



Departamento de  
Ingeniería Mecánica  
Universidad de Concepción

# Caracterización de señales de emisiones acústicas en una transmisión de engranajes con soldadura basal

**Juan Pablo Miguieles Millar**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción  
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:  
Dr.-Ing. Félix Leaman W.

Enero 2025  
Concepción, Chile

©2025 Juan Pablo Miguieles Millar

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento,  
incluyendo la cita bibliográfica del documento

# Agradecimientos

Agradezco a todos quiénes me han apoyado y alegrado mi experiencia universitaria. A los profesores y ayudantes que se han esforzado por transmitir su conocimiento de la mejor forma posible durante los últimos 6 años. Especialmente a mi profesor guía Félix Leaman por su apoyo durante la realización del PIM y la memoria de título y su asistencia frente a las dificultades que se presentaron durante el camino.

Agradezco de igual forma a mi familia que siempre ha estado conmigo, a mi madre Lilian por su paciencia y dedicación conmigo, a mi hermano Martín por su simpatía, curiosidad y buena disposición ante cualquier complicación y a mi hermana Catalina por su sonrisa, su simpatía y colaboración en los momentos complicados. También a mi abuela Dora y mi tía Cecilia por proporcionar un espacio de paz y tranquilidad en sus respectivos campos y a mi tío Milton por revivir mi pasión por el ciclismo sin los cuales la presión me habría afectado de mayor manera.

Agradezco también a mis amigos que me han acompañado, animado y alegrado durante estos años. A los que tuve desde mi infancia y en cuyos reencuentros revivía esos días mas simples, con los que tuve tardes cordiales y agradables pero en que la amistad no perduró y a todos los amigos y gente estupenda que he conocido en esta universidad. A Catalina la pequeña, Catalina la grande, Diego y Ricardo les agradezco especialmente por su amistad incondicional en los últimos y por la conexión que hemos logrado.

Por último, quiero agradecer a quienes empezaron el camino de mi vida y educación pero no estarán en la conclusión de esta etapa. A mi padre Francisco y mi abuela Domitila quienes sé que cariño resiste su ausencia de este mundo.

## Resumen

Se realizó una comparación estadística con diversas herramientas de análisis de señales entre una transmisión por engranajes en estado normal y con una soltura en un perno basal. Esto con el objetivo de identificar los síntomas y mecanismos presentes en el equipo al presentar este defecto mediante emisiones acústicas. A partir de mediciones realizadas durante el funcionamiento del equipo en ambas bases y sobre dos descansos se incluye un análisis de la señal bruta, de su espectro de frecuencia y la envolvente de la señal, encontrando una menor actividad de emisiones acústicas en la base en donde se aplica la soltura. Esto se expresa esencialmente en una disminución de las ondas continuas que se produce por resultado del roce en la conexión. A su vez, hay un aumento en la actividad por este roce en la base del lado contrario y de los eventos periódicos sincrónicos a la dinámica de la transmisión en los descansos. Sugiriendo que la pérdida de una conexión aumenta el nivel de esfuerzo en el resto del equipo.

Estos síntomas se notan mayormente en condiciones de operación de alto torque y frecuencia. En un análisis paralelo utilizando señales de vibraciones mecánicas se nota de menor manera la presencia de un patrón de síntomas entre los ensayos, por lo que la medición con emisiones acústicas se muestra adecuada para el monitoreo.

## Abstract

A statistical comparison was made with various signal analysis tools between a gear transmission in normal condition and with a looseness in a basal bolt. This with the objective of identifying the symptoms and mechanisms present in the equipment when presenting this defect through acoustic emissions. Based on measurements made during the operation of the equipment in both bases and on two rests, an analysis of the raw signal, its frequency spectrum and the signal envelope is included, finding a lower activity of acoustic emissions in the base where the looseness is applied. This is essentially expressed in a decrease in the continuous waves that are produced as a result of the friction in the connection. In turn, there is an increase in the activity due to this friction in the base on the opposite side and in the periodic events synchronous to the dynamics of the transmission in the rests. Suggesting that the loss of a connection increases the level of effort in the rest of the equipment.

These symptoms are mostly noticed in high torque and frequency operating conditions. In a parallel analysis using mechanical vibration signals, the presence of a pattern of symptoms between tests is less noticeable, so measurement with acoustic emissions is suitable for monitoring.

# Contenidos

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Lista de Figuras</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Lista de Tablas</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Nomenclatura</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1 Introducción</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1 Contexto . . . . .   | 5         |
| 1.2 Hipótesis . . . . .  | 6         |
| 1.3 Objetivos . . . . .  | 6         |
| 1.4 Descripción del trabajo . . . . .  | 7         |
| <b>2 Marco Teórico</b>   | <b>9</b>  |
| 2.1 Naturaleza de las soldaduras mecánicas . . . . .   | 9         |
| 2.2 Respuesta vibratoria en sistemas no lineales . . . . .                                       | 9         |
| 2.3 Posibles fuentes de Emisiones cústicas (EA) en una caja de engranajes . . . . .              | 10        |
| <b>3 Metodología</b>   | <b>14</b> |
| 3.1 Verificación de sensores . . . . .   | 14        |
| 3.2 Medición experimental . . . . .  | 14        |
| 3.3 Procesamiento de señales de EA . . . . .   | 16        |
| 3.4 Análisis con vibraciones . . . . .   | 19        |
| <b>4 Resultados</b>  | <b>21</b> |
| 4.1 Resultado de ensayos de calibración . . . . .  | 21        |
| 4.2 Cambios en los parámetros estadísticos de la señal bruta y su espectro de amplitud . . . . . | 21        |
| 4.3 Cambios en los parámetros estadísticas en la envolvente de la señal . . . . .                | 29        |
| 4.4 Cambios en las componentes sincrónicas de la envolvente . . . . .                            | 34        |
| 4.5 Revisión de señales de vibraciones mecánicas . . . . .                                       | 39        |
| <b>5 Discusión</b>   | <b>44</b> |
| <b>6 Conclusiones</b>  | <b>46</b> |
| <b>Anexo A Tablas con datos globales</b>   | <b>52</b> |

## Lista de Figuras

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1  | Transiente de EA e indicadores . . . . .  | 11 |
| Figura 2.2  | Bandas frecuenciales de diversas fuentes de EA [1] . . . . .                                    | 11 |
| Figura 2.3  | Señal de EA en ráfaga y continua [2] . . . . .  | 12 |
| Figura 3.1  | Geometría modelo de ensayo Hsu Nielsen [3] . . . . .  | 14 |
| Figura 3.2  | Banco de ensayos para medición . . . . .  | 15 |
| Figura 3.3  | Perno basal suelto . . . . .  | 15 |
| Figura 3.4  | Relación entre corriente en el freno magnético y torque aplicado en el sistema [4] . . . . .    | 16 |
| Figura 3.5  | Filtro para aislar primeros armónicos de envolvente . . . . .                                   | 19 |
| Figura 3.6  | Recolección de <i>peaks</i> en envolvente . . . . .   | 19 |
| Figura 3.7  | Filtro para señal de vibraciones mecánicas . . . . .  | 19 |
| Figura 3.8  | Filtro para señal para análisis de <i>peaks</i> . . . . .                                       | 20 |
| Figura 3.9  | Recolección de <i>peaks</i> en señal vibratoria . . . . .                                       | 20 |
| Figura 4.1  | Señales de ensayo Hsu-Nielsen recolectadas . . . . .  | 21 |
| Figura 4.2  | Formas de onda de señales de EA . . . . .   | 23 |
| Figura 4.3  | Espectro de frecuencia de señales de EA en la condición de máxima frecuencia y torque . . . . . | 24 |
| Figura 4.4  | Evolución de valor RMS en canal 0 . . . . .   | 25 |
| Figura 4.5  | Evolución de valor RMS en canal 1 . . . . .   | 25 |
| Figura 4.6  | Evolución de valor RMS en canal 2 . . . . .   | 26 |
| Figura 4.7  | Evolución de factor de Curtosis en canal 2 . . . . .  | 26 |
| Figura 4.8  | Evolución de factor de Curtosis en canal 3 . . . . .  | 27 |
| Figura 4.9  | Evolución de la entropía espectral en canal 0 . . . . .   | 27 |
| Figura 4.10 | Evolución de la entropía espectral en canal 1 . . . . .   | 28 |
| Figura 4.11 | Evolución de la entropía espectral en canal 2 . . . . .   | 28 |
| Figura 4.12 | Evolución de la componente máxima espectral en canal 0 . . . . .                                | 29 |
| Figura 4.13 | Evolución del centroide del espectro en canal 0 . . . . .                                       | 29 |
| Figura 4.14 | Evolución de la desviación espectral en canal 0 . . . . .                                       | 30 |
| Figura 4.15 | Evolución de la desviación espectral en canal 2 . . . . .                                       | 30 |
| Figura 4.16 | Evolución de la energía en canal 0 . . . . .  | 31 |
| Figura 4.17 | Evolución de la energía en canal 1 . . . . .  | 31 |
| Figura 4.18 | Evolución de la energía en canal 2 . . . . .  | 32 |
| Figura 4.19 | Evolución de la entropía de la envolvente en canal 0 . . . . .                                  | 32 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.20 Evolución de la entropía de la envolvente en canal 1 . . . . .  | 33 |
| Figura 4.21 Evolución de la entropía de la envolvente en canal 2 . . . . .  | 33 |
| Figura 4.22 Evolución del centroide de la envolvente en canal 1 . . . . .   | 33 |
| Figura 4.23 Evolución del centroide de la envolvente en canal 2 . . . . .   | 34 |
| Figura 4.24 Evolución de la desviación espectral de la envolvente en canal 0 . . . . .                                  | 34 |
| Figura 4.25 Evolución de la desviación espectral de la envolvente en canal 2 . . . . .                                  | 35 |
| Figura 4.26 Evolución del coeficiente de variación de la 1X de la envolvente en canal 2                                 | 35 |
| Figura 4.27 Evolución del coeficiente de variación de la 1X de la envolvente en canal 3                                 | 36 |
| Figura 4.28 Espectro de la envolvente de señales de EA en la condición de máxima<br>frecuencia y torque . . . . .       | 37 |
| Figura 4.29 Espectro de la envolvente de señales de EA en la condición de máxima<br>frecuencia y torque . . . . .       | 38 |
| Figura 4.30 Evolución de la magnitud de la 1X al eje rápido en canal 0 . . . . .  | 39 |
| Figura 4.31 Evolución de la magnitud de la 1X al eje rápido en canal 1 . . . . .  | 39 |
| Figura 4.32 Evolución de la magnitud de la 1X al eje rápido en canal 2 . . . . .  | 40 |
| Figura 4.33 Evolución de la magnitud de la suma de los armónicos al eje rápido en<br>canal 2 . . . . .                  | 40 |
| Figura 4.34 Evolución de la magnitud de la 1X al eje lento en canal 2 . . . . .   | 41 |
| Figura 4.35 Evolución de la magnitud de la suma de los armónicos al eje lento en canal 2                                | 41 |
| Figura 4.36 Evolución de la magnitud a la frecuencia de engrane en canal 2 . . . . .                                    | 42 |
| Figura 4.37 Evolución de la magnitud de la suma de las componentes mecánicamente<br>significativas en canal 2 . . . . . | 42 |
| Figura 4.38 Evolución de la magnitud de la 1X al eje rápido en canal 3 . . . . .  | 42 |
| Figura 4.39 Evolución de la magnitud de la 1X al eje lento en canal 3 . . . . .   | 42 |
| Figura 4.40 Evolución de la magnitud a la frecuencia de engrane en canal 3 . . . . .                                    | 43 |
| Figura 4.41 Diferencia en coeficiente de variación en <i>peaks</i> a la frecuencia de engrane<br>en canal 2 . . . . .   | 43 |
| Figura 4.42 Evolución de la magnitud a la frecuencia de engrane en canal 1 . . . . .                                    | 43 |
| Figura 4.43 Evolución de la magnitud a la frecuencia de engrane en canal 2 . . . . .                                    | 43 |

## Lista de Tablas

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabla 4.1  | Resultados de ensayo Hsu-Nielsen . . . . .  | 22 |
| Tabla 4.2  | Resumen de patrones detectados de los parámetros de la señal bruta y su espectro de frecuencia. . . . . | 29 |
| Tabla 4.3  | Resumen de patrones detectados de los parámetros de la envolvente de la señal . . . . .                 | 30 |
| Tabla 4.4  | Resumen de los patrones encontrados en las componentes del espectro de la envolvente . . . . .          | 34 |
| Tabla 4.5  | Resumen de los patrones vistos en los parámetros de la señal vibratoria .                               | 40 |
| Tabla 4.6  | Resumen de los patrones vistos en la revisión de los armónicos de la señal vibratoria . . . . .         | 41 |
| Tabla A.1  | Datos de parámetros de señal de EA y Fast Fourier Transform (FFT) en canal 0 . . . . .                  | 52 |
| Tabla A.2  | Datos de parámetros de señal de EA y FFT en canal 1 . . . . .   | 53 |
| Tabla A.3  | Datos de parámetros de señal de EA y FFT en canal 2 . . . . .   | 53 |
| Tabla A.4  | Datos de parámetros de señal de EA y FFT en canal 3 . . . . .   | 54 |
| Tabla A.5  | Datos de parámetros de envolvente de señal de EA en canal 0 . . . . .                                   | 54 |
| Tabla A.6  | Datos de parámetros de envolvente de señal de EA en canal 1 . . . . .                                   | 55 |
| Tabla A.7  | Datos de parámetros de envolvente de señal de EA en canal 2 . . . . .                                   | 55 |
| Tabla A.8  | Datos de parámetros de envolvente de señal de EA en canal 3 . . . . .                                   | 56 |
| Tabla A.9  | Datos de armónicos de envolvente de señal de EA en canal 0 . . . . .                                    | 56 |
| Tabla A.10 | Datos de armónicos de envolvente de señal de EA en canal 1 . . . . .                                    | 57 |
| Tabla A.11 | Datos de armónicos de envolvente de señal de EA en canal 2 . . . . .                                    | 57 |
| Tabla A.12 | Datos de armónicos de envolvente de señal de EA en canal 3 . . . . .                                    | 57 |
| Tabla A.13 | Parámetros de señales de vibraciones mecánicas en canal 1 . . . . .                                     | 58 |
| Tabla A.14 | Parámetros de señales de vibraciones mecánicas en canal 2 . . . . .                                     | 58 |
| Tabla A.15 | Componentes en señales de vibraciones mecánicas en canal 1 . . . . .                                    | 58 |
| Tabla A.16 | Componentes en señales de vibraciones mecánicas en canal 2 . . . . .                                    | 58 |

# Nomenclatura

|            |                        |
|------------|------------------------|
| <b>EA</b>  | Emisiones cústicas     |
| <b>FFT</b> | Fast Fourier Transform |
| <b>RMS</b> | Root mean squared      |

# 1 Introducción

## 1.1 Contexto

El mantenimiento por condición o predictivo permite identificar defectos emergentes en maquinarias antes de que estos generen fallas severas en estas, evitando gastos excesivos por paradas no programadas, reparaciones de emergencia y también por acciones de mantenimiento prescindibles [5]. Para máquinas rotatorias, las herramientas más utilizadas incluyen el análisis de las señales vibratorias [6], de la composición del aceite y la termografía infrarroja. Una técnica cuyo estudio ha dado resultados prometedores como nueva herramienta de monitoreo de condición es el análisis de las emisiones acústicas EA. Estas son ondas de alta frecuencia (entre 100 [kHz] y 2 [MHz]) que se generan como consecuencia de la aplicación y liberación de energía elástica en el material. Las EA ya se han usado exitosamente en el análisis de condición de estructuras estáticas por su sensibilidad a la aparición y expansión de grietas. Así, estas se usan, por ejemplo, para detectar fallas en concreto [7] y acero [8] antes de que se causen daños mayores y se localizan fallas comunes como son las fugas en sistemas de tuberías con alta eficacia [9].

La introducción de esta herramienta al análisis de condición de máquinas y sistemas mecánicos ha sido promisorio, mostrando capacidad de detección de fallas en elementos mecánicos a los que se aplica carga por impacto, sean los rodamientos [10] o las transmisiones por engranajes [2]. Además, las EA tienen mayor sensibilidad a la detección temprana de fallas, por lo que permiten mayor planificación en el mantenimiento de equipos críticos. Sin embargo, las interacciones que no conllevan impactos cíclicos, como el desbalanceamiento en el rotor o el desalineamiento del eje, no dan una respuesta identificable en señales EA. Por lo demás, no se tienen modelos analíticos sobre el comportamiento de las señales en función de las distintas condiciones de operación, por lo que las correlaciones existentes de condición son en ocasiones más bien empíricas.

Otra de las fallas recurrentes a analizar mediante el monitoreo de condición son las solturas mecánicas. Estas se producen ya sea por una montura deficiente de una máquina rotatoria o por un proceso progresivo de soltura por corrosión o por fatiga local. Una soltura puede aumentar hasta llegar a tener un efecto significativo en la vibración del equipo, reduciendo su rigidez y amortiguamiento equivalente [11] y pasa a ser parcialmente libre, lo que provoca un aumento en el riesgo de una falla repentina y una pérdida en la vida útil de los elementos mecánicos. El comportamiento vibratorio por soltura ha sido objeto de varios estudios, poniéndose énfasis en modelos de vibración con juego seguido de impacto [12, 13] por una parte, otros prefieren modelos centrados en el carácter no lineal provocado por la soltura [14, 15], así como el comportamiento caótico que adopta la señal para estos casos [16, 13].

En cuanto al análisis de las solturas en los pernos en sí, existen estudios sobre el efecto de solturas parciales en uniones estáticas como placas o flanges. En específico, sobre los cambios en los modos de vibrar de la conexión provocados por la soltura [17, 18], alterándose especialmente entre los modos de alto orden. También sobre los mecanismos que generan solturas, sean por las condiciones ambientales de corrosión, por fatiga [19], desgaste [20] o como consecuencia de las vibraciones [21] y la fricción [22]. Se ha investigado sobre técnicas de detección de solturas en los pernos mediante análisis de las vibraciones [23] y de emisiones acústicas cerca de estos. A su vez, ha sido objeto de estudio los cambios en la transmisibilidad de las señales por la junta, que al soltarse se reduce considerablemente. Otros métodos incluyen la comparación de curvas de esfuerzo-deformación [24], la medición de ondas de audio [25], por la acción de ondas ultra-sonoras [26] inducidas a partir del cambio en la

transmisibilidad entre las superficies de la unión [27] o por cambios en la fase de la onda al pasar por la unión suelta [28]. Estos métodos, si bien cuentan con mayor precisión que las técnicas más rudimentarias de medición directa de la carga axial y torsional en estos, también conllevan un costo económico mayor [29].

Y en el análisis de las EA, estos han sido, por lo general, más bien enfocados a la identificación de solturas por métodos de aprendizaje automático [30, 31], más que a la realización de un ejercicio analítico de su comportamiento en estas condiciones, el cual ha producido trabajos relacionando la fricción y desgaste en los pernos con las EA en condiciones de prueba [32] pero sin establecer la influencia del apriete en estos ni de su rugosidad actual. Por lo demás, a conocimiento del autor, no se ha realizado un estudio del efecto de una soltura en una máquina rotatoria, pues la literatura se enfoca en la detección de solturas en estructuras estáticas. Esto tiene especial interés en un equipo de transmisión por engranaje, pues en este, por lo general, la fuerza de desbalanceamiento (que genera la respuesta cambiante según la presencia de soltura) es reducida en comparación a otro tipo de rotores. Por tanto, puede que no sea posible realizar la técnica más común de detección de soltura en máquina rotatoria, que es ver la presencia de sub-armónicos [23] en el espectro de frecuencia. Aún así, [21] afirma que los pulsos vibratorios cortos son los que más aceleran la soltura, por lo que las transmisiones tienen riesgo de tener soltura y es más difícil detectarlas.

## 1.2 Hipótesis

Previo a la realización del trabajo, se tenían algunas nociones a priori del probable comportamiento de las señales de EA ante una soltura en un sistema de engranaje. Por una parte, de acuerdo a la teoría de vibraciones con impactos, una soltura conlleva una pérdida parcial en la rigidez del soporte y una sucesión de golpes entre la base del equipo y la fundación. Extrapolando esto a las EA se pensó que estos impactos podrían ser localizados en su fuente y servir como mecanismo de detección precisa de la soltura. A esto se consideró que seguramente habría cambios en las señales de EA periódicas y en los parámetros estadísticos de estas a lo largo del equipo.

Además, se trabaja con la asunción de que es posible detectar mediante las EA de forma más sencilla que en vibraciones mecánicas debido a que estas son más sensibles, por lo que los cambios en la primera serán visibles en más condiciones de operación que en la segunda. Por tanto y resumiendo los puntos, se tiene la siguiente sentencia como hipótesis a refutar o confirmar:

*Es posible encontrar patrones en las señales de emisiones acústicas que se repitan entre múltiples condiciones de operación que permitan detectar de forma confiable la presencia de solturas mecánicas en una transmisión por engranajes.*

## 1.3 Objetivos

Durante el desarrollo de este trabajo, se pretende estudiar en detalle el comportamiento de las EA en una transmisión por engranajes ante la presencia de una soltura mecánica en la base. Es así que se requiere encontrar una serie de parámetros en esta señal que, al compararse con un caso sano, presenten diferencias sustanciales. Estas se contrastan con un análisis paralelo de las señales de vibraciones mecánicas en el sistema para ver el grado de facilidad de la identificación del defecto. A su vez, se analiza en múltiples condiciones de operación, esperando que los patrones en las señales se repitan entre estos o al menos identificar los cambios existentes. Por último, los patrones encontrados deben ser relacionados

con fenómenos físicos conocidos, junto con proponer instancias analíticas y experimentales de verificación de las explicaciones presentadas.

Es así que se presenta de forma concisa el objetivo general como:

Identificar experimentalmente atributos en las señales de EA que se relacionen con una soldadura mecánica en una transmisión por engranajes

Luego, como objetivos específicos para obtener este general, se cuentan:

1. Obtener datos experimentales de señales de EA en múltiples condiciones de operación y un set de señales de vibraciones mecánicas análogos.
2. Obtener a partir de una comparación directa y estadística entre los casos sano y con defecto por soldadura mecánica las medidas que permitan caracterizar el caso defectuoso de forma general.
3. Encontrar posibles técnicas para la ubicación de la soldadura dentro de la máquina.
4. Proponer uno o más mecanismos físicos que expliquen el comportamiento observado. Luego dar propuestas de verificación de estas en un modelo más detallado.

## 1.4 Descripción del trabajo

Para la realización de los objetivos establecidos, se realizaron las siguientes actividades:

1. En relación al objetivo número 1, se hicieron una serie de ensayos de medición de las señales de EA generadas durante la operación de un sistema de engranajes. Este equipo se encontraba ya montado en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica y cuenta con un variador de frecuencia del voltaje del motor eléctrico y un freno magnético del otro lado. Estos aparatos permiten variar a voluntad la condición de operación del equipo, por lo que pudo obtenerse un conjunto de datos variados y representativo. La recolección de datos fue realizada en cuatro puntos, dos en la base del equipo y dos sobre los descansos de forma de realizar un análisis más completo sobre los síntomas de la soldadura. Para la obtención de datos de vibraciones mecánicas, se utilizó un conjunto recolectado anteriormente en el mismo banco de ensayos y en condiciones de operación seleccionadas similares. Aunque solo se tenían con las señales correspondientes a los puntos sobre los descansos.
2. Para conseguir el objetivo número 2, fue necesario la selección de una serie de atributos utilizados en la literatura para caracterizar de la forma más completa posibles las múltiples señales. Estas incluyen parámetros estadísticos obtenidos desde la señal bruta, desde su espectro de amplitud y desde la envolvente y su espectro. Luego, a partir de un algoritmo se reunieron estos valores de todas las señales y se realizó una comparación entre las diversas condiciones de operación y entre los casos con soldadura y sin soldadura. Así, se realizó un recuento de los indicadores que parecen representar el cambio en el comportamiento mecánico del sistema al aplicar la soldadura.
3. Se intentó identificar ráfagas de EA que puedan identificarse directamente a la acción de golpes causados por la soldadura, sin tener éxito. Aún así, desde el análisis estadístico se revisó indicadores con comportamiento inverso entre el lado al que se le aplica la soldadura y el opuesto, viendo que existe un aumento en la energía de EA del lado opuesto de donde se ve potencial.

4. En relación al último objetivo, se relaciona el comportamiento identificado con la combinación de la disminución del roce en la superficie del perno suelto con un aumento de las interacciones de fuerzas presentes en la transmisión. Para verificar esto serían necesaria un análisis mas profundo en base a simulaciones, experimentos y análisis físico del sistema.

## 2 Marco Teórico

### 2.1 Naturaleza de las solturas mecánicas

En primer lugar, se debe definir de forma precisa lo que se entiende como una soltura mecánica. Esta es, según la norma ISO 13372 [44] la disminución de la sujeción o aparición de una holgura dentro de un elemento mecánico que debería estar fijo en una máquina. Las solturas pueden ser de múltiples naturalezas y sus causas diversas. Dentro de sus posibilidades pueden ser solturas internas en la máquina entre el eje con los descansos, entre el eje y el rotor, por piezas estructurales o de sujeción dentro de la máquina, de los pernos en la base o de la base en su conjunto con la fundación. Para sus causas se puede contar desde un diseño o montaje inadecuado (provocando holguras en piezas que deben tener interferencia), pérdida de la sujeción por la corrosión [45], solturas causadas por las vibraciones [21], desgaste en piezas, etc. En común todas las solturas tienen en un cambio en la respuesta del sistema ante las fuerzas que se le aplican. Así, ante la fuerza estándar de desbalanceamiento durante la operación se puede tener un comportamiento vibratorio bastante distinto.

Estas se suelen dividir en tres categorías:

1. Tipo A: La holgura estructural, causada por debilidad en la base o fundación en la máquina. Aparición de un pulso una vez por ciclo en dirección radial.
2. Tipo B: Soltura basal, debilitamiento en la conexión entre la máquina y la base que la sujeta. Genera una respuesta no lineal con un número limitado de componentes armónicas y sub-armónicas. Puede tener un carácter caótico (es decir, con múltiples componentes no sincrónicas en el espectro).
3. Tipo C: Holgura interna entre partes estáticas y rotatorias (ejemplo, eje suelto en el rodamiento), hay impactos sucesivos con importante. Respuesta no lineal intensa con muchas componentes armónicas y sub-armónicas con carácter en casos seigveros caótico.

Al realizar la soltura de un perno basal, se tiene una soltura de tipo B.

### 2.2 Respuesta vibratoria en sistemas no lineales

Para modelar los sistemas dinámicos, la forma más simplificada consiste en pasar a un sistema ideal de masa-amortiguador-resorte, resultando en la fórmula 1 para un sistema con frecuencia natural  $\omega_n$  y factor de amortiguamiento  $\xi$ . Para un sistema de engranajes, la fuerza  $F(t)$  aplicada al sistema consiste, primero, en una fuerza de desbalanceamiento de carácter radial y sinusoidal con frecuencia igual a la de la velocidad de rotación del eje. Segundo, por las fuerzas causadas en consecuencia por el choque entre los dientes de los engranajes. Este provoca de forma natural una deflexión en los dientes que se expresa en una fuerza en forma de pulso que ocurre en cada evento de contacto, o sea, en la frecuencia de engrane de esta. Así, en un caso ideal, el espectro de amplitud tan solo debería tener una componente sincrónica a la rotación y otra en los múltiplos de la frecuencia de engrane.

$$\ddot{x} + 2\omega_n\xi\dot{x} + \omega_n^2x - F(t)/M = 0 \quad (1)$$

Cuando un sistema pasa de ser lineal a no lineal, esto ocurre cuando la fuerza interna adopta una forma más compleja y, por tanto, debe utilizarse la ecuación 2. Ahora, se cuenta aparte

de la respuesta elástica con una fuerza generalizada que puede depender de la velocidad o la posición del sistema. Para un sistema mecánico vibratorio, no suele ser importante la parte no lineal dependiente de la velocidad, por lo que interesa una función genérica dependiente de la posición  $\Phi(x)$ . La respuesta a una excitación periódica en este sistema difiere del caso lineal tanto por el cambio de la resistencia real al movimiento como por la aparición de una respuesta en frecuencias distintas a la de la fuerza de entrada.

