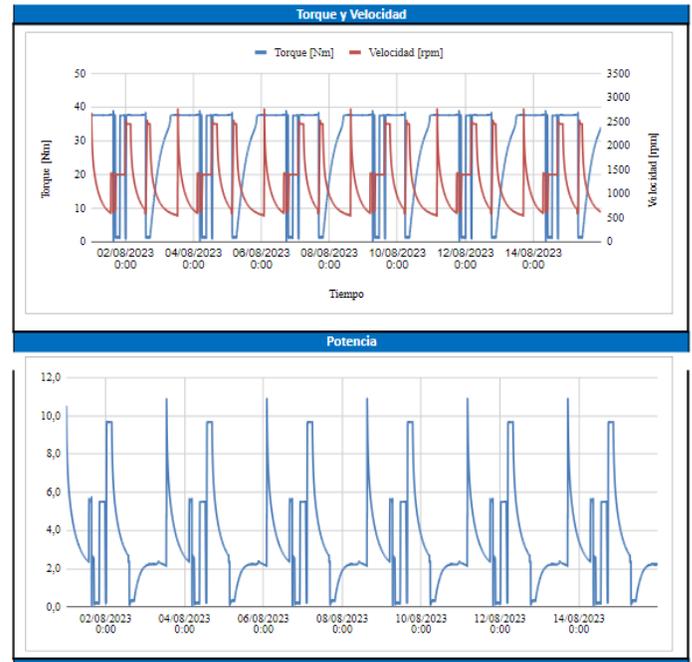
3.3.3.1. Formato de informe de datos almacenados

Habiendo almacenado ya los datos en Google Sheets, se ha diseñado el formato del informe que contendrá la información recopilada de los últimos 15 días. En este formato, se incluirá la información general del sensor, como su capacidad en torque y velocidad, así como la resolución de cada magnitud. Además, se brinda al usuario la posibilidad de especificar los rangos nominales y tolerancias del sistema bajo monitoreo. Esto permite que, si el sensor registra datos fuera de estos rangos, genere alarmas que se reflejan en el documento.

El informe proporcionará un resumen general de los datos registrados, incluyendo el número total de datos, el intervalo entre ellos y las fechas de inicio y final del registro. Por último, se incluirán algunos datos estadísticos, como el promedio de cada magnitud y los valores máximos y mínimos registrados. El diseño final del formato se encuentra en la [figura 41](#).

Figura 41. Formato del informe.

UAN UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO		INFORME DE MONITOREO		FIMEB FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRÓNICA Y ENERGÍA	
Información general					
Fecha generado	##Fecha en la cual se genera el informe		ID:	1f6xxxEvRWBp9aLpK56n 47EVOErPr-U	
Todos los tiempos mostrados se basan en UTC -5:00 (Colombia) y en formato 24 horas [DD/MM/AA HH:MM:SS]					
Datos del sensor					
Modelo:	D&E T50V35	Ubicación:	UAN-Sur Bloque 3		
Código:	LIMES ###	Serial:	503500-0001		
Medición de torque	Rango: [1 - 50]	Resolución: 0,1	Unidad: Nm		
Medición de velocidad	Rango: [0 - 3200]	Resolución: 0,1	Unidad: rpm		
Descripción:	Sensor de torque y velocidad IoT para motores electricos.				
Información del sistema monitoreado					
Tipo de Motor:	Inducción	Conectado a:	Banda transportadora	Marca:	Siemens
Serie:	N.I	Modelo:	CPM 100	Voltaje/Consumo:	240V / 1,3A
Rangos de uso:	Potencia:	Torque:	Velocidad:		
	Limite superior:	#Tmax	Vmax		
	Limite inferior:	Tmin	Vmin		
Resumen de grabación					
Información de grabación	Fecha y hora de inicio	Intervalo de grabación:	Horas	Minutos	Segundos
Tiempo finalizado:	Fecha y hora finalización	Duración de grabación:			
Numero de datos:	##datos				
Sensor de torque	Maximo	Minimo	Promedio	Unidad	
Sensor de velocidad				Nm rpm	
Activación de alarmas					
Tipo de alarma	N. Alarma	Mayor difrencia	Hora de inicio	Duracion	Medicion



3.4. Calibración y puesta a punto del sensor

Una vez completada la construcción del sistema de monitoreo, integrando todas sus partes, se procedió a llevar a cabo las mediciones necesarias para determinar las curvas características de cada uno de los sensores. Inicialmente, utilizando un sistema de palanca, se registraron los datos de las señales de salida del transductor de torque, expresadas en mV, en relación al par torsional aplicado al sensor.

Posteriormente, se realizó la verificación y ajuste del sistema de velocidad angular, asegurándose de que la frecuencia de lectura fuera la correcta y corrigiendo cualquier desviación estimada. Para determinar dicha corrección, se compararon las lecturas del sensor de velocidad con las lecturas de un patrón de referencia calibrado.

Finalmente, después de ajustar cada uno de los sensores, se llevó a cabo la calibración del sistema. En el caso del transductor de torque, se siguió la norma Euramet cg-14, mientras que para el sensor de velocidad se realizó una calibración por comparación directa, siguiendo así los conceptos de la guía Meta y basándose en el documento titulado "Métodos de Medición, Prueba y Calibración". Este enfoque no solo garantizó una calibración confiable y rigurosa, sino también se intentó asegurar en la medida de lo posible la trazabilidad y la confiabilidad del sistema de monitoreo.

3.4.1. Sistema palanca

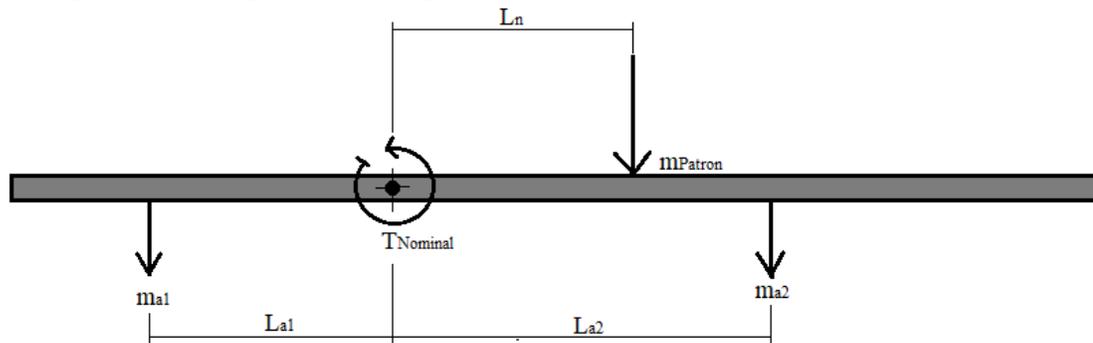
Para estimar la curva característica del transductor de torque, se implementó un sistema de palanca que aplica un torque constante y controlado al sensor, permitiendo así la medición de las señales de salida. El banco diseñado para este propósito debía tener la capacidad de generar torque en todo el rango de lectura del sensor, que abarcaba desde 5 Nm hasta 50 Nm.

El banco se configuró montando el eje en chumaceras, las cuales sostenían el sensor, permitiéndole un movimiento libre de rotación. Adicionalmente, mediante acoples, un extremo del sensor se fijó a una base, mientras que en el otro extremo se instaló una palanca con varias muescas perforadas a distancias específicas. Esto posibilita variar la posición de la masa con respecto al centro del eje, alterando así el torque aplicado al sensor de manera controlada.

3.4.1.1. Diseño de sistema de palanca

El diseño del sistema de palanca, consistió en calcular la ubicación de cada una de las muescas donde iba a ser ubicada la masa patrón, la cual iba a generar el torque necesario al sensor. Dado que el método de calibración de la Euramet sugiere la realización de al menos 5 mediciones con diferentes valores nominales, se seleccionaron los puntos de medición de 5 Nm, 15 Nm, 25 Nm, 35 Nm y 50 Nm. Esta elección garantiza una cobertura completa de todo el rango de medición del transductor.

Figura 42. Diagrama de cuerpo libre de la palanca de medición.



$\sum M:$

$$T_{Nominal} = m_{Patron} \cdot L_n + m_{a1} \cdot L_{a1} + m_{a2} \cdot L_{a2} \text{ (Ecuación 14)}$$

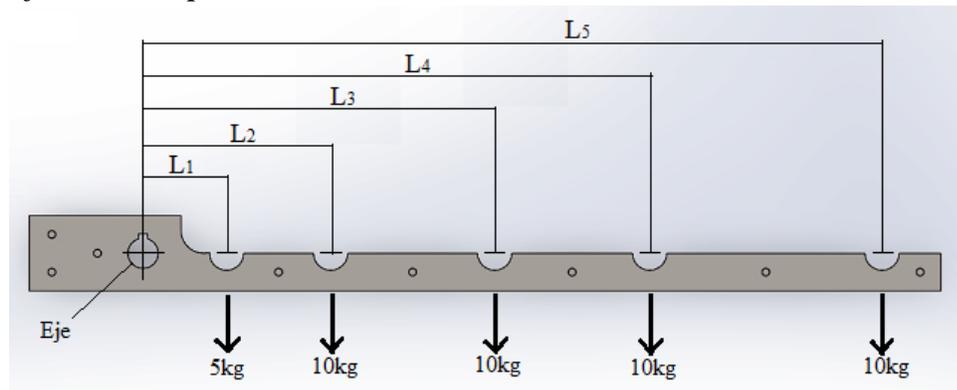
Para determinar la ubicación precisa de cada muesca en el sistema de palanca, se empleó un diagrama de cuerpo libre, ver [figura 42](#), identificando las cargas que se aplicarían a la palanca. El proceso de cálculo se llevó a cabo mediante un método iterativo. En la primera iteración, la distancia L_n se calculó considerando exclusivamente la ubicación de la masa . A partir de esta primera aproximación, en las iteraciones siguientes se incorporaron otros factores, como la masa m_{an} de la propia palanca, para lograr una mayor precisión en la determinación de las ubicaciones finales de las muescas. Este enfoque iterativo permitió refinar y ajustar de manera efectiva la ubicación de cada punto de medición en la palanca, cada una de las interacciones están en la siguiente [tabla 13](#).

Tabla 13. Iteraciones de las distancias para la palanca de medición.

	Torque (Nm)	Masa (kg)	Numero de iteraciones				
			1° (mm)	2° (mm)	3° (mm)	4° (mm)	5° (mm)
L1	5	5	101,94	43,89	54,86	54,96	54,94
L2	15	10	152,91	123,88	129,37	129,42	129,41
L3	25	10	254,84	225,82	231,30	231,35	231,34
L4	35	10	356,78	327,76	333,24	333,29	333,28
L5	50	10	509,68	480,66	486,15	486,19	486,19
	Δ en %			5,69%	1,14%	0,01%	0,00%

Una vez determinada la distancia de la ubicación de las muescas, el diseño de la palanca quedó como se muestra en la [figura 43](#), en esta se representa el diseño de la palanca que se utilizó para la calibración del sensor, de bajo de cada muesca se encuentra un peso, el cual indica el peso que se quiere para general el torque calculado, por ejemplo, en la muesca a la distancia L_2 , con un peso de 10 kg, se obtiene un torque nominal de 15 Nm.

