

# Instrumentación y Adquisición de Señales de Vibración en un Motor de Inducción Trifásico: Estudio de Inmunidad al Ruido y Relevamiento de Características para Diferentes Modos de Operación

Gonzalo O. Nauman <sup>a\*</sup>, Axel A. Skrauba <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> GIDE, IMAM UNaM-CONICET, Facultad de Ingeniería, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: gonzalonauman16@gmail.com, axel.skrauba@fio.unam.edu.ar

---

## Resumen

El presente artículo, aborda el análisis del estado de un motor de inducción trifásico en distintos modos de operación a través de la instrumentación y la adquisición de señales de vibración mediante la utilización de sensores y microcontroladores. Además, el estudio incluye la exploración de técnicas de inmunización de ruidos externos, que tienen como objetivo prevenir la degradación y garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos electrónicos involucrados en el proceso.

**Palabras Clave** – Adquisición de Señales de Vibración, Banco de Datos, Instrumentación, Ruido

## 1 Introducción

Las máquinas eléctricas de inducción son piezas fundamentales en todo proceso productivo y por lo tanto requieren de un excelente mantenimiento y unas condiciones aceptables de operación para poder cumplir efectivamente con los objetivos globales de una planta.

El mantenimiento predictivo ha sido muy difundido en el sector productivo en especial en las máquinas eléctricas. Para estas últimas, se han desarrollado variadas técnicas de diagnóstico, pero las más aplicadas son las que involucran análisis de vibraciones, análisis espectral de corriente, análisis del flujo axial de dispersión y las más recientes que combinan modelos de simulación del comportamiento de las fallas y la aplicación de redes neuronales artificiales para identificar las fallas entre espiras del estator.

Las señales de vibración son una herramienta importante en el monitoreo de motores de inducción trifásicos. Estas señales pueden proporcionar información valiosa sobre el estado de salud del motor, como desalineaciones, desequilibrios, daños en los rodamientos y otros problemas mecánicos [1]. Por lo tanto, es crucial entender cómo adquirir correctamente estas señales y cómo caracterizarlas para una interpretación precisa.

La adquisición y caracterización de señales de vibración es esencial en la identificación temprana de problemas en motores de inducción trifásicos. La caracterización de estas señales puede proporcionar información valiosa sobre el estado de salud del motor y permitir la identificación de problemas mecánicos antes de que se conviertan en fallas catastróficas [2]. Por lo tanto, es

importante continuar investigando y desarrollando nuevas técnicas para mejorar la adquisición y caracterización de señales de vibración en este tipo de máquinas [3].

Además, es importante tener en cuenta la inmunidad al ruido en la adquisición de señales, ya que el ruido puede degradar, dificultar o interrumpir el correcto funcionamiento de un equipo electrónico, y por ende, comprometer la calidad de los datos adquiridos. Por lo tanto, es necesario validar técnicas para reducir el impacto del ruido en las señales adquiridas.

En este trabajo se implementa un banco de ensayo para un motor de inducción con el fin de caracterizar sus fallas, donde se realizaron ensayos en condiciones de vacío y de carga, a diferentes velocidades. Durante los ensayos, se adquirieron datos de vibración y velocidad, lo que permitió obtener información precisa sobre la respuesta de la máquina.

## 2 Descripción del Banco de Ensayos

Los ensayos experimentales fueron realizados en el laboratorio del Grupo de Investigación del Departamento de Electrónica de la Facultad de Ingeniería de Oberá.

### 2.1 Hardware

Los materiales y equipos utilizados para la realización de dichas pruebas fueron:

- Motor de inducción trifásico
- Inversor trifásico *SV055i-4NO*
- Alternador automotriz
- Osciloscopio *GW INSTEK*
- *Arduino MEGA 2560*
- Acelerómetro triaxial *ADXL345*
- *Encoder* rotativo *LPD3806-600BM-G5-24C*

Las características específicas del motor de inducción se denotan en la siguiente tabla:

**Tabla 1:** Datos de la placa del motor de inducción trifásico

Marca	<b>SIEMENS</b>
Modelo	<b>1LA3 083-2YB20</b>
Tensión	<b>220-380 V</b>
Corriente	<b>4,50 A</b>
Potencia	<b>1,5 CV</b>
Velocidad	<b>2880 RPM</b>
Frecuencia	<b>50 Hz</b>

La variación de la velocidad del motor se logró mediante un control  $V/F$  implementado en el inversor trifásico, lo que permite evaluar y experimentar el comportamiento del motor en diferentes

puntos de operación. Como carga se utilizó un alternador automotriz, solidario al eje del motor mediante una correa.

Para la adquisición de datos se utilizó un microcontrolador Arduino MEGA 2560, con un *firmware* para la gestión y manejo de los datos de cada uno de los ejes del acelerómetro en conjunto con la velocidad relevada por el *encoder* rotativo.