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x + 2\xi\omega_n\dot{x} + f(x, \dot{x}, t) = 0, f(x, \dot{x}, t) = \Phi(x) - F(t)/M \quad (2)$$

La modelación de un sistema no lineal real es un proceso complejo, pues la función  $f(x, \dot{x})$  no es conocida a priori. Sin embargo, sí es conocida la relación entre los defectos de condición y la presencia de no linealidades en una máquina. Así, dependiendo de la naturaleza de una falla, se puede desarrollar un modelo que la relacione con una función no lineal en concreto. En el caso de una soldadura basal, el equipo tiene un rango en que la parte suelta ofrece una resistencia menor al movimiento y, al pasar cierto rango de este, se encuentra por un tope al encontrar la base u otra pieza que vuelve a elevar esta resistencia. Por eso es que se puede modelar de dos formas, una es mediante el modelo de un resorte que se endurezca, como por [14]. Esto es, mediante un método de aproximación, cuando este tiene una rigidez de  $k_{eq}(x) = k_0 + cx^3$  y, por tanto, la función no lineal es  $\Phi(x) = \frac{cx^3}{m}$ , con  $c$  un factor de endurecimiento y  $m$  la masa del sistema. La otra forma es mediante una función bi-lineal (2) por el cual se tiene por sección del movimiento una u otra ecuación del movimiento, según el modelo de [12]. Se recalca de igual forma el efecto de pérdida parcial en la rigidez base al disminuir la calidad de la sujeción, por tanto, es esperable que la amplitud vibratoria sea generalmente más amplia.

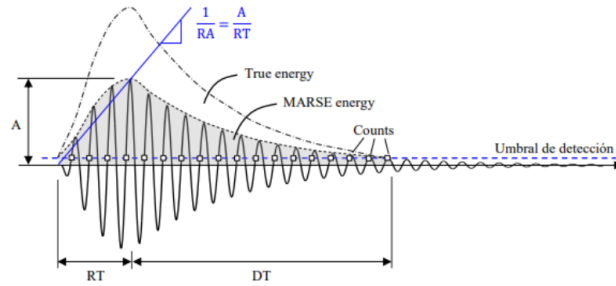
$$f(x) = \begin{cases} \text{si } x \leq \Delta & \ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n x^2 = F(t)/M \\ \text{si } x > \Delta & \ddot{x} + 2[\xi + \frac{c_f}{2M}]\dot{x} + [\omega_n^2 + \frac{K_f}{M}]x = F(t)/M \end{cases} \quad (3)$$

Además, otro aspecto que distingue a las fallas por soldadura de otros defectos típicos es la presencia de una componente caótica importante, estudiada por [13]. Esto implica la posible aparición de múltiples componentes no armónicas en el espectro, así como la alta aleatoriedad en la amplitud general de las componentes. También se cuenta que en el instante de transición entre un régimen al otro (cuando  $x = \Delta$ ), se produce un impacto con reflejo vibratorio. Este impacto suele ocurrir cada  $n$  ciclos de rotación del eje, lo que genera la aparición de sub-armónicos de la frecuencia  $\frac{1}{n} \times$ , con  $n$  generalmente siendo igual a 2. Estos últimos factores sirven como criterio importante para la distinción de la soldadura de fallas típicas como el desalineamiento o la distorsión en la carcasa, según [6].

### 2.3 Posibles fuentes de EA en una caja de engranajes

Es considerado necesario un pronóstico a priori de las posibles fuentes periódicas de señales de EA que pueden encontrarse durante el funcionamiento de la transmisión. Estas incluyen las fuentes mecánicas típicas junto con otras provenientes de interferencias externas. También, debido a la naturaleza sensible de las fuentes de EA, pueden encontrarse señales distintas o modificaciones en las señales predichas.

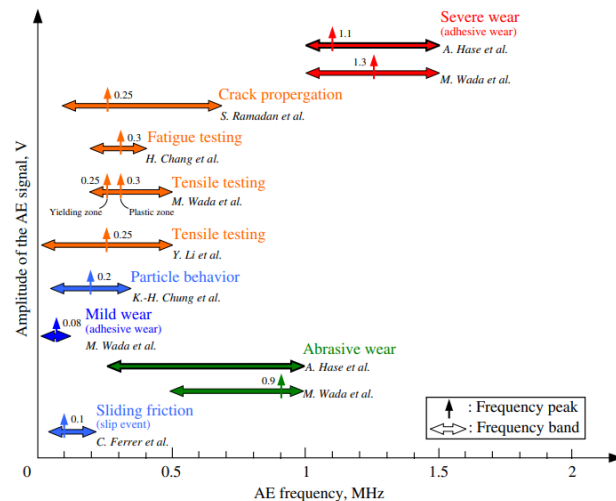
En primer lugar, se recuerda el mecanismo físico por el cual surgen estas señales. Estas son consecuencia de la redistribución del estado de esfuerzos en un material [5]. Es decir, sea una fuerza  $\mathbf{F}$  que genera en un medio un estado de deformación  $[\epsilon]$  y de esfuerzo  $[\sigma]$ , al retirarse  $\mathbf{F}$



**Figura 2.1** Transiente de EA e indicadores

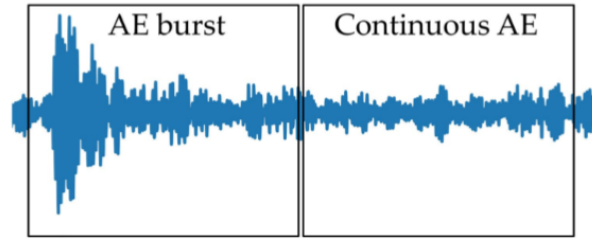
de forma rápida, la parte elástica de la deformación vuelve a su estado anterior y, por tanto,  $[\sigma]$  tiene un nuevo estado en el medio y se emite una ráfaga de EA, como puede notarse en la figure 2.1. El proceso de reordenamiento puede ocurrir en instancias de cambios abruptos en el material, como por la aparición y expansión de grietas, así como por la aplicación de energía en estas [47], ya que se crean grandes concentraciones de esfuerzos. También pueden haber eventos por eventos locales de deformación superficial. Este fenómeno es típico durante el roce entre dos superficies porque las asperezas en escala microscópica tienen contacto entre ambas superficies. Esto ocurre en motivo de que estas asperezas tienen un área local muy baja y, así, las fuerzas se concentran y forman estados de esfuerzo mucho más altos que en el global de las piezas.

Según el resumen de múltiples investigaciones recopiladas por [1] en la figura 2.2, se tienen las bandas frecuenciales en donde se concentran los eventos de EA según su fenómeno de origen. De igual forma, en [2] se diferencia entre las señales de tipo continua con las que vienen por ráfagas, con las primeras siendo causadas por eventos que ocurren en intervalos discretos, como la excitación de una grieta por una fuerza externa. Mientras que los segundos son típicos de eventos que se extienden durante un período mas extendido, como el roce entre dos superficies que dura mientras el movimiento dure. En la figura 2.3 se ve un ejemplo tipo de estos dos tipos de señales.



**Figura 2.2** Bandas frecuenciales de diversas fuentes de EA [1]

Para realizar un estudio de una señal de EA, en caso de ser una ráfaga o transiente como en la figura 2.1, es posible analizar desde las características de esta transiente. Este método cuenta con indicadores como la cuenta de ondas (definidas como el punto en donde se pasa un umbral), el tiempo de crecimiento y de decrecimiento, el valor máximo, la energía, entre



**Figura 2.3** Señal de EA en ráfaga y continua [2]

otros. Estos indicadores eran tradicionalmente los más utilizados y, si bien hoy no suelen ser suficiente, siguen siendo relevante [36]. Para ondas en equipos rotatorios, suelen haber eventos periódicos de EA, los que pueden ser analizados de forma análoga a un caso de vibraciones mediante la [48] o con técnicas de tiempo-frecuencia tal que la transformada Wavelet o la descomposición modal empírica [49, 2].

Ahora, se realiza un análisis de las fuerzas presentes durante el funcionamiento de la transmisión y los mecanismos en los que puedan emitir señales de EA. Como se mencionó anteriormente, las dos fuerzas actuando sobre el sistema son la de desbalanceamiento y la fuerza por el choque entre los dientes de los engranajes. Para la primera, se entiende que no deberían haber ráfagas de EA en consecuencia de esta interacción a pesar de existir interacciones entre superficies asociadas a esta fuerza (por ejemplo, en la transmisión de la fuerza desde el rotor al eje en su conexión). Esto en motivo de que la magnitud y la frecuencia de esta fuerza son relativamente bajas y no logran generar un cambio lo suficientemente grande en el sistema como para que las emisiones generadas sean medibles. Y en cuanto a la fuerza por el paso de los dientes, esta es de amplitud más importante y en una frecuencia mucho mayor, y, por lo demás, es causada directamente a partir del contacto a alta velocidad entre dos superficies rugosas. En este contacto, se acumula una cantidad de energía importante en las asperezas de la superficie, provocando una liberación de EA en consecuencia, esto apoyado por la literatura [42]. Esta señal emitida es la principal componente al analizar una transmisión por engranaje, ya que es la de mayor amplitud y, también, porque es altamente sensible a la aparición de fallas en los dientes. Dependiendo del estado de los dientes, se obtendrían distintos tipos de ráfagas, siendo de mayor valor en caso de haber defectos como grietas en alguno de estos, habiendo también cambios dependiendo del nivel de desgaste presente en las superficies [46]. En circunstancias con nivel inicial y avanzado de desgaste, este ocurre con mayor velocidad, aumentando así las EA que ocurren por este.

Existen otras posibles fuentes de EA que pueden encontrarse. Una es por la presencia de grietas sub-superficiales en algún elemento de los rodamientos. Estos, por ser grietas en expansión y al ser sometidas a una carga cíclica por el paso de los elementos rodantes en las pistas, dan una sucesión de ráfagas. Esto puede ser en cualquiera de las partes, pero lo más común de identificar son las grietas en la pista externa que generan en su frecuencia de paso *BPFO* [10]. La aparición de estas componentes puede darse en una instancia muy temprana de la formación de la grieta, por lo que no son sinónimo de la proximidad de una falla en el rodamiento. Además, estas son fáciles de reconocer, pues esta frecuencia tanto en vibraciones como en el espectro de la envolvente de una EA es un sub-armónico por un número no entero ni por una fracción propia, siendo el único evento mecánico capaz de realizar esto [6]. Igualmente, en caso de existir defectos en forma de grietas al interior de la estructura del equipo, estas darán ráfagas de EA como consecuencia de recibir una fuente externa de energía. Por tanto, se tendría una nueva fuente que debería ser sincrónica a la

fuerza más importante en el equipo, es decir, la fuerza de choque de los dientes. Así, para el caso actual, predomina el evento de fricción deslizante que esta en una banda entre 100 y 200 [kHz] y, como fuente secundaria, pueden encontrarse frecuencias en la zona de propagación de grietas entre 100 y 700 [kHz] y de desgaste abrasivo entre 300 y 1000 [kHz].

De igual forma, debe considerarse las EA generadas por acción de los pernos. Estas son causadas por el roce que ocurre entre las superficies en los hilos del perno con las partes que éste une [32, 15, 28]. Aquí, se tiene la misma dinámica del contacto entre las asperezas superficiales que en los contactos en los dientes, pero aquí el contacto es casi constante, pues en ningún momento se produce una separación completa. Esta interacción puede modelarse como un objeto en un plano inclinado en movimiento relativo que tiene como fuente las vibraciones en el sistema [21]. Igualmente, debe considerarse el posible desgaste que ocurre por la rotura de estas asperezas, habiendo así una fuente periódica de estas emisiones en los rangos definidos en la figura 2.2.

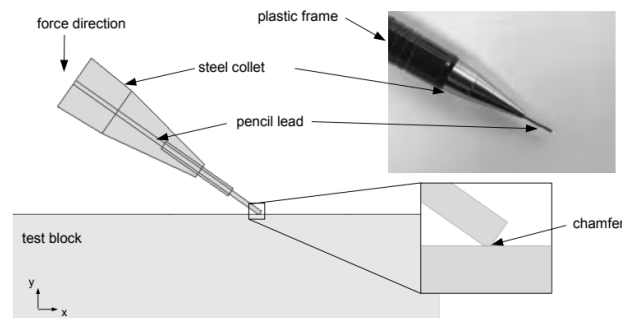
Por último, existen posibles fuentes de interferencia externa que 'contaminen' la señal de EA, apareciendo en el espectro de la envolvente señales demoduladas que no provienen de una interacción mecánica en la máquina, sino de otras fuentes como pueden ser interacciones eléctricas, entradas desde sistemas externos cercanos, entre otras.

Debido a que el sistema de engranaje corresponde a un banco de ensayos con uso experimental que fue armado recientemente, se entiende que es muy poco probable que existan defectos por roturas, desgaste o presencia de grietas, pues este no ha recibido una gran cantidad de uso real que genere estas fallas. Sí que pueden existir algunos defectos menores causados por su montaje, que incluye desalineamiento residual de los ejes o de los engranajes, una montura excéntrica en este último o la presencia de alguna holgura entre piezas. Aunque al estar estas presentes tanto en el caso estándar como al aplicar la soltura, se entiende que no deberían invalidar las conclusiones.

## 3 Metodología

### 3.1 Verificación de sensores

Como medida previa a la realización de las mediciones experimentales, se deben realizar ensayos de verificación de los sensores de EA. Este proceso se encuentra normalizado mediante el ensayo de Hsu-Nielsen [3], el cual consiste en la rotura de la punta de una mina de tipo HB desde un lápiz portaminas. Según el procedimiento, este debe realizarse ajustando un largo de la punta de 0.1 [in] (o 2.5 [mm]), la cual debe tener un diámetro de 0.5 [mm] y realizarse la rotura a una distancia idéntica entre sensores de unos 5 [cm] de distancia y con una inclinación con respecto a la superficie de unos 30 [°], según se observa en la figura 3.1. Para evitar una segunda ráfaga, se coloca una protección de teflón entre la punta del lápiz y su parte metálica. De tal forma y con un método fácilmente reproducible, se puede saber la sensibilidad real de un sensor y ponderar la influencia de la superficie seleccionada, siendo que esta, dependiendo de su rugosidad, recubrimientos, óxidos o presencia de pintura, puede ver alterada la transmisibilidad.



**Figura 3.1** Geometría modelo de ensayo Hsu Nielsen [3]

Para el caso de estudio, se colocan los sensores sobre dos tipos de superficie, ambas metálicas, no cuentan con pintura y presentan visualmente un nivel aceptable de desgaste y oxidación. También se recalca que, debido a la geometría del equipo, los ensayos presentaron algunas dificultades en su ubicación y ejecución, pero se realizaron varios sucesivos, por lo que se asume que el error se compensa. Así, se asume a priori que al menos los canales ubicados en el mismo tipo de superficie deben tener una sensibilidad en el sensor. Este valor de sensibilidad se expresa por el valor máximo alcanzado por la ráfaga de EA que ocurre en consecuencia del ensayo. Sin embargo, se recalca que el valor obtenido como máximo no implica directamente la sensibilidad del sensor, pues los ensayos de Hsu-Nielsen no implican una cantidad fija e invariable de energía, teniendo en verdad estos una importante incertidumbre.

### 3.2 Medición experimental

El proceso de recolección de datos se realizó a partir de la medición durante el funcionamiento de un sistema de transmisión por engranaje armado por [4]. Este equipo cuenta con un motor eléctrico de tipo SK 100LA/4, trifásico y con condición nominal de funcionamiento de 60 Hz, con amperaje 6.35 [A], diferencia de voltaje de 460 [V] y potencia 3.45 [kW]. Este está conectado a la red a través de un variador de frecuencia que permite controlar su frecuencia en el rango de 0-60 [Hz]. El eje de salida se conecta mediante un acople flexible y su velocidad de rotación tiene una relación de 1:2 a la frecuencia del motor. En la caja de engranajes se tiene una reducción de 1:3, con el primer eje contando un engranaje recto de 60 dientes, mientras que el segundo eje cuenta con un engranaje de 20 dientes. Este último eje se conecta



**Figura 3.2** Banco de ensayos para medición



**Figura 3.3** Perno basal suelto

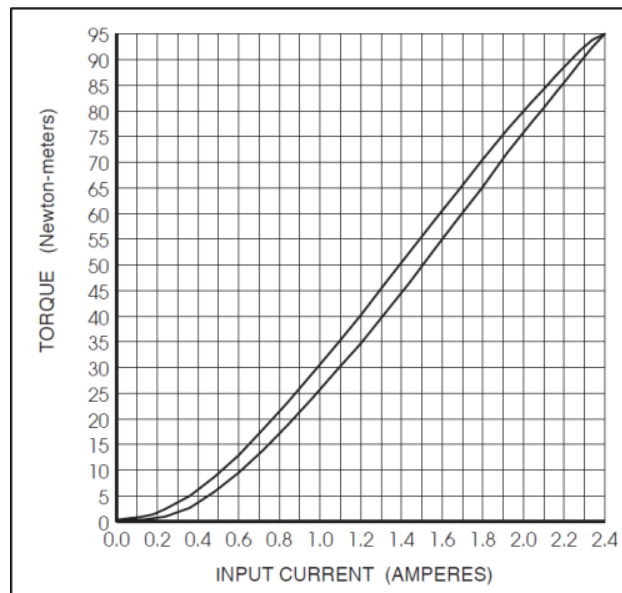
mediante otro acople flexible a un freno magnético de modelo Placid Industries PFB-100, el cual transforma una corriente de entre 0 y 2.4 [A] a un torque resistente en el rango de 0 a 95 [Nm]. Este se puede observar en la figura 3.2.

De tal forma, para realizar las mediciones se emplearon las condiciones de operación fijando distintas frecuencias de voltaje y corriente en el freno. En específico, se utilizan las frecuencias [10, 20, 30, 40] [Hz] y las corrientes [0, 0.5, 1, 1.5] [A], que corresponden respectivamente en los ejes rápido y lento a una velocidad de rotación de [300-100, 600-200, 900-300, 1200-400] [CPM] y en el torque aplicado un valor de alrededor de [0, 7.5, 27.5, 52.5] [Nm], según la conversión vista en la figura 3.4. Las mediciones se realizaron en un espacio de media jornada y de forma sucesiva, asumiendo que el calentamiento del aceite podría desprejiciarse en su influencia en el roce entre los dientes y así las señales de EA son comparables entre ellas.

La soltura se impone al sistema al retirar el apriete entre el perno y la tuerca con una llave inglesa. Se hace una soltura total entendiendo que pueden no encontrarse patrón alguno en una soltura parcial. Se nota en la figura 3.3 que existen tres pernos que conectan el equipo a la fundación y tan sólo uno tiene soltura. De tal forma, el experimento tiene menor riesgo de causar un daño pero seguramente el efecto se notará menos que para una estructura con

solo dos pernos por lado pues la base esta mas empotrada.

Se realizan las mediciones mediante cuatro sensores de EA, estos se ubican en puntos fijos ubicados todos del lado de la caja de engranaje en donde se aplica la soldadura, que es por el lado del eje lento. Estos se instalan respectivamente del lado del motor y del freno, siendo aplicada la soldadura del lado del motor. Así, los sensores 0 y 1 están en la base junto a su respectivo perno y los sensores 2 y 3 se instalan en la sobre la caja de engranaje, en la posición mas cercana y rígida posible al descanso. Para garantizar un régimen estacionario, se deja funcionar el equipo en la condición de operación actual por aproximadamente 15 [s] antes de realizar la medición.



**Figura 3.4** Relación entre corriente en el freno magnético y torque aplicado en el sistema [4]

Los sensores utilizados son de tipo piezoeléctrico, sensibles a ondas de muy alta frecuencia, lo que los hace ideales para medir señales de EA. Estos se conectan por una misma fuente de poder y tarjeta de adquisición de datos, la cual define una frecuencia de muestreo fijada en 1 [MHz], por lo que en una instancia de medición que dura 10 [s] se obtiene una muestra con 40 millones de puntos.

### 3.3 Procesamiento de señales de EA

Como medida preliminar a los procesos que permitan realizar los análisis respectivos de la señal, esta, según el procedimiento habitual al trabajar con señales de EA, debe filtrarse de forma de eliminar las componentes de baja frecuencia, que para este contexto se consideran como las de frecuencia inferior a 95 [kHz].

En primer lugar, se extraen parámetros estadísticos de las señales a partir de la forma de onda bruta. Estos se comparan para observar patrones que se repitan según las condiciones de operación y que muestren una diferencia clara entre el caso sano y el caso con soldadura. Un indicador típico para comparar la intensidad de las señales de forma general es el valor medio cuadrático o *RMS* por sus siglas en inglés [33]. Este se define en la ecuación 4 y es normalmente el valor mas general para la caracterización de la intensidad de una señal con componente periódica, siendo utilizada en labores de diagnostico [34] y modelación de EA

[35].

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N V_i^2} \quad (4)$$

Luego, se tiene el factor de cresta definido en 5, que consiste en una normalización del máximo de la señal y permite comparar el valor relativo al que llegan valores extremos por transiente, aunque por la aleatoriedad en algunas señales esta es muy susceptible a eventos únicos no interpretables.

$$F_C = \frac{\max_{i \in [0, N]} [V_i]}{V_{RMS}} \quad (5)$$

En el contexto de las EA, un indicador de gran utilidad [36] para el análisis es el valor de kurtosis. El cálculo de este valor, al depender del cuarto momento de la señal, es muy sensible a la presencia de valores extremos. Así, este tiene valor igual a la ecuación 6.

$$V_{kurt} = \frac{1}{\sigma^4 T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - x]^4 dt = \frac{\sum_{i=0}^N (x_i - x)^4}{N \sigma^4} \quad (6)$$

A partir de la transformada de Fourier, en su algoritmo rápido de la FFT, no da mayor información sobre la señal de una EA ni del sistema del cual estas se originan en comparación con el análisis de vibraciones, donde esta herramienta permite por sí sola extraer información para hacer un diagnóstico correcto. Esto, pues las señales de EA son de alta frecuencia y en los eventos esta última no depende directamente de la fuerza de entrada al sistema. Sin embargo, pueden extraerse valores globales del espectro de frecuencia que permiten caracterizarlo. En este caso, se utilizan dos indicadores que son el centroide del espectro y la desviación en este. El centroide se entiende como una analogía al centro de masa en un sólido, y sirve para mostrar si predominan las ondas elásticas de más alta o de baja frecuencia. Esto es de especial utilidad, pues las EA propias de la fricción continua entre asperezas se concentran entre los 100 y 200 [kHz] según 2.2. En cuanto a la desviación en el espectro, esta sirve como una analogía a la desviación estándar en una muestra de datos, entrega información sobre la concentración de las componentes espectrales. De esta forma, un espectro concentrado solo tiene un tipo de EA y en caso contrario pueden tenerse a la vez múltiples fuentes independientes actuando en el sistema. Estos parámetros han sido identificados como estadísticamente significativos en trabajos que relacionan las soldaduras con aprendizaje automático [31].

$$F_{cent} = \frac{\sum_{i=1}^N X[i] f[i]}{\sum_{i=1}^N X[i]} \quad (7)$$

$$D[X] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X[i] (f[i] - F_{cent})^2}{N}} \quad (8)$$

Por último, una técnica utilizada en el análisis global del espectro es la medida del desorden/complejidad en la señal a partir de la entropía espectral. Esta se calcula a partir de la densidad de potencia espectral (9) de la señal que aproxima a una función de probabilidad (10) y luego usando la entropía estadística de Shannon, este indicador fue encontrado por [37] como una potente muestra de defectos pues detecta la actividad inusual como un aumento en la complejidad.

$$S(\omega) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{|X(\omega)|^2}{t} \quad (9)$$

$$L(x, f_s) = - \sum_{\omega=0}^{f_s/2} S(\omega) \log_2[S(\omega)] \quad (10)$$

Se prosigue con un análisis a la envolvente de la señal. Esta es una señal definida por pasar por los extremos locales de la señal original. Esta acción es de especial utilidad pues, si bien los eventos de EA implican frecuencias muy elevadas, en un sistema como lo es una transmisión por engranajes, los eventos ocurren en intervalos continuos. Estos son esencialmente causados por los impactos y rodaduras periódicas ocurridas en instancias como el impacto entre los dientes de engranaje o en el paso de los elementos rodantes en un descanso. Una forma eficiente de encontrar la envolvente de una señal es usando la transformada de Hilbert, definida en 11, esta da por resultado en su valor absoluto una función envolvente de una señal modulada.

$$H[x(t)] = \frac{2}{\pi} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\epsilon}^{\infty} \frac{x(t - \tau) - x(t + \tau)}{2\tau} d\tau \quad (11)$$

Teniendo la envolvente de la señal, se puede repetir el procesamiento previo para obtener parámetros de esta; también existen indicadores propios de la envolvente, como puede ser la energía de la señal (12). Este valor es análogo al valor RMS, con aplicación adecuada en señales con menor carácter periódico. De igual forma, ahora es posible realizar un análisis del espectro de amplitud de esta envolvente, estando ahora demodulada la señal los eventos periódicos son análogos al análisis del espectro de una señal vibratoria. Por tanto, se puede comparar directamente la amplitud de las componentes espectrales correspondientes con los armónicos de la frecuencia de rotación del eje o la de paso de los dientes del engranaje. Se consideran relevantes la frecuencia fundamental de ambos ejes junto con sus respectivos 4 siguientes armónicos, esto junto con los 2 armónicos siguientes de la frecuencia de engrane y las bandas laterales de esta. Se considera que las componentes más relevantes son las fundamentales y que los armónicos se pueden analizar en conjunto mediante la suma de estos en (13).