Figura 43. Vista frontal de la palanca de medición.



La palanca fue fabricada en lámina hr (hot rolled) de 4.5mm de espesor, a través una mesa de corte láser. El ensamblaje consiste en dos láminas las cuales están distanciadas por medio de tornillos que cumplen la función de separadores. En la [figura 44](#) se muestra el resultado final.

Figura 44. Palanca ya fabricada y ensamblada. (a) vista frontal y (b) vista superior



(a)



(b)

3.4.1.2. Pruebas de carga

Ya habiendo diseñado y montado el sistema de palanca, se procedió a tomar las mediciones. Para esto, se realizó un procedimiento, el cual se encuentra en uno de los anexos de la guía Euramet, ver [figura 45](#), el procedimiento consiste en realizar 3 cargas a capacidad máxima, luego realizar una prueba ascendente y una descendente, y por último para determinar la repetibilidad se vuelve a realizar una prueba ascendente. La guía Euramet, además de esto, pide determinar la reproducibilidad del sensor, para este se vuelve a realizar una prueba de carga máxima, y una ascendente y una descendente pero en distintos ángulos.

Figura 45. Procedimiento de medición del transductor de torque.

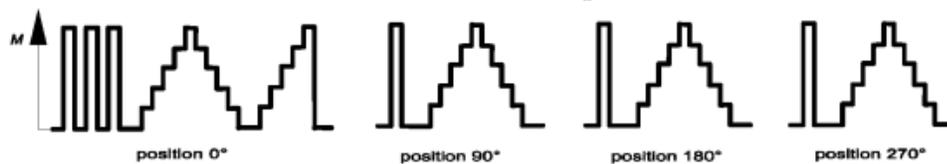
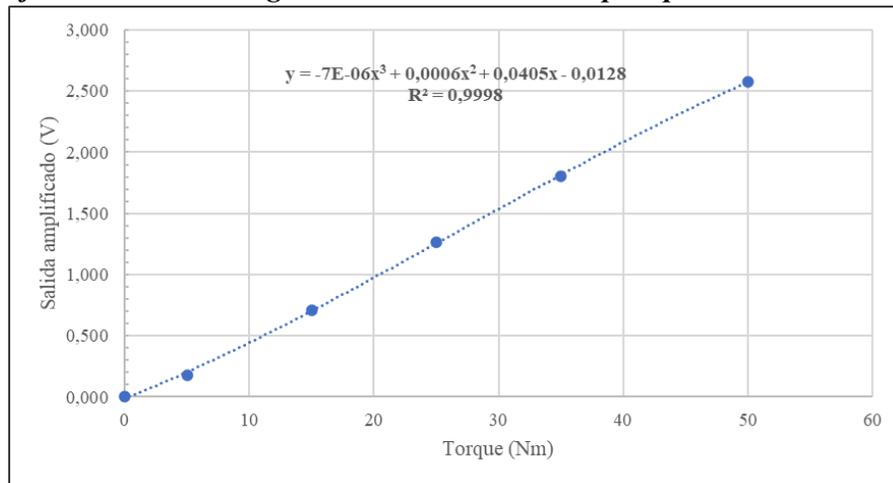


Fig. D.2: Example of preloadings and sequences for torque measuring devices with square drive, a minimum 5 steps and $0,1\% \leq U < 1\%$

Una vez tomadas las medidas, estas fueron tabuladas. Posteriormente a esto, se determinó la media de cada uno de los valores de salida del transductor en las distintas posiciones, para así luego graficar los resultados y así determinar la curva característica del sensor y poder normalizar las señales en la escala de la unidad de Nm, ver [figura 46](#). Para esta parte, solo se consideraron los resultados de las pruebas ascendentes, y para el caso de la posición en 0°, solo se tomó la primera rampa.

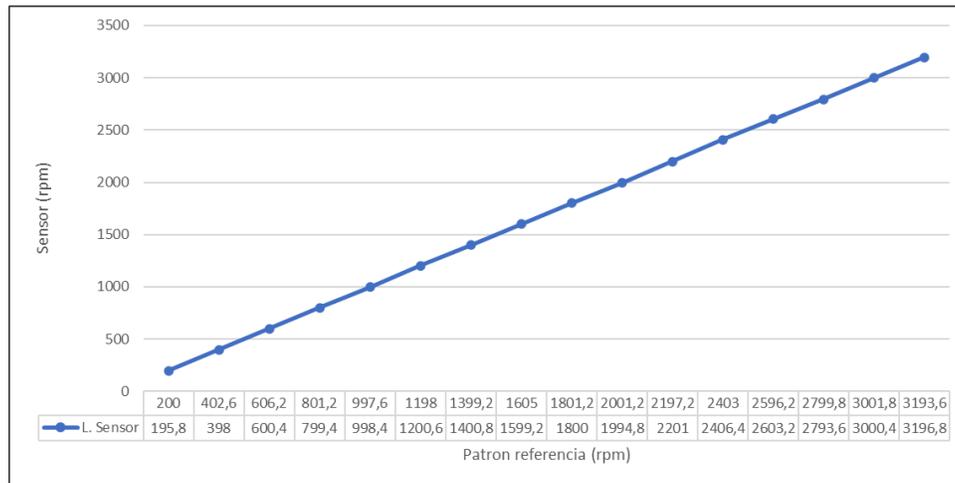
Figura 46. Gráfica de salida analógica en V del sensor vs torque aplicado en Nm.



3.4.2. Comparación directa de velocidad angular

En el caso del sensor de velocidad angular, el procedimiento consistió en realizar una comparación directa frente a un patrón de referencia, el cual fue un tacómetro digital marca CEM y modelo DT 6236B [49]. Para esto, por medio de los acoples flexibles, el sensor fue conectado al eje de un motor el cual podía variar su velocidad en todo el rango de medición del sensor. Para la toma de datos, la escala de medición del sensor se dividió en 16 partes iguales, para poder realizar mediciones cada 200 rpm. Las mediciones fueron tabuladas y las mediciones se encuentran representadas en la gráfica de la [figura 47](#).

Figura 47. Gráfica sensor de velocidad vs patrón referencia.



En esta gráfica se aprecia a primera vista que el sensor que se está evaluado, tiene una relación lineal con respecto al patrón referencia. Lo cual nos indica que el sensor está midiendo apropiadamente.

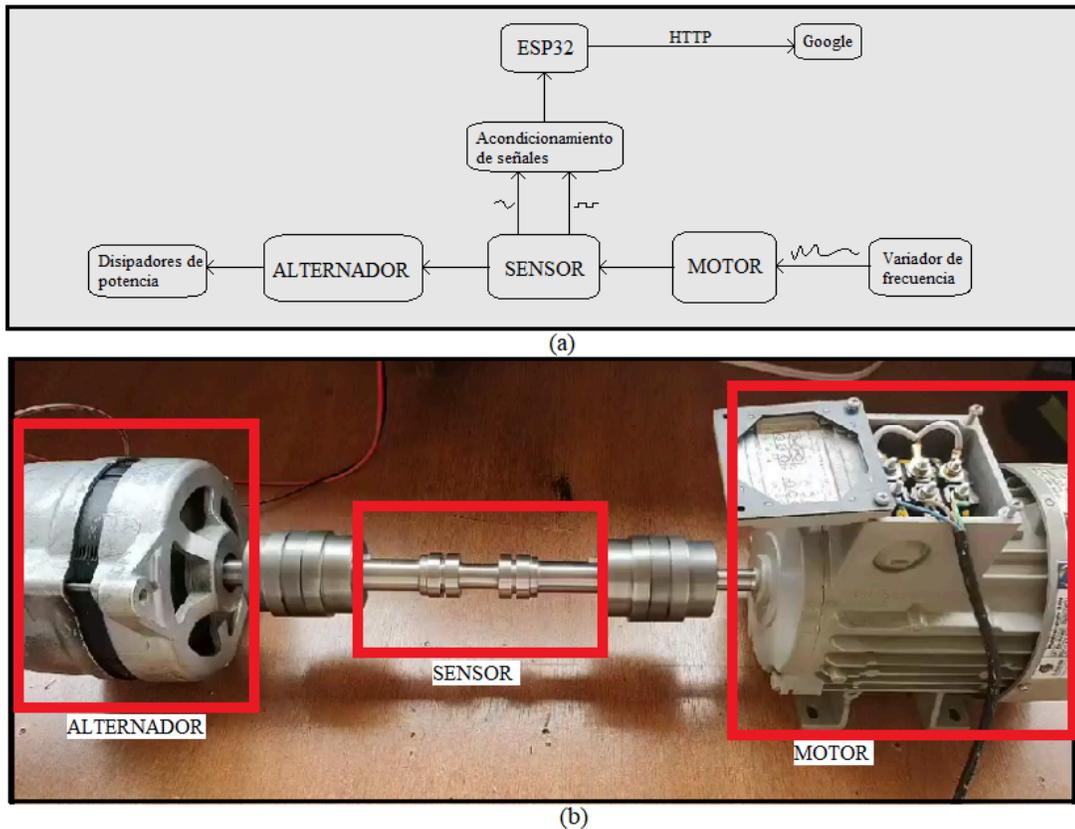
3.5. Pruebas de funcionamiento

Una vez construido, ajustado y calibrado el sistema, se procedió a realizar el montaje para realizar las pruebas de funcionamiento. Durante las pruebas al sistema, se evaluaron los comportamientos de cada uno de los sensores, así como de los sistemas de transmisión y almacenamiento de datos.

3.5.1. Montaje del sistema

El montaje del sistema para realizar las pruebas de funcionamiento, consistió en la instalación del sensor por medio de los acoples flexibles a un motor eléctrico, el cual genera la potencia al sistema, y a un alternador, con la finalidad de extraer la energía simulando una carga. La velocidad del motor se varió a través del uso de un variador de frecuencia. El diagrama y montaje en físico están en la [figura 48](#).

Figura 48. Montaje para pruebas de funcionamiento. (a) Diagramas y (b) Fotográfica del montaje.



3.5.2. Pruebas de ruido y perturbaciones

Para comprobar el funcionamiento de la etapa de acondicionamiento se deben realizar pruebas en campo, consisten en poner en funcionamiento un motor que utilice variador de velocidad mientras el circuito se encuentra cerca del mismo, los motores al funcionar generan un campo magnético en función de la corriente que demanda el equipo, por ende se debe esperar una cantidad considerable de ruido inducido dentro de las líneas de transmisión.

Para la ejecución de la prueba se dispone de un motor eléctrico utilizado en una máquina de coser como se muestra en la [figura 49](#) cuyo variador es conocido por generar grandes cantidades de armónicos incluso a baja exigencia.

Figura 49. Motor con variador para prueba de ruido eléctrico.