Fig. 1. Fotografía del banco de ensayos.

## 2.2 Software

Para la adquisición de las señales se utilizó un *firmware* diseñado específicamente para esta tarea. El mismo se encarga de gestionar las interrupciones y periféricos de comunicación del *ATmega2560* (Microcontrolador del *Arduino MEGA*), con el fin de garantizar un muestreo adecuado de las señales de vibración y pulsos provenientes del *encoder*. Además, esta información se serializa mediante *USB*, utilizando una codificación con redundancia para la detección de errores.

La información recibida por *USB*, es decodificada y almacenada por una computadora personal, dónde se tiene una interfaz especialmente diseñada para esta tarea. Durante este proceso, se renderizan las curvas relevadas en tiempo real, con el fin de validar empíricamente la correcta ejecución del experimento en curso.

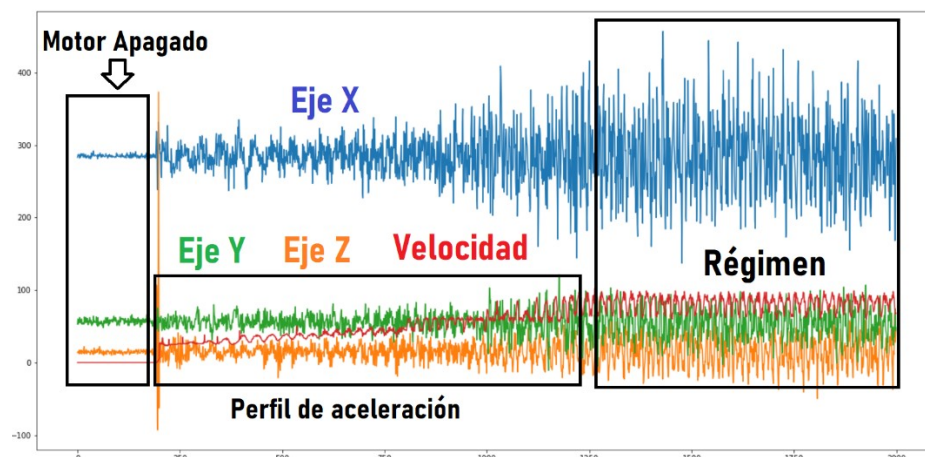
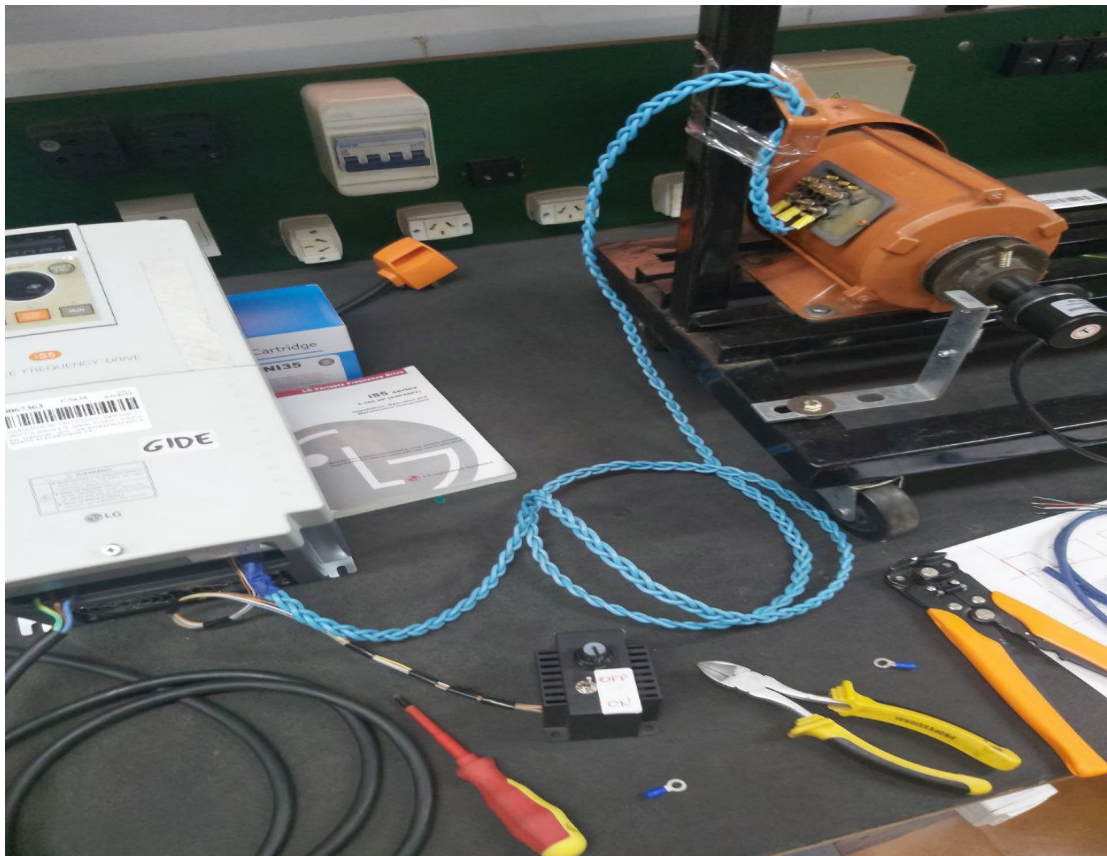


Fig. 2. Ejemplo de visualización de un ensayo en la interfaz.