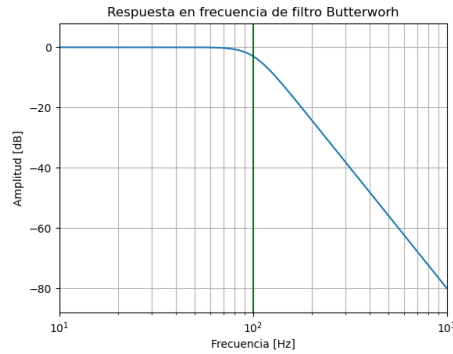
$$E[x(t)] = \int_{t_0}^{t_0+T} |H[x(t)]| dt \quad (12)$$

$$A[f] = \sum_{i=1}^{n \in N} X[f * i] \quad (13)$$

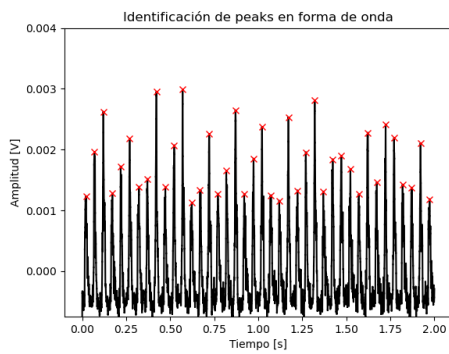
Por último, para tomar en cuenta la variabilidad en la señal por causa de la aleatoriedad consecuencia de la soldadura, se comparan los valores máximos sincrónicos a la rotación del eje. Así, se compara la variabilidad en estos con medidas como la desviación estándar. Para aislar los peaks, se utiliza primero un filtro (que se ve en la figura 3.5) pasa bajo en la envolvente para que se noten los valores de los armónicos a la rotación de los ejes (que en este caso son de valor mas alto y no están modulados como la frecuencia de engrane). Los peaks se identifican como los puntos en donde hay un máximo local determinado por un cambio en el signo de la derivada, según la ecuación 14, luego se ordenan estos en una lista y se obtiene su coeficiente de variación, que es una normalización de la desviación estándar por la media de la muestra, esta se ve en la ecuación 15. Puede verse un ejemplo de los peaks detectados en la figura 3.6

$$x(t) \in x_{peak} \text{ if } \dot{x}(t) = 0 \quad (14)$$

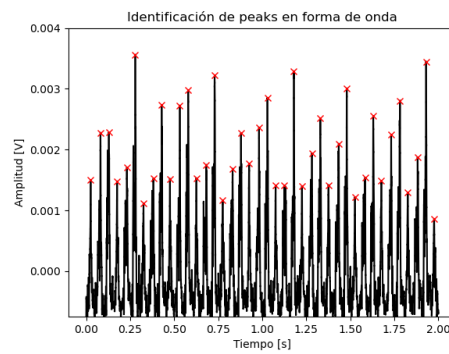
$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (15)$$



**Figura 3.5** Filtro para aislar primeros armónicos de envolvente



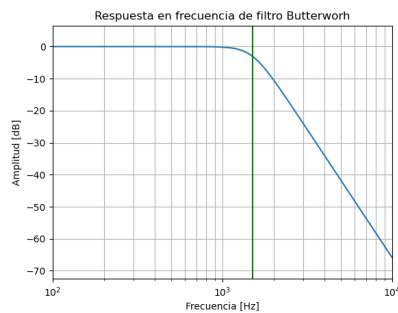
(a) Envolvente de señal sana



(b) Envolvente de señal con soltura

**Figura 3.6** Recolección de *peaks* en envolvente

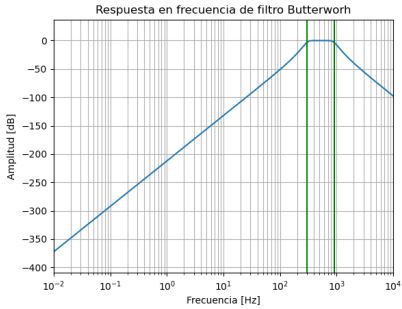
### 3.4 Análisis con vibraciones



**Figura 3.7** Filtro para señal de vibraciones mecánicas

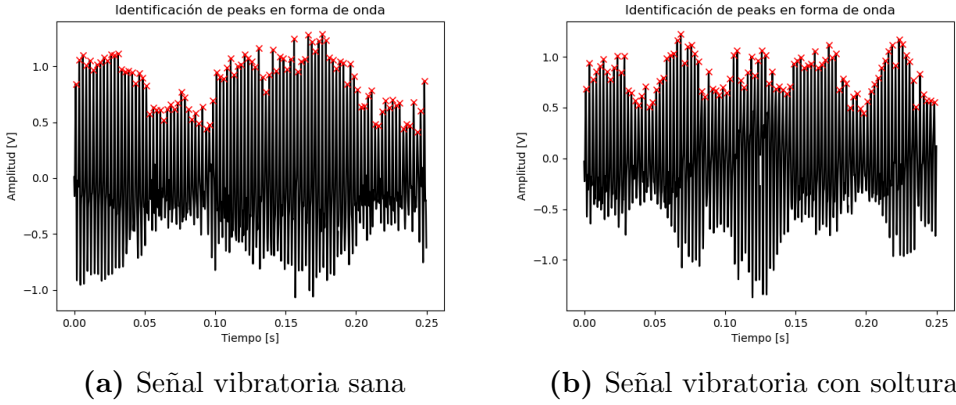
En motivo de tener un contraste entre la medición por EA con un método tradicional de monitoreo de condición, se utiliza un conjunto de mediciones realizadas anteriormente en el mismo banco de ensayos que el utilizado en la medición actual. Para aquél caso, se le aplicó la misma soltura en un perno basal y se dejó funcionar en estado estándar y con soltura en

dos condiciones de operación del freno, de 0 y 40 [A] y en cuatro condiciones de frecuencia del motor, [10,20,30,40] [Hz]. Para la recolección de datos, se utilizaron dos sensores AC-uni y AC-tri, siendo acelerómetros piezoeléctricos ubicándose el primero sobre el descanso del eje de rotación rápida por el lado del motor y el segundo del mismo lado pero sobre el eje lento. Las mediciones se realizan con ambos sensores teniendo una frecuencia de muestreo de 12.8 [kHz].



**Figura 3.8** Filtro para señal para análisis de *peaks*

Para realizar los análisis, se toma el valor del sensor uniaxial y únicamente la vibración vertical del sensor triaxial. Luego, se hace un análisis análogo al presentado recién, con la diferencia de que se salta el análisis de la envolvente para los parámetros estadísticos y la revisión de los espectros de amplitud y, para la variabilidad de esta, se toma la frecuencia de engrane como estándar, aislándolos mediante el filtro pasa banda 3.8. Esto, pues los valores armónicos a la rotación de los ejes no tienen una magnitud suficientemente alta y aquí las componentes de engrane no se notan tan moduladas.



(a) Señal vibratoria sana

(b) Señal vibratoria con soltura

**Figura 3.9** Recolección de *peaks* en señal vibratoria

## 4 Resultados

### 4.1 Resultado de ensayos de calibración

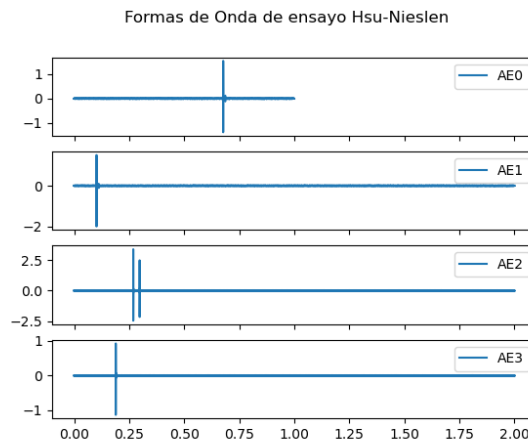


Figura 4.1 Señales de ensayo Hsu-Nielsen recolectadas

Al realizar los ensayos de Hsu-Nielsen, habiendo ejemplos en la figura 4.1, se obtiene una ligera diferencia entre el valor medido entre los puntos del canal 0 y 1, siendo la media entre el máximo en el canal 0 de 1.34 [V] contra 1.81 [V]. Aunque se considera que esta diferencia está dentro del rango aceptable, se debe tener en cuenta que el sensor 1 es más sensible. Para los sensores en los descansos 2 y 3, se tiene una diferencia más grande, siendo el máximo detectado en el sensor de 2.59 [V] contra 1.29 [V] en el sensor, y a la vez contando el sensor 2 con una desviación estándar mucho mayor que el resto de los canales, con 0.631 [V] en este contra un rango de 0.13 a 0.2 [V] en los demás. Para revisar una posible falla en el sensor piezoeléctrico, se realizó un cambio de posición del sensor 2, que pasó a colocarse en la posición del sensor 3 y se realizaron dos ensayos adicionales (en canal denominado 2b). Estos dieron un valor máximo medio de 1.39 [V], lo que es muy cercano al obtenido anteriormente en el canal 3. Por tanto, se entiende que el punto de medición 2 cuenta con una transmisibilidad más alta e irregular, probablemente en motivo de una superficie más irregular, con mayores defectos de maquinado o corrosión. De todas formas, se decidió proseguir con la ubicación de los sensores decidida inicialmente en motivo de preservar la simetría entre los puntos de medición al estar de lados opuestos de un mismo eje y tener seguridad de no interferir en los cables de los sensores que ocurriría al instalar en otros puntos.

### 4.2 Cambios en los parámetros estadísticos de la señal bruta y su espectro de amplitud

En primera instancia, se inicia mostrando los resultados obtenidos del procesamiento de la señal bruta. Siendo que se tienen múltiples indicadores y un total de 64 mediciones (4 frecuencias del motor, 4 torques del freno magnético en 4 canales), se considera un análisis global ordenado, en primer lugar, por el indicador en cuestión. Luego, se analiza por canal individual y por sus condiciones de operación según la tendencia general que muestran, el grado de correlación aparente y la presencia de excepciones notorias. Se presentan los datos tanto en sus magnitudes absolutas como en la diferencia relativa entre el caso sano como en el caso con soltura.

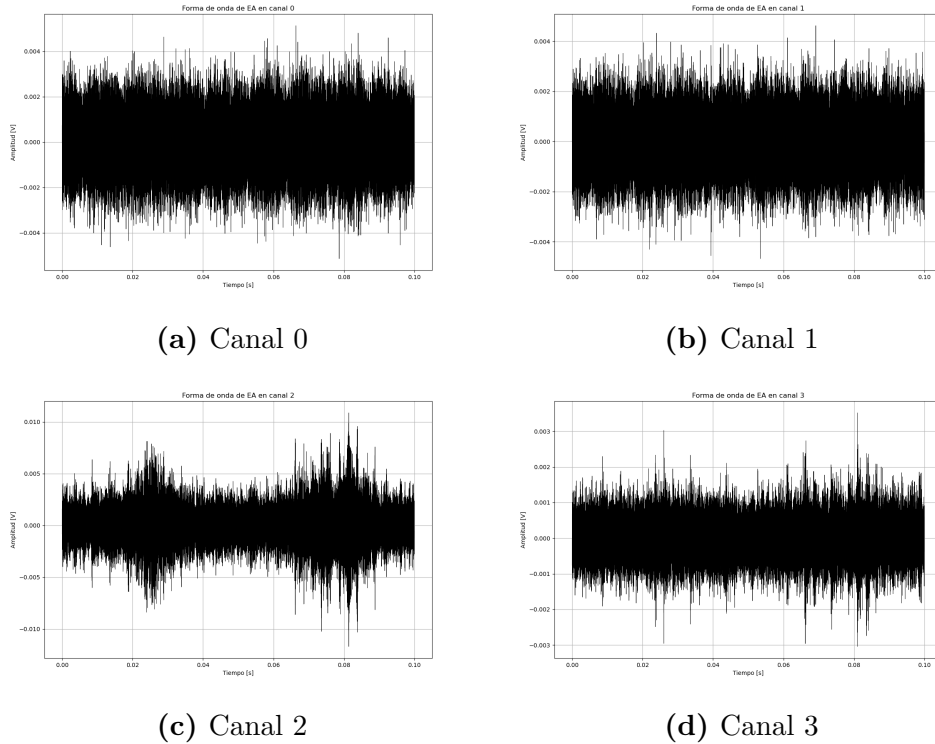
**Tabla 4.1** Resultados de ensayo Hsu-Nielsen

| Canal | Valor Máximo | Desviación estándar | Número de ensayos |
|-------|--------------|---------------------|-------------------|
| 0     | 1.34         | 0.159               | 4                 |
| 1     | 1.81         | 0.199               | 4                 |
| 2     | 2.59         | 0.631               | 6                 |
| 3     | 1.29         | 0.128               | 4                 |
| 2b    | 1.39         | 0.047               | 2                 |

Partiendo por una revisión visual, pueden verse algunas formas de onda para la condición de máxima frecuencia y torque en la figura 4.2 (recortado para mostrar aproximadamente dos vueltas del eje rápido) para el caso con soltura y sus espectros en la figura 4.3 en ambas condiciones. La inspección visual de las formas de onda revela ya información relevante del comportamiento general de las señales en los distintos canales. Por una parte, en los canales 0 y 1 se tiene una señal continua en vez de por ráfagas, sugiriendo que se tiene en la base una fricción constante como fuente de EA y que la soltura aplicada parece no generar el síntoma de impacto visible en algunos casos de soltura. Por otro lado, en los canales 2 y 3 sí que se tiene una señal compuesta por una seguidilla de ráfagas, mostrando que la fuente mayoritaria de EA seguramente proviene del paso de los engranajes. Además, se nota una importante modulación de la señal en el canal 2, con la presencia de los dos peaks en una duración coincidente con la rotación de los ejes. Este hecho implica que probablemente existe una excentricidad o un eje flectado en la transmisión. También, al haber una forma muy distinta entre los canales en similar posición horizontal muestra que las ondas de EA no logran pasar desde la base del equipo hasta los puntos de medición superiores y viceversa. Así, se puede considerar que los pares de sensores son mayormente independientes entre sí, sin que las tendencias se vean afectadas de un sensor a otro.

Luego, revisando en los espectros de 4.3, en primer lugar, que las componentes se concentran en la banda frecuencia de entre 100-200 [kHz] y con componentes máximas alrededor de los 100 [kHz], habiendo valores menores en la banda entre 200-300 [kHz] y despreciables en la banda por sobre 300 [kHz]. Por tanto, de acuerdo a la figura 2.2, se confirma que las señales provienen esencialmente desde la fricción deslizante y existe probablemente una ligera acción de desgaste abrasivo. A su vez, es claro que la aplicación de la soltura no hace que aparezcan o desaparezcan por completo componentes del espectro de la FFT, por tanto, la soltura hace una acción de intensificación o reducción en de los eventos existentes.

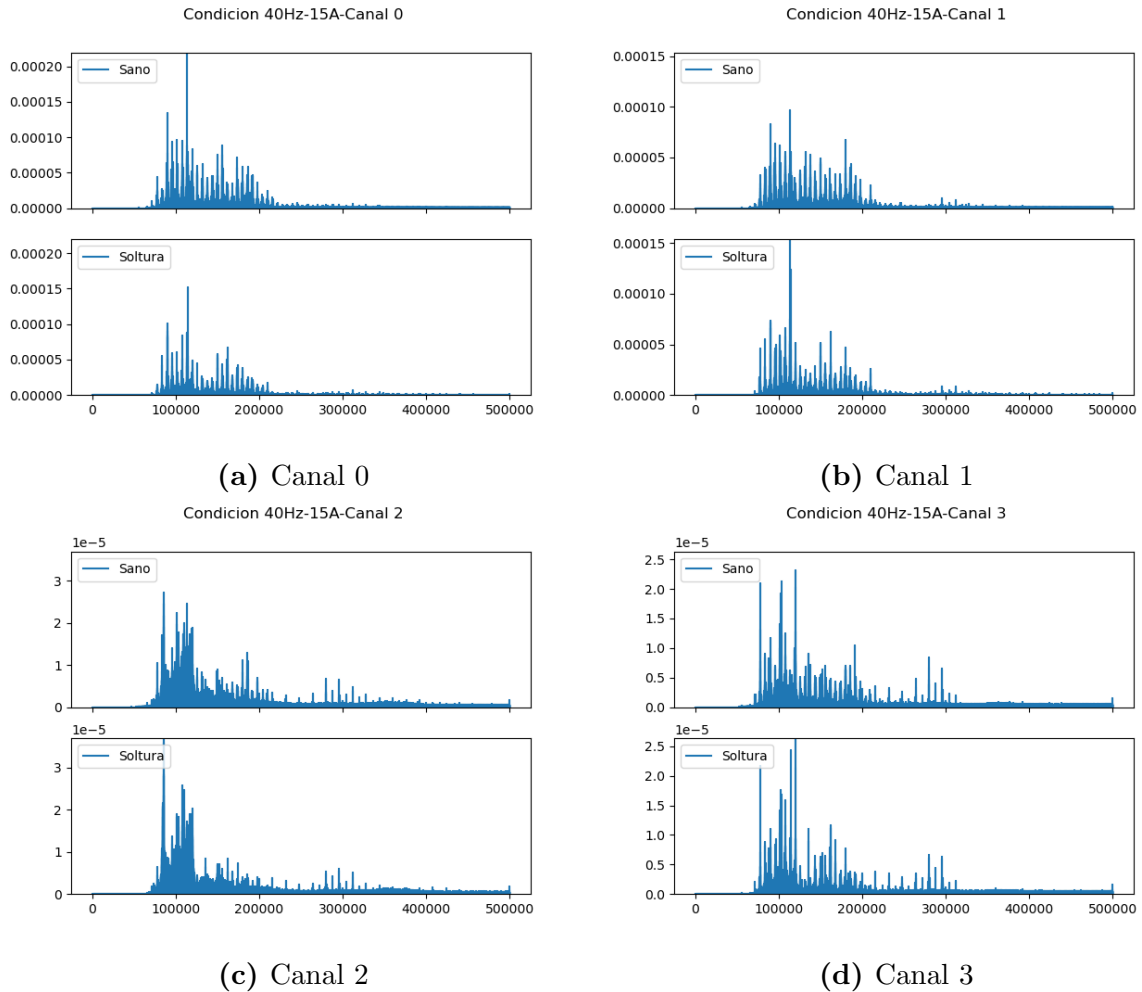
Ahora, se observan las magnitudes Root mean squared (RMS) en las señales. Se nota en primera instancia que entre los canales 0 y 1 se está en un mismo orden de magnitud, cosa que no ocurre entre los canales 2 y 3, donde el primero es mucho mayor. Por tanto, junto a la mayor sensibilidad en el canal 2, parece existir un fenómeno que haga que buena parte de las ondas de EA vayan para el lado del motor. Revisando en los canales, para el canal 0, se observa una reducción en este valor al aplicar la soltura. Esta es general, pues se repite en todas las condiciones de operación y la variación se reduce al aumentar la frecuencia y la corriente en el funcionamiento. La reducción es en su punto más alto de un 30% y la



**Figura 4.2** Formas de onda de señales de EA

diferencia más estrecha es del 10%. Con valores visibles en la figura 4.4. Siguiendo con el canal 1, que es visible en la figura 4.5, la tendencia no se mantiene y en su lugar se aprecia un aumento continuo con soldadura. Este aumento llega hasta el 10%, aunque se cuentan con excepciones en los casos con bajo torque aplicado y frecuencia del motor. Para estos dos canales, se destaca que existe una ligera correlación negativa con el torque y positiva con la frecuencia. En cuanto al canal 2 en la figura 4.6, se tiene un crecimiento del valor al aplicar la soldadura. Esta diferencia se vuelve más notoria al aplicar mayor torque y con mayor frecuencia, llegando a un crecimiento de hasta el 23%. Además, el RMS en este canal muestra una gran dependencia de las condiciones de operación, aumentando para ambos casos con la frecuencia y el torque aplicado; este hecho coincide con la literatura del comportamiento de las EA en engranajes [2]. Siguiendo en el canal 3, aquí se tiene en la mayoría de los casos un decrecimiento para el caso con soldadura. Sin embargo, se cuenta con 4 excepciones en condiciones de operación no relacionadas (tanto en baja como en alta frecuencia y torque). Por tanto, no se puede decir que es una regla general, y además, el rango de variación es aquí de tan solo entre un  $\pm 5\%$ . Este canal igualmente varía menos con la rotación y el torque aplicado, lo que refuerza que este canal es menos representativo de la señal emitida por los engranes, pues este patrón debería ser equivalente con el canal 2.

Este hallazgo se considera de interés, pues para el canal 0 hay una diferencia significativa al aplicar la soldadura. Este es de esperar al considerar la disminución del roce en el perno. Lo que sorprende más es el aumento en los canales 1 y 2, pues esto implica que la soldadura sí tiene una diferencia en las características mecánicas del sistema. Además, el tener una tendencia inversa de un lado del equipo y del otro se presenta como una oportunidad para realizar una aproximación de la ubicación de la soldadura, pues si se tiene un aumento del RMS en una parte de la base, se puede descartar la presencia de soldadura cercana hasta encontrar un descenso. También, si se considera como independientes los eventos en la base de los del descanso, se podría diferenciar la presencia de una soldadura de otras fallas en los engranajes

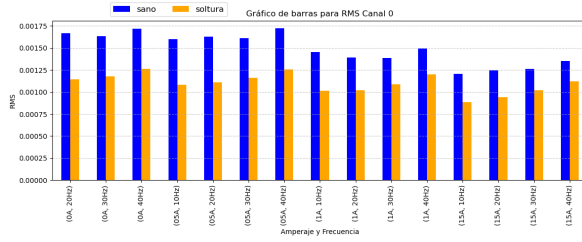


**Figura 4.3** Espectro de frecuencia de señales de EA en la condición de máxima frecuencia y torque

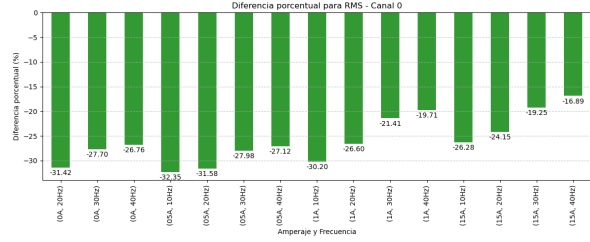
al ver la tendencia de los valores RMS en la base. Sin embargo, primero debería investigar si las otras fallas tienen algún efecto en la base.

Prosiguiendo el análisis, se pasa a la comparación de los valores de Curtosis entre los diversos casos. Aquí, se tiene tanto para el canal 0 como para el canal 1 que se tienen valores cercanos a 0 (es decir, propio de una distribución Gaussiana) y, también, sin ningún patrón entre los casos con o sin soltura y entre las demás condiciones de operación. Pasando así al canal 2, se observa un aumento sostenido en casi todas las condiciones de operación, excepto la de mayor torque y frecuencia. Aquí el valor medio es mayor que para los primeros canales, llegando a un máximo de 3.5 y es creciente en general con la frecuencia del motor y el torque. En cuanto al aumento por la soltura, esta no presenta una correlación en su magnitud y este se encuentra por lo general entre un 20% y un 100%, tal como se observa en 4.7. En el canal 3, vista en 4.8, la curtosis solamente traspasa el umbral del 0.5 para los valores elevados de frecuencia y torque. Tan solo en estos casos, hay una tendencia creciente con soltura con magnitud muy variable (hasta de un 150%).

Sobre estos resultados, el valor nulo de Curtosis en los canales 1 y 2 descarta definitivamente la presencia de golpes contra la fundación, tanto con o sin soltura, teniendo así una soltura más débil de lo supuesto inicialmente. Así mismo, se confirma que las señales de EA en las bases son esencialmente continuas. Por otro lado, el mayor valor en los demás canales

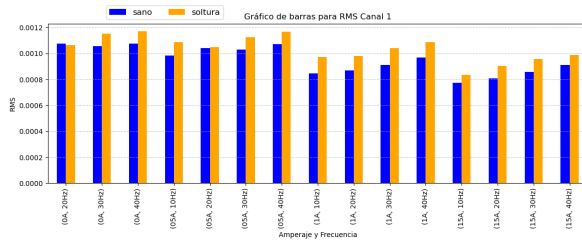


(a) Valores según condición de operación

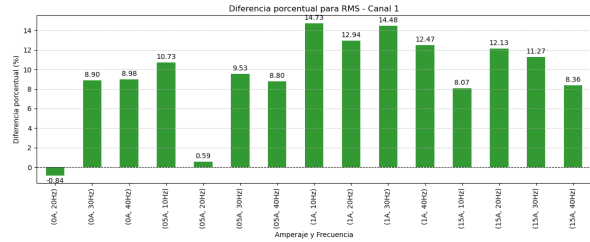


(b) Diferencia porcentual en canal 0

**Figura 4.4** Evolución de valor RMS en canal 0



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 0

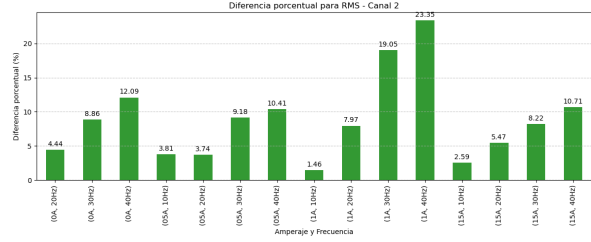
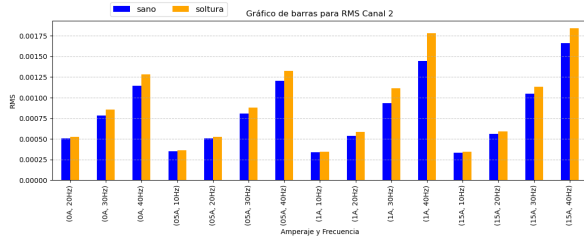
**Figura 4.5** Evolución de valor RMS en canal 1

refleja la mayor actividad en los engranes, pues estos emiten señales por ráfagas transientes. Aunque debe considerarse que este valor es sumamente sensible, por lo que el valor aumento alcanzado no es tan significativo como puede parecer. El hecho de que existan excepciones, sobre todo la existente en la máxima frecuencia y torque, muestra que este valor por sí solo no es enteramente representativo para revelar una soltura.

Para el factor de cresta, las correlaciones son por lo general bajas. En el canal 0, existe un ligero crecimiento de este valor (menor al 10% en la mayoría de los casos), salvo un valor atípico en el máximo torque y baja frecuencia del motor en donde el aumento es de más de 200%. Para el canal 1, no se nota una correlación con la presencia de soltura, pues se intercala entre un crecimiento y decrecimiento al aplicarse esta. Pasando al canal 2, aquí se tiene un crecimiento en 10 de los casos mientras que en los demás hay un ligero decrecimiento y las excepciones se reparten en distintas condiciones de operación, por lo que no puede decirse que hay una tendencia fuerte. Luego, se tiene en el canal 3 un patrón similar, aunque en las excepciones aquí no muestran diferencia en vez de tener decrecimiento. Por lo demás, tampoco se muestra un patrón entre las condiciones de operación y la magnitud de esta diferencia.

Este indicador en verdad no otorga información adicional, pues por la definición del factor de cresta, este depende directamente del RMS, por lo que es claro que muchas de estas variaciones (sobre todo el patrón en los canales 0 y 3) son simplemente consecuencia del cambio en este otro valor. Además, la aleatoriedad del valor máximo es demasiado alta para que en los demás casos se dé un patrón claro. Siendo esto claro en el canal 2, en donde un valor RMS en general es compensado muchas veces por tener alguna ráfaga con mayor amplitud.