3.5.3. Pruebas de medición

Esta prueba consistió en realizar las mediciones a un motor eléctrico en diferentes puntos de funcionamiento variando la velocidad de giro así como la carga con el fin de evaluar el correcto funcionamiento de cada uno de los sensores. Para esto, en el caso del sensor de velocidad, se realizó a través del uso de comparar las lecturas registradas por el sensor del sistema, contra el sensor referencia. Luego de esto, se evaluó la funcionalidad del sensor de torque, identificando si las mediciones si corresponden de manera proporcional a la ficha técnica del motor.

3.5.4. Pruebas del sistema IoT

Para comprobar el funcionamiento del sistema de transferencia y almacenamiento de datos, paralelamente a las pruebas de medición, se transfirieron los datos de dicha prueba a Google Sheet, en donde se evaluó la velocidad de transferencia de datos, la pérdida de datos y se comparó los datos tomados por la interfaz del ordenador, con los almacenados.

4. Resultados y análisis de resultados

Una vez realizadas las pruebas al sistema, se procedió a evaluar y analizar cada uno de los resultados de cada prueba.

4.1. Evaluación de los sistemas de medición

En lo referente a los sistemas de medición, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos de las mediciones, guiado por la normatividad vigente. Este proceso permitió la clasificación y estimación de los errores e incertidumbres asociados, asegurando que dichos sistemas cumplan con las especificaciones esperadas. Cabe destacar que las mediciones fueron posibles gracias al diseño y construcción de bancos de prueba específicos, los cuales desempeñaron un papel fundamental en la realización precisa de cada medición.

4.1.1. Calibración de los sensores

La calibración de los sensores se llevó a cabo siguiendo las pautas de la normativa vigente, y el cálculo y estimación de la incertidumbre se fundamentaron en la Guía GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida) proporcionada por el CEM (Centro Español de Metrología). Para dicho proceso, se aplicaron las ecuaciones detalladas en la mencionada guía, garantizando así la adhesión a estándares reconocidos y la obtención de resultados precisos y confiables en la calibración de los sensores [46].

4.1.1.1. Resultados de la calibración del torquimetro

La estimación de los errores e incertidumbres del sensor de torque se fundamentó en la norma Euramet CG-14 V 2.0, en el [apéndice C](#) se muestra los procedimientos detallados y las ecuaciones que se utilizaron para poder determinar la incertidumbre así como las características metroológicas del sensor.

En el proceso de presupuesto de incertidumbre, se consideraron los factores de repetibilidad, reproducibilidad, reversibilidad, ajuste de curva y retorno a cero, todos aplicados para la incertidumbre tipo A. Por otro lado, para la incertidumbre tipo B, se incorporaron la resolución de los instrumentos y la incertidumbre asociada banco de pruebas del sistema de palanca. Esto aseguró una evaluación exhaustiva y completa de las fuentes de error, proporcionando una estimación de la incertidumbre total del sensor de torque.

Tabla 14. Resultados de calibración del sensor de torque.

Valor Nominal	Torque estimado	Error	Incertidumbre Combinada	K	Incertidumbre Expandida	Nivel de confianza
Nm	Nm	Nm	Nm	t- Student	Nm	t- Student
0	0,0	0,0	0,03	2,0	0,07	95%
5	5,4	0,4	0,11	2,0	0,22	95%
15	12,2	-2,8	0,27	2,0	0,54	95%
25	22,8	-2,2	0,30	2,0	0,61	95%
35	32,8	-2,2	0,46	2,0	0,92	95%
50	47,7	-2,3	0,57	2,0	1,15	95%

Luego, se procedió a clasificar el torquímetro comparando los parámetros de la [tabla 2](#), para esto se tuvo encuesta las recomendación de la norma las cuales se encuentran en el [apéndice B](#).

Tabla 15. Resultados de la caracterización del sensor para su clasificación.

Valor Nominal	Repetibilidad	Reproducibilidad	Valor residual relativo en cero	Reversibilidad	Desviación de ajuste de curva	Clase
	$\frac{\dot{b}}{\bar{X}}$	$\frac{b}{\bar{X}}$	$\frac{f_0}{\bar{X}_{max}}$	$\frac{h}{\bar{X}}$	$\frac{f_a}{\bar{X}}$	
Nm	%	%	%	%	%	
0			0,2			5,0
5	-2,2	-4,4		-1,4	-2,2	
15	-0,1	-3,6		-1,1	0,1	
25	-0,2	-2,2		-0,7	0,0	
35	-0,1	-1,5		-0,6	-2,3	
50	-0,5	-0,4		-0,1	-2,4	

En donde se evidencia que el equipo cumple con los requerimientos en cada una de las pruebas para poder ser clasificado como un clase 5. Ahora si analizamos los resultados, podemos

apreciar que si no fuera por la restricción de los EMP en la desviación de ajuste de curva, el sensor podría ser catalogado como clase 2 o incluso clase 1 en algunos de los valores nominales evaluados.

4.1.1.2. Resultados de la calibración del tacómetro

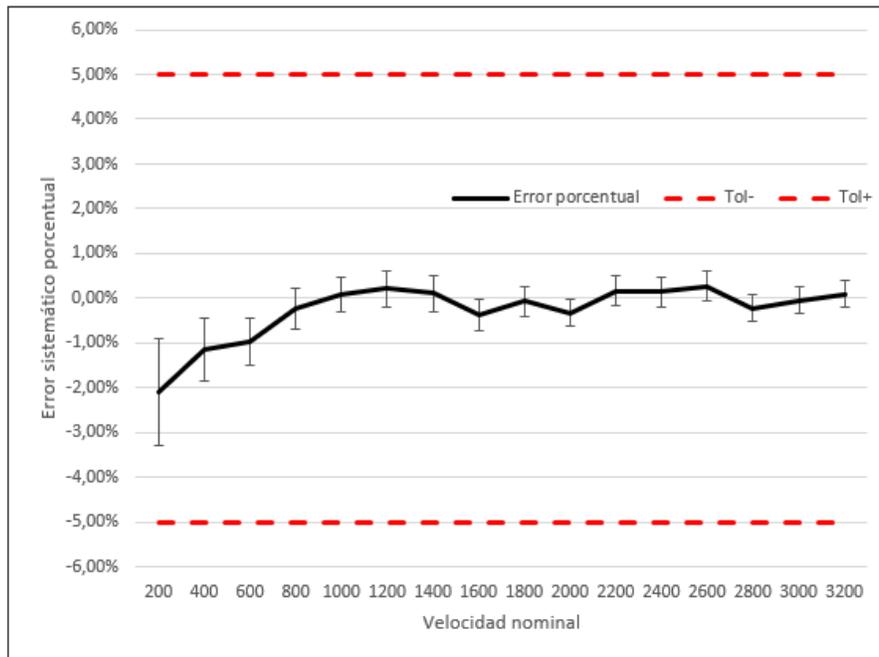
En relación a la calibración del sensor de velocidad angular, al carecer de un documento o norma específica de referencia, se optó por llevar a cabo una calibración estándar. Este proceso se centró exclusivamente en la incertidumbre tipo A, la cual se derivó de la desviación estándar de 5 mediciones realizadas en cada punto evaluado.

En cuanto a la incertidumbre tipo B, se consideraron la resolución del instrumento y la incertidumbre asociada al patrón de referencia proporcionado por el fabricante del equipo [49]. Tras la estimación de los errores del sensor, se procedió a verificar que estos estuvieran dentro de las especificaciones esperadas, con un margen de error no superior al $\pm 5\%$.

Tabla 16. Resultados de calibración del sensor de velocidad.

Valor nominal	Error	Error porcentual	Incertidumbre Comb.	K	Incertidumbre Exp.	Nivel de confianza
rpm	rpm	% FS	rpm	t- Student	rpm	t- Student
200	-4,2	-2,10%	2,4	2,1	5,1	95%
400	-4,6	-1,15%	2,8	2,0	5,6	95%
600	-5,8	-0,97%	3,2	1,9	6,0	95%
800	-1,8	-0,23%	3,6	1,8	6,3	95%
1000	0,8	0,08%	4,0	1,7	6,7	95%
1200	2,6	0,22%	4,9	1,7	8,4	95%
1400	1,6	0,11%	5,6	1,7	9,7	95%
1600	-5,8	-0,36%	5,6	1,7	9,3	95%
1800	-1,2	-0,07%	6,1	1,7	10	95%
2000	-6,4	-0,32%	6,2	1,6	10	95%
2200	3,8	0,17%	7,1	1,7	12	95%
2400	3,4	0,14%	7,7	1,7	13	95%
2600	7	0,27%	8,5	1,7	14	95%
2800	-6,2	-0,22%	8,5	1,6	14	95%
3000	-1,4	-0,05%	9,0	1,6	15	95%
3200	3,2	0,10%	9,8	1,6	16	95%

Figura 50. Errores del sensor de velocidad con su incertidumbre..



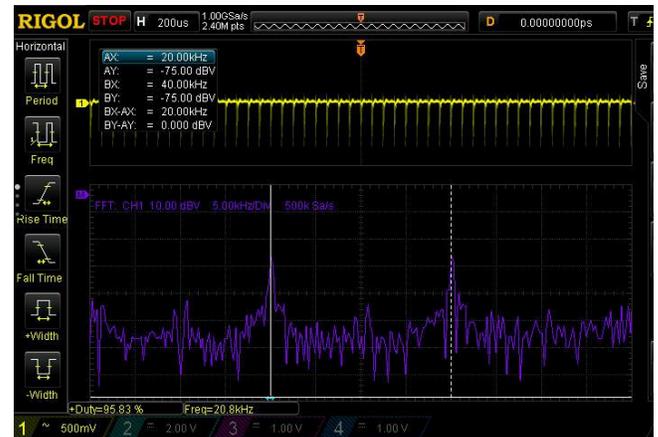
Tal y como se evidencia en la gráfica de la [figura 50](#) y en la [tabla 16](#), se observa que el sensor en ningún momento de las pruebas se salió de especificaciones, siempre presentando errores relativos inferiores al 5%. Es importante señalar que, incluso al considerar la incertidumbre asociada a cada punto evaluado, persiste un margen de error considerable, lo cual reafirma la alta confiabilidad del sensor de velocidad para cumplir con la especificación deseada.

4.2. Evaluación del funcionamiento de la etapa de acondicionamiento.

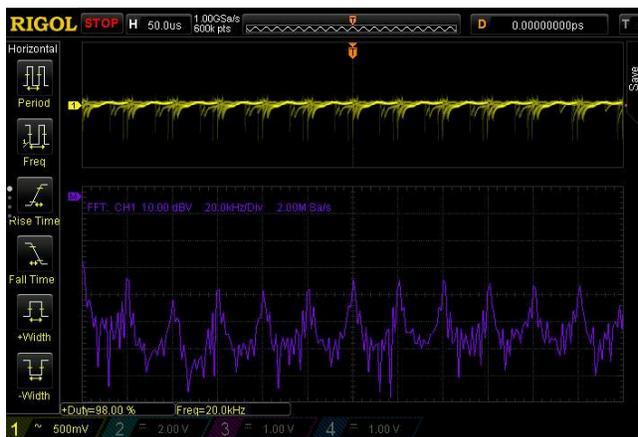
Durante la prueba se acercó el circuito de acondicionamiento a un motor en funcionamiento para inducir ruido electromagnético en las líneas de transmisión de datos, el rendimiento del filtro se demuestra en las gráficas de la [figura 51](#):

Figura 51. Comparación de señal de salida adquirida mediante osciloscopio con modo FFT para análisis espectral.