### 3 Inmunidad al Ruido Electromagnético

Cuando se requiere procesar una señal digitalizada para su aplicación en una tarea específica, suele ser necesario emplear un filtro. En muchos casos, es importante evaluar si el filtro existente es adecuado o si se debe desarrollar uno más complejo y específico. El tipo de filtro a utilizar depende, entre otros factores, de las componentes que se desean eliminar o atenuar. Esto es relevante cuando se trata de señales adquiridas de un proceso físico, ya que suelen estar contaminadas con ruido no deseado. Se vuelve fundamental identificar el ruido presente, comprender su naturaleza y composición, y usar esta información para determinar las características que debe tener el filtro.

Durante la fase de experimentación y pruebas Fig. 3, se identificaron ruidos que emergen principalmente de etapa de potencia de la máquina y las componentes armónicas del variador. La intensidad de estos ruidos varía en función de las condiciones específicas durante la etapa de medición. Esto dio lugar a señales distorsionadas no deseadas Fig. 4.



**Fig. 3.** Etapa de potencia con cable trenzado de tipo taller.

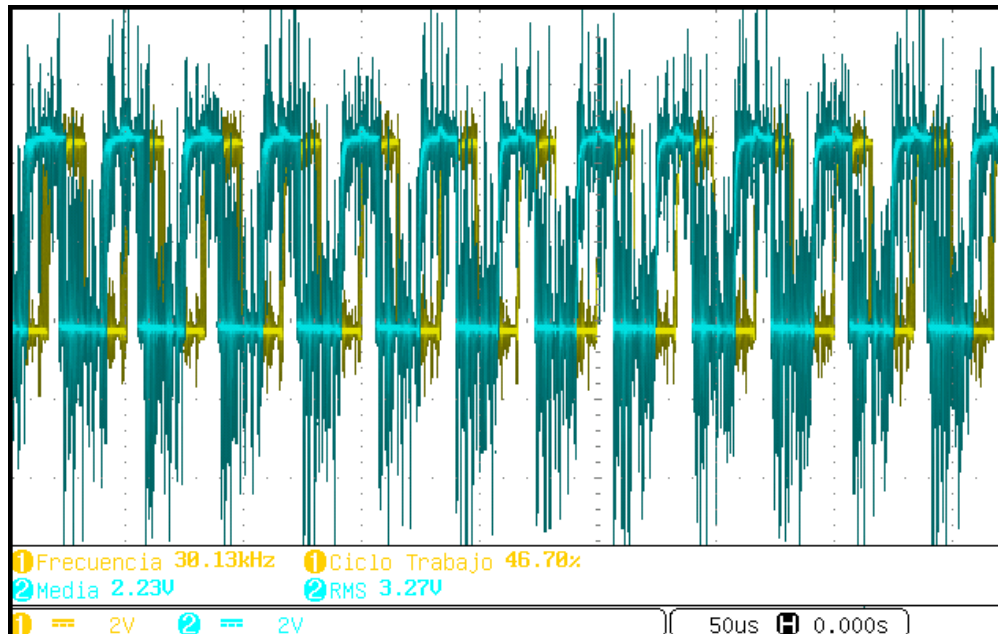


Fig. 4. Captura de osciloscopio de la señal relevada en la salida del *encoder*.

Por otra parte, la comunicación entre el microcontrolador y el acelerómetro ocurre mediante el bus  $I^2C$ , lo que conlleva un protocolo de transferencia específico. La interferencia con la naturaleza observada en la Fig. 4, directamente rompe la comunicación en la capa física, por lo tanto, resulta inviable. Además de eso, los picos de varios voltios sobre la señal digital pueden producir desde anomalías graves en los GPIO (*General Purpose Input/Output*, Entrada/Salida de Propósito General) de los microcontroladores, hasta la destrucción de los mismos.

La reducción de este tipo de interferencias suele ser posible mediante la implementación de una conexión a tierra efectiva en los instrumentos. Esta estrategia permite dirigir el ruido directamente hacia el suelo utilizando un cable de drenaje en el lugar del cable de señal.