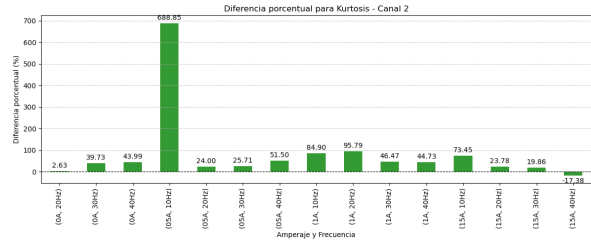
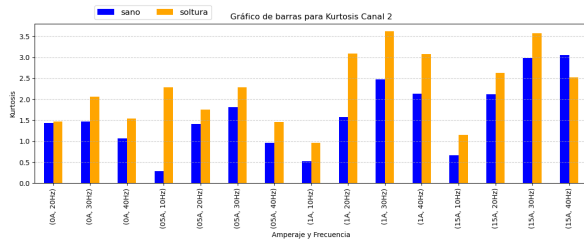
El siguiente indicador es la entropía espectral, aquí en el canal 0 como se nota en la figura 4.9 se tiene un decrecimiento sostenido entre las condiciones de operación. Este es más bien de baja (en su máximo de un 10%) y también se aprecia una tendencia de reducción en la diferencia en las condiciones de operación de mayor frecuencia y torque (teniendo un



(a) Valores según condición de operación

(b) Diferencia porcentual en canal 0

**Figura 4.6** Evolución de valor RMS en canal 2



(a) Valores según condición de operación

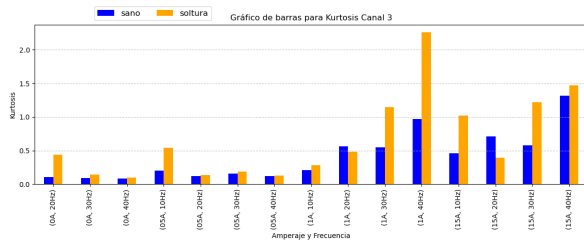
(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.7** Evolución de factor de Curtosis en canal 2

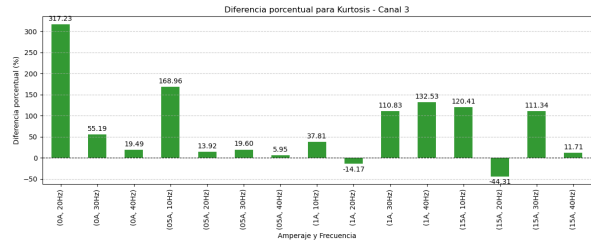
mínimo de un 0.9%). En el siguiente canal revisando la figura 4.10, la tendencia es inversa con respecto a la soltura, aumentando la entropía espectral con esta, aunque se tienen 2 excepciones con condiciones de operación opuestas. La magnitud del crecimiento no está relacionada con la condición de operación y llega hasta un valor reducido de un 10.9%. Al ver el canal 2, se tiene igualmente un aumento general en la condición de soltura, pero su magnitud es muy baja (de a lo más un 2.3% de aumento) y tampoco se aprecia una correlación entre la condición de operación y la magnitud del cambio. Esto según la figura 4.11. Luego, en el canal 3, nuevamente se tiene un crecimiento general en la entropía con la soltura. El valor del crecimiento es nuevamente bajo, teniendo un máximo del 5.9% y sin tener correlación entre la magnitud de este y la condición de operación.

La significancia de la entropía espectral y los patrones encontrados son difíciles de clasificar. Esto en motivo de la complejidad del indicador, esta puede verse en su dependencia de la condición de operación en general, donde en los canales en la base se aumenta junto con el torque del sistema y la velocidad de rotación, mientras que para los de los descansos no hay relación positiva con la frecuencia del motor. Por lo tanto, relacionar un aumento o descenso con un fenómeno físico requiere de un análisis más profundo. De igual forma, se nota que la sensibilidad en la 'complejidad de la señal' es baja, teniendo variaciones pequeñas para todos los casos, esto puede ser negativo o positivo pues al ser poco sensible si se encuentra una diferencia notable se sabe que hay un cambio en el sistema, pero también una soltura incompleta, por ejemplo, podría no generar un cambio detectable. De todas formas, se destaca que nuevamente hay una tendencia invertida entre ambas bases, lo que hace volver a la idea de aproximar la posición del perno suelto con este método.

A continuación se analiza el valor de la componente máxima en el espectro de amplitud. En el canal 0 se tiene una reducción en todas salvo dos condiciones de operación. Esto en una magnitud en el rango del 50% y esta misma se ve reducida en condiciones de más alta frecuencia en el motor, esto visible en la figura 4.12. En cambio, en la posición del canal 1 se tiene ahora un crecimiento en todas (salvo 2) las condiciones de operación al aplicar la

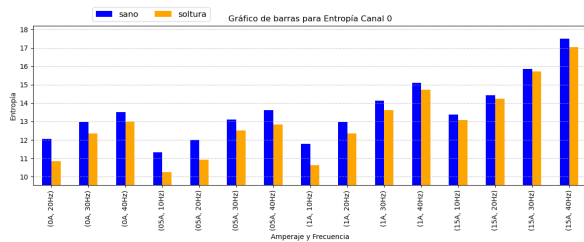


(a) Valores según condición de operación

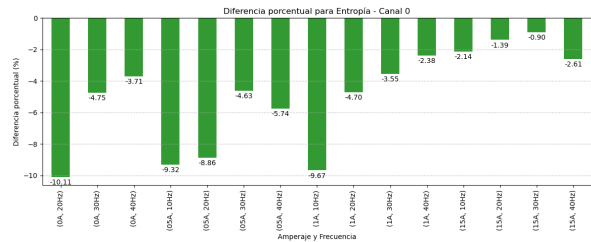


(b) Diferencia porcentual en canal 3

**Figura 4.8** Evolución de factor de Curtosis en canal 3



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 0

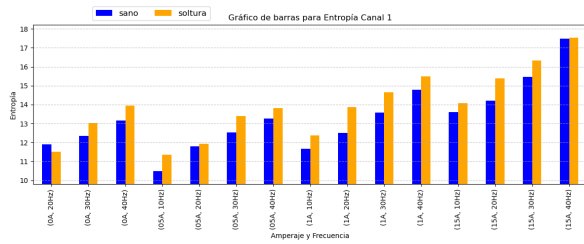
**Figura 4.9** Evolución de la entropía espectral en canal 0

soltura. Se tiene aquí una gran variación en el cambio de magnitud, aunque este no tiene correlación con la condición de operación. Pasando ahora a los siguientes canales, se tiene para estos casos que no hay correlación en el caso sano del que tiene soltura, alternándose un crecimiento y decrecimiento de forma aparentemente aleatoria.

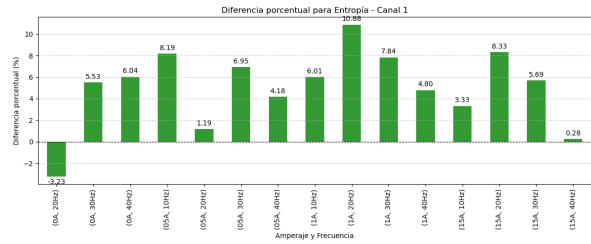
No es sorpresa que este indicador de un patrón cambiante pues, como puede verse en la figura 4.3, el fenómeno de las EA es propio de una banda frecuencial más que de componentes individuales, por lo que fijarse en una única no es lo más efectivo para detectar los cambios. Sin embargo, si que se nota que en los canales de la base hay una tendencia inversa y con correlación importante. Esto, aparte de contribuir a la identificación y ubicación de la soltura, da una idea sobre el mecanismo físico, en donde el roce continuo parece depender en mayor medida de componentes individuales que los eventos periódicos, lo que podría deberse al hecho de ser una emisión continua de EA.

También se trata el centroide del espectro de amplitud en frecuencia. Este tiene en el canal 0 de la figura 4.13 un aumento importante al aplicar la soltura. Este aumento tiene una magnitud de entre un 2 y un 8% y muestra una tendencia a atenuarse cuando se tiene una frecuencia del motor más alta. En el siguiente canal, no pareciera haber mayor tendencia, aunque se tiene en mayor número de ocasiones una reducción que un aumento; no basta para que se considere significativo. Pasando al canal 2, el comportamiento aquí tiene una tendencia cambiante, en la baja frecuencia se tiene un ligero aumento de menos de un 1%, mientras que al aumentar la frecuencia se pasa a una reducción que alcanza un 4.6%. En cambio, en el canal 3 tiene en la mayoría de las condiciones un aumento del indicador en la condición de soltura. Sin embargo, en las condiciones con mayor frecuencia y torque aplicado se revierte y hay una reducción, ambos casos en una magnitud respectiva de alrededor de un 2%.

El valor del centroide podría ser útil en otras aplicaciones, pero en esta se considera que no otorga información adicional del sistema. Se consideraría de utilidad en casos en dónde haya un cambio en el régimen de las EA existentes, aumentando unas y disminuyendo otras por

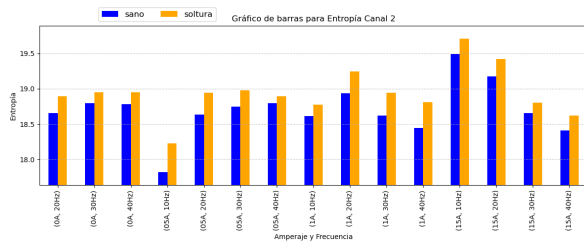


(a) Valores según condición de operación

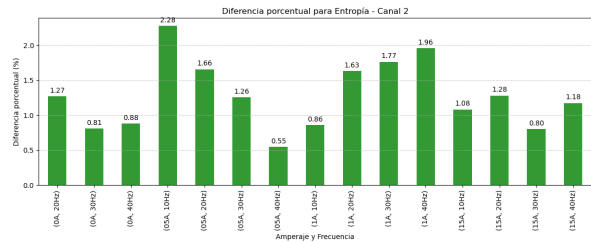


(b) Diferencia porcentual en canal 1

**Figura 4.10** Evolución de la entropía espectral en canal 1



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 2

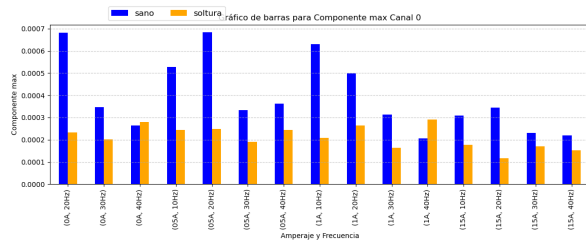
**Figura 4.11** Evolución de la entropía espectral en canal 2

el aumento de la fase de desgaste, por ejemplo. Pero en estos ensayos no ocurre esto, de la revisión de los espectros es claro que no hay zonas que no ocurre un aumento en una banda y reducción en otra. Así, los cambios en el centroide serían casi enteramente consecuencia del cambio general en la fricción deslizante, recordando que un espectro donde haya únicamente ruido tendrá su centroide en el centro, por lo que un aumento general produce un movimiento a la izquierda y una disminución lo hace a la derecha.

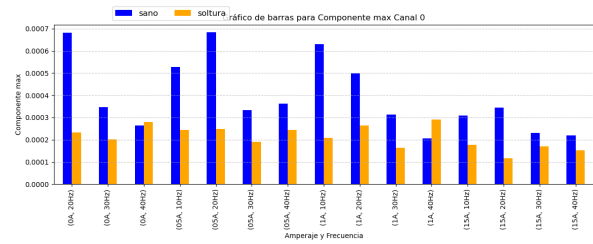
Como último indicador se tiene la desviación en el espectro de amplitud en frecuencia. En el canal 0, en la figura 4.14, hay una tendencia clara a la reducción en el valor cuando ocurre la soltura. Esta variación se ve reducida al aumentar la frecuencia de rotación, su magnitud llega hasta un 7%. Mientras, en el canal 1 se tiene escasa correlación en el indicador al aplicar la soltura mecánica. Tan solo se nota un ligero aumento en los casos de alta frecuencia y torque, pero en una magnitud del orden de un 1%. Luego, en el canal 2 se aprecia un aumento general con la condición de operación y al aplicar la soltura se tiene una diferencia positiva que aumenta con la frecuencia del sistema, con una diferencia máxima de un 4.3%. Este se encuentra en la imagen 4.15. En cuanto al canal 3, se tiene una diferencia negativa en los primeros valores de torque que llega hasta un -2.6% que pasa luego a una correlación incierta.

Nuevamente, se tiene un indicador con escaso valor físico para el presente caso. Esto pues una significancia de este valor ocurre cuando aparecen y desaparecen componentes nuevas en el espectro de frecuencia, cosa que no ocurre. Es por esto, que las diferencias detectadas pueden venir como consecuencia del cambio general en la magnitud dentro de una banda frecuencial concreta. Se hace un resumen del análisis estadístico realizado en base a la tabla 4.2, en donde se clasifica por colores según el nivel de correlación detectado al aplicar la soltura mecánica. El código de colores es:

- Rojo oscuro: Ninguna correlación
- Rojo claro: Correlación mínima

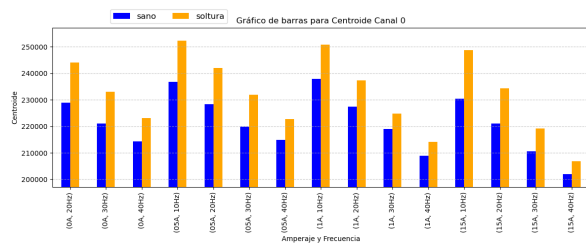


(a) Valores según condición de operación

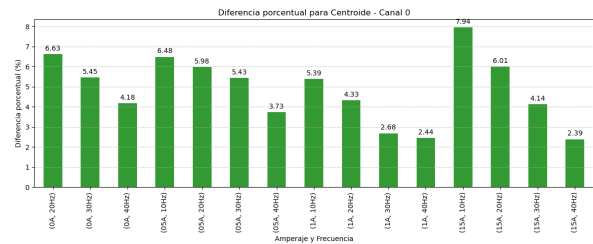


(b) Diferencia porcentual en canal 0

**Figura 4.12** Evolución de la componente máxima espectral en canal 0



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 0

**Figura 4.13** Evolución del centroide del espectro en canal 0

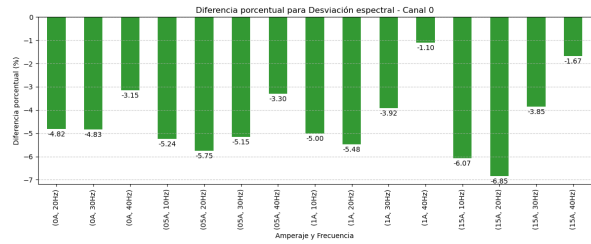
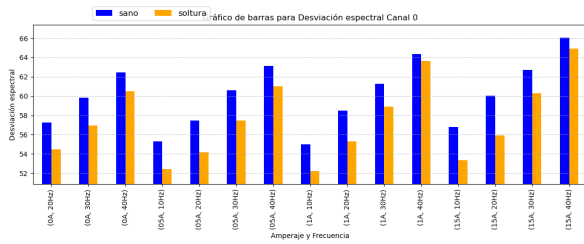
- Amarillo: Correlación marcada en algunas condiciones de operación marcada (ejemplo, en mismo rango de frecuencia/torque se cumple).
- Naranja: Correlación invertida al progresar entre condiciones de operación.
- Verde claro: Correlación clara con excepciones aisladas
- Verde oscuro: Correlación general
- Letra X: Correlación baja en magnitud

### 4.3 Cambios en los parámetros estadísticas en la envolvente de la señal

Luego de analizar en la señal bruta, se procede a realizar el proceso equivalente con la envolvente de esta. En primer lugar, se ve la energía de la envolvente, que se revisa en el conjunto de la señal y en bandas frecuenciales, así teniendo información complementaria. En el canal 0, la energía se reduce considerablemente al aplicar la soltura en el equipo. En la figura 4.16 se nota que el descenso está en un rango del 30% al 50% y su magnitud se reduce al aumentar la frecuencia y el torque en el sistema. Por lo demás, el descenso es en las tres bandas frecuenciales, pero se concentra sobre todo en la primera, donde llega

**Tabla 4.2** Resumen de patrones detectados de los parámetros de la señal bruta y su espectro de frecuencia.

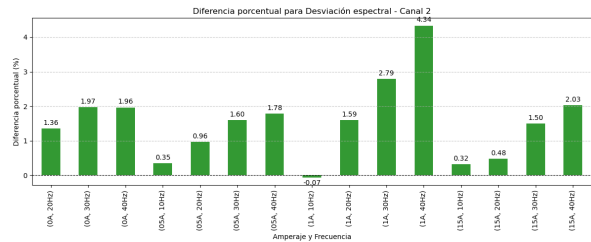
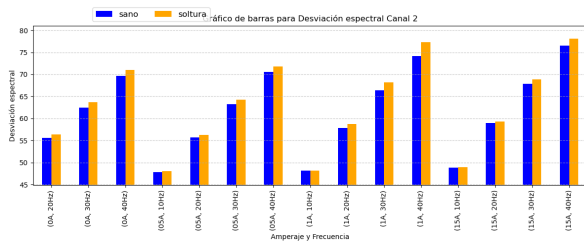
| Parametro | RMS          | Kurtosis     | FC           | Entropía señal | Componente máxima | Centroide señal | Desviación espectro |
|-----------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| Canal     |              |              |              |                |                   |                 |                     |
| 0         | Verde oscuro | Verde oscuro | X            | Verde oscuro   | Verde oscuro      | Verde oscuro    | Verde oscuro        |
| 1         | Verde oscuro | Verde oscuro | Verde oscuro | Verde oscuro   | Verde oscuro      | Verde oscuro    | Verde oscuro        |
| 2         | X            | Verde oscuro | Verde oscuro | Verde oscuro   | Verde oscuro      | X               | X                   |
| 3         | X            | Verde oscuro | Verde oscuro | Verde oscuro   | X                 | X               | X                   |



(a) Valores según condición de operación

(b) Diferencia porcentual en canal 0

Figura 4.14 Evolución de la desviación espectral en canal 0



(a) Valores según condición de operación

(b) Diferencia porcentual en canal 2

Figura 4.15 Evolución de la desviación espectral en canal 2

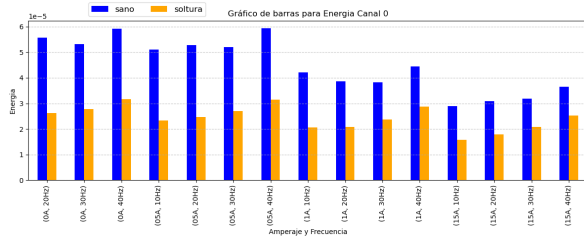
hasta un 60% de reducción, mientras que en la segunda y tercera son más moderados con valor de hasta -38% y -12% respectivamente. Para el canal 1 que se ve en la figura 4.17, ahora se tiene un crecimiento en casi todas las condiciones de operación. La magnitud de este cambio es de entre 15% y 30% y viendo por bandas frecuenciales se verifica que este se concentra esencialmente en la primera, en dónde alcanza un aumento del 50%, mientras que en la segunda solo un 10% y en la tercera no hay correlación. En cuánto al canal 2, se aprecia un importante crecimiento en el indicador en condiciones de alta frecuencia, mientras que en la baja frecuencia apenas hay diferencia. El cambio identificado llega hasta un 50% y se concentra esencialmente en la primera banda frecuencial. Esto en la imagen 4.18. Para el último canal, se nota que, para bajas frecuencias se tiene un ligero aumento en la energía. Pero, al aumentar estas se va revirtiendo hasta tener un decrecimiento en tres de los cuatro casos, estando estos dos fenómenos en un rango de magnitud similar de hasta un 10%. Nuevamente, el cambio en la energía se concentra en la primera banda frecuencial.

El indicador de la energía tiene una definición e interpretación similar, pero la energía suele utilizarse más en señales de EA pues representa de mejor manera el comportamiento de señales no periódicas. Así, es normal que se lleguen a patrones similares, pero se considera como más representativo a la energía.

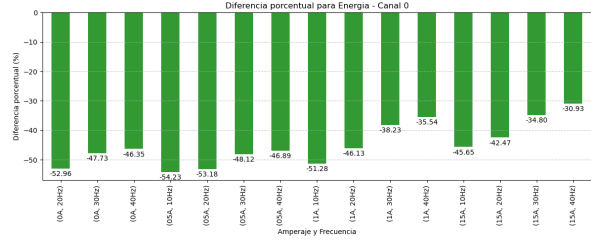
Luego, se revisa el valor de la entropía espectral en la envolvente. En el canal 0 visible en la

| Parametro | Energía | Entropía | Componente máxima | Centroide | Desviación espectral |
|-----------|---------|----------|-------------------|-----------|----------------------|
| Canal     |         |          |                   |           |                      |
| 0         |         | X        |                   |           |                      |
| 1         |         | X        | X                 |           | X                    |
| 2         |         | X        | X                 |           |                      |
| 3         | X       | X        |                   |           |                      |

Tabla 4.3 Resumen de patrones detectados de los parámetros de la envolvente de la señal

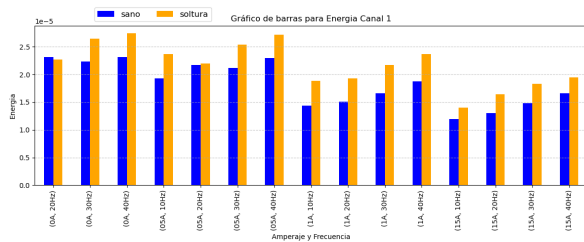


(a) Valores según condición de operación

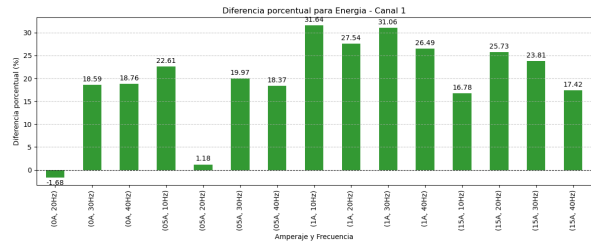


(b) Diferencia porcentual en canal 0

**Figura 4.16** Evolución de la energía en canal 0



(a) Valores según condición de operación



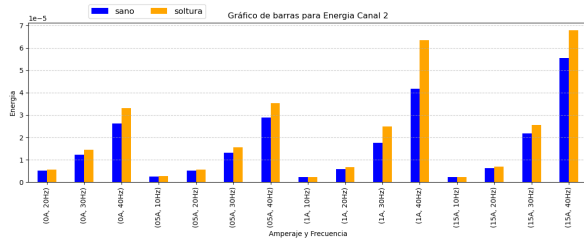
(b) Diferencia porcentual en canal 1

**Figura 4.17** Evolución de la energía en canal 1

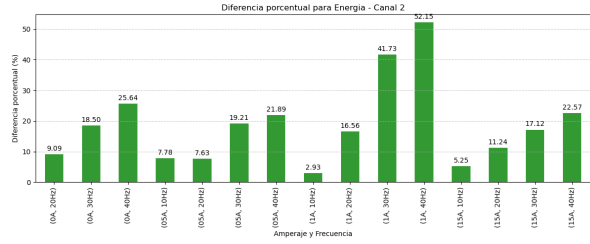
figura 4.19, se tiene ahora un cambio positivo en la magnitud en casi todas las condiciones de operación. Este cambio llega hasta un valor 9.4% y se reduce al aumentar el torque y la frecuencia. En cuanto al canal 1 que se ve en la imagen 4.20, la correlación con la soltura es ahora una reducción en todas las condiciones de operación menos la primera, siendo esta variación de alrededor de un -5%, sin tendencia clara entre las distintas condiciones. Para el canal 2, la tendencia es igualmente decreciente con dos excepciones en condiciones dispares. Se nota en la figura 4.21 que en para la magnitud, esta tiene un máximo de -8.6% y parece que el decrecimiento se reduce a mayor frecuencia, salvo en la condición de mayor torque. Y en el canal 3, no se observa mayor correlación, teniendo en la mayoría de los casos una diferencia muy baja entre los casos.

Viendo la comparación entre la entropía en la envolvente con la de la señal bruta, se nota que las correlaciones se invierten, mostrando una vez más la alta correlación de estas señales. Se desconoce si este hecho es general para las señales, pero la entropía en la envolvente otorga información propia, pues dice cuánto influyen eventos de modulación distintos en las EA, por lo que es normal que al aumentar componentes únicas, como ocurre en el canal 2, esta disminuya. Es de notar también la inversión en la dependencia de las condiciones de operación entre la base y el descanso, mostrando que al predominar la emisión continua, un aumento en la energía implica que aparezcan componentes aleatorias en la envolvente, aumentando su complejidad. Igualmente, la tendencia impar entre las bases se muestra como un indicador de la presencia de una soltura u otro defecto en la base,

Siguiendo con el análisis, se pasa a la componente máxima en el espectro de amplitud, en donde se revisará tanto la frecuencia como la amplitud de esta. En el primer canal, hay una reducción general en la amplitud, estando en un rango de entre -17% y -31.6%, siendo la diferencia entre el caso con y sin soltura decreciente al aumentar los valores de frecuencia y torque. Pero se cuenta con un cambio sustancial en la frecuencia que es máxima, por lo que no se pueden comparar directamente. Esto último igualmente ocurre en el canal 1, en donde se tiene ahora un crecimiento sostenido sin mayor correlación entre las condiciones de operación

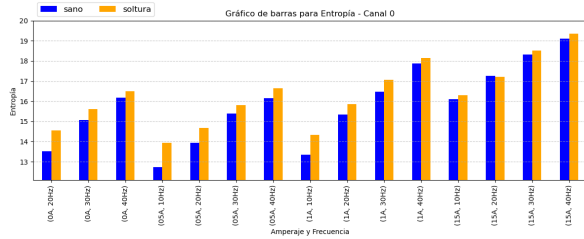


(a) Valores según condición de operación

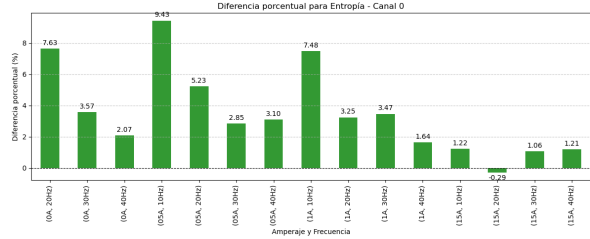


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.18** Evolución de la energía en canal 2



(a) Valores según condición de operación

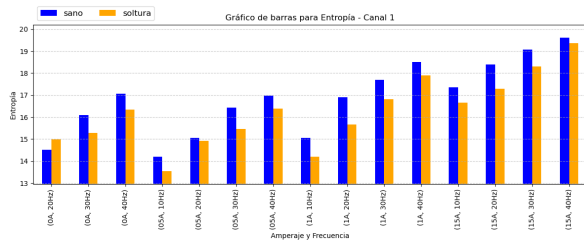


(b) Diferencia porcentual en canal 0

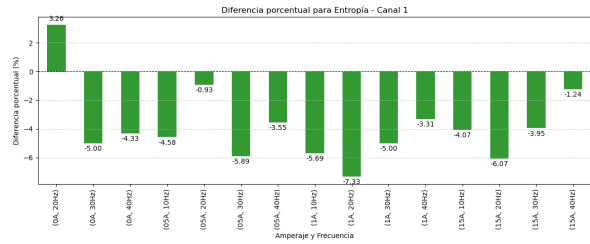
**Figura 4.19** Evolución de la entropía de la envolvente en canal 0

y que alcanza un valor de un 15%. Para el siguiente canal, ahora la frecuencia máxima es constante en valor que es sincrónica con la rotación del eje rápido. Aquí, al aplicar la soltura se llega a un crecimiento en la magnitud, siendo esta tendencia más marcada al ir aumentando la frecuencia del motor. Y en el canal 3, la componente máxima es sincrónica para los casos de alta frecuencia y el valor de este no presenta una tendencia clara al aplicarse la soltura mecánica, alternando entre crecimiento y decrecimiento. En general, esta componente no otorga por sí sola información importante, pues hay demasiada aleatoriedad en la frecuencia de la componente máxima cuando la fricción es continua y, en caso contrario, vale más analizar directamente por las componentes mecánicamente significativas.