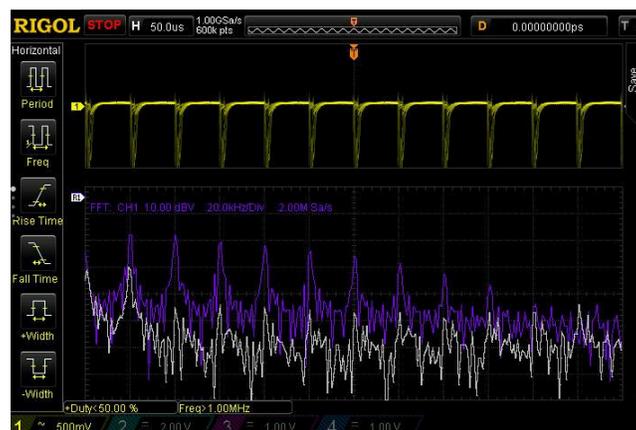
(a) Señal con el motor apagado y sin filtro. **(b)** Señal con motor encendido y sin filtración, señal centrada en 30 kHz, picos en 20 y 40 kHz.



(c) Señal sin filtro y con motor encendido, centrada en 120 kHz, 20 kHz/div. **(d)** Señal con filtro y con motor encendido, centrada en 120 kHz, 20 kHz/div.



(e) Comparación de señal con y sin filtro (señal filtrada en color blanco)



Las gráficas muestran el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, el ítem (a) contiene el nivel de ruido ambiente, se observa un pico en el extremo izquierdo que corresponde al nivel DC de la señal de entrada, esto se repite en todas las gráficas. El ítem (b) contiene los picos de frecuencia provocados por el ruido inducido una vez puesto en funcionamiento el variador, debido a que el variador genera señales analógicas con métodos como el PWM, se generan señales parásitas que suelen ubicarse por encima del rango audible humano, en el ítem (c) se puede apreciar de una forma más amplia el pico principal en 20 kHz y sus armónicos. Al realizar la conexión del circuito de filtración el nivel de ruido y distorsión de la señal se reducen (ítem d), para realizar una mejor comparación de los resultados, se guardaron los datos de la última medida realizada con filtración para compararla frente a frente con la medida tomada antes de aplicar la filtración (ítem e), como se observa, el filtro consigue reducir los picos inducidos en un rango que supera los 10 dB de atenuación, dejando la señal de salida mucho más limpia y fiel a la original.

4.3. Evaluación de la efectividad del sistema

Durante las pruebas de operación del sistema, se confirmó con éxito su eficacia para prevenir sobrecargas mecánicas en el motor examinado, un SIEMENS 1LA7 070-4YC60. El sistema demostró su capacidad al medir y registrar con precisión las sobrecargas tanto en torque como en velocidad.

Es relevante resaltar que estas pruebas se llevaron a cabo respetando las limitaciones especificadas en la ficha técnica del motor, que establecía un torque máximo en arranque de 3.1 Nm, un torque nominal de 1.7 Nm, y una velocidad nominal de 1640 rpm, con una velocidad máxima permitida de 2500 rpm. Este análisis detallado enfatiza la habilidad del sistema para funcionar dentro de los parámetros establecidos, asegurando un rendimiento conforme a las especificaciones técnicas del motor sometido a evaluación.

4.5. Verificación del sistema de almacenamiento de datos

Ya por último, se verificó el almacenamiento de datos y la generación de informes tal y como se presentó el formato en la [figura 41](#), en donde se identificó que los datos se almacenaron correctamente en hoja de cálculo correspondiente para poder generar el informe.

Figura 53. Ubicación de almacenamiento de datos transmitidos.

No.	Fecha	Torque [Nm]	Velocidad [rpm]	Potencia [kW]	Alarma
0	01/11/2023 13:00	0,2	1896,7	0,04	Desactivada
1	01/11/2023 13:01	0,2	1898,3	0,04	Desactivada
2	01/11/2023 13:02	0,2	1900	0,04	Desactivada
3	01/11/2023 13:03	0,2	1905	0,04	Desactivada
4	01/11/2023 13:04	0,2	1903,3	0,04	Desactivada
5	01/11/2023 13:05	0,2	1875	0,04	Desactivada
6	01/11/2023 13:06	0,2	1846,7	0,04	Desactivada
7	01/11/2023 13:07	0,2	1821,7	0,04	Desactivada
8	01/11/2023 13:08	0,2	1798,3	0,04	Desactivada
9	01/11/2023 13:09	0,2	1775	0,04	Desactivada
10	01/11/2023 13:10	0	1753,3	0,03	Desactivada
11	01/11/2023 13:11	0,2	1733,3	0,04	Desactivada
12	01/11/2023 13:12	0,2	1713,3	0,04	Desactivada
13	01/11/2023 13:13	0,2	1695	0,04	Desactivada
14	01/11/2023 13:14	0,2	1676,7	0,04	Desactivada
15	01/11/2023 13:15	0,2	1660	0,03	Desactivada
16	01/11/2023 13:16	0,2	1643,3	0,03	Desactivada
17	01/11/2023 13:17	0,2	1639,3	0,03	Desactivada

Los datos transmitidos se organizaron en 6 columnas distintas. La primera columna representa el consecutivo de datos generado por Google App Script. La segunda columna indica la hora y fecha de la medición considerando una precisión de ± 30 segundos y dependiendo de la configuración horaria del sistema. La tercera y cuarta columna corresponden a las mediciones registradas; a diferencia de las dos anteriores, estos valores pueden repetirse, ya que no siguen un orden consecutivo sino que representan mediciones individuales.

La quinta columna refleja el cálculo de la potencia teórica ideal del sistema. Este valor es teórico, ya que no tiene en cuenta pérdidas ni eficiencias del motor o del sistema en general. Finalmente, en la última columna se encuentra el estado de la alarma, con dos posibles valores: "Desactivado" o "Activado". Este indicador varía dependiendo de si las mediciones están dentro o fuera del rango tolerable de funcionamiento, ofreciendo una clara señal del estado operativo del sistema en tiempo real.

5. Conclusiones

Durante la fase de diseño, se logró diseñar un transductor que utilice galgas extensiométricas uniaxiales para la medición de torque con una resolución de 0.1 Nm que cumpliera con las especificaciones de un clase 5 (DIN 51309), para esto a través del uso del software SolidWorks se realizaron análisis de diseño mediante el cálculo por elementos finitos de esfuerzos y deformaciones. Adicionalmente a esto, el diseño realizado incorporó un sistema de medición de velocidad angular a través de un codificador transmisor con una resolución de 1 rpm y una precisión inferior al 5%.

El diseño de los circuitos se realiza exitosamente obteniendo etapas cuyo funcionamiento conjunto entrega las señales deseadas en todo momento, además de brindar un amplio rango de alimentaciones posibles. La etapa de alimentación proporciona voltajes estables con un nivel de pérdida por disipación de calor muy bajo en comparación a fuentes tradicionales. La etapa de filtración consigue mitigar los ruidos de alta frecuencia provocados por el funcionamiento de variadores u otras fuentes por conmutación, permitiendo una lectura más fiable de la señal deseada. Por último, el ajuste de voltaje entrega niveles de tensión óptimos para su lectura por medios digitales como los microcontroladores, brindando características de protección para no exceder los voltajes permitidos.

La construcción de los sistemas de medición se realizó a base de los diseños mecánicos y electrónicos realizados. Durante la construcción de los sensores, se determinaron los materiales y los procesos de manufactura más adecuados, para el caso del eje del sensor, se determinó que el material más adecuado es el SAI 4140 el eje se construyó a través de procesos de maquinado por torno y fresa, para el caso de las de mas piezas, se reciclo partes de cobre de sistema de refrigeración, además de uso de impresión 3d con resinas ABS; los demás accesorios se adquirieron en el mercado teniendo en cuenta las necesidades del sistema. Por otro lado, la implementación del microcontrolador tuvo resultados óptimos, adquiriendo y enviando los datos a la plataforma sin presentar novedades como la

pérdida de paquetes por una u otra razón. Sin embargo, debido a las condiciones de trabajo y falta de optimización en el código o carencia de un hardware más potente, no se alcanzaron las velocidades más altas planteadas para el desarrollo de este proyecto, de igual modo, los avances conseguidos quedan como precedente para futuras mejoras en distintos proyectos.

La fase de calibración se llevó a cabo mediante bancos de prueba que permitieron estimar y corregir desviaciones en las mediciones de torque y velocidad. Se diseñó y construyó un sistema de palanca para validar y ajustar el sensor de torque en toda su escala, para el caso del sensor de velocidad con ayuda de un motor y un patrón de referencia, se realizó una comparación directa para validar, estimar y ajustar el sensor.

Se realizaron pruebas de funcionamiento al sistema, utilizando un montaje con un motor SIEMENS 1LA7 070-4YC60 y un alternador de coche, para verificar que los sistemas de medición si se comportan de manera correcta en condiciones operativas reales. Los resultados obtenidos, reflejaron que se logró de manera exitosa la medición de torque de hasta 50 Nm y velocidades de hasta 3200 rpm, adicional a esto, el sistema IoT se comportó de manera eficaz, transmitiendo y almacenados los datos para su posterior análisis en un informe.

Referencias Bibliográficas

- [1]. D. A. Montealegre Fernandez. y J. Caicedo Colonia. “Análisis de fallas en los motores eléctricos de inducción”. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero electricista. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 1995. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/2726/T0001002.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2]. Mordor Intelligence. (2021). “Mercado de motores industriales: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronósticos (2023 - 2028)” [En línea]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/industrial-motors-market>
- [3]. J.C. Mollisaca Contreras. "Mantenimiento y reparación de motores eléctricos síncronos" [en línea].. Tesis de máster. Universitat politècnica de valència, 2020. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/153318/Mollisaca%20%20MANTENIMIENTO%20Y%20REPARACI%C3%93N%20DE%20MOTORES%20EL%C3%89CTRICOS%20S%C3%8DNCRONOS.pdf?sequence=1>
- [4]. Fluke, “13 causas comunes del fallo del motor” [En línea].. Disponible en: <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/motores-accionamientos-bombas-compresores/13-causas-comunes-de-l-fallo-del-motor>
- [5]. A.C. Rojas Vanegas. "Implementación de una guía para el diagnóstico de fallas y estimación de eficiencia de máquinas eléctricas asíncronas utilizando el equipo MCEMAX" [en línea].. PASANTÍA INSTITUCIONAL para optar al título de Ingeniero Electricista. Universidad autónoma de occidente, Santiago de Cali, Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10856/T08443.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- [6]. M. Castelli, M. Andrade, “Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción”, Universidad de Montevideo, Facultad de Ingeniería, Montevideo, 2007 [En línea].. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/335340812.pdf>
- [7]. FCMSolutionsPeru. "EasyPact TVS : Fundamentos de la protección del motor" [En línea].. Disponible en: <https://www.fcmsolutionsperu.com/blogs/noticias/easypact-tvs-fundamentos-de-la-proteccion-del-motor>
- [8]. G. M. Smith, DEWESoft, “Qué es el monitoreo de condición y por qué es importante prevenir fallas en la maquinaria?, ene 2021 [En línea].. Disponible en: <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-monitoreo-de-condicion>
- [9]. J. F. Chilito, W. D. Murcia, “Diseño y construcción de un dispositivo para medición de la variación de momento con respecto a un eje”, Universidad tecnológica de Pereira, facultad de tecnología mecánica, Pereira, 2015.