En esta línea, establecer una conexión a tierra óptima debe constituir una prioridad. No solo resguarda contra el ruido eléctrico, sino también frente a las sobretensiones, cuyo potencial destructivo puede extenderse a la totalidad del sistema eléctrico [4]. Otra estrategia radica en la utilización de cables blindados, que desempeñan un papel crucial, actuando como una barrera que impide que las interferencias externas afecten la señal. En este proceso, es esencial una vinculación a tierra para derivar las corrientes inducidas en el blindaje.

Los cables blindados suelen presentar una trenza o lámina fabricada en materiales conductores, como el cobre o el aluminio. Esto permite que operen a modo de una jaula de Faraday, una forma de blindaje que desvía cualquier interferencia exterior, manteniéndola lejos de la señal que debe ser preservada [5]. Estas implementaciones físicas dan lugar a mejoras sustanciales en la calidad de la señal, posibilitando una transmisión más fiable y constante. De manera visual, pueden contrastarse las diferencias respecto a las Fig. 4 y Fig. 6, dónde se perciben claramente los efectos de atenuación del ruido al implementar un blindaje adecuado en la etapa de potencia, en conjunto a una vinculación a tierra.

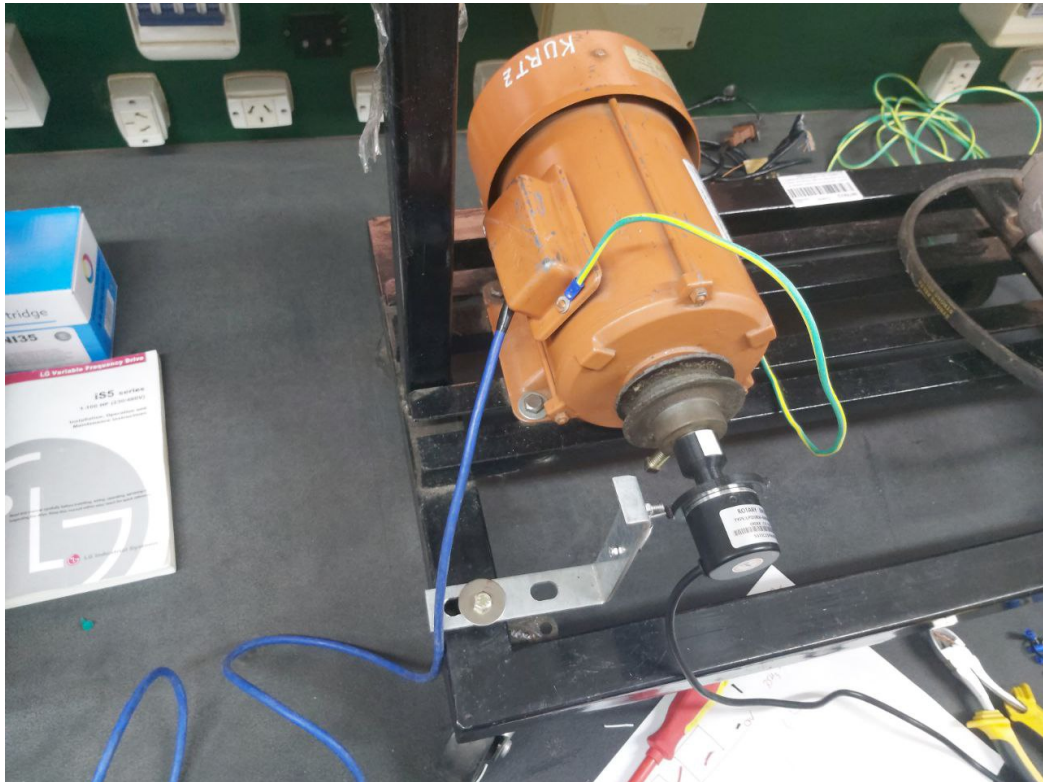


Fig. 5. Etapa de potencia con cable blindado más puesta a tierra.