Analizando junto el centroide y la desviación en el espectro de la envolvente, se empieza con el canal 0. Aquí, se alterna entre crecimiento y decrecimiento en la mayoría de las condiciones de operación, salvo en la de mayor torque, en donde se nota un aumento. En cuanto a la desviación en este espectro, al aplicar la soltura al equipo se llega a una reducción en este valor. El valor de este llega hasta un -15% y también muestra decrecer al aumentar la rotación del motor. Para el siguiente canal, se tiene ahora una reducción en el centroide del espectro, con variación de hasta un -3% y esta va disminuyendo en mayores frecuencias del sistema. Y la desviación de este espectro muestra una tendencia compleja, pues en las condiciones de bajo torque y frecuencia, se tiene una reducción en el indicador con soltura. Mientras que al ir aumentando los parámetros, la correlación de la soltura pasa a ser positiva, llegando a crecer en un 4%, esto visible en los gráficos 4.22. La tendencia es más compleja en el canal 2, como se ve en la figura 4.23, pues aquí se tiene un ligero aumento en el centroide, en condición de baja rotación del eje. Pero, al aumentar la frecuencia, esta pasa a una reducción de hasta un -4%. Ocurre al revés en la desviación de este espectro, pues en baja frecuencia del motor hay una reducción que se vuelve un aumento importante mientras aumenta esta, siendo el rango de variación desde -25% hasta un 28%. Ocurre en el canal 3 que en un bajo valor de torque y frecuencia existe un aumento en el centroide con la soltura, el cual se revierte a una reducción cuando estas son elevadas, estando estas variaciones en un rango de entre -2.5% y un 3%. Y para la desviación en el espectro, este no tiene una

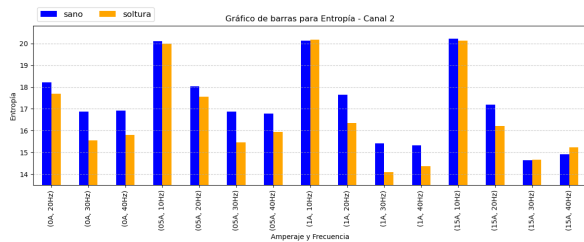


(a) Valores según condición de operación

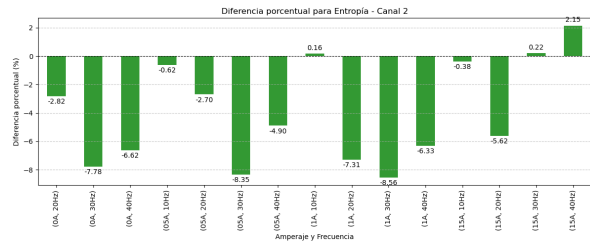


(b) Diferencia porcentual en canal 1

**Figura 4.20** Evolución de la entropía de la envolvente en canal 1



(a) Valores según condición de operación

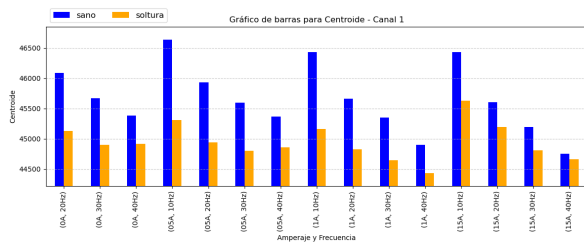


(b) Diferencia porcentual en canal 2

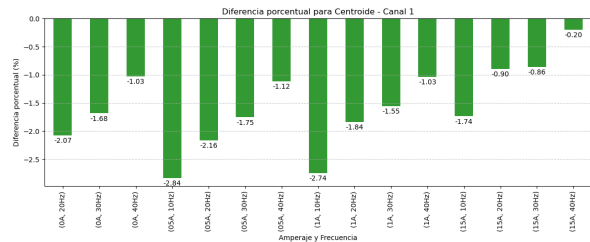
**Figura 4.21** Evolución de la entropía de la envolvente en canal 2

tendencia reconocible entre ambos escenarios.

Este parámetro puede tener algo más de significancia que para la señal bruta, pues aquí si que hay una relación mas directa entre el crecimiento componentes sincrónicas (que están a baja frecuencia) con el aumento de la energía. Es así, que es esperable que los canales en el descanso tengan un movimiento a la izquierda. Y para los canales en la base, la relación es menos clara, probablemente al aumentar la energía se tiene un mayor número de componentes menores no sincrónicas a frecuencia aleatoria que pueden dar un movimiento a la izquierda. En cambio, para la desviación espectral no se tiene una explicación física, pero al tener en los canales 0 y 2 una correlación importante se toma en cuenta en la identificación de la soltura.



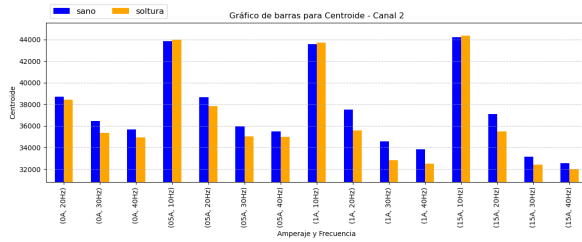
(a) Valores según condición de operación



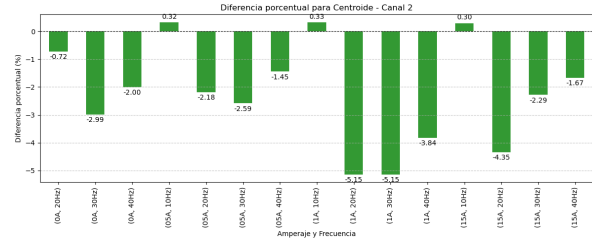
(b) Diferencia porcentual en canal 1

**Figura 4.22** Evolución del centroide de la envolvente en canal 1

Por último, el coeficiente de variación solo pudo ser extraído de las señales de los casos de más alta frecuencia y en los canales 2 y 3. En el primero de estos, tan solo se nota una tendencia creciente con la soltura en las condiciones de operación de mayor torque, en donde se tiene un crecimiento importante (mayor a un 100%), salvo en la última condición en donde tan solo llega a un 14.3%. Y para el canal 3, la tendencia es parecida, tanto en su patrón como en su magnitud. Estas se ven en los gráficos de 4.26 y 4.27.

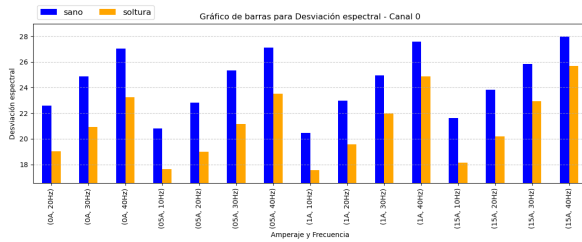


(a) Valores según condición de operación

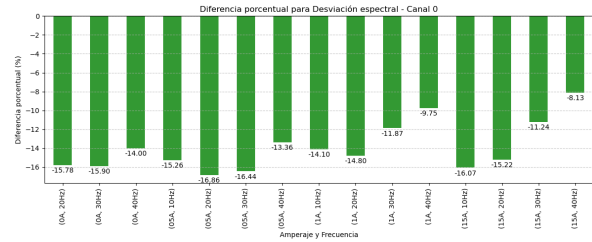


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.23** Evolución del centroide de la envolvente en canal 2



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 0

**Figura 4.24** Evolución de la desviación espectral de la envolvente en canal 0

Este valor, puede tener problemas en su cálculo y este puede revisarse, pero se nota una relación positiva entre las condiciones con más energía y su valor, así como una correlación con la soldadura. Por tanto, se considera como potencialmente valioso y una prueba de que existan no linealidades en el sistema, cosa que difícilmente puede concluirse a partir de los indicadores anteriores.

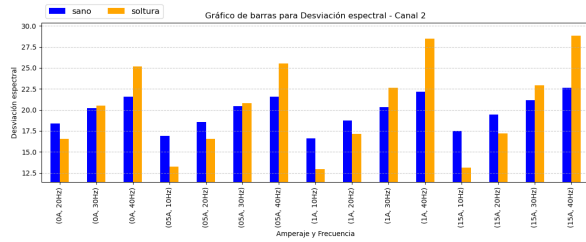
De forma general, se obtuvo información adicional al realizar el análisis en la envolvente con respecto a la de la señal bruta, por lo que se considera que si vale la pena realizar y no quedarse únicamente con el primero. Los indicadores extraídos se pueden relacionar de una forma u otra al cambio en la energía presente en los canales. Estos podrían usarse hipotéticamente en un modelo de clasificación o un algoritmo similar. Las tendencias encontradas se resumen en la tabla 4.3

#### 4.4 Cambios en las componentes sincrónicas de la envolvente

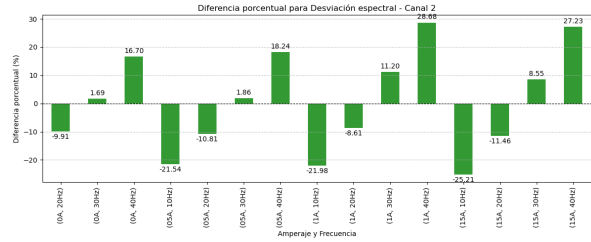
Ahora se procederá a una revisión general de las componentes del espectro, siendo de forma más detallada en las frecuencias fundamentales, mientras que en los armónicos se generaliza mediante la suma entre estos. También se tomará en cuenta el orden de magnitud de las

**Tabla 4.4** Resumen de los patrones encontrados en las componentes del espectro de la envolvente

| Armonicos<br>Canal | Eje rapido |            | Eje lento |            | Engrane          |                     |
|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------------|---------------------|
|                    | Primeros   | Siguientes | Primeros  | Siguientes | Bandas Laterales | Frecuencias Engrane |
| 0                  | Orange     | Dark Blue  | Yellow    | Yellow     | Orange           | Red                 |
| 1                  | Orange     | Yellow     | Dark Blue | Dark Blue  | Green            | Dark Blue           |
| 2                  | Green      | Orange     | Dark Blue | Dark Blue  | Orange           | Dark Blue           |
| 3                  | Orange     | Orange     | Dark Blue | Dark Blue  | Orange           | Yellow              |

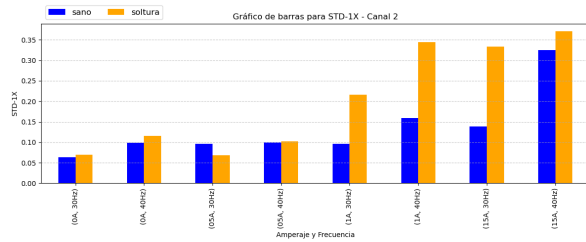


(a) Valores según condición de operación

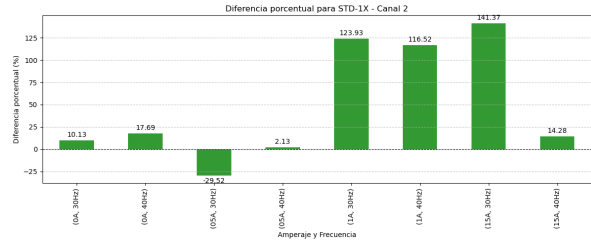


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.25** Evolución de la desviación espectral de la envolvente en canal 2



(a) Valores según condición de operación



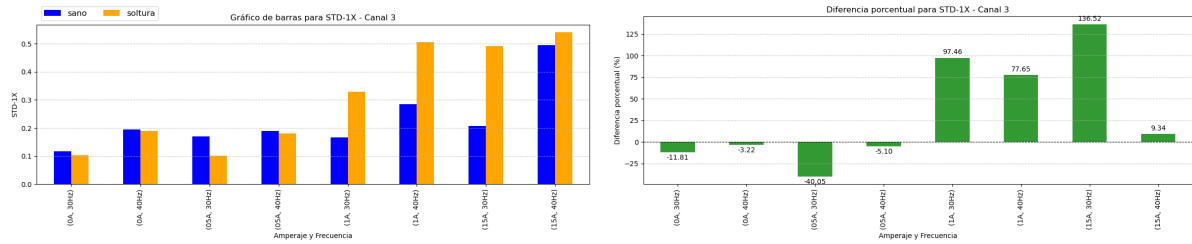
(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.26** Evolución del coeficiente de variación de la 1X de la envolvente en canal 2

componentes y la presencia de patrones globales y parciales al aplicar la soldadura. Se revisará por los canales individuales, haciendo el análisis de las tres fuentes de EA cada vez.

Como revisión inicial, se observa el espectro de la envolvente para el caso de máxima condición de frecuencia del motor y torque del freno. Estos se encuentran en las figuras 4.28 mostrando hasta la tercera componente de engrane y en la figura 4.29 haciendo zoom en los armónicos de la velocidad de rotación de los ejes. En los primeros armónicos, observan que en todos los casos hay una presencia de múltiples armónicos de la 1X de ambos ejes. En los canales del descanso, se tienen muchos armónicos de magnitud importante, sobre todo los correspondientes al eje rápido. Y, si bien hay diferencias en la magnitud de estos al aplicar soldadura, esta no es tan importante. Sí que es mayor la diferencia en las componentes del eje lento, que son de baja amplitud en ambos canales en el caso sano y aumentan sobre todo cuando hay una soldadura sobre todo en el canal 2. Para los canales en la base, es claro que las componentes sincrónicas son de proporción relativa mucho menor, estando eclipsadas por otra componente que probablemente viene de interferencia electromagnética. La diferencia al aplicar la soldadura es poco visible a simple vista y, por lo demás, no se sabe en que proporción estas modulaciones ocurren en el sistema localmente o cuanto de estas pueden ser la recepción de ondas residuales provenientes desde los engranes. En cuanto a las componentes de los engranes, se nota de forma clara la alta modulación en esta, lo que sugiere la presencia de excentricidad. Aquí, visualmente la diferencia al aplicar la soldadura es siempre baja y en los canales basales aparecen más componentes no sincrónicas, que al aumentar con la soldadura en el canal 1 y reducirse en el canal 2 sugieren que vienen del roce del perno.

Se empieza por el canal 0, aquí por la inspección visual general se contempla que, por regla general, las componentes sincrónicas están eclipsadas por la presencia de múltiples componentes no relacionadas con un fenómeno mecánico. En cuanto al eje rápido, es posible apreciar en la componente 1X que la mayoría de las veces hay una reducción en la amplitud en el caso de la soldadura, tendencia que se revierte para los ensayos con mayor frecuencia del motor y torque aplicado. Este patrón parece repetirse en la componente 2X, pero en las



**Figura 4.27** Evolución del coeficiente de variación de la 1X de la envolvente en canal 3

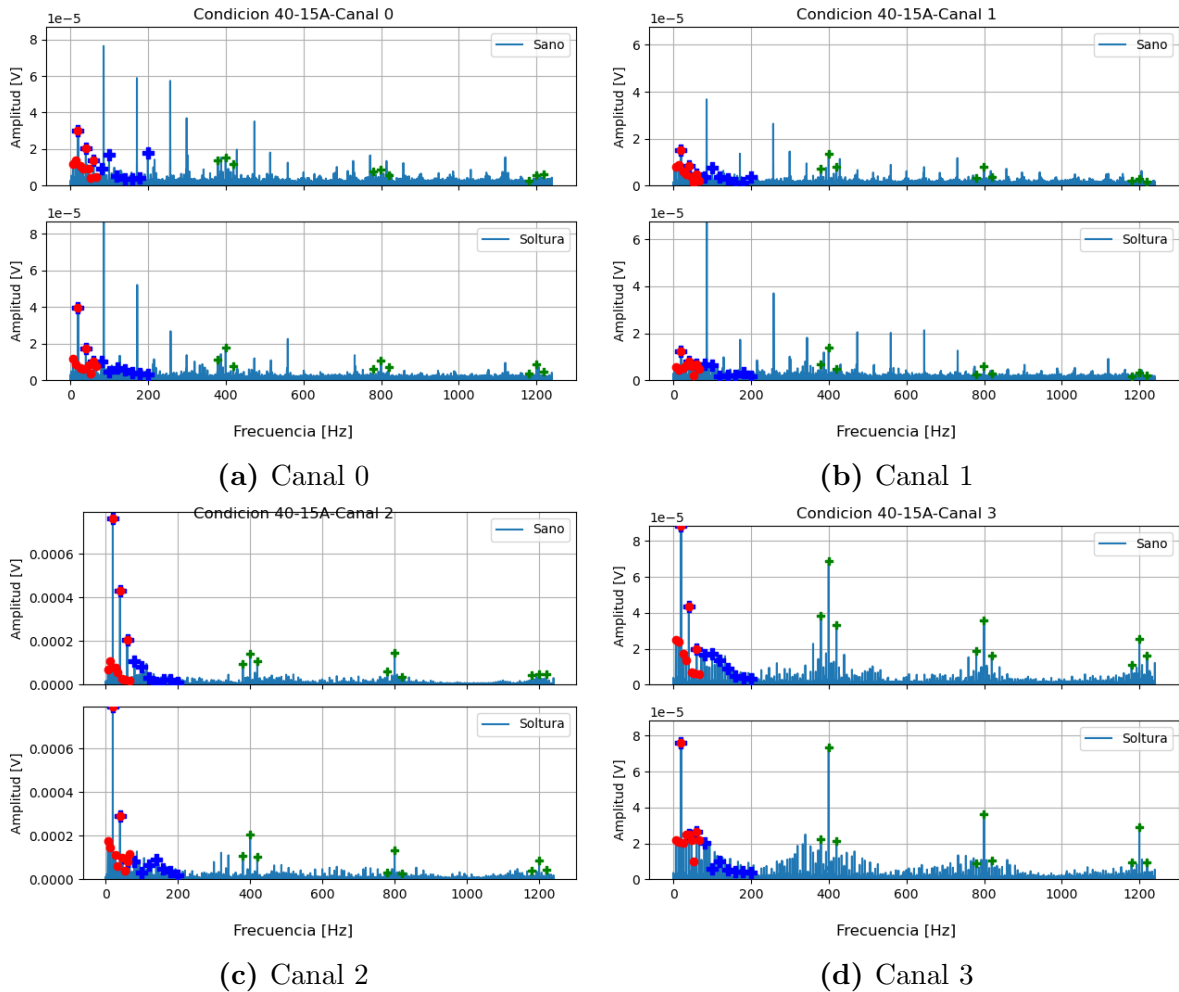
demás no se aprecia una tendencia clara. Debido a que los armónicos tienen una magnitud muy baja, la suma de estos sigue un patrón similar existente en la 1X, pero más débil. Para el eje lento, este visualmente en el espectro se muestra apenas discernible del ruido en varios casos. Observando su comportamiento ante la soltura, es visible un leve descenso en la mayoría de las condiciones de operación, aunque en los armónicos superiores apenas se nota una correlación. Y para las componentes en las frecuencias de engrane, estas igualmente son apenas diferenciables del ruido, salvo en las condiciones de operación más exigentes. Aquí, la presencia de la soltura mayormente reduce la amplitud en la componente y nuevamente se invierte parcialmente la tendencia al aumentar la frecuencia y el torque.

Así, en este canal visible en el gráfico de 4.30 no se entrega mayor información en cuánto a los armónicos analizados, lo que es esperable, pues ya se había definido que las señales son esencialmente continuas con escasa modulación. Además, el hecho de que haya un aumento más o menos coincidente con el visto en el canal 2 en la revisión visual da a pensar que estas señales son residuales que llegan desde los engranajes.

A continuación se realiza el análisis para el canal 1, en estos espectros las componentes armónicas al eje rápido son más visibles. Aunque se nota nuevamente que la componente 4 y la 5 son inusualmente altas, seguramente coincidiendo con componentes eléctricas. De igual forma, en los dos primeros armónicos se tiene una tendencia similar, habiendo en la mayoría de las condiciones una tendencia a la reducción en las experiencias con bajo torque aplicado, pasando a ser un crecimiento al pasar a mayores torques. Pero se recalca que se cuentan con muchas excepciones como para que este fenómeno se pueda considerar una regla general. Para las componentes mayores hay un aumento en la mayoría de los casos en que hay soltura y, con la gran magnitud de estas, da que la suma de las componentes se relaciona positivamente con la soltura en la mayoría de los casos. Para el eje lento, las componentes asociadas nuevamente son algo más visibles en el espectro (aunque aún son de baja magnitud). Por lo demás, no se nota correlación en ninguna de las componentes, habiendo aumentos y descensos intercalados entre los distintos ensayos. Siguiendo con las componentes en la frecuencia de engrane, estas tienen una amplitud muy baja y, si bien hay una cierta tendencia creciente al aplicar la soltura, esto no se ve como suficiente para afirmar que hay un patrón. Esta componente tienen su comparación en la figuras 4.31.

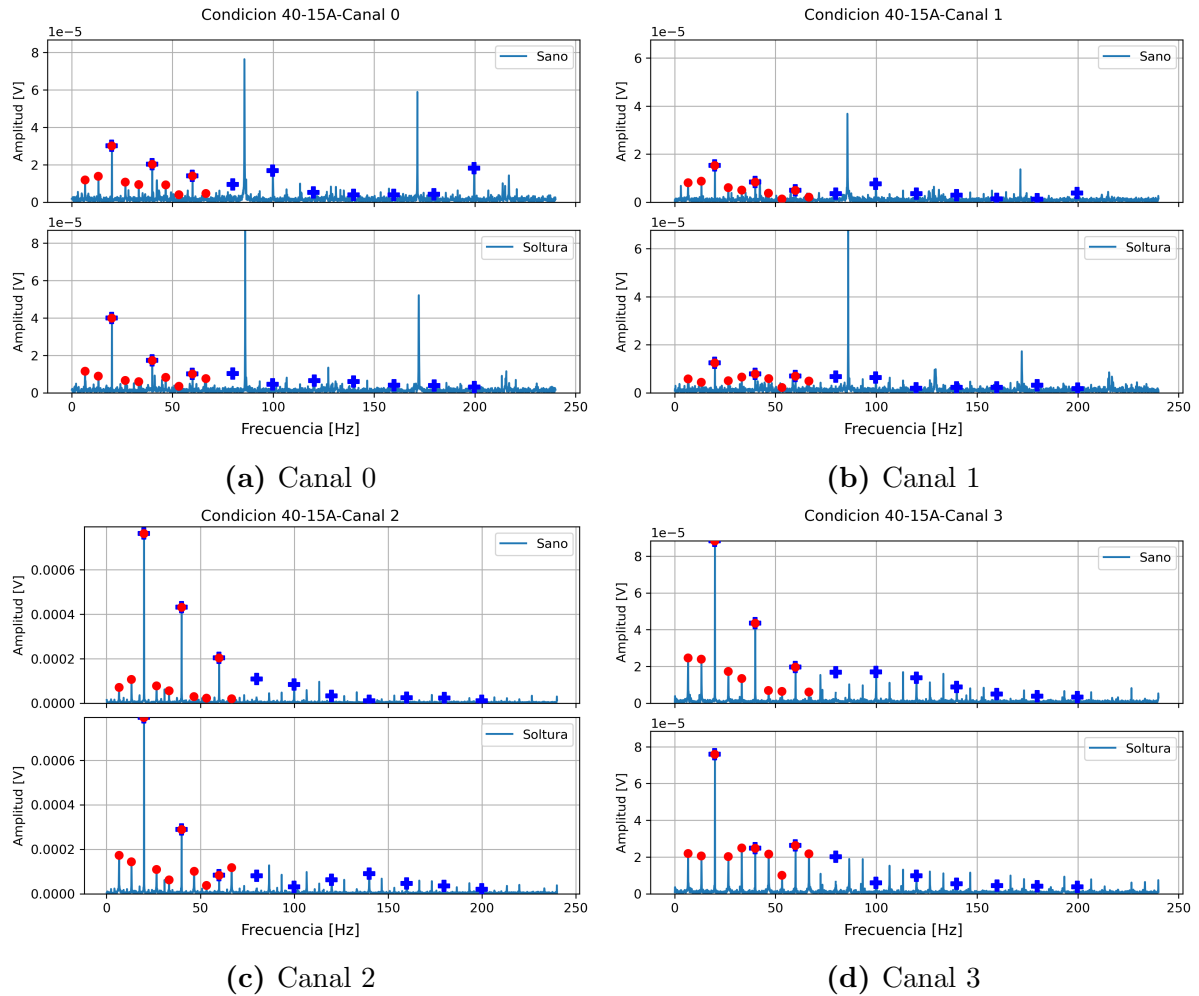
Aquí, se verifica que el aumento de la energía general no se corresponde con la presencia de mayores señales moduladas según las frecuencias del sistema. Un factor que sí llama la atención es el tener un patrón que se invierte en ambos canales y da a entender que este es causado por el cambio en los esfuerzos en el engranaje más que de forma local.

Se pasa ahora al canal 2, en la comparación de los gráficos 4.32, 4.33, 4.34, 4.35 y 4.36 es donde se cuenta con las componentes identificables desde la mecánica del equipo de mayor



**Figura 4.28** Espectro de la envolvente de señales de EA en la condición de máxima frecuencia y torque

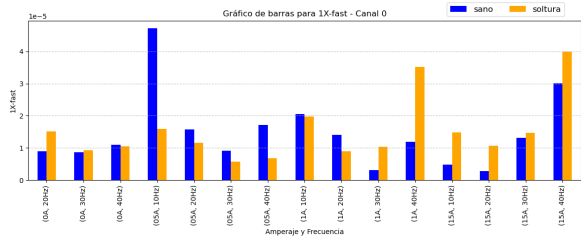
magnitud. También aquí ocurre que las componentes sincrónicas a la rotación son las que tienen magnitud más importante, en lugar de las frecuencias de engrane. Viendo en las correspondientes al eje rápido, se tiene una correlación positiva entre la amplitud de esta y la aplicación de la soldadura, la cual se nota especialmente en los casos de alta frecuencia. En las siguientes componentes, ocurre un extraño fenómeno en el que para condiciones de bajo torque en el sistema hay una tendencia al crecimiento con la soldadura, mientras que a mayor torque es al revés. Este ocurre de tal forma que en la suma entre las componentes hay un descenso para los casos con máximo torque y frecuencia. Por otro lado, en el eje lento se tienen componentes en general muy dependientes de la condición de operación, siendo apenas visibles en los casos de menor exigencia, e importantes en los de mayor (aunque siempre inferior a las del eje rápido). Su relación con la presencia de una soldadura es ampliamente positiva en los ensayos en donde esta componente tiene un valor relevante. Este patrón se repite en todas las componentes. Y en la frecuencia de engrane ocurre de forma similar, teniendo en los ensayos de alta frecuencia y torque una magnitud en general más alta y un mayor aumento cuando hay una soldadura. Para realizar una ponderación mayor de los cambios y entendiendo la relación entre las componentes sincrónicas con las de engrane, se realiza una suma de todas las componentes con importancia mecánica que se ve en la figura 4.37, aquí se nota que para el caso de mayor torque se tiene igualmente una reducción al aplicar la soldadura.



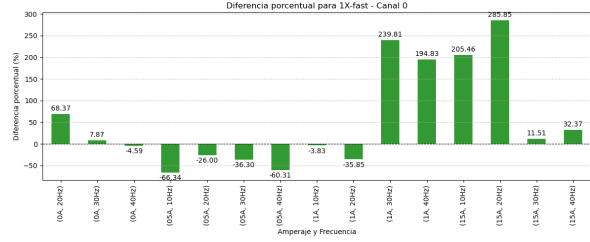
**Figura 4.29** Espectro de la envolvente de señales de EA en la condición de máxima frecuencia y torque

De este canal se tiene una correlación importante, pero solo en algunas condiciones de operación y con una complejidad importante entre diferentes componentes. Esto presenta una debilidad a la hora de realizar un análisis en busca de indicadores de soldadura. Sin embargo, se reconoce igualmente que el hecho de encontrar un patrón en algunos casos ya es un hecho para destacar, pues a priori no se pensaba que hubiera necesariamente relación alguna entre una soldadura basal y el comportamiento en el engranaje.

Por último, en el canal 3 con las figuras 4.38, 4.39 y 4.40 se tiene un espectro similar al del canal anterior, con la diferencia de que en proporción las frecuencias de engranes tienen más importancia y la magnitud general es menor. En las componentes del eje rápido, se tiene el mismo patrón de una tendencia revertida en alto torque en casi todos los casos y componentes, quedando la suma entre estas con una forma parecida a la del canal 2. Para los armónicos al eje lento, nuevamente se tiene una alta dependencia de la condición de operación. Pero aquí en la 1X se sigue teniendo la tendencia creciente revertida en alto torque, cosa que no ocurre en los armónicos mayores, por lo que la suma total sigue mostrando un crecimiento entre los ensayos con soldadura y los sin esta. Pasando a las componentes de engrane, se tiene nuevamente una forma similar a la del canal 2, pero aquí se reduce más el aumento provocado por la soldadura en los ensayos de mas alto torque, aunque este aumento sigue existiendo.