- [10]. R. E. Marse, J. D. Schroeder, “Monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos trifásicos”, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná, Buenos Aires, 2020.
- [11]. A. A. Correa, “Desarrollo de un transductor de torque de bajo costo, utilizando galgas extensiométricas y protocolos de comunicación del internet de las cosas”, Maestría En Ingeniería, Universidad Eafit, Escuela De Ingeniería, Medellín, 2020.
- [12]. L. Magadán, F. Suárez, J.C. Granda, *et al.* “Low-Cost Industrial IoT System for Wireless Monitoring of Electric Motors Condition”. *Mobile Network Appl* 28, 97–106 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11036-022-02017-2>
- [13]. S. Potturi, Dr. R. Mandi, “Critical Survey on IOT Based Monitoring and Control of Induction Motor”, School of EEE, REVA University, Bangalore [En línea].. Disponible en: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.uan.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8711222>
- [14]. FUTEK. “Torque sensors”, [En línea]. Disponible en: <https://www.futek.com/store/torque-sensors>
- [15]. A.C. Rojas Vanegas. "Implementación de una guía para el diagnóstico de fallas y estimación de eficiencia de máquinas eléctricas asíncronas utilizando el equipo MCEMAX", Pasantía Institucional, Universidad autónoma de occidente, Santiago de Cali, 2019 [En línea].. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10856/T08443.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- [16]. Y. L. Roa Terán, “Análisis de funciones modales usando entropía para la detección de fallas en motores de inducción”, Tesis, Universidad De Guanajuato, Salamanca, Guanajuato Nov 2017 [En línea].. Disponible en: <http://www.repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/390/1/145572.pdf>
- [17]. Y. Zhu, J. Duan, “Overview of predictive maintenance based on digital twin technology”, Heliyon, volume 9, Issue 4, mar 2023 [En línea].. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023017413>
- [18]. Y. Cortés, C. Berenice, et al, “El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras”, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Conciencia Tecnológica, núm. 54, México, 2017 [En línea].. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/944/94454631006/94454631006.pdf>
- [19]. Motores eléctricos, Unidad 11 [En línea].. Disponible en: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>
- [20]. J. A. Polanía Puentes, Control De Motores Eléctricos.
- [21]. J. C. Puerta Gomez, J. A. Arias Cadena, “Libro Digital De La Máquina De Inducción Trifásica”, Programa De Tecnología Eléctrica, Universidad Tecnológica De Pereira, Pereira 2013 [En línea].. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/d5b53066-eb7c-4f8c-a690-4fb59a650591/content>
- [23]. Logicbus, “Sensores de torque”, 2023 [En línea].. Disponible en: https://www.logicbus.com.mx/torque_sensores.php
- [24]. T. Kleckers, “Cómo funciona un transductor de fuerza piezoeléctrico?”, Sensores de fuerza en HBM, Hottinger Brüel & Kjær [En línea].. Disponible en: <https://www.hbm.com/es/7318/como-funciona-un-transductor-de-fuerza-piezoelctrico/>
- [25]. La guía metas, “Tacómetros (Medición de Frecuencia Rotacional)”, Metas & metrólogos asociados, sep 2005 [En línea].. Disponible en: https://www.metas.com.mx/guia_metas/archivos/La-Guia-MetAs-05-09-tacometros.pdf

- [26]. Uni-Trend Technology, “Test & Measurement Tools and Solutions” , UT372D 2 in 1 Tachometer [En línea].. Disponible en: <https://meters.uni-trend.com/product/ut372d/#Specifications>
- [27]. US Digital Motion Control Products, “What's the difference between optical, magnetic and capacitive encoders?” Blog, Agosto, 2019.
- [28]. Universitat Politècnica de València - UPV. *Galgas Extensiométricas: Funcionamiento y Circuitos de Medida* | | UPV. (26 de septiembre de 2011). Accedido el 2 de diciembre de 2023 [Video en línea].. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=duD06ex8CpA>
- [29]. “El puente de Wheatstone | Galgas extensométricas”. HBM. [En línea].. Disponible: <https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>
- [30]. Institución Apasionada por la Metrología, “Métodos de: Medición, Prueba y Calibración”, MetAs & Metrologos Asociados, Julio 2005 [En línea].. Disponible en: https://metas.com.mx/guia_metas/archivos/La-Guia-MetAs-05-07-metodos-de-medicion.pdf
- [31]. “Google Apps Script: Automatic, integre y extienda Google Workspace.” Business-Apps: Produktivität & Zusammenarbeit | Google Workspace. [En línea].. Disponible en: <https://workspace.google.com/intl/es-419/products/apps-script/>
- [32]. Alsimet, “7 diferencias entre el aluminio y el acero inoxidable | Alsimet”. | Comercialización de metales férricos y no férricos, corte a medida y acabados [En línea].. Disponible en: <http://alsimet.es/es/noticias/7-diferencias-entre-el-aluminio-y-el-acero-inoxidable#:~:text=El%20acero%20es%20sin%20duda,más%20ligero%20que%20el%20acero>
- [33]. “SAE 4140”. Dimecol [En línea].. Disponible en: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/6c2ac93b/files/uploaded/SAE4140FINAL.pdf>
- [34]. “SAE 9260 Propiedades (Mecánicas, Químicas y Clasificación) 2022”. Dimecol. Dic 2020 [En línea].. Disponible en: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/6c2ac93b/files/uploaded/SAE4140FINAL.pdf>
- [35]. “SAE 1020”. Dimecol [En línea].. Disponible en: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/6c2ac93b/files/uploaded/SAE4140FINAL.pdf>
- [36]. “Chumacera/pedestal 3/4 Uks® (ucp204-12)”. RUEDAS Y RODACHINAS SUPO® [En línea].. Disponible: https://www.tiendaimpomundo.com/MCO-455995355-chumacerapedestal-34-uks-ucp204-12-_JM
- [37]. R I. Mott ,“Diseño de cuñas”, 4 edición, capítulo 11, pág. 494.
- [38]. H. Bustamante Soto, Introducción a los mecanismos y. a la cinemática, 2017. [En línea].. Disponible:<https://docplayer.es/54429360-I-introduccion-a-los-mecanismos-y-a-la-cinematica.html>
- [39]. CAPÍTULO 5: PROTOCOLO HTTP. En línea. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11214/fichero/TOMO+I%252F05+Capitulo+5+Protocolo+HTTP.pdf>
- [40]. Electronilab,Módulo LM2596 Convertidor de Voltaje DC-DC Reductor Buck 1.25V-35V, [En línea].. Disponible en: <https://electronilab.co/tienda/modulo-lm2596-convertidor-de-voltaje-dc-dc-buck-1-25v-35v/>
- [41]. Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier, AD620. En línea. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad620.pdf>

- [42]. Disparador Schmitt [En línea].. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Disparador_Schmitt
- [43]. Wilaeba electronica, Filtros Activos de Orden superior Pasa bajos, julio 21, 2018. En línea. Disponible en: <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2018/07/filtros-activos-de-orden-superior-pasa-bajos.html>
- [44]. SUPER BONDER PINCEL. En línea. Disponible en: https://www.loctite-consumidor.co/cuando-necesite-una-union-perfecta-loctite-jamas-te-abandona/productos/super-bonder/super_bonder_pincel.html
- [45]. Galgas Extensometricas Adhesivos - © HBK, En línea. Disponible en: <https://www.hbm.com/es/4625/galgas-extensometricas-adhesivos/>
- [46]. Centro Español de Metrología, Evaluación de datos de medición: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, JCGM 100: 2008, (3ª edición en Esp 2009) [En línea]. Disponible en: <https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>
- [47]. A. Valencia, P. Portilla. Internet Industrial de las Cosas (IIOT): Nueva Forma de Fabricación Inteligente, Fundación Universitaria de Popayán, Facultad de Ingeniería Industrial, Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://unividafulp.edu.co/repositorio/files/original/0cba2296f09e033fe6c5c08e5a6a0119.pdf>
- [48] [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-iiot>
- [49] [En línea]. Disponible en: <https://www.openskycolombia.com/equipos/tacometro-digital-marca-cem-modelo-dt-6236b/>
- [50] [En línea]. Disponible en: <https://electrotec.pe/blog/PartesdeunMotorElectricoNEW>

APÉNDICE A

3 Symbols

For the utilisation of this standard, the symbols indicated in Table 1 apply.

Table 1 - Symbols, units and denomination

Symbol	Denomination	Unit
M	Torque	N·m
M_{nom}	Nominal torque	N·m
M_A	Lower limit of the measuring range	N·m
M_E	Upper limit of the measuring range	N·m
M_K	Calibration torque	N·m
	AE = Indication unit of the output signal (e.g. N·m, mV/V, V, Hz)	AE
I	Uncorrected value displayed on the indication unit	AE
I_s	Displayed value before installation in the calibration facility and in vertical position (transducer's zero value)	AE
$I_{0,j}$	Displayed value before loading in mounting position j (zero value)	AE
$I_{f,j}$	Displayed value after unloading in mounting position j	AE
$I_j(M_K)$	Displayed value with increasing calibration torque M_K in mounting position j	AE
$I'_j(M_K)$	Displayed value with decreasing calibration torque M_K in mounting position j	AE
X	Displayed value of the display unit, corrected for the zero value	AE
$X_j(M_K)$	Displayed value corrected for the zero value with increasing calibration torque M_K in mounting position j	AE
$X'_j(M_K)$	Displayed value corrected for the zero value with decreasing calibration torque M_K in mounting position j	AE
Y	Calibration result	AE
$Y(M_K)$	Calibration result at calibration torque M_K hysteresis (case I)	AE
$Y_h(M_K)$	Calibration result at calibration torque M_K with hysteresis (case II)	AE
Y_E	Calibration result at the upper limit of the measuring range M_E	AE
$Y_a(M_K)$	Interpolated calibration result at calibration torque M_K without hysteresis (case I)	AE
$Y_{ah}(M_K)$	Interpolated calibration result at calibration torque M_K with hysteresis (case II)	AE
	Measurands for the consideration of measurement uncertainties	
$b(M_K)$	Comparison accuracy at calibration torque M_K	AE
$b'(M_K)$	Repeatability at calibration torque M_K	AE

Table 1 (continued)

Symbol	Denomination	Unit
$f_a(M_K)$	Interpolation deviation at calibration torque M_K	AE
$f_q(M_K)$	Indication deviation at calibration torque M_K	AE
f_0	Zero variation	AE
$h(M_K)$	Reversal error of the torque meter at calibration torque M_K	AE
r	Resolution of the display unit	N·m
$w_{KB}(M_K)$	Relative standard measurement uncertainty of the calibration facility's torque value M_K	%
$W_{KB}(M_K)$	Relative expanded measurement uncertainty of the calibration facility's torque value M_K	%
$w(M_K)$	Relative standard measurement uncertainty of the interpolated calibration result at calibration torque M_K	%
$W(M_K)$	Relative expanded measurement uncertainty of the interpolated calibration result at calibration torque M_K	%
$W'(M_K)$	Relative uncertainty interval of the calibration result at the interpolated calibration torque M_K	%

APÉNDICE B

Classification of the torque measuring device

C.1 Principle of classification

The range for which the torque measuring device is classified shall be determined by considering each calibration torque one after the other, starting with the maximum torque and decreasing from this to the minimum torque. The classification range ceases at the last torque for which the classification requirements in C.2 are satisfied.