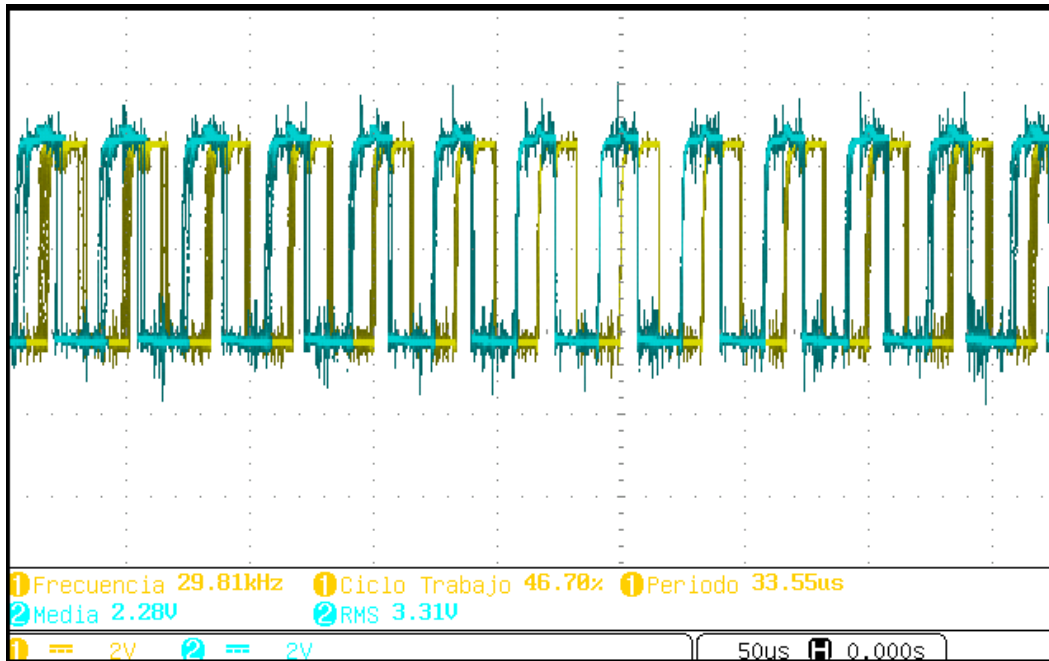


Fig. 6. Captura del osciloscopio de la señal relevada en la salida del *encoder* luego de adecuamiento en la etapa de potencia.

#### 4 Relevamiento de Señales en Diferentes Modos de Operación

El proceso de relevamiento de señales comienza con la captura de un pulso generado por un *encoder* rotativo, el cual está sujeto al eje del motor para lograr una medición precisa de su velocidad Fig. 7. De manera complementaria, se ha incorporado un acelerómetro como componente adicional para capturar las vibraciones del sistema Fig. 8. Estas señales se han recopilado en diversas condiciones operativas, logrando esta versatilidad a través de la implementación de una modulación de la velocidad del motor mediante *inversor trifásico* de control de Voltaje/Frecuencia ( $V/F$ ). Para llevar a cabo estos experimentos, se ha aplicado un rango de frecuencias variable, abarcando desde 19 Hz hasta 56 Hz (1140 a 3360 *RPM* para el motor descrito).

Como carga, se ha empleado un alternador automotriz, unido al eje del motor mediante una correa. Esta configuración ha permitido un análisis detallado de la respuesta del motor frente a esta carga específica, lo que permite relevar su dinámica para distintos puntos y modos de operación (distintas velocidades y condiciones de funcionamiento).

Las señales son procesadas en un Arduino MEGA, el mismo el papel de coordinar las tasas de muestreo y sincronismo entre las diferentes fuentes de datos (vibración triaxial y velocidad). En esta etapa, las señales son procesadas y adecuadas conforme a las instrucciones programadas. Las señales se codifican y envían en tramas vía conexión serie USB a una computadora Fig. 9, en dónde se comprueban y validar varios aspectos de integridad. Si la comprobación es exitosa, los datos se almacenan y se concreta un proceso de relevamiento.

Los datos recibidos se analizan con software especializado. Son interpretados y desglosados para extraer información, desde la determinación precisa de la posición hasta la evaluación de patrones de aceleración.

Al concluir el proceso de análisis, los datos se encuentran listos para su utilización como fuente de información para algoritmos de modelado de máquina, determinación de anomalías, predicción de velocidad en base a la dinámica de la vibración, etc. Es decir, estos datos sientan la base de trabajos futuros.