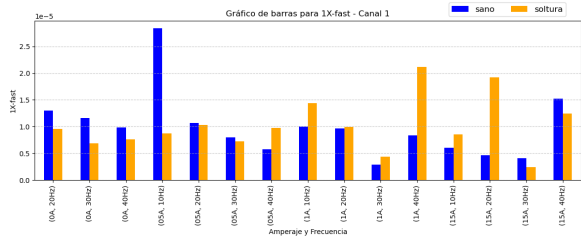


(a) Valores según condición de operación

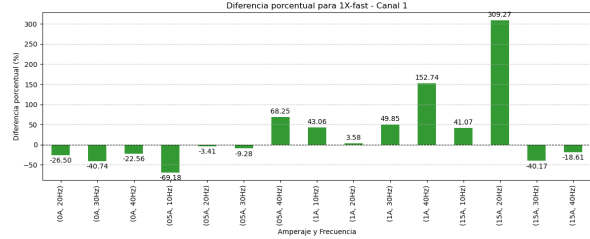


(b) Diferencia porcentual en canal 0

**Figura 4.30** Evolución de la magnitud de la 1X al eje rápido en canal 0



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 1

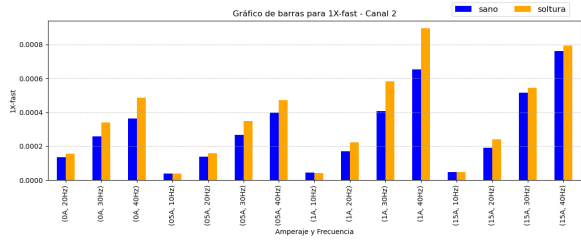
**Figura 4.31** Evolución de la magnitud de la 1X al eje rápido en canal 1

Los valores encontrados para este canal parecen mayormente correspondientes con los del canal 2. La mayor diferencia se encuentra en las componentes sincrónicas, que aquí tienen una magnitud muy inferior. Por tanto, se entiende que el fenómeno que las causa se concentra en el lado del motor del sistema. Las correlaciones encontradas aquí son más débiles que en el canal anterior y la tendencia revertida para el caso de mayor torque es un patrón complicado, pues no coincide con la teoría de un mayor nivel de EA asociado a la soltura. Se requiere una revisión y probable repetición en más ensayos para emitir un juicio más completo.

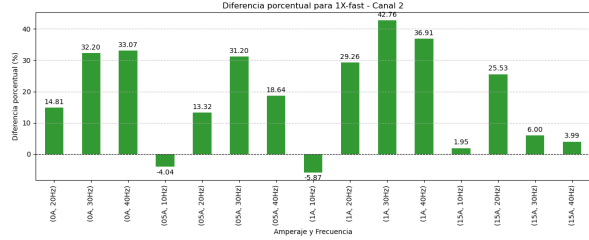
La revisión por componentes resultó dar resultados menos claros de lo que se esperaba, especialmente para los canales en los descansos. Esto hace pensar que el aumento general en la energía puede no traducirse necesariamente en un aumento de estas componentes. De igual forma, la presencia de casos con tendencia inversa a la norma vuelve menos confiable un diagnóstico realizado con esta técnica. De todas formas, a pesar de la complejidad vista en las señales, sigue predominando en muchos de los ensayos un comportamiento más o menos esperado. Se resumen los hallazgos encontrados en la tabla 4.4

## 4.5 Revisión de señales de vibraciones mecánicas

Se realiza un análisis por canal y en menos profundidad que en las EA. Empezando por el primer canal, se tiene un valor RMS altamente creciente con la soltura en condición sin torque externo y alta frecuencia. En caso contrario, la diferencia es baja y sin patrón entre ambos casos. Para la Curtosis, se tiene un valor cercano al de una distribución normal y sin diferencia significativa a causa de la soltura. Tampoco existe una correlación clara en el factor de cresta, pues se tiene, salvo en alta frecuencia y sin torque, una variación muy reducida. Se repite la tendencia casi nula con la excepción recurrente tanto en entropía como en la magnitud de la componente máxima. Para el centroide y la desviación espectral, existe una tendencia que se revierte, pasando de ser ligeramente creciente con la soltura sin torque a decreciente en el torque máximo, pero en la condición de operación de más exigencia no hay mayor diferencia. Viendo en el canal 2, se tienen tendencias prácticamente idénticas,

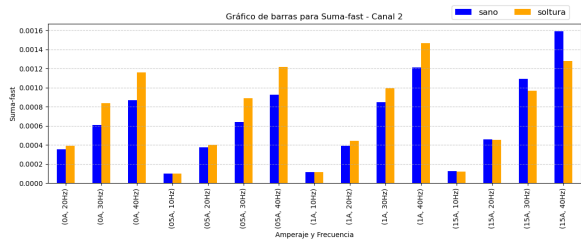


(a) Valores según condición de operación

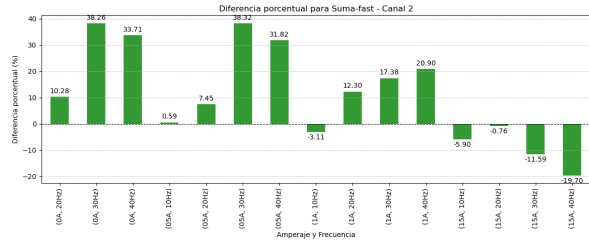


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.32** Evolución de la magnitud de la 1X al eje rápido en canal 2



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.33** Evolución de la magnitud de la suma de los armónicos al eje rápido en canal 2

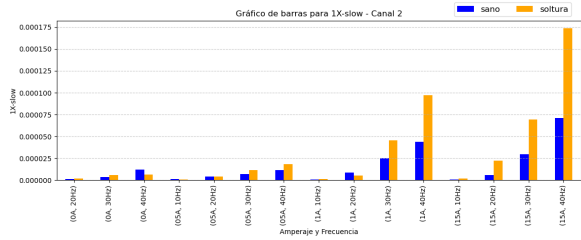
por lo que se pasa al análisis de las componentes sincrónicas.

Empezando por el canal 1, se nota una magnitud muy baja de las vibraciones provocadas por el desbalanceamiento en todos los casos, siendo eclipsada por componentes causadas por componentes eléctricas y resonancias locales. Son las componentes principales generalmente las sincrónicas con la frecuencia de engrane del sistema y sus armónicos. En cuanto a la tendencia causada por la presencia de la soltura, se tiene en los armónicos de la rotación del eje rápido un alza importante en las condiciones de alta y sin torque y más moderada en la presencia del torque. Este patrón se repite en los cinco armónicos analizados. Y en cuanto a los armónicos del eje lento, este muestra un crecimiento para una frecuencia alta y sin torque, y, al proporcionar este último al sistema, se tiene un aumento de muy baja amplitud. Aunque la magnitud general de las componentes es muy baja, apenas distingue del ruido salvo por la frecuencia fundamental. Y, para las frecuencias de engrane, se aprecia un aumento muy grande para la alta frecuencia y sin torque y una diferencia casi nula al aplicar torque. Además, la magnitud de esta vibración es muy dependiente de la frecuencia de rotación del eje, siendo casi nula en frecuencias bajas.

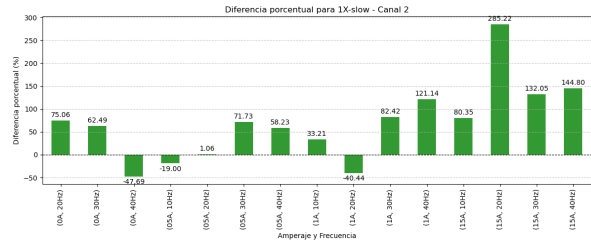
Luego, en el canal 2, se nota inspeccionando los espectros que apenas existen componentes armónicas, predominan la magnitud de la 1X tanto en el eje rápido como en el eje lento. Para el primero de ellos, se observa una correlación incierta entre ambos casos estudiados, pues, existen condiciones de operación con aumento y disminución intercaladas. Algo similar ocurre en la 1X del eje lento, aunque en la mayoría de los casos se tiene una tendencia a la reducción. Por último, para la componente principal en la frecuencia de engrane, se tiene

| Parametro | RMS    | Kurtosis | FC     | Entropía señal | Componente máxima | Centroide señal | Desviación espectro |
|-----------|--------|----------|--------|----------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| Canal     |        |          |        |                |                   |                 |                     |
| 1         | Yellow | Brown    | Brown  | Red            | Yellow            | Yellow          | Orange              |
| 2         | Yellow | Brown    | Yellow | Red            | Brown             | Yellow          | Green               |

**Tabla 4.5** Resumen de los patrones vistos en los parámetros de la señal vibratoria

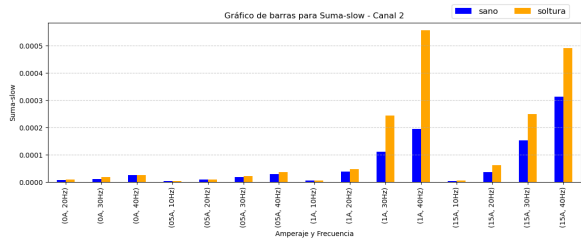


(a) Valores según condición de operación

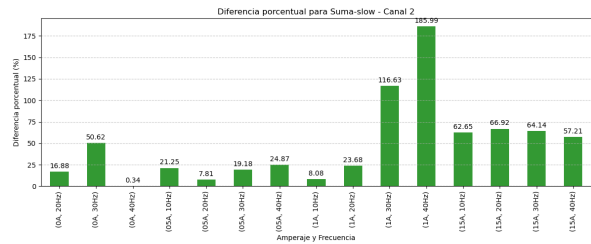


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.34** Evolución de la magnitud de la 1X al eje lento en canal 2



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 2

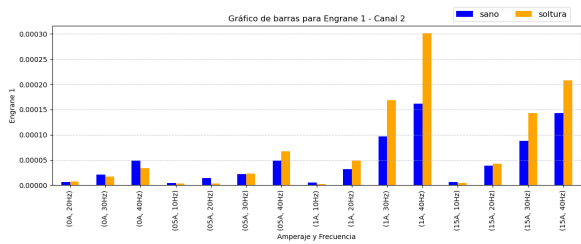
**Figura 4.35** Evolución de la magnitud de la suma de los armónicos al eje lento en canal 2

nuevamente una dependencia importante en la amplitud por la frecuencia de los ejes. Aquí nuevamente, se tiene una tendencia creciente al aplicar una soltura en el sistema, en mayor cantidad para el caso sin torque aplicado. En este canal de igual forma se detectó un valor mayor de variación en los *peaks* filtrados a la frecuencia de engrane, como se nota en la figura 4.41.

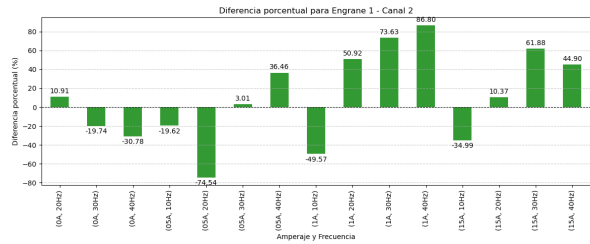
De tal forma, se observa que la identificación de la soltura utilizando solamente las señales vibratorias es un proceso más complejo que utilizando las EA. Así, la realización del trabajo se ve mas justificada pues, a pesar de que la correlación en EA no son absolutas, la mayor sensibilidad de estas genera que sigan siendo mas importante que en las señales vibratorias. Por lo demás, una característica de las transmisiones por engranajes que se corrobora es que la magnitud de la fuerza de desbalanceamiento es muy baja en comparación a la de la frecuencia de engrane en el caso base. Esto implica que la acción no lineal causada por la presencia de la soltura estaría oculta, pues estas se notan menos en las vibraciones por pulsos como lo son las que vienen de los engranajes. Se recalca además, que se destaca que si se detecta un crecimiento en estos canales de la componente 3X del eje rápido, lo que por muy baja que esta sea podría indicar que sí existe un efecto equivalente a un resorte que se endurece según una vibración no lineal del tipo (2). Se resumen los patrones encontrados en las tablas 4.5 y 4.6.

**Tabla 4.6** Resumen de los patrones vistos en la revisión de los armónicos de la señal vibratoria

| Armonicos | Eje rapido |            | Eje lento |            | Engrane          |                     |
|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------------|---------------------|
|           | Primeros   | Siguientes | Primeros  | Siguientes | Bandas Laterales | Frecuencias Engrane |
| Canal     |            |            |           |            |                  |                     |
| 1         |            |            |           |            |                  |                     |
| 2         |            |            |           |            |                  |                     |

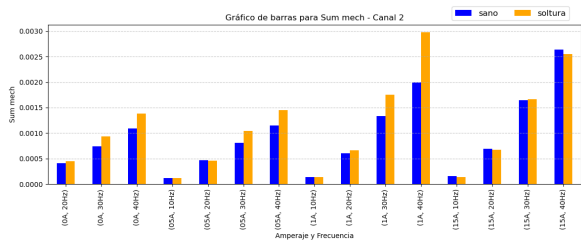


(a) Valores según condición de operación

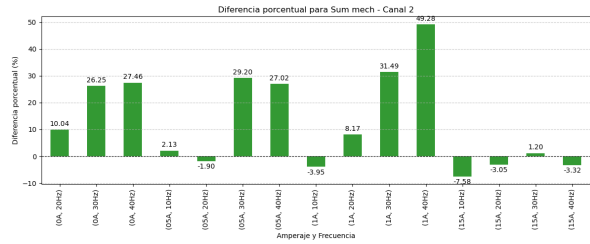


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.36** Evolución de la magnitud a la frecuencia de engrane en canal 2

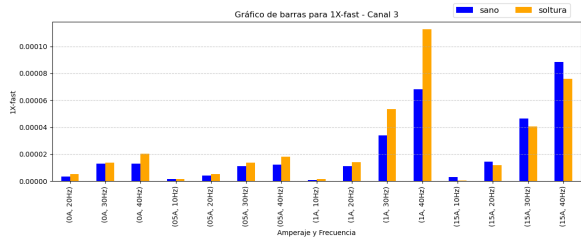


(a) Valores según condición de operación

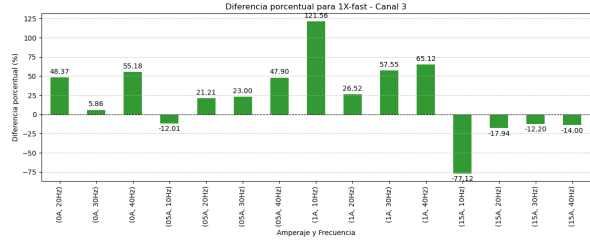


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.37** Evolución de la magnitud de la suma de las componentes mecánicamente significativas en canal 2

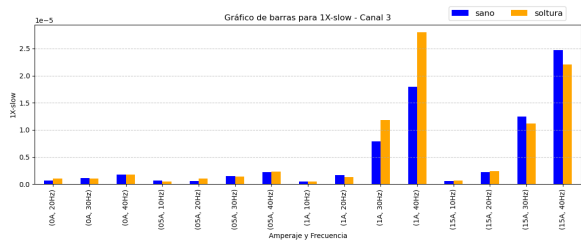


(a) Valores según condición de operación

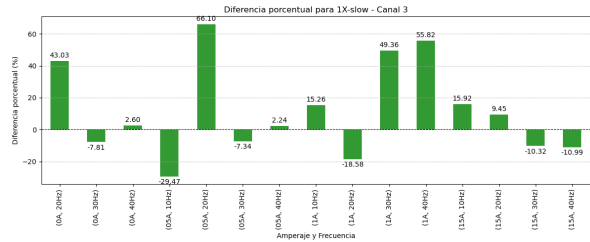


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.38** Evolución de la magnitud de la 1X al eje rápido en canal 3

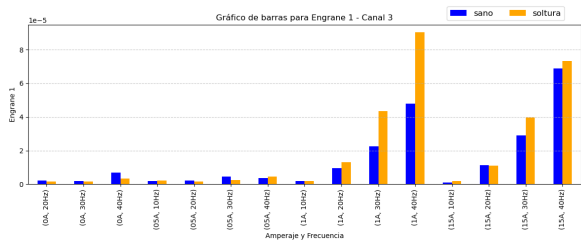


(a) Valores según condición de operación

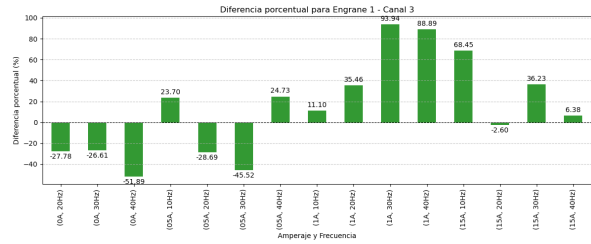


(b) Diferencia porcentual en canal 3

**Figura 4.39** Evolución de la magnitud de la 1X al eje lento en canal 3

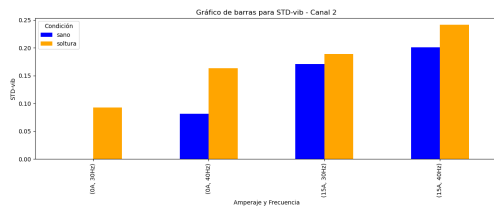


(a) Valores según condición de operación

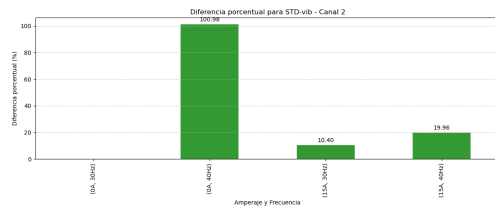


(b) Diferencia porcentual en canal 3

**Figura 4.40** Evolución de la magnitud a la frecuencia de engrane en canal 3

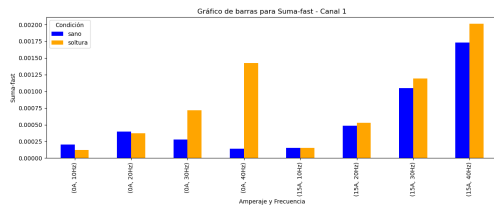


(a) Valores según condición de operación

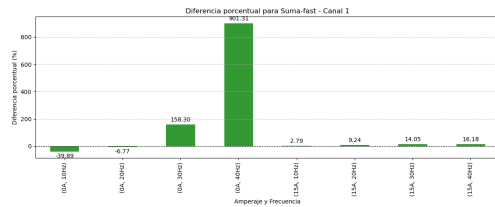


(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.41** Diferencia en coeficiente de variación en *peaks* a la frecuencia de engrane en canal 2

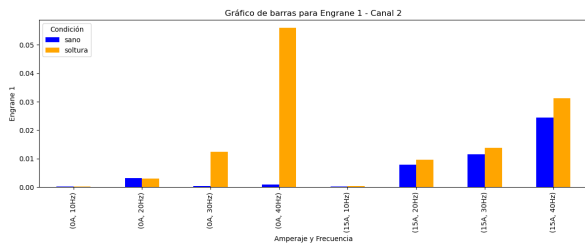


(a) Valores según condición de operación

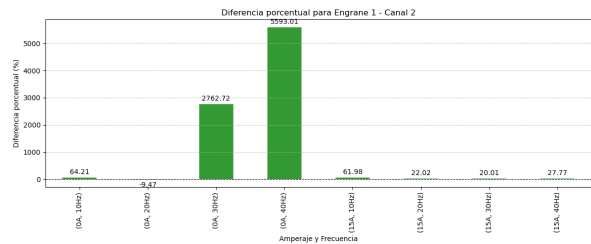


(b) Diferencia porcentual en canal 1

**Figura 4.42** Evolución de la magnitud a la frecuencia de engrane en canal 1



(a) Valores según condición de operación



(b) Diferencia porcentual en canal 2

**Figura 4.43** Evolución de la magnitud a la frecuencia de engrane en canal 2

## 5 Discusión

Realizando comentarios sobre los resultados encontrados en la parte anterior, en esta el primer indicador es de bastante interés. Esto pues la reducción en el valor RMS en el canal 0, que se encuentra junto al perno suelto, coincide con los resultados obtenidos en la literatura y, de tal forma, se verifica que la principal fuente de señales de EA en la conexión es producida por el roce dinámico entre el hilo del perno y con la superficie que sujeta. Así, se tiene que una conexión en una máquina rotatoria no es fundamentalmente distinta de la que se tiene en una estructura estática, sin que proporcione la forma ni las demás interacciones en esta un fuentes de EA que compensen la pérdida por el roce. Si que se considera una novedad el hecho de que aumente el valor RMS en los demás canales, pues de la dinámica del sistema no se observa simple vista que las interacciones puedan causar mayor actividad en los canales alejados del punto de soldadura. Esto implica que existe una mayor interacción de roce en estas otras regiones el equipo, y, sabiendo que las superficies no tienen cambios en sus rugosidades ni aprietes, debe ocurrir que haya una mayor cantidad de fuerza aplicada en estas partes. También llama la atención que no necesariamente se corresponda esta interacción con el comportamiento vibratorio, indicando que el cambio en la rigidez del sistema y en los modos de vibrar no serían lo suficientemente profundos como para mostrar síntomas vibratorios. La detección en estas condiciones de una soldadura aún muestra un interés importante, pues como las fuerzas se reparten de forma adicional en los otros pernos, estos se verán mucho mas expuestos a posibles fallas por desgaste, fatiga y deslizamiento que genere mas soldadura. Por tanto, la detección temprana cumple con el principio del mantenimiento predictivo.

Igualmente, según el mecanismo propuesto del aumento en la actividad de EA por el aumento en la fuerza entre las superficies de roce, hay una relación directa entre la rigidez relativa y el apriete del perno. Esto es lógico pero queda la duda sobre que tanto pueda ser extensible a una soldadura parcial en algún perno. Ya se ha investigado en la literatura [18, 17] sobre el potencial cambio en los modos de vibrar de una conexión en distintos niveles de soldadura de uno de los pernos. Sin embargo, esto se realiza en una conexión mucho más simple y de forma local. Se desconoce si en un equipo con complejidad mecánica pueda existir un efecto visible y queda pendiente para futuras investigaciones. Dependiendo de este hecho la utilidad del análisis realizado puede ser mucho más global, pues se podría detectar la soldadura de forma temprana.

Un estudio sobre la interacción entre la soldadura y la redistribución de esfuerzos puede llevarse a cabo, ya sea a partir de un modelo de elementos finitos, de nuevos ensayos experimentales o de forma analítica, para caracterizar la aparente redistribución de los esfuerzos en estado de soldadura. De igual forma, el fenómeno de impacto, si bien no pudo ser investigado más a fondo en este trabajo, presenta potencial en su estudio teórico y experimental en sus emisiones de EA. La razón es que al tener estas soldaduras que causan síntomas vibratorios claros, estos no dan mayor información sobre la ubicación de la falla dentro de la máquina. Por tanto, a pesar de detectarse fácilmente mediante técnicas de análisis de vibraciones, aún así puede ser necesario que el equipo sea desarmado y examinado parte por parte. Si los sensores de EA pueden detectar las ondas generadas durante estos impactos, se podría hacer mediante una triangulación con al menos tres sensores y tener un estimado aceptable de la ubicación de la falla.

La relación entre el estado de los pernos y su comportamiento en EA es motivo de investigaciones mas en profundidad. Por ejemplo, puede obtener una relación empírica o analítica sobre la magnitud RMS de las señales emitidas con factores de diseño como el paso o la

inclinación del hilo. También, el nivel de rugosidad actual que se relaciona directamente con el estado de desgaste es digno atención. Especialmente, pues en un equipo real al haber la condición para una soltura basal seguramente los demás pernos tengan al menos un estado mas avanzado de desgaste. Y, análogamente al roce en los dientes de engranaje según [36], puede que al estar en su estado mas 'liso' por el desgaste reduzca el valor general emitido por los pernos, dificultando un análisis como el realizado en este trabajo.

Otro punto que produce extrañeza en el desarrollo del trabajo es la forma del espectro de la envolvente en los descansos. Como se mencionó anteriormente, en una transmisión por engranaje, las únicas fuentes significativas que deberían medirse en el descanso son las provenientes del choque de engranaje y por la presencia de grietas en rodamientos. Y estas dos componentes no actúan en la 1X de la rotación del eje. Sin embargo, para el caso actual, y especialmente en el sensor 2, estas son de gran tamaño y hasta sobrepasan a las componentes de los engranajes. Por lo demás, en la forma de onda y por la presencia de bandas laterales se nota que las ráfagas están muy moduladas a una frecuencia igual a la rotación del eje rápido, probablemente causado por tener el engranaje de ese lado excéntrico. Debido a esta misma modulación, se produce el evento de mayor amplitud igualmente una vez por cada ciclo, por tanto, es probable que la envolvente y su espectro actúen tal que este punto máximo se trate como un pulso periódico aparte no relacionado con la señal del engranaje. La forma que toma en el espectro parece apoyar esta teoría, pues desde el plano frecuencial una función periódica cualquiera toma forma de una seguidilla de armónicos -cosa que coincide con el comportamiento detectado-. Además, en caso de tener una modulación no sinusoidal que forme un pulso periódica en la amplitud de la onda, esto se vería reflejado en el espectro como múltiples bandas laterales separadas por la frecuencia de rotación y de baja amplitud, cosa que no ocurre en los espectros de envolvente. Por tanto, debe asumirse que este comportamiento detectado no es más que un fallo en el algoritmo de detección de la envolvente y de formación de su espectro, por lo que se consideran estas componentes como parte de la respuesta en EA al actuar de los engranes.

## 6 Conclusiones

En conclusión, se presenta a partir del análisis de las señales de EA sobre la existencia de diferenciales sutiles al aplicar una soltura en un perno basal. Esto fue logrado a partir de una revisión de los datos experimentales recolectados de un sistema de transmisión por engranaje en funcionamiento y en múltiples condiciones de operación. Así, se logra el primer objetivo específico.

La causa una disminución en la actividad junto a la soltura y una mayor actividad en las demás ubicaciones, lo que se ve reflejado en indicadores como el valor RMS, la entropía espectral y parcialmente en el análisis de la envolvente. En otros indicadores se tienen correlaciones reducidas, nulas o con escasa información añadida. Así, se puede afirmar que el segundo objetivo específico fue cumplido pero con menos contundencia de la esperada inicialmente, pudiéndose identificar la soltura potencialmente con la medición en los descansos y en las bases.

Para el tercer objetivo específico, se tiene un cumplimiento más limitado pues la soltura mecánica impuesta al sistema no conlleva la aparición de ondas EA adicionales que puedan ubicarse. Y, si bien se tiene un comportamiento anti-simétrico entre los lados del equipo entre que se aplica y no se aplica la soltura. Así, podría realizarse una rutina de inspección que pase por las bases y los descansos de forma que se pueda reconocer una soltura de otro tipo de fallas, en caso de que estas últimas no causen actividad adicional en los pernos basales. Para conocer esto último, sería necesario realizar una investigación experimental adicional. Se reconoce que el procedimiento no siempre es práctico, pues puede implicar la medición por tramos de la máquina hasta encontrar un valor discordante.

Respondiendo al cuarto objetivo del trabajo, el motivo más probable de esto es la reducción del roce en el perno suelto que reduce su área de contacto real con la superficie que sujeta. Y en los demás puntos existe una mayor interacción de fuerzas entre las superficies causadas por el cambio en la rigidez equivalente y el apoyo de uno de los lados del equipo. Este cambio se pensaba que sería muy sutil para notarse como síntomas de EA pero ahora se le nota como potencial para este y otros tipos de defectos que impliquen la pérdida de la rigidez estructural como la corrosión en la base.