C.2 Classification criteria

C.2.1 For the classification, the minimum value of the measuring range M_A shall be

- 20 % of M_E , alternatively
- 40 % of M_E for the classes 0.05 and 0.1.

C.2.2 For the instruments classified for interpolation, the following criteria shall be taken into consideration:

- relative repeatability in unchanged mounting position,
- relative reproducibility in different mounting positions,
- relative deviation of indication or of fitting curve,
- relative residual value at zero torque,
- relative reversibility when increasing and decreasing torque is applied,
- resolution of the indicating device at the minimum value of the measuring range M_A .

C.2.3 Table C.1 states the values of these different parameters for the torque measuring device class and the respective expanded relative uncertainty required for calibration torque.

Table C.1 Classification criteria for torque measuring devices

class	Maximum permissible error of the torque measuring device in %					min. value of torque	Calibration torque M_k expanded rel. uncertainty of measurement in %
	relative repeat-ability	relative reproducibility	Relative residual value at zero torque	relative reversibility	relative dev. of indication or of fitting curve ,		
	$\frac{b'}{X}$	$\frac{b}{X}$	$\frac{f_0}{X_E}$	$\frac{h}{X}$	$\frac{f_q}{X}, \frac{f_a}{X}$	M_A	$W_{tcm} = k \cdot w_{tcm}$
0.05	0.025	0.050	0.0125	0.063	± 0.025	$\geq 4000 r$	0.010
0.1	0.05	0.10	0.025	0.125	± 0.05	$\geq 2000 r$	0.020
0.2	0.10	0.20	0.050	0.250	± 0.10	$\geq 1000 r$	0.040
0.5	0.25	0.50	0.125	0.63	± 0.25	$\geq 400 r$	0.10
1	0.5	1.0	0.25	1.25	± 0.5	$\geq 200 r$	0.20
2	1.0	2.0	0.50	2.50	± 1.0	$\geq 100 r$	0.40
5	2.5	5	1.25	6.25	± 2.5	$\geq 40 r$	1.0

APÉNDICE C

Calibration Guide

EURAMET cg-14

Version 2.0 (03/2011)



Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices

1 SCOPE

- 1.1 This guide is generally applicable to torque measuring devices where the torque is obtained by the measurement of the elastic deformation of a body or of a measurand proportional to it.
- 1.2 The scope of the calibration provided, should be made clear to the customer and recorded on the certificate when calibrating torque systems, i.e. whether all or some of the following are included: clockwise and/or anti-clockwise, incremental and decremental torque.
- 1.3 The uncertainty of measurement is determined in section 5¹, this should include the parameters of the selected scope.
- 1.4 This guide applies to the static calibration of torque measuring systems using supported beams or the comparison method with reference transducer and includes an example for calculation of the uncertainty of measurement. A diagram showing an example of the calibration steps and series is given in Annex D.
- 1.5 The torque measuring device is defined as the complete instrument comprising all parts, from the torque transducer to the indicating device.

2 SYMBOLS

For the purpose of this guide, the symbols given in Table 1 shall apply.

Table 1: Symbols, units and designations

Symbol	Designation	Unit
M_{nom}	nominal torque (maximum design torque of the device)	N·m
M_a	minimum torque value of the measuring range	N·m
M_E	maximum torque value of the measuring range	N·m
M_k	applied calibration torque	N·m
Symbol	Designation	Unit

¹ The calculation of measurement uncertainty described in this guidance publication is to be considered as preliminary.

I_0	indication of torque measuring device of the zero signal prior to load application in mounting position	mV/V^2
I_f	indication of torque measuring device after load removal in mounting position	mV/V^2
I	indication of torque measuring device at torque step with increasing torque	mV/V^2
I'	indication of torque measuring device at torque step with decreasing torque	mV/V^2
S	sensitivity	$(mV/V^2)/N\cdot m$
X	indicated value at torque step with increasing torque	mV/V^2
X_0	indicated value calculated from the interpolation equation	mV/V^2
\overline{X}_c	mean value of the torque measuring device at maximum of the measuring range	mV/V^2
\overline{X}	mean value of the torque measuring device of increasing steps in different mounting positions	mV/V^2
b'	repeatability	mV/V^2
b	reproducibility	mV/V^2
f_D	deviation of indication of the torque measuring device from the fitting curve	mV/V^2
f_Q	deviation of indication of the torque measuring device with defined scale	$N\cdot m$
f_0	residual value at zero signal of the torque measuring device	mV/V^2
h	reversibility of the torque measuring device	mV/V^2
r	resolution of the indicating device	$N\cdot m$
$u_{b'}$	uncertainty contribution of repeatability	$N\cdot m$
$w_{b'}$	relative uncertainty contribution of repeatability	%
u_b	uncertainty contribution of reproducibility	$N\cdot m$
w_b	relative uncertainty contribution of reproducibility	%
u_{D_0}	uncertainty contribution of interpolation	$N\cdot m$
w_{D_0}	relative uncertainty contribution of interpolation	%
u_r	uncertainty contribution of resolution	$N\cdot m$
w_r	relative uncertainty contribution of resolution	%
u_{TCM}	uncertainty contribution of the torque calibration machine	$N\cdot m$
w_{TCM}	relative uncertainty contribution of the torque calibration machine	%
$u(\overline{X})$	standard uncertainty of measurement	mV/V^2
Symbol	Designation	Unit
$w(\overline{X})$	relative standard uncertainty of measurement	%

u_c	combined standard uncertainty of measurement allowing for systematic errors	N·m
W_c	combined relative standard uncertainty of measurement allowing for systematic errors	%
U	expanded uncertainty of measurement	mV/V ²
W	expanded relative uncertainty of measurement	%

3 CHARACTERISTICS OF TORQUE MEASURING DEVICES

3.1 Description and identification of the torque measuring device

The torque measuring device comprises or consists of the complete set of measuring instruments and other equipment assembled to carry out torque measurements. All components of the torque measuring device (including cables for electrical connection) shall be individually and uniquely identified (for example by the manufacturer's name, the type, four or six conductor circuit or similar, and the serial number). For the torque transducer, the maximum working torque and the measuring end of the transducer should be indicated.

3.2 Application of the torque

The torque transducer and any associated mechanical coupling should be designed and assembled such that both clockwise and anti-clockwise torque can be applied without the significant influence of non-torsional forces, such as bending moments.

4 CALIBRATION OF THE TORQUE MEASURING DEVICE

4.1 General

4.1.1 Indicators

Where an electrical indicator is replaced with another, both indicators shall have a valid calibration certificate traceable to national standards. The replacement indicator shall have been calibrated over at least the same range of indication as the original indicator. Where the uncertainty of calibration of the replacement indicator differs from the original, the standard uncertainty of measurement should be recalculated.

4.1.2 Overloading test

It is recommended that prior to the first calibration, the torque transducer, including its mechanical couplings, is subjected to two overload tests in the course of which the nominal torque is exceeded by 8% to 12% of the nominal torque and this value is maintained for 1 to 1.5 minutes.

² The output indication will be in units depending on the design (e.g. N·m, mV/V, V, Hz, mm or others) or in arbitrary units (digits)

This should exclude unexpected failure of the torque transducer during application of the calibration load, for example by fracture, resulting in consequential damage to the calibration facility.

4.2 Resolution of the indicating device

4.2.1 Analogue scale

The thickness of the graduation marks on the scale should be uniform, and the width of the pointer should be approximately equal to the width of a graduation mark: the resolution r of the indicator shall be obtained from the ratio of the width of the pointer to the centre-to-centre distance between adjacent scale marks (scale spacing) - recommended ratios are 1/2, 1/5 or 1/10 : spacings not smaller than 1.25 mm are required to estimate a tenth of the scale division.

4.2.2 Digital scale

The resolution r is considered to be one increment of the least significant active digit of the numerical indicating device, provided that the indication does not fluctuate by more than one increment when the instrument is unloaded.

4.2.3 Fluctuation of readings

If the reading (with the instrument unloaded) fluctuates by more than the value previously determined for the resolution, the resolution should be deemed to be equal to half the range of fluctuation.

4.2.4 Resolution

The resolution r shall be converted to units of torque using the sensitivity factor S at M_E , the maximum torque value of the measuring range.

4.2.5 Minimum value of the measuring range

Taking into consideration the resolution r with which the indicator can be read, the minimum torque M_M (minimum value of the measuring range) applied to a torque measuring device should be not less than 0.02 M_E (2% of the maximum torque value of the measuring range); see also table C.1.

4.3 Preparation of the calibration

4.3.1 Indicating device

The indicating device should be adjusted according to the manufacturer's instructions and in accordance with the customer's specifications. Prior to the calibration, it is recommended that the indicating device is subject to a check to ensure it functions correctly and will not invalidate the calibration. All adjustments and, where appropriate, corresponding setting values should be recorded before and after the calibration.

4.3.2 Temperature stabilisation

Prior to calibrating the torque measuring device, it should be stored with the supply power applied in the calibration environment for sufficient time for its temperature to stabilise.

4.3.3 Transducer zero signal

Prior to the installation of the transducer into the calibration equipment, the zero signal of the mechanically unloaded torque transducer should be measured in a specified (vertical) position and recorded.

4.3.4 Mounting of transducer

Failure to apply the calibration torque at the shaft end position stated by the manufacturer, or specified by the customer, may lead to erroneous measurements. The mounting position should be identified.

4.4 Calibration procedure

The calibration can be carried out for clockwise and/or anti-clockwise torque. For the purpose of this guideline, the calibration of torque transducers should be carried out as a static procedure by measuring discrete approximately equally spaced torque values (typical of calibration facilities with lever-mass systems).