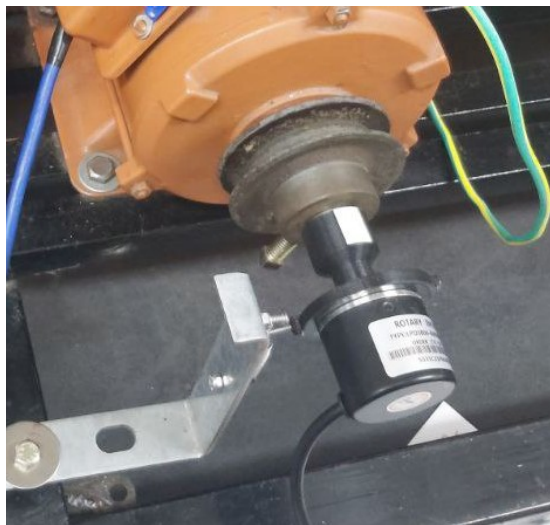
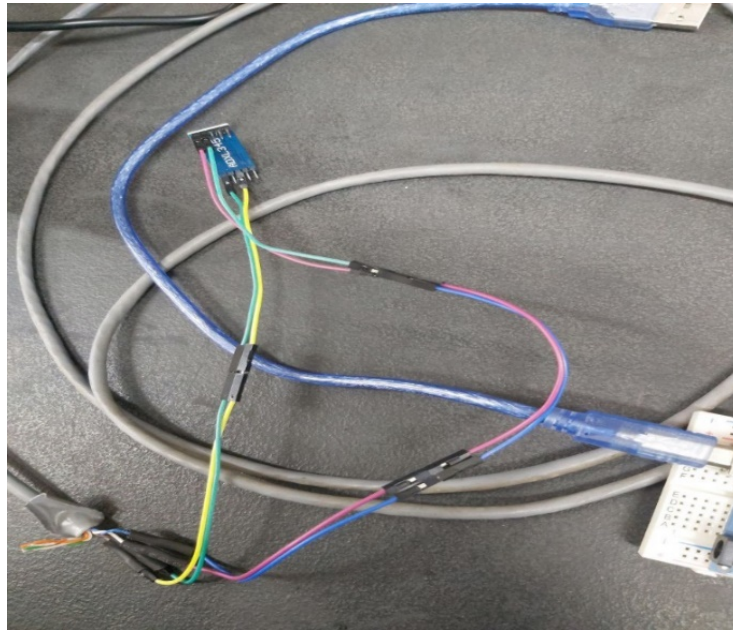
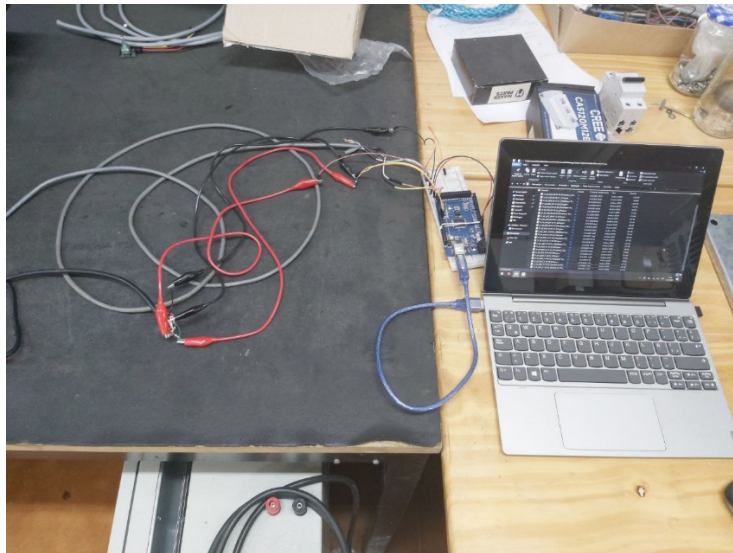


Fig. 7. Fotografía del *encoder* sujeto al eje del motor.