Para un análisis equivalente en vibraciones mecánicas, no se obtiene información suficiente para afirmar la existencia de una relación con la soltura. Por tanto, un estudio de EA se muestra justificado aunque la correlación tampoco sea indiscutible, pues hay patrones visibles y significativos, sobre todo en las condiciones de operación más exigentes. Se recomienda realizar un estudio experimental más detallado, que incluya fuerzas controladas de entrada al sistema y en donde se compare la respuesta en EA dependiendo del estado de los pernos.

Por lo demás, se reconoce una limitación de este estudio al no tomar en cuenta técnicas de complejidad de análisis de señales como lo puede ser la descomposición modal empírica o la transformada en tiempo-frecuencia Wavelet, así como otras más simples, tal que el estudio de los parámetros propios de los eventos individuales de las señales (como duración, tiempo de crecimiento, energía, entre otros). En estos puede que se hayan obtenido indicadores más claros, pues en la literatura muchas veces se encuentran fallas con estos que parecen invisibles con los demás métodos.

El estudio de los pernos y su relación entre su estado actual con las emisiones de EA aún se encuentra en fases iniciales y, si bien no fueron el motivo central de este trabajo, se considera que esta área requiere atención. Este debe incluir un control de los parámetros de diseño

de estos y de su rugosidad superficial actual, para establecer un modelo que relacione todos estos parámetros.

De todas formas, se destaca que se tiene uno de los primeros estudios que relaciona en un sistema de engranajes las señales emitidas por estos con un defecto que no les afecte directamente. Queda a partir de aquí probar si el patrón se modifica en una transmisión dinámicamente más complicada, como lo es la de un engranaje planetario.

## Referencias

- [1] A. Hase, H. Mishina, and M. Wada, “Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms,” *Wear*, vol. 292-293, pp. 144–150, 6 2012.
- [2] F. Leaman, “A Review on Acoustic Emissions of Gear Transmissions: Source, Influencing Parameters, Applications and Modeling,” *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2024.
- [3] M. G. R. Sause, “INVESTIGATION OF PENCIL-LEAD BREAKS AS ACOUSTIC EMISSION SOURCES,” *Journal of Acoustic Emission*, 1 2011.
- [4] R. Morales and C. Vicuña, “InclusiÓN del lubricante en la dinÁmica de engranajes de dientes rectos,” 2018.
- [5] N. Meyendorf, N. Ida, R. Singh, and J. Vrana, *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*. 3 2021.
- [6] P. Saavedra, “Análisis de vibraciones en máquinas rotatorias, nivel 1-2-3,” 2010. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción.
- [7] K. Ohno and M. Ohtsu, “Crack classification in concrete based on acoustic emission,” *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 2339–2346, 6 2010.
- [8] T. Roberts and M. Talebzadeh, “Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, pp. 695–712, 3 2003.
- [9] N. K. Banjara, S. Sasmal, and S. Voggu, “Machine learning supported acoustic emission technique for leakage detection in pipelines,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 188, p. 104243, 10 2020.
- [10] F. König, C. Sous, A. O. Chaib, and G. Jacobs, “Machine learning based anomaly detection and classification of acoustic emission events for wear monitoring in sliding bearing systems,” *Tribology International*, vol. 155, p. 106811, 12 2020.
- [11] S. I. Z. Estakhraji, M. Wall, J. Capito, and M. S. Allen, “A thorough comparison between measurements and predictions of the amplitude dependent natural frequencies and damping of a bolted structure,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 544, p. 117397, 10 2022.
- [12] P. Goldman and A. Muszynska, “Dynamic Effects in Mechanical Structures with Gaps and Impacting: Order and Chaos,” *Journal of vibration and acoustics*, vol. 116, pp. 541–547, 10 1994.
- [13] A. Muszynska and P. Goldman, “Chaotic responses of unbalanced rotor/bearing/stator systems with looseness or rubs,” *Chaos Solitons Fractals*, vol. 5, pp. 1683–1704, 9 1995.
- [14] A. D. Dimarogonas, *Vibration for engineers*. 1 1992.
- [15] P. Wang, X. Zhao, H. Xu, H. Ma, X. Yin, X. Zhang, and S. Zhao, “Nonlinear dynamic behaviors of a shaft-bearing-pedestal system with outer ring slip and damage,” *Nonlinear Dynamics*, 10 2024.
- [16] F. Chu and Y. Tang, “STABILITY AND NON-LINEAR RESPONSES OF a ROTOR-BEARING SYSTEM WITH PEDESTAL LOOSENESS,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 241, pp. 879–893, 4 2001.

- [17] F. Huda, I. Kajiwara, N. Hosoya, and S. Kawamura, “Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 40, pp. 589–604, 6 2013.
- [18] A. Pirdayr, M. Mohammadi, M. J. Kazemzadeh-Parsi, and M. Rajabi, “Self-loosening effects on vibration characteristics of plates with bolted joints: An experimental and finite element analysis,” *Measurement*, vol. 185, p. 109922, 7 2021.
- [19] J. Juoksukangas, A. Lehtovaara, and A. Mäntylä, “Experimental and numerical investigation of fretting fatigue behavior in bolted joints,” *Tribology International*, vol. 103, pp. 440–448, 7 2016.
- [20] T. Ireman, T. Ranvik, and I. Eriksson, “On damage development in mechanically fastened composite laminates,” *Composite Structures*, vol. 49, pp. 151–171, 6 2000.
- [21] A. Daadbin and Y. Chow, “A theoretical model to study thread loosening,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 27, pp. 69–74, 1 1992.
- [22] B. A. Housari and S. A. Nassar, “Effect of Thread and Bearing Friction Coefficients on the Vibration-Induced Loosening of Threaded Fasteners,” *Journal of vibration and acoustics*, vol. 129, pp. 484–494, 4 2007.
- [23] M. Zhang, Y. Shen, L. Xiao, and W. Qu, “Application of subharmonic resonance for the detection of bolted joint looseness,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 88, pp. 1643–1653, 1 2017.
- [24] U. Prabhakaran, R. Beale, and M. Godley, “Analysis of scaffolds with connections containing looseness,” *Computers Structures*, vol. 89, pp. 1944–1955, 4 2011.
- [25] J. Guarino and R. Hamilton, “Stethoscope-based detection of detorqued bolts using impact-induced acoustic emissions,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 136, p. 2209, 10 2014.
- [26] Q. Pan, R. Pan, C. Shao, M. Chang, and X. Xu, “Research Review of Principles and Methods for Ultrasonic Measurement of Axial Stress in Bolts,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 33, 2 2020.
- [27] X. Chen, W. Han, and Z. Zhang, “Loosening state monitoring and identification of multi-bolted flange joints based on nonlinear wave energy transmission,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 224, p. 112114, 2025.
- [28] T. Tong, J. Hua, D. Du, F. Gao, and J. Lin, “Bolt looseness detection in lap joint based on phase change of lamb waves,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 223, p. 111840, 2025.
- [29] S. Yadavar Nikraves and M. Goudarzi, “A review paper on looseness detection methods in bolted structures,” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, pp. 2153–2176, 12 2017.
- [30] F. Wang, “Multi-Bolt looseness detection using a new acoustic emission strategy,” *Structural Health Monitoring*, vol. 22, pp. 1543–1553, 7 2022.
- [31] X. Wang, Q. Yue, and X. Liu, “Bolted lap joint loosening monitoring and damage identification based on acoustic emission and machine learning,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 220, p. 111690, 7 2024.

- [32] J. Sun, H. Yang, D. Li, and C. Xu, “Analysis of friction-related acoustic emission in bolted joint structures,” *International journal of mechanical system dynamics*, vol. 3, pp. 383–396, 12 2023.
- [33] A. Isaacs, *Oxford dictionary of Physics*. 1 1996.
- [34] T. Loutas, G. Sotiriades, I. Kalaitzoglou, and V. Kostopoulos, “Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements,” *Applied Acoustics*, vol. 70, pp. 1148–1159, 5 2009.
- [35] R. B. Sharma, A. Parey, and N. Tandon, “Modelling of acoustic emission generated in involute spur gear pair,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 393, pp. 353–373, 1 2017.
- [36] E. Caso, A. F. del Rincon, P. Garcia, M. Iglesias, and F. Viadero, “Monitoring of misalignment in low speed geared shafts with acoustic emission sensors,” *Applied Acoustics*, vol. 159, p. 107092, 2020.
- [37] M. Chai, Z. Zhang, and Q. Duan, “A new qualitative acoustic emission parameter based on Shannon’s entropy for damage monitoring,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 100, pp. 617–629, 9 2017.
- [38] C. Guo, “NONLINEAR DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF ROTOR-BALL BEARING SYSTEM INCLUDING UNBALANCE-RUBBING-LOOSENESS COUPLED FAULTS,” *Zhendong yu chongji*, 1 2008.
- [39] S. A. A. Moosavian and E. MohammadiAsl, “Backlash Detection in CNC Machines Based on Experimental Vibration Analysis,” *RAM*, pp. 393–398, 9 2008.
- [40] H. Dunegan, D. Harris, and C. Tatro, “Fracture analysis by use of acoustic emission,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 1, pp. 105–122, 6 1968.
- [41] D. Q. Tran, J.-W. Kim, K. D. Tola, W. Kim, and S. Park, “Artificial Intelligence-Based Bolt Loosening Diagnosis Using Deep Learning Algorithms for Laser Ultrasonic Wave Propagation Data,” *Sensors*, vol. 20, p. 5329, 9 2020.
- [42] C. K. Tan and D. Mba, “Correlation Between Acoustic Emission Activity and Asperity Contact During Meshing of Spur Gears Under Partial Elastohydrodynamic Lubrication,” *Tribology Letters*, vol. 20, pp. 63–67, 9 2005.
- [43] A. B. Novoa and C. M. Vicuña, “New aspects concerning the generation of acoustic emissions in spur gears, the influence of operating conditions and gear defects in planetary gearboxes,” *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 58, pp. 18–27, 1 2016.
- [44] I. O. for Standardization, “Condition monitoring and diagnostics of machines — vibration condition monitoring — part 1: General procedures.” ISO Standard No. 13373-1:2002, 2002.
- [45] F. Wang and R. Zhu, “Detection of bolt head corrosion under external vibration using a novel entropy-enhanced acoustic emission method,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 108, pp. 3807–3816, 3 2022.
- [46] E. Caso, A. Fernandez-Del-Rincon, P. Garcia, A. Diez-Ibarbia, and J. Sanchez-Espiga, “An experimental study of acoustic emissions from active surface degradation in planetary gears,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 189, p. 110090, 1 2023.

- [47] H. Dunegan and A. Tetelman, “Non-Destructive characterization of hydrogen-embrittlement cracking by acoustic emission techniques,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 2, pp. 387–402, 6 1971.
- [48] F. Leaman, C. Vicuña, and E. Clausen, “Experimental Investigation of Crack Detection in Ring Gears of Wind Turbine Gearboxes Using Acoustic Emissions,” *Journal of vibration engineering technologies*, vol. 12, pp. 2111–2128, 4 2023.
- [49] F. Leaman, C. M. Vicuña, and E. Clausen, “Potential of Empirical Mode Decomposition for Hilbert Demodulation of Acoustic Emission Signals in Gearbox Diagnostics,” *Journal of vibration engineering technologies*, vol. 10, pp. 621–637, 10 2021.

# A Tablas con datos globales

Tabla A.1 Datos de parámetros de señal de EA y FFT en canal 0

| RMS         | Kurtosis     | Factor de cresta | Entropía    | Componente max | Centroide   | Desviación espectral | Energía     | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|--------------|------------------|-------------|----------------|-------------|----------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 0.001669357 | 0.040958151  | 5.14340254       | 14.6128899  | 0.000680589    | 228952.6929 | 57.24992913          | 5.57345E-05 | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 0.001144924 | 0.100858001  | 5.369304706      | 14.75754968 | 0.000231922    | 244127.7634 | 54.49219679          | 2.62175E-05 | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.001630858 | 0.022710179  | 5.336018349      | 14.60287024 | 0.000346927    | 220983.1207 | 59.82253881          | 5.31985E-05 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 0.001179136 | 0.031033825  | 5.297171326      | 14.73616798 | 0.000201261    | 233027.4021 | 56.93397382          | 2.7859E-05  | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.001719428 | -0.057802956 | 4.994173108      | 14.58784445 | 0.0002633      | 214221.7507 | 62.46433044          | 5.91295E-05 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 0.001259378 | 0.017245626  | 5.367625053      | 14.73816095 | 0.000280518    | 223178.6346 | 60.49648795          | 3.17222E-05 | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.001597716 | 0.015780537  | 4.770579804      | 14.64451526 | 0.000527047    | 236852.3339 | 55.29889707          | 5.1054E-05  | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001080934 | 0.050774132  | 5.023403707      | 14.79920043 | 0.000244343    | 252211.8237 | 52.40076597          | 2.3369E-05  | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.001624863 | 0.03381415   | 4.985231232      | 14.6221946  | 0.000683882    | 228417.0701 | 57.4559555           | 5.2833E-05  | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001111809 | 0.066582182  | 5.163544152      | 14.76520948 | 0.000248496    | 242070.0355 | 54.15385056          | 2.4723E-05  | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.001612109 | 0.019924083  | 4.932405275      | 14.62586046 | 0.000333953    | 219899.2755 | 60.60510916          | 5.19784E-05 | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001161117 | 0.014377027  | 5.099508827      | 14.75426093 | 0.000190941    | 231848.5616 | 57.48229683          | 2.69639E-05 | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.001723124 | -0.095494474 | 4.89373496       | 14.62066375 | 0.00036311     | 214795.5197 | 63.11518039          | 5.93825E-05 | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001255734 | 0.008361604  | 5.101487263      | 14.75001214 | 0.000244403    | 222800.947  | 61.03493005          | 3.15369E-05 | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.001452867 | -0.004198896 | 4.648658131      | 14.67107275 | 0.000629277    | 237929.9318 | 54.98388416          | 4.22169E-05 | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 0.001014076 | 0.073457197  | 5.680239076      | 14.80146898 | 0.000209231    | 250758.1465 | 52.23451952          | 2.05669E-05 | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.00139012  | 0.102372471  | 5.381512699      | 14.68222543 | 0.000499261    | 227407.5834 | 58.49209911          | 3.86488E-05 | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 0.001020331 | 0.065330811  | 5.618071698      | 14.79153462 | 0.000264652    | 237245.6572 | 55.28783475          | 2.0822E-05  | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.001383429 | 0.094746295  | 5.318835807      | 14.69147131 | 0.000313564    | 218953.6994 | 61.2891681           | 3.82772E-05 | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 0.001087263 | -0.007463904 | 5.891675312      | 14.76797574 | 0.000164417    | 224828.0937 | 58.88967307          | 2.36424E-05 | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.001491811 | -0.042992917 | 5.042676945      | 14.65370058 | 0.000205153    | 208972.89   | 64.35083609          | 4.45117E-05 | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 0.001197755 | -0.001710729 | 5.703916014      | 14.75487399 | 0.000290486    | 214070.7798 | 63.64504036          | 2.86918E-05 | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.001203919 | 0.055946306  | 5.165682664      | 14.67166058 | 0.000307888    | 230373.6518 | 56.79223471          | 2.89892E-05 | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000887549 | 0.096608251  | 17.1439445       | 14.82295954 | 0.000176906    | 248673.6495 | 53.34349095          | 1.57547E-05 | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.001244529 | 0.054456496  | 5.319532515      | 14.68002625 | 0.000344111    | 221028.1476 | 60.00991838          | 3.09768E-05 | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000943984 | 0.073879919  | 5.686033643      | 14.77751363 | 0.000116849    | 234315.6943 | 55.90069796          | 1.78223E-05 | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.001262586 | 0.067015621  | 5.832184946      | 14.68420223 | 0.000230044    | 210492.8305 | 62.72157938          | 3.1882E-05  | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 0.001019502 | 0.029386054  | 5.407954131      | 14.76349078 | 0.000169512    | 219198.713  | 60.30373082          | 2.07875E-05 | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.001351308 | 0.018406977  | 5.866298508      | 14.66220868 | 0.000219522    | 202049.0069 | 66.03017519          | 3.6526E-05  | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 0.001123019 | 0.047305389  | 5.942951228      | 14.74048276 | 0.000151757    | 206871.8867 | 64.92855032          | 2.52232E-05 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.2** Datos de parámetros de señal de EA y FFT en canal 1

| RMS         | Kurtosis     | Factor de cresta | Entropía    | Componente max | Centroide   | Desviación espectral | Energía     | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|--------------|------------------|-------------|----------------|-------------|----------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 0.001074975 | 0.001400716  | 4.849135954      | 14.78794518 | 0.000413439    | 247786.7542 | 53.69813913          | 2.31115E-05 | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 0.001065919 | -0.120028332 | 5.224074241      | 14.7909785  | 0.000297517    | 248919.5594 | 53.94868347          | 2.27238E-05 | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.001056341 | -0.039164099 | 5.071507393      | 14.77422673 | 0.000209113    | 238252.7648 | 56.11631936          | 2.23166E-05 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 0.00115034  | 0.037100549  | 5.193624325      | 14.75508839 | 0.000294449    | 238720.2367 | 56.09770582          | 2.64663E-05 | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.001074781 | -0.030999897 | 5.048992696      | 14.76260003 | 0.000157622    | 230893.2826 | 58.29162494          | 2.3148E-05  | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 0.001171319 | 0.017407239  | 5.335853642      | 14.75078874 | 0.000252558    | 230257.1102 | 58.39353606          | 2.74394E-05 | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.0009827   | 0.034817311  | 5.049004357      | 14.81846786 | 0.000325171    | 256989.8336 | 51.54251347          | 1.93139E-05 | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001088125 | 0.094330543  | 5.329595698      | 14.81631989 | 0.000552661    | 256933.0686 | 51.95183622          | 2.36812E-05 | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.001041119 | -0.025692619 | 5.036225758      | 14.78900198 | 0.000334681    | 246748.1304 | 54.00531878          | 2.16788E-05 | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001047232 | -0.093345723 | 5.20698605       | 14.79494666 | 0.000378321    | 247275.2691 | 53.87563014          | 2.19344E-05 | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.001028233 | 0.002439308  | 5.529929479      | 14.7915316  | 0.000202189    | 237400.1132 | 56.56525068          | 2.11453E-05 | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001126243 | 0.017087832  | 5.21332899       | 14.77417417 | 0.000245527    | 237425.0087 | 56.51357032          | 2.53684E-05 | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.001072102 | 0.00790048   | 5.117469975      | 14.78807776 | 0.000179316    | 231624.0308 | 58.60011832          | 2.29879E-05 | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001166403 | 0.007532752  | 5.127262431      | 14.76369087 | 0.00023343     | 229546.2976 | 58.82259136          | 2.7212E-05  | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.000846308 | 0.205611736  | 5.505458503      | 14.84826258 | 0.000252123    | 257639.1565 | 51.34630804          | 1.43241E-05 | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 0.000970981 | 0.280558709  | 5.883821194      | 14.81938106 | 0.000274864    | 255470.2402 | 51.95734847          | 1.88559E-05 | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000869376 | 0.064113295  | 5.691308405      | 14.8374446  | 0.00015151     | 244713.5258 | 54.88800759          | 1.51161E-05 | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 0.000981843 | 0.006827646  | 5.097030181      | 14.81487504 | 0.00040578     | 242363.9926 | 54.96275978          | 1.92796E-05 | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000909971 | 0.024175355  | 5.43645522       | 14.83186259 | 0.000115841    | 234803.7844 | 57.49130792          | 1.6561E-05  | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 0.0010417   | 0.015588096  | 5.402535888      | 14.78723838 | 0.000226486    | 230836.2299 | 57.86594969          | 2.1733E-05  | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000968291 | 0.000512274  | 5.874374302      | 14.80189034 | 0.000174815    | 224514.5965 | 60.06836546          | 1.87514E-05 | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 0.001089012 | 0.018356529  | 5.513463932      | 14.77419696 | 0.000239246    | 220772.7393 | 61.1067811           | 2.3719E-05  | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000773296 | -0.047925105 | 5.247798878      | 14.83870006 | 0.00018221     | 249868.0922 | 53.19855052          | 1.196E-05   | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000835693 | -0.00444282  | 7.509977047      | 14.83842635 | 0.000148597    | 252200.6938 | 53.12941847          | 1.39671E-05 | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000807058 | 0.018627566  | 5.400640677      | 14.83517854 | 0.000166431    | 238212.3321 | 56.43177361          | 1.3271E-05  | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000904964 | -0.010172923 | 5.521412037      | 14.79508502 | 0.000189234    | 239101.2178 | 55.64356245          | 1.63791E-05 | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000859443 | -0.022614013 | 5.568291235      | 14.81582561 | 0.000111976    | 226406.0174 | 58.98022044          | 1.47728E-05 | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000956292 | 0.056580807  | 5.418319536      | 14.7836965  | 0.000270214    | 224845.2387 | 59.22316702          | 1.8293E-05  | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000911447 | 0.01473711   | 5.641146139      | 14.79722547 | 9.65545E-05    | 217521.1914 | 61.66438785          | 1.66147E-05 | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 0.00098768  | 0.044518315  | 5.827238221      | 14.76635912 | 0.000153716    | 213180.9458 | 62.47319398          | 1.9592E-05  | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.3** Datos de parámetros de señal de EA y FFT en canal 2

| RMS         | Kurtosis    | Factor de cresta | Entropía    | Componente max | Centroide   | Desviación espectral | Energía     | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|-------------|------------------|-------------|----------------|-------------|----------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 0.000505533 | 1.432644927 | 19.53806127      | 14.93094439 | 3.8399E-05     | 237852.2842 | 55.57817499          | 5.11112E-06 | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 0.000527999 | 1.470276077 | 19.19241163      | 14.92812832 | 8.14524E-05    | 237507.2342 | 56.33262891          | 5.57581E-06 | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.000783674 | 1.474764038 | 11.7481906       | 14.79342406 | 5.32818E-05    | 213811.8353 | 62.50739622          | 1.22828E-05 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 0.00085308  | 2.060614809 | 11.20413574      | 14.76107941 | 5.14977E-05    | 210113.5412 | 63.74001966          | 1.45545E-05 | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.00114704  | 1.073109522 | 11.00362425      | 14.71241464 | 5.42775E-05    | 200632.28   | 69.66600173          | 2.63155E-05 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 0.001285743 | 1.545126545 | 13.73823479      | 14.6651585  | 5.52523E-05    | 195761.2722 | 71.03360148          | 3.3063E-05  | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.000349686 | 0.289919125 | 9.844800885      | 15.05769941 | 5.15713E-05    | 270483.4029 | 47.88058645          | 2.44563E-06 | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 0.000363027 | 2.28701762  | 36.1248661       | 15.06371697 | 0.000101895    | 271805.512  | 48.04813468          | 2.6358E-06  | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.000507123 | 1.415930054 | 27.51093445      | 14.92858431 | 4.64754E-05    | 237163.6284 | 55.71728031          | 5.14353E-06 | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 0.00052611  | 1.755728794 | 22.71471612      | 14.9164169  | 7.86363E-05    | 235572.0245 | 56.2538819           | 5.5362E-06  | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.000807974 | 1.818884011 | 14.72047026      | 14.79493777 | 5.49594E-05    | 213008.1426 | 63.23372231          | 1.3566E-05  | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 0.000882181 | 2.286583856 | 19.31077166      | 14.75120028 | 5.56633E-05    | 208884.6286 | 64.24300505          | 1.5565E-05  | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.00120213  | 0.964711267 | 10.04539693      | 14.70150379 | 5.7088E-05     | 198735.8713 | 70.52911593          | 2.8928E-05  | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 0.001327221 | 1.46154992  | 13.14706282      | 14.66009657 | 6.16728E-05    | 194458.7922 | 71.78601293          | 3.5232E-05  | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.000341499 | 0.522056644 | 17.99666856      | 15.05986801 | 6.27764E-05    | 269352.6796 | 48.15022537          | 2.33243E-06 | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 0.000346475 | 0.965280019 | 29.57226643      | 15.06412191 | 6.04739E-05    | 270467.3318 | 48.11631486          | 2.471E-06   | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000539921 | 1.577123665 | 12.23725375      | 14.92289981 | 7.45753E-05    | 231716.5644 | 57.8091478           | 5.8317E-06  | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 0.00058294  | 3.087888865 | 14.68696912      | 14.8720171  | 7.24248E-05    | 225100.1961 | 58.73104201          | 6.79593E-06 | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000936357 | 2.473192524 | 10.87823012      | 14.74338365 | 5.47569E-05    | 203190.5493 | 66.39444914          | 1.75352E-05 | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 0.00114756  | 3.622476443 | 12.2272799       | 14.64623658 | 4.4511E-05     | 193817.7807 | 68.24555715          | 2.48534E-05 | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.001443273 | 2.129399892 | 11.82492505      | 14.62419778 | 4.5646E-05     | 187154.3405 | 74.11459962          | 4.1667E-05  | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 0.001780281 | 3.081932965 | 12.74826781      | 14.5354802  | 3.73515E-05    | 179725.7565 | 77.32786997          | 6.33879E-05 | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000334582 | 0.665122652 | 16.67401028      | 15.06279356 | 2.77127E-05    | 268164.4681 | 48.7977105           | 2.23881E-06 | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000343238 | 1.153669644 | 17.26752901      | 15.06960524 | 4.4564E-05     | 270006.0101 | 48.95344304          | 2.35624E-06 | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000561275 | 2.123580534 | 20.11086505      | 14.90973016 | 6.69282E-05    | 228275.6191 | 59.01874898          | 6.341E-06   | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000591973 | 2.628467715 | 17.70153335      | 14.86457204 | 3.38336E-05    | 223930.4521 | 59.29975586          | 7.00833E-06 | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.001045475 | 2.987390885 | 12.52219107      | 14.67870173 | 5.13773E-05    | 196174.2808 | 67.81365184          | 2.1864E-05  | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 0.001131463 | 3.580554997 | 18.9781257       | 14.64448423 | 3.57568E-05    | 193193.9717 | 68.83013041          | 2.5638E-05  | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.001663958 | 3.054194191 | 15.92378642      | 14.56079187 | 2.7569E-05     | 181732.6509 | 76.48995248          | 5.53752E-05 | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 0.001842148 | 2.523293666 | 11.81267645      | 14.51646599 | 3.6989E-05     | 178180.0346 | 78.04289663          | 6.78714E-05 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.4** Datos de parámetros de señal de EA y FFT en canal 3