4.4.1 Preloading

After installation into the calibration equipment, the torque transducer should be preloaded three times in the direction to be calibrated, applying the maximum torque value M_E of the measuring range of the device, and additionally once after each change of the mounting position. The duration of the application of preload should be approximately 30 seconds. After each preload has been removed for approximately 30 seconds, the indicator reading should be recorded.

NOTE: The stability of the zero signal may provide an indication of the performance of the device during its calibration.

4.4.2 Mounting position

The torque transducer should preferably be calibrated in three different mounting positions with the transducer or its mechanical coupling part rotated each time through 120° about the measurement axis. Four relative mounting positions can be used for a square drive. (see Annex D). For transducers with accuracy of 1% or less calibration 0 and 90° may be sufficient (Annex D Fig. 4).

Two incremental calibration series are required at the same mounting position, normally at the start of calibration, for determination of repeatability.

4.4.3 Range of calibration

The recommended number of calibration steps should be a minimum of 5 approximately equally spaced from 20% to 100 % of M_E .

For the calculation of a fitting curve, a minimum of 5 steps must be taken.

When calibration points below 20% of M_E are required, calibration steps of 10%, 5%, 2% of M_E should be used.

4.4.4 Loading conditions

The time interval between two successive calibration steps should, if possible, be similar. Recording the measured value may take place only after the indication has stabilised. Indication drift due to creep requires that the time sequence be maintained.

Calibration should be carried out at a temperature stable to $\pm 1^\circ\text{C}$. This temperature should be in the range between 18°C and 28°C (preferably between 20°C and 22°C) and recorded.

4.4.5 Indicated value

The indicated value is defined as the difference between an indication in loaded condition and an indication in unloaded condition. The indication at the beginning of each measurement series should be zeroed, or taken into account by computation during the evaluation following the measurement.

NOTE: Recording of non-zeroed values provides additional information about the zero signal behaviour.

For torque measuring devices with defined scale (indication in the unit of torque), the indication should be zeroed at the beginning of each measurement series.

4.4.6 Evaluation of the torque measuring device: Calibration result (Annex E - Worked example of calibration sequence and interpolation of data)

4.4.6.1 Determination of the sensitivity S

The sensitivity S shall be calculated according to the following equation:

$$S = \frac{\overline{X}_t}{M_t} \quad (1)$$

4.4.6.2 Determination of mean value \overline{X}

The mean value \overline{X} for each torque step shall be calculated according to equation (2) as the mean value of the measurement results obtained in the increasing series in changed mounting positions:

$$\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (I_j - I_{j,0}) \quad (2)$$

Where:

j index of selected series

n number of increasing series in different mounting positions

NOTE: The values measured in the 0° position in the second series at increasing torque are not included in the calculation of \overline{X} .

4.4.6.3 Determination of repeatability b'

The repeatability in unchanged mounting position (b') shall be calculated for each torque step according to the following equation:

$$b' = |X_1 - X_2| \quad (3)$$

Where:

X_1 and X_2 are the values measured in unchanged position.

4.4.6.4 Determination of reproducibility b

The reproducibility in changed mounting position b shall be calculated for each torque step according to the following equation:

$$b = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Where:

n number of increasing series in different mounting positions

NOTE: For the 0° position, the second series at increasing torque is not included in the calculation of b .

4.4.6.5 Determination of residual value f_5 at zero torque

The zero value shall be recorded prior to and after each measurement series. The zero value shall be read approximately 30 seconds after complete unloading. The residual value of the zero signal shall be calculated according to equation (5):

$$f_5 = \max |I_r - I_0| \quad (5)$$

4.4.6.6 Determination of reversibility h

The reversibility shall be determined according to equation (6) as the mean of the absolute values of the differences between the values indicated for the series of increasing and decreasing torque series for each torque step:

$$h = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k |I_j - I'_j| \quad (6)$$

Where: k number of torque series

NOTE: In this section a series is defined as increasing and decreasing torque.

4.4.6.7 Determination of the deviation of indication from the fitting curve f_6

The deviation from the fitting curve shall be determined for each torque step for the indication as a function of the torque using an equation of the 1st, 2nd or 3rd degree without absolute term. The equation used shall be stated in the calibration certificate.

The equation shall be calculated as the least squares fit.

The deviation from the fitting curve shall be calculated from the following equation (7).

$$f_6 = (\bar{X} - X_s) \quad (7)$$

NOTE: An alternate method consists to calculate the fitting curve and the associated standard uncertainty ($u_{(6)}$) using the orthogonal polynomial method (Forsythe's algorithm). If this approach is adopted, it should be stated in the certificate.

4.4.6.8 Determination of the deviation of indication f_7

The deviation of indication shall be determined only for such torque measuring devices where the measured value is directly indicated in the unit of torque and the indicated value is not fitted. It shall be determined from the mean value of the increasing series in changed mounting positions, equation (8):

$$f_7 = (\bar{X} - M_s) \quad (8)$$

5 DETERMINATION OF THE STANDARD UNCERTAINTY OF MEASUREMENT FOR INCREASING TORQUE

- 5.1 The following statements are intended to serve as an example for the calculation of the uncertainty of measurement of a uniform calibration, described in this guide. According to the application of the measuring instrument to be calibrated, it may be useful to deviate from this example or to add further uncertainty components. In such cases, the calculation must be documented.
- 5.2 The calibration of the torque measuring device is carried out by comparison, using a torque calibration machine with known torque steps, or calibration equipment with a torque reference transducer.
- 5.3 The calibration result is the output signal of the torque measuring device and is obtained from the approximate model (9):

$$\bar{X} = (S + \delta S_r + \delta S_b + \delta S_a) M_k + \delta X_r \quad (9)$$

where:

M_k torque generated by the torque calibration machine with an associated uncertainty $u(M_k) = u_{cm}$

δS_r repeatability with an associated uncertainty $u(\delta S_r) = \frac{S}{M_k} u_r$

δS_b reproducibility with an associated uncertainty $u(\delta S_b) = \frac{S}{M_k} u_b$

δS_a deviation resulting from the fitting curve with an associated uncertainty $u(\delta S_a) = \frac{S}{M_k} u_a$

δX_r observed influence due to instrument resolution with an associated uncertainty $u(\delta X_r) = S \cdot u_r \cdot \sqrt{2}$ (two readings for one value indicated)

- 5.4 The standard uncertainty $u(\bar{X})$ expressed in units of indication and the relative standard uncertainty $w(\bar{X})$ are obtained by the law of propagation of uncertainty in the approximation of non-correlated variables:

$$u(\bar{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial \bar{X}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (10)$$

$$w(\bar{X}) = \frac{u(\bar{X})}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (10a)$$

with

$$u^2(\bar{X}) = S^2 (u_{cm}^2 + u_r^2 + u_b^2 + 2u_r^2 + u_a^2) \quad (11)$$

$$w^2(\bar{X}) = (w_{cm}^2 + w_r^2 + w_b^2 + 2w_r^2 + w_a^2) \quad (11a)$$

- 5.5 The example furnishes information on the uncertainty of measurement at the time of calibration. It does not allow for the uncertainty of components' long-term stability, or the influence of dynamic components in the applied torque and/or the effects of mechanical couplings used in practice, for example.

Table 2: Uncertainty budget - increasing torque only

Quantity	evaluation of standard uncertainty	standard uncertainty in N·m	relative standard uncertainty in %
Repeatability in unchanged mounting position b'	type A	$u_{b'} = \frac{b'}{5\sqrt{2}}$	$w_{b'} = \frac{b'}{\sqrt{2}} \cdot \frac{100}{X}$
Reproducibility in different mounting positions b	type A	$u_b = \frac{b}{5\sqrt{n}}$	$w_b = \frac{b}{\sqrt{n}} \cdot \frac{100}{X}$
Deviation resulting from fitting curve f_s	type B with triangular distribution	$u_{f_s} = \frac{|f_s|}{5\sqrt{6}}$	$w_{f_s} = \frac{|f_s|}{\sqrt{6}} \cdot \frac{100}{X_s}$
Resolution r	type B with rectangular distribution	$u_r = \frac{r}{\sqrt{12}}$	$w_r = \frac{r}{\sqrt{12}} \cdot \frac{100}{M_k}$
Reference torque	type B	u_{TCM}	w_{TCM}

NOTE: For u_{f_s} , see also note chapter 4.4.6.

5.1 Calibration of devices with undefined scale

The expanded uncertainty of measurement U for each calibration step is calculated from the uncertainty of measurement, equation (10), according to equation (12). The expanded relative uncertainty of measurement W for each calibration step is calculated from the uncertainty of measurement, equation (11a), according to equation (12a). The coverage factor $k=2$ applies in both cases.

$$U = k \cdot u(\bar{X}) \quad (12)$$

$$W = k \cdot w(\bar{X}) \quad (12a)$$

5.2 Calibration of devices with a non-adjustable defined scale or where a straight line fit only, can be applied.

- 5.21 An exceptional case is where the indicator of the torque measuring device is non-adjustable, or has the capability only of fitting a straight line to the data. The values determined for f_Q or f_S are treated as systematic errors whose moduli represent a non-dominant part of the uncertainty. In these cases the expanded uncertainty statement at the desired coverage probability of 95% (cf. Ref. No. 3) can only be obtained by equations (16) and (16a), a procedure described in F.2.4.5 of the *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (cf. Ref. No. 4).

- 5.22 The standard uncertainty $u(\bar{X})$ expressed in units of indication and the relative standard uncertainty $w(\bar{X})$ of the random variables is calculated for each calibration step:

$$u(\bar{X}) = S \sqrt{u_{\text{TCM}}^2 + u_b^2 + u_s^2 + 2u_r^2} \quad (13)$$

$$w(\bar{X}) = \sqrt{w_{\text{max}}^2 + w_a^2 + w_b^2 + 2w_r^2} \quad (13a)$$

The appropriate formulae for the straight line fit are:

$$u_c(\bar{X}) = \sqrt{\left(\frac{f_g}{S}\right)^2 + u^2(\bar{X})} \quad (14)$$

$$w_c(\bar{X}) = \sqrt{\left(\frac{f_g}{\bar{X}}\right)^2 + w^2(\bar{X})} \quad (14a)$$

f_g is the deviation from the straight line fit

The appropriate formulae for the defined scale are:

$$u_c(\bar{X}) = \sqrt{\left(\frac{f_g}{S}\right)^2 + u^2(\bar{X})} \quad (15)$$

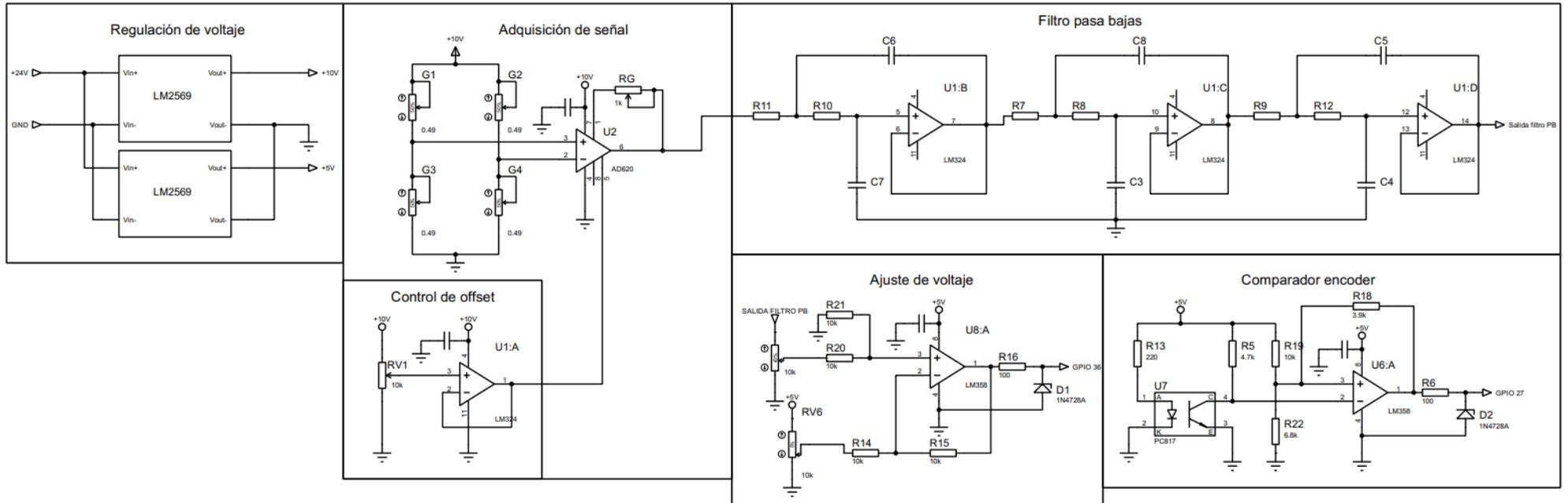
$$w_c(\bar{X}) = \sqrt{\left(\frac{f_g}{\bar{X}}\right)^2 + w^2(\bar{X})} \quad (15a)$$

5.23 The expanded uncertainty of measurement U or the expanded relative uncertainty of measurement W for each calibration step is calculated from the combined uncertainty of measurement, using equation (16 or 16a), with coverage factor $k=2$:

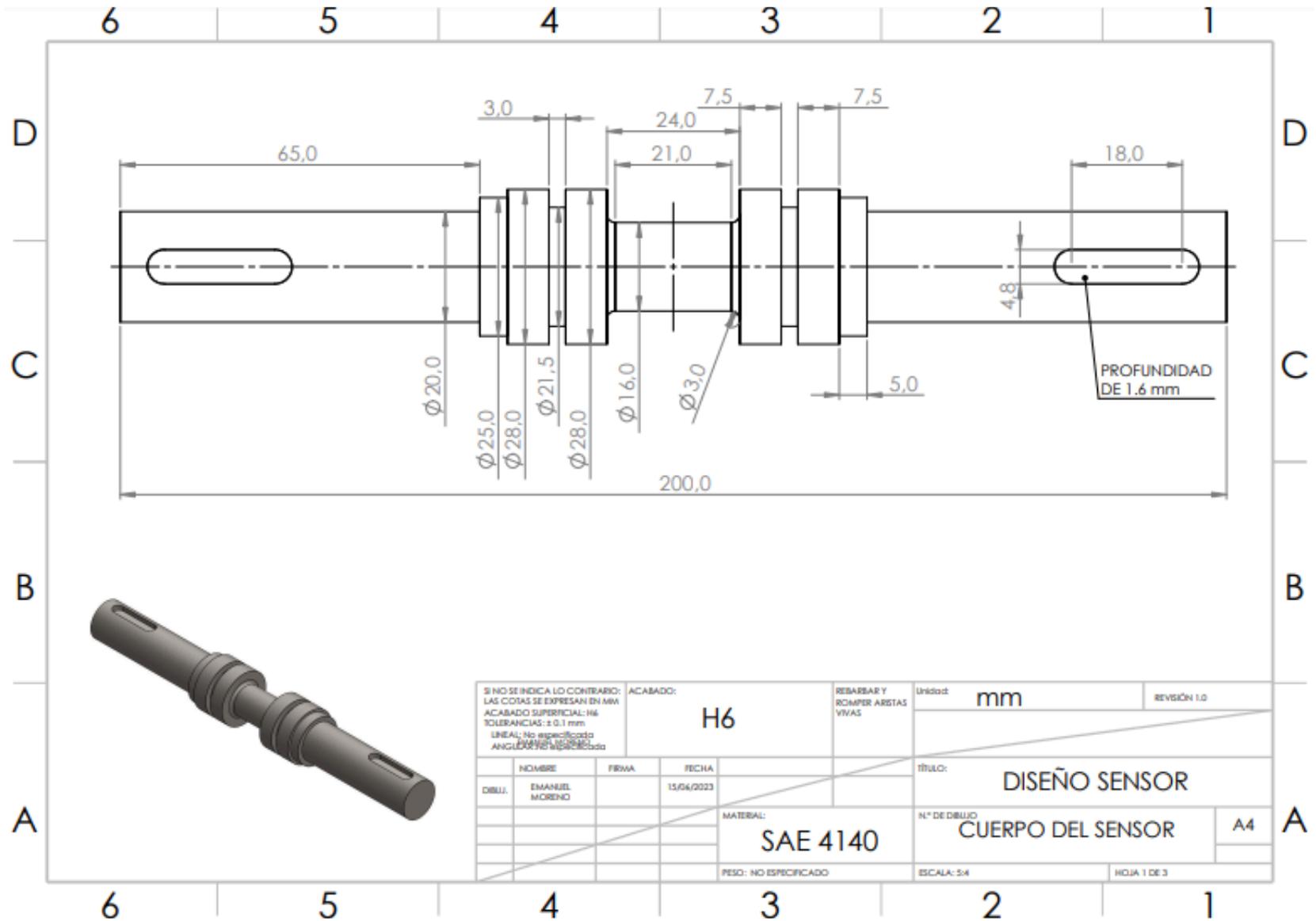
$$U = k \cdot u_c(\bar{X}) \quad (16)$$

$$W = k \cdot w_c(\bar{X}) \quad (16a)$$

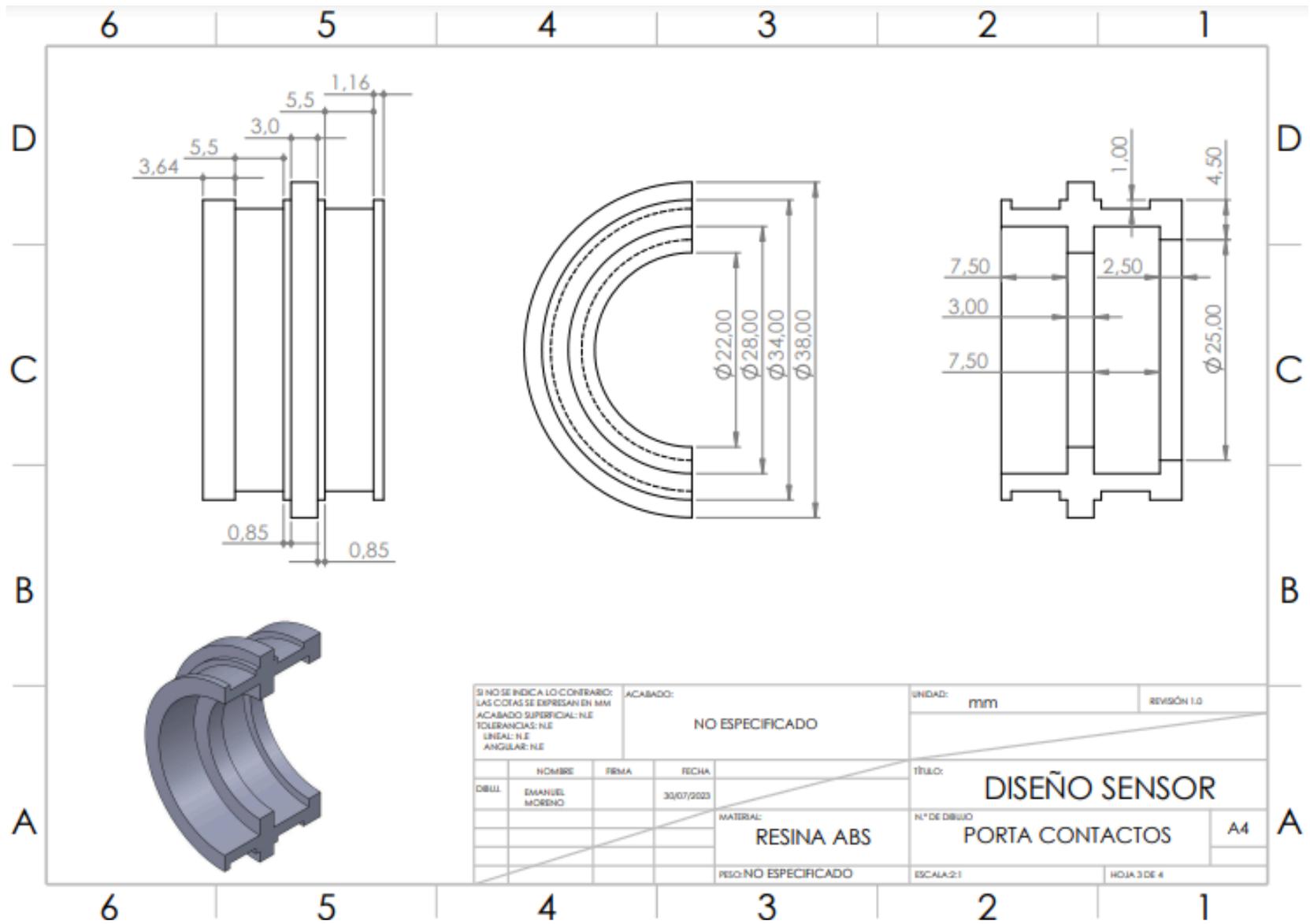
APÉNDICE D



APÉNDICE E



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: IN TOLERANCIAS: ± 0.1 mm LINEAL: No especificado ANGULAR: No especificado			ACABADO: H6	RESABAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	Unidad: mm	REVISIÓN 1.0
DIBUJ. EMANUEL MORENO			FIRMA	FECHA 15/06/2023	TÍTULO: DISEÑO SENSOR	
			MATERIAL: SAE 4140		N° DE DIBUJO CUERPO DEL SENSOR	A4
			PESO: NO ESPECIFICADO		ESCALA: 5:4	HOJA 1 DE 3



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: N.E TOLERANCIAS: N.E LINEAL: N.E ANGULAR: N.E		ACABADO: NO ESPECIFICADO		UNIDAD: mm	REVISIÓN 1.0
DIBUJANTE: EMANUEL MORENO		FECHA: 30/07/2023		TÍTULO: DISEÑO SENSOR	
		MATERIAL: RESINA ABS		N.º DE DIBUJO: PORTA CONTACTOS	
		MATERIAL: NO ESPECIFICADO		ESCALA: 2:1	HOJA 3 DE 4

A4