**Fig. 8. Fotografía de acelerómetro.**

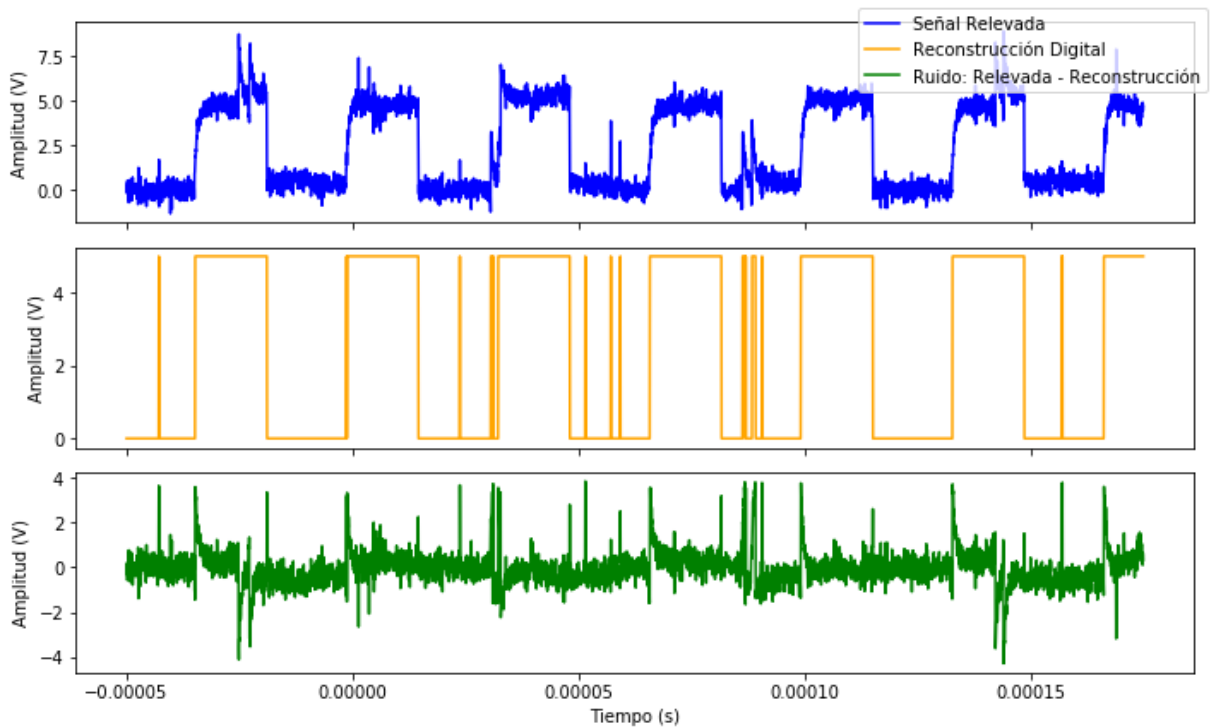


**Fig. 9. Fotografía de la conexión entre el Arduino y la Computadora.**

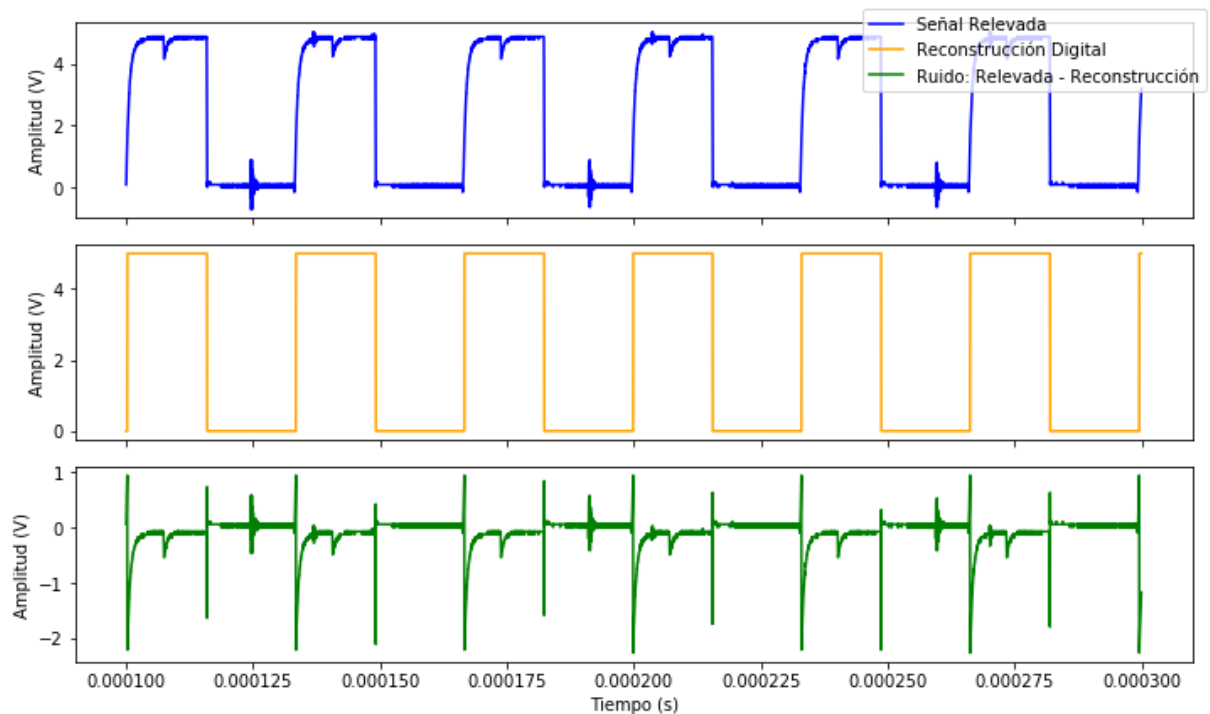
## 5 **Análisis de Resultados**

Para cuantificar los efectos de las acciones llevadas a cabo para mitigar el ruido, se emplea el coeficiente *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), que expresa en forma numérica la proporción existente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido. Ya que se tienen señales digitales, se opta por una reconstrucción mediante umbralización simple (1,5 V), la diferencia entre la señal relevada y la reconstrucción digital se considera como ruido. A continuación, se grafica esta descomposición para una de las señales del *enconder*, con y sin el efecto del blindaje.





**Fig. 10. Ejemplo de señal relevada sin tratamiento anti-ruido.**



**Fig. 11. Ejemplo de señal relevada con tratamiento anti-ruido.**

Para el caso de las Fig. 10 se tiene un  $SNR$  de  $24,22\text{ dB}$  mientras que, para la Fig. 11, se computa un valor de  $67,78\text{ dB}$ . Es decir, se consigue una mejoría de casi 3 veces.

Por otra parte, hasta la realización del presente escrito, se han almacenado 32 minutos de registros válidos de las señales ya mencionadas. Esto se corresponde con 64 ensayos individuales respecto a las curvas de aceleración del motor, estableciendo diferentes velocidades de régimen y condiciones de carga. La duración de estos ensayos es variable, un panorama general se percibe en el histograma de la Fig. 12.

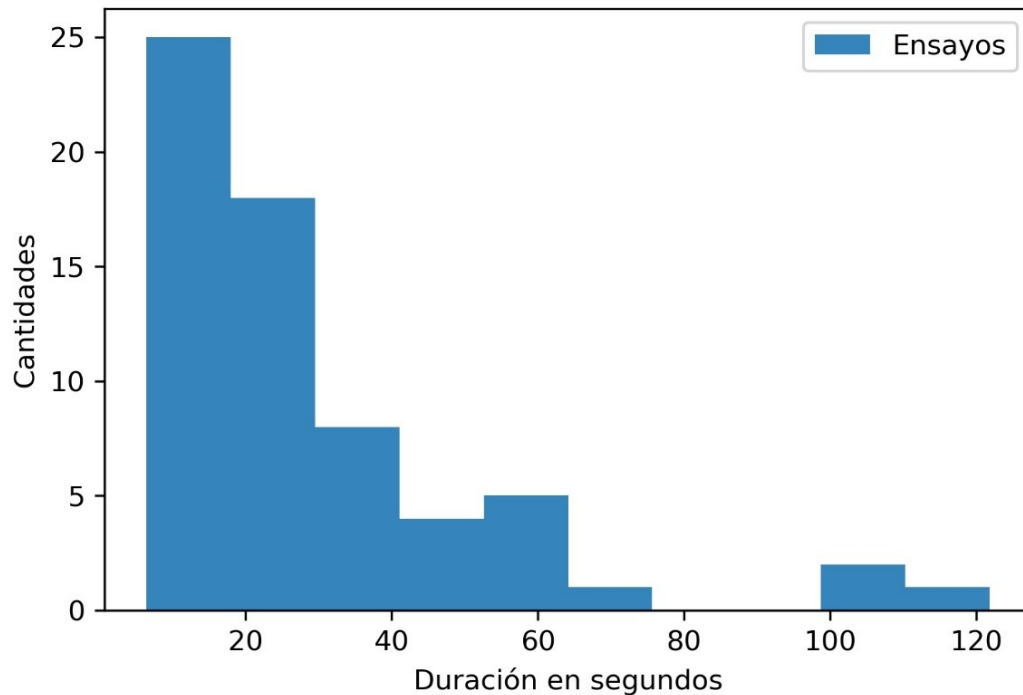


Fig. 12. Histograma con la distribución de la duración de los ensayos válidos.

## 6 Conclusiones

En el marco del presente escrito se ha abordado la instrumentación de un motor para el muestreo y adquisición de señales de vibración y velocidad para diversas situaciones y contexto. Este artículo contrasta los efectos de los ruidos sobre estas señales y los resultados respecto a las acciones llevadas a cabo para mitigarlos.

Se han presentado resultados cualitativos y cuantitativos, logrando una mejora de casi tres veces en el SNR de la señal. Además, se ha generado un banco de datos con información de la dinámica de la máquina en un amplio contexto operativo. Esto sienta las bases para la validación de diversos algoritmos basados en el procesamiento y análisis de estas señales.

En conclusión, se destaca la relevancia de continuar investigando y perfeccionando estas metodologías, con miras a escalar este banco de ensayos mediante *hardware* con mayor capacidad de procesamiento, lo que permitiría mayores tasas de muestreo.

## Referencias

- [1] J. A. Hernández-Muriel, A. M. Álvarez-Meza, J. D. Echeverry-Correa, Á. Á. Orozco-Gutierrez y M. A. Álvarez-López, «Feature relevance estimation for vibration-based condition monitoring of an internal combustion engine,» *TecnoLógicas*, vol. 39, n° 20, 2017.
- [2] D. Trocel, «Análisis de vibraciones en motores eléctricos de inducción,» 20 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://power-mi.com/es/content/an%C3%A1lisis-de-vibraciones-en-motores-el%C3%A9ctricos-de-inducci%C3%B3n>. [Último acceso: 2023].
- [3] P. A. Aristizabal, «Metodología para caracterizar señales de vibración en motores diésel, usando representaciones del Tiempo, Frecuencia y Tiempo-Frecuencia y diagnóstico mediante HMM,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/1a522f80-9793-4860-8d39-0a5edb210312/content>. [Último acceso: 2023].
- [4] PROINEX TEAM, «Ruido Electrico: Conoce las Posibles Causas y Soluciones.,» [En línea]. Available: <https://proinex.net/ruido-electrico-conoce-las-posibles-causas-y-soluciones/>. [Último acceso: 2023].
- [5] C. Cassiolato, «EMI - Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales y mucho más,» [En línea]. Available: <https://www.smar.com/es/articulo-tecnico/emi-interferencia-electromagnetica-en-instalaciones-industriales-y-mucho-mas>. [Último acceso: 2023].