| RMS         | Kurtosis    | Factor de cresta | Entropía    | Componente max | Centroide   | Desviación espectral | Energía     | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|-------------|------------------|-------------|----------------|-------------|----------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 0.000352358 | 0.105074345 | 7.414209356      | 15.04799579 | 6.93512E-05    | 265796.9462 | 48.18335327          | 2.4832E-06  | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 0.000348953 | 0.438403332 | 9.100541371      | 15.06772393 | 6.1167E-05     | 271521.9209 | 47.29902397          | 2.43544E-06 | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.000419244 | 0.090687638 | 6.352950462      | 14.99126315 | 5.01339E-05    | 249514.4785 | 52.10902673          | 3.51529E-06 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 0.000399383 | 0.140741662 | 8.859896657      | 15.01464259 | 5.68487E-05    | 254678.3181 | 51.08519127          | 3.194E-06   | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.000506261 | 0.080300762 | 6.475658293      | 14.94196828 | 4.56793E-05    | 236685.1196 | 55.7535096           | 5.1261E-06  | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 0.000480604 | 0.095951093 | 6.416966643      | 14.96319547 | 4.7674E-05     | 240234.2126 | 54.8864562           | 4.61949E-06 | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.000303774 | 0.199966538 | 7.456136843      | 15.08788747 | 3.62482E-05    | 283853.8266 | 43.93978171          | 1.84567E-06 | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 0.000322138 | 0.537826881 | 10.07346232      | 15.08616681 | 5.15273E-05    | 284969.5967 | 43.86400716          | 2.07542E-06 | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.000348967 | 0.11849862  | 7.172989441      | 15.05069907 | 5.47887E-05    | 265861.8289 | 48.20974298          | 2.43559E-06 | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 0.000333444 | 0.134990365 | 7.583083289      | 15.06808219 | 4.78687E-05    | 271767.0846 | 46.93782236          | 2.2237E-06  | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.00042204  | 0.158112352 | 6.974673917      | 14.9989116  | 5.3128E-05     | 249702.7432 | 52.22019306          | 3.5624E-06  | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 0.000398712 | 0.189101211 | 10.7118428       | 15.01845705 | 4.5966E-05     | 254754.5579 | 51.14085767          | 3.17945E-06 | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.000497606 | 0.118575673 | 6.7966077        | 14.96066796 | 4.66171E-05    | 238871.6144 | 55.57776752          | 4.95223E-06 | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 0.000478916 | 0.125629749 | 6.788246398      | 14.96898679 | 3.96699E-05    | 240940.1443 | 54.97703361          | 4.58728E-06 | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 0.00029694  | 0.206507341 | 7.970229632      | 15.09250316 | 4.98822E-05    | 283881.3296 | 43.94512058          | 1.76345E-06 | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 0.000316066 | 0.284593476 | 7.961736526      | 15.08798663 | 7.96389E-05    | 285121.2931 | 43.6682608           | 1.99794E-06 | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000343637 | 0.562022582 | 9.116876464      | 15.06590269 | 4.26917E-05    | 264681.2009 | 49.01804062          | 2.3617E-06  | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 0.000330249 | 0.482366164 | 12.6200797       | 15.06965262 | 3.68752E-05    | 266422.61   | 48.34812414          | 2.18127E-06 | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000423849 | 0.544889377 | 10.37332253      | 15.00643518 | 3.93123E-05    | 246175.7596 | 53.59792237          | 3.59297E-06 | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 0.000418716 | 1.1488074   | 18.3935911       | 14.99524049 | 3.31938E-05    | 244300.9469 | 53.57236725          | 3.5649E-06  | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000523536 | 0.972010756 | 11.10984046      | 14.93617298 | 3.316E-05      | 230156.3364 | 57.65655378          | 5.48171E-06 | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 0.000556486 | 2.260237089 | 11.22437416      | 14.91093935 | 4.4887E-05     | 226097.9707 | 58.79175869          | 6.19376E-06 | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 0.000287486 | 0.461969478 | 9.065887823      | 15.09666905 | 4.16567E-05    | 283330.852  | 44.38790747          | 1.65295E-06 | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000301025 | 1.018223925 | 10.16183372      | 15.09537879 | 4.752E-05      | 284961.9441 | 44.25702273          | 1.81224E-06 | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000333808 | 0.713243146 | 9.197599262      | 15.0722155  | 2.9881E-05     | 264430.4664 | 49.36978724          | 2.22869E-06 | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000322869 | 0.397213908 | 10.19832133      | 15.07250024 | 3.24947E-05    | 267359.6556 | 48.31444447          | 0.000002085 | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000416878 | 0.57781906  | 9.951316061      | 14.99906597 | 4.5922E-05     | 243679.7291 | 53.98638673          | 3.47593E-06 | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000407346 | 1.221136467 | 14.61866868      | 15.00499053 | 3.31723E-05    | 245289.5051 | 53.6436014           | 3.31873E-06 | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000535801 | 1.318643402 | 10.90179284      | 14.92575002 | 2.3178E-05     | 227603.9965 | 58.52790804          | 5.74183E-06 | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000530881 | 1.473023575 | 11.5183357       | 14.92173535 | 2.63348E-05    | 227187.7169 | 58.46660789          | 5.63642E-06 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.5** Datos de parámetros de envolvente de señal de EA en canal 0

| Entropía    | Componente max | Frecuencia max | Centroide   | Desviación espectral | STD-1X | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------------|--------|------------|----------|-----------|
| 13.51640457 | 0.002088388    | 120.7          | 45021.02214 | 22.57432706          |        | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 14.54756203 | 0.001429016    | 23996.8        | 45263.54513 | 19.01193883          |        | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 15.07711077 | 0.002042191    | 5969           | 45219.70413 | 24.88795982          |        | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 15.61573413 | 0.001475151    | 120.5          | 45119.39934 | 20.93025548          |        | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 16.16752293 | 0.002162226    | 5718.2         | 45138.33699 | 27.04840273          |        | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 16.50287782 | 0.001576873    | 160.4          | 44636.39104 | 23.2611952           |        | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 12.7411555  | 0.001999551    | 41.6           | 44938.62262 | 20.79082747          |        | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 13.94238908 | 0.001352562    | 30047.8        | 45934.80819 | 17.6191503           |        | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 13.94636639 | 0.002032577    | 17977.3        | 44947.14963 | 22.8230062           |        | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 14.67509619 | 0.001390063    | 60032.9        | 45118.5976  | 18.97525225          |        | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 15.38057804 | 0.002019521    | 5968.8         | 45155.80711 | 25.31872441          |        | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 15.81827655 | 0.001453872    | 12119.9        | 44953.70917 | 21.15558568          |        | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 16.14358177 | 0.002169589    | 6039.5         | 44969.35095 | 27.12681595          |        | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 16.64330861 | 0.001572831    | 161.5          | 44620.17798 | 23.50173252          |        | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 13.33508102 | 0.001817892    | 66.6           | 45036.21751 | 20.46094034          |        | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 14.33217045 | 0.00126692     | 44.2           | 45714.56791 | 17.5754845           |        | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 15.35149401 | 0.001737398    | 126.9          | 44988.67406 | 22.9740025           |        | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 15.84988634 | 0.001276836    | 60034.5        | 45234.6629  | 19.57371166          |        | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 16.48314845 | 0.001727183    | 124.7          | 45097.0639  | 24.93145838          |        | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 17.05464701 | 0.001363059    | 124.6          | 44697.51458 | 21.97123529          |        | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 17.86558133 | 0.00187401     | 164.6          | 44758.01547 | 27.56937871          |        | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 18.15836158 | 0.001501834    | 164.9          | 44533.1151  | 24.88042147          |        | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 16.0987515  | 0.001504919    | 166.9          | 45678.34302 | 21.60429356          |        | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 16.294938   | 0.001108779    | 115.1          | 46031.6963  | 18.13155728          |        | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 17.25171148 | 0.001557149    | 60084.9        | 45102.13201 | 23.81439772          |        | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 17.20165754 | 0.001179268    | 44.9           | 45444.37117 | 20.18935048          |        | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 18.32812222 | 0.001579254    | 5966.1         | 44876.07644 | 25.85042542          |        | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 18.52325298 | 0.001276186    | 65.6           | 44945.62162 | 22.94489433          |        | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 19.11015461 | 0.001692051    | 85.6           | 44154.66619 | 27.94669852          |        | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 19.34089841 | 0.001404767    | 86             | 44817.56266 | 25.674111452         |        | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.6** Datos de parámetros de envolvente de señal de EA en canal 1

| Entropía    | Componente max | Frecuencia max | Centroide   | Desviación espectral | STD-1X | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------------|--------|------------|----------|-----------|
| 14.52215885 | 0.001346077    | 17977.5        | 46087.21102 | 18.39117024          |        | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 14.99611538 | 0.00134366     | 18017.7        | 45131.17271 | 18.17611074          |        | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 16.09013269 | 0.001326046    | 120.4          | 45669.53548 | 20.18383769          |        | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 15.28533121 | 0.001439536    | 120.5          | 44901.13268 | 20.1077165           |        | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 17.07071545 | 0.001349041    | 160.4          | 45382.88423 | 21.56177255          |        | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 16.33232795 | 0.001466789    | 160.4          | 44915.85524 | 21.86854693          |        | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 14.2041788  | 0.001231566    | 17987.2        | 46635.22935 | 16.90005385          |        | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 13.55430561 | 0.001364401    | 47993.8        | 45312.99848 | 16.87396913          |        | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 15.04905355 | 0.001304701    | 18018          | 45936.22723 | 18.56183245          |        | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 14.90929482 | 0.001318024    | 5978.8         | 44942.98497 | 18.15718037          |        | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 16.43575053 | 0.001288099    | 121.2          | 45600.40023 | 20.42089334          |        | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 15.46714072 | 0.001409781    | 121.4          | 44800.94043 | 20.26772691          |        | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 16.97690709 | 0.001343137    | 161.3          | 45364.87649 | 21.59393019          |        | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 16.37478338 | 0.001461458    | 161.5          | 44858.91744 | 22.01332094          |        | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 15.047821   | 0.00105285     | 66.6           | 46431.71068 | 16.627582            |        | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 14.19182689 | 0.001205421    | 47993.8        | 45158.62945 | 16.89757101          |        | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 16.90179463 | 0.001086969    | 126.9          | 45665.61637 | 18.72821565          |        | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 15.66356908 | 0.001229999    | 126.6          | 44825.62375 | 18.78675852          |        | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 17.68661476 | 0.001138986    | 124.7          | 45348.36114 | 20.33896551          |        | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 16.80311771 | 0.001304494    | 124.6          | 44644.28357 | 21.06775587          |        | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 18.51720903 | 0.001213383    | 164.6          | 44900.65388 | 22.14231057          |        | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 17.90348196 | 0.001363758    | 247.4          | 44436.323   | 23.11039708          |        | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 17.36232214 | 0.000971627    | 166.9          | 46437.33041 | 17.51214416          |        | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 16.65634003 | 0.001046686    | 12023.6        | 45631.45902 | 17.55812873          |        | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 18.39538825 | 0.00101023     | 23950.5        | 45605.04134 | 19.44213732          |        | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 17.27945266 | 0.001134319    | 134.8          | 45196.14985 | 19.51068916          |        | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 19.06705854 | 0.001078106    | 6098.2         | 45198.77939 | 21.12948919          |        | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 18.31378189 | 0.001195536    | 6032           | 44810.12132 | 21.92770225          |        | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 19.60043993 | 0.001141803    | 85.6           | 44755.99749 | 22.64155242          |        | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 19.35669603 | 0.001235683    | 86             | 44665.94115 | 23.65237428          |        | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.7** Datos de parámetros de envolvente de señal de EA en canal 2

| Entropía    | Componente max | Frecuencia max | Centroide   | Desviación espectral | STD-1X      | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 18.21093663 | 0.000614607    | 9.9            | 38701.56007 | 18.39117024          |             | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 17.69717988 | 0.000637858    | 9.9            | 38422.02842 | 16.56850702          |             | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 16.87316842 | 0.000942782    | 14.9           | 36446.02472 | 20.18383769          | 0.062867533 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 15.56052694 | 0.001009474    | 14.9           | 35356.35087 | 20.52432648          | 0.069234243 | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 16.92861302 | 0.001391789    | 19.9           | 35669.71844 | 21.56177255          | 0.098416112 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 15.80816479 | 0.00154101     | 19.9           | 34954.96204 | 25.16247816          | 0.115827383 | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 20.11304994 | 0.000434656    | 4.9            | 43869.4915  | 16.90005385          |             | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 19.98930995 | 0.000448803    | 4.9            | 44010.30693 | 13.25944249          |             | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 18.04369816 | 0.000615783    | 9.9            | 38679.89665 | 18.56183245          |             | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 17.5564579  | 0.000634413    | 9.9            | 37834.83903 | 16.55615955          |             | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 16.87667739 | 0.000967937    | 14.9           | 35967.29672 | 20.42089334          | 0.096689844 | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 15.46676041 | 0.001041398    | 14.9           | 35036.9066  | 20.80054225          | 0.068146955 | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 16.77189954 | 0.001459395    | 19.9           | 35503.85569 | 21.59393019          | 0.099797713 | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 15.94997218 | 0.001592586    | 19.9           | 34990.67088 | 25.53166628          | 0.101922552 | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 20.13292459 | 0.000423185    | 4.9            | 43577.36977 | 16.627582            |             | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 20.16554577 | 0.000428602    | 4.9            | 43723.17643 | 12.97352405          |             | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 17.64870998 | 0.000649369    | 9.9            | 37528.68466 | 18.72821565          |             | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 16.35929776 | 0.000686291    | 9.9            | 35595.95955 | 17.1159475           |             | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 15.42563084 | 0.001097376    | 14.9           | 34593.45996 | 20.33896551          | 0.096454464 | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 14.10593104 | 0.001270718    | 14.9           | 32813.08221 | 22.61612601          | 0.215991381 | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 15.33167808 | 0.001701945    | 19.9           | 33826.36924 | 22.14231057          | 0.158864777 | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 14.36139219 | 0.002051896    | 19.9           | 32529.06239 | 28.49197926          | 0.343974625 | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 20.20948441 | 0.000413261    | 4.9            | 44202.33699 | 17.51214416          |             | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 20.13366448 | 0.000421819    | 4.9            | 44335.26144 | 13.09752056          |             | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 17.18835631 | 0.00066902     | 9.9            | 37104.57889 | 19.44213732          |             | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 16.22280166 | 0.000697145    | 9.9            | 35489.50043 | 17.21390955          |             | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 14.63933705 | 0.001207641    | 14.9           | 33165.67089 | 21.12948919          | 0.138338589 | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 14.67193879 | 0.001307493    | 14.9           | 32407.79783 | 22.93507628          | 0.333907852 | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 14.91915907 | 0.001941833    | 19.9           | 32567.59593 | 22.64155242          | 0.324731232 | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 15.23920005 | 0.002165921    | 19.9           | 32022.8325  | 28.80743338          | 0.371095423 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.8** Datos de parámetros de envolvente de señal de EA en canal 3

| Entropía    | Componente max | Frecuencia max | Centroide   | Desviación espectral | STD-1X      | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 20.67491743 | 0.000440645    | 120.7          | 43981.44368 | 12.87982008          |             | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 20.47860041 | 0.000434416    | 35995.3        | 45330.77645 | 12.72014106          |             | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 20.59416935 | 0.000523994    | 14.9           | 41323.86667 | 14.60752193          | 0.117763005 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 20.6189821  | 0.000498858    | 14.9           | 42414.52557 | 14.12483564          | 0.103856041 | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 20.42046424 | 0.000632736    | 19.9           | 39830.37523 | 16.237555            | 0.194909478 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 20.49800769 | 0.000600587    | 19.9           | 40632.37884 | 15.76748378          | 0.188626957 | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 20.49577558 | 0.000379247    | 62.4           | 47098.34938 | 11.42513522          |             | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 20.20553144 | 0.000400521    | 11977.7        | 47321.24213 | 11.76493277          |             | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 20.68914971 | 0.000436179    | 18140          | 44184.00466 | 12.83471719          |             | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 20.62454398 | 0.000416734    | 121.9          | 45178.77613 | 12.3373149           |             | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 20.61606196 | 0.000526896    | 14.9           | 41538.93881 | 14.69546832          | 0.16955986  | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 20.61714576 | 0.000497689    | 14.9           | 42515.1009  | 14.09812723          | 0.101645523 | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 20.48954684 | 0.000621617    | 19.9           | 40253.85893 | 16.08951381          | 0.189583633 | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 20.51041336 | 0.000598144    | 19.9           | 40731.08319 | 15.75586012          | 0.179918011 | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 20.68879998 | 0.000370776    | 66.6           | 47197.51116 | 11.37756777          |             | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 20.32846622 | 0.000394344    | 132.8          | 47339.03743 | 11.58502299          |             | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 20.77414382 | 0.000426713    | 59992.3        | 44699.11768 | 12.98749329          |             | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 20.60470066 | 0.000410446    | 9.9            | 44382.45354 | 12.59764203          |             | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 20.28297684 | 0.000525112    | 14.9           | 41106.19128 | 14.81891842          | 0.166822229 | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 19.48817153 | 0.000513954    | 14.9           | 40301.33832 | 14.66384743          | 0.329411186 | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 19.40668942 | 0.000644457    | 19.9           | 38243.81356 | 16.50623661          | 0.284932486 | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 17.88772398 | 0.000668927    | 19.9           | 37294.128   | 17.05651519          | 0.506188353 | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 20.95277648 | 0.00035803     | 11998.4        | 47223.94712 | 11.38755357          |             | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 20.64276268 | 0.000372416    | 11998.4        | 47585.77159 | 11.70605876          |             | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 20.84884447 | 0.000413798    | 9.9            | 44734.7726  | 12.84380848          |             | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 20.81393929 | 0.000401171    | 9.9            | 44686.92229 | 12.43275617          |             | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 20.07803086 | 0.000515398    | 14.9           | 40283.6227  | 14.73603773          | 0.207632597 | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 19.86011306 | 0.000501109    | 14.9           | 40384.26356 | 14.54872751          | 0.491085061 | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 18.89595252 | 0.000654253    | 19.9           | 37450.35677 | 16.72771918          | 0.494602373 | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 18.87615523 | 0.00064752     | 19.9           | 37275.64623 | 16.67756393          | 0.540807027 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.9** Datos de armónicos de envolvente de señal de EA en canal 0

| 1X-fast     | 2X-fast     | 3X-fast     | 4X-fast     | 5X-fast     | Suma-fast   | 1X-slow     | 2X-slow     | 4X-slow     | 5X-slow     | Suma-slow   | Banda Lateral | Engrane 1   | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 8.96583E-06 | 1.18772E-05 | 1.684E-05   | 6.86228E-05 | 4.56595E-06 | 0.000110832 | 1.49298E-06 | 1.32951E-06 | 1.26599E-06 | 1.73147E-06 | 5.81995E-06 | 4.2348E-06    | 6.07653E-06 | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 1.5956E-05  | 6.29483E-06 | 8.0427E-06  | 8.89944E-05 | 9.5197E-06  | 0.000127947 | 1.7564E-06  | 9.69812E-07 | 9.28772E-07 | 1.01569E-06 | 4.6649E-06  | 3.05745E-06   | 2.67873E-06 | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 8.6358E-06  | 1.5362E-05  | 5.89473E-06 | 1.26945E-05 | 6.3786E-06  | 4.85668E-05 | 2.0529E-06  | 4.4682E-06  | 1.3791E-05  | 1.25355E-06 | 1.24215E-05 | 3.69515E-06   | 1.3575E-05  | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 9.31276E-06 | 5.1637E-06  | 7.48365E-06 | 5.605E-05   | 1.02814E-05 | 8.82342E-05 | 9.64778E-07 | 1.19583E-06 | 3.46661E-06 | 1.89281E-06 | 7.523E-06   | 2.66234E-06   | 1.91321E-05 | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 1.0992E-05  | 1.65429E-05 | 1.39767E-05 | 6.34127E-05 | 1.1652E-05  | 0.000116575 | 2.01672E-06 | 1.5624E-06  | 1.83725E-06 | 2.24157E-06 | 7.65578E-06 | 4.63529E-06   | 3.27526E-06 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 1.04854E-05 | 8.8235E-06  | 4.1488E-06  | 5.1369E-05  | 5.74582E-06 | 8.024E-05   | 2.71466E-06 | 1.5217E-06  | 1.79281E-06 | 2.3152E-06  | 8.33816E-06 | 4.7733E-06    | 2.22876E-06 | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 4.7182E-05  | 1.85837E-05 | 3.85555E-05 | 1.16556E-05 | 4.00197E-06 | 0.000117249 | 4.75392E-06 | 3.09873E-06 | 4.38363E-06 | 3.07675E-06 | 1.5315E-05  | 2.0199E-05    | 1.1719E-05  | 10Hz       | 05A      | sano      |
| 1.58819E-05 | 4.31339E-06 | 2.14123E-06 | 1.02974E-05 | 1.08888E-05 | 4.35226E-05 | 2.71422E-06 | 3.87142E-06 | 1.27132E-06 | 1.66915E-06 | 9.5261E-06  | 8.6171E-06    | 3.32536E-06 | 10Hz       | 05A      | soltura   |
| 1.5702E-05  | 1.1711E-05  | 1.34834E-05 | 7.55519E-06 | 2.06974E-06 | 5.05115E-05 | 1.6565E-06  | 1.72484E-06 | 2.0635E-06  | 1.177E-06   | 6.53975E-06 | 4.2417E-06    | 1.02719E-05 | 20Hz       | 05A      | sano      |
| 1.1621E-05  | 5.12271E-06 | 3.27367E-06 | 2.2188E-05  | 7.03551E-06 | 4.934E-05   | 1.23499E-06 | 1.8287E-06  | 1.28413E-06 | 1.54839E-06 | 5.89621E-06 | 2.2554E-06    | 3.33364E-06 | 20Hz       | 05A      | soltura   |
| 9.13272E-06 | 1.6818E-05  | 2.62285E-06 | 4.2899E-06  | 3.02563E-06 | 3.58811E-05 | 0.000013725 | 3.26787E-06 | 1.00316E-05 | 2.28249E-06 | 2.9307E-05  | 3.31112E-06   | 1.0892E-05  | 30Hz       | 05A      | sano      |
| 5.81739E-06 | 5.85596E-06 | 2.81768E-06 | 6.14999E-06 | 1.74938E-06 | 2.2394E-05  | 8.32354E-06 | 2.65445E-06 | 5.7755E-06  | 1.3887E-06  | 1.81419E-05 | 1.2258E-06    | 5.84236E-06 | 30Hz       | 05A      | soltura   |
| 1.71131E-05 | 1.13831E-05 | 4.76133E-06 | 6.3971E-06  | 1.35362E-05 | 5.3198E-05  | 2.02803E-06 | 2.24756E-06 | 2.21355E-06 | 1.99423E-06 | 8.48427E-06 | 3.1735E-06    | 1.4092E-06  | 40Hz       | 05A      | sano      |
| 6.79175E-06 | 9.08998E-06 | 5.11692E-06 | 3.3174E-06  | 3.68755E-06 | 2.8632E-05  | 1.7572E-06  | 1.91453E-06 | 1.5033E-06  | 1.28871E-06 | 6.4121E-06  | 4.58628E-06   | 1.73642E-06 | 40Hz       | 05A      | soltura   |
| 2.0587E-05  | 5.98628E-06 | 3.6639E-05  | 2.2638E-06  | 2.0144E-06  | 6.74898E-05 | 4.26263E-06 | 2.2093E-06  | 1.4531E-05  | 2.73826E-06 | 2.3743E-05  | 5.3421E-06    | 1.2074E-05  | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 1.97995E-05 | 4.43978E-06 | 1.9427E-05  | 2.7821E-06  | 1.46269E-06 | 4.78848E-05 | 3.01583E-06 | 2.23371E-06 | 2.63139E-06 | 2.42618E-06 | 1.0371E-05  | 5.11822E-06   | 6.3189E-06  | 10Hz       | 1A       | soltura   |
| 1.4283E-05  | 4.61723E-06 | 2.5629E-06  | 5.79472E-06 | 1.88766E-06 | 2.88882E-05 | 2.7352E-06  | 1.89155E-06 | 2.06882E-06 | 9.21147E-06 | 1.58754E-05 | 4.0608E-06    | 2.99273E-06 | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 8.99879E-06 | 5.91934E-06 | 1.4429E-06  | 2.78721E-06 | 1.89754E-06 | 2.172E-05   | 1.29982E-06 | 8.54169E-07 | 1.4463E-06  | 1.1537E-06  | 4.74499E-06 | 3.3987E-06    | 1.73897E-06 | 20Hz       | 1A       | soltura   |
| 3.05887E-06 | 5.91755E-06 | 1.65359E-05 | 3.45953E-06 | 3.92745E-06 | 3.28994E-05 | 3.78512E-06 | 3.9283E-06  | 1.64424E-06 | 5.01779E-06 | 1.4368E-05  | 5.14186E-06   | 1.33432E-05 | 30Hz       | 1A       | sano      |
| 1.03945E-05 | 1.00151E-05 | 3.1635E-06  | 2.44369E-06 | 3.16151E-06 | 2.91752E-05 | 4.4269E-06  | 6.4866E-06  | 1.54269E-06 | 6.8379E-06  | 1.92631E-05 | 1.19884E-05   | 1.06582E-05 | 30Hz       | 1A       | soltura   |
| 1.19125E-05 | 9.34859E-06 | 4.57395E-06 | 4.94384E-06 | 9.77796E-06 | 4.05625E-05 | 3.87576E-06 | 2.85793E-06 | 2.6634E-06  | 9.17615E-06 | 1.85732E-05 | 1.2213E-05    | 1.9126E-06  | 40Hz       | 1A       | sano      |
| 3.51214E-05 | 1.76296E-05 | 1.00253E-05 | 3.85196E-06 | 8.75195E-06 | 7.9882E-05  | 7.99924E-06 | 1.69511E-05 | 3.0506E-06  | 1.93821E-05 | 4.7383E-05  | 2.6669E-05    | 2.2526E-05  | 40Hz       | 1A       | soltura   |
| 4.84168E-06 | 3.22735E-06 | 2.9895E-06  | 5.68924E-06 | 1.88314E-06 | 1.8639E-05  | 2.85184E-06 | 2.5446E-06  | 2.65825E-06 | 2.67143E-06 | 1.0722E-06  | 6.871E-06     | 9.26485E-06 | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 1.47895E-06 | 4.82711E-06 | 2.54583E-06 | 1.23548E-06 | 3.45649E-05 | 5.79629E-05 | 2.1949E-06  | 4.2952E-06  | 1.08594E-06 | 1.8622E-06  | 9.43276E-06 | 5.24261E-06   | 1.2811E-05  | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 2.77927E-06 | 1.92521E-06 | 3.11152E-06 | 2.88763E-06 | 6.4486E-06  | 1.7185E-05  | 2.4514E-06  | 2.13374E-06 | 3.2431E-06  | 2.24118E-06 | 1.00654E-05 | 9.7948E-06    | 5.99958E-06 | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 1.07238E-05 | 5.27747E-06 | 4.43951E-06 | 1.87775E-06 | 3.1857E-06  | 2.5542E-05  | 1.5812E-06  | 9.0545E-07  | 1.53275E-06 | 8.9716E-07  | 4.9093E-06  | 1.61822E-05   | 3.39495E-06 | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 1.3233E-05  | 8.95724E-06 | 6.25134E-06 | 4.6529E-06  | 2.85136E-06 | 3.59161E-05 | 4.6909E-06  | 4.63411E-06 | 6.1233E-06  | 2.84255E-06 | 1.8294E-05  | 6.6264E-06    | 9.2676E-06  | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 1.47234E-05 | 1.2367E-05  | 3.41958E-06 | 4.62188E-06 | 3.0843E-06  | 3.81565E-06 | 3.09865E-06 | 4.786E-06   | 3.37222E-06 | 3.8631E-06  | 1.5585E-05  | 1.0815E-05    | 1.1891E-05  | 40Hz       | 15A      | soltura   |
| 3.01614E-05 | 2.02362E-05 | 1.39786E-05 | 9.5192E-06  | 1.68961E-05 | 9.07831E-05 | 1.18543E-05 | 1.38156E-05 | 1.08412E-05 | 4.94932E-06 | 4.634E-05   | 2.59755E-05   | 1.54311E-05 | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 3.99231E-05 | 1.73115E-05 | 1.01387E-05 | 1.02994E-05 | 4.5664E-06  | 8.22392E-05 | 1.1657E-05  | 8.95281E-06 | 6.73658E-06 | 6.02184E-06 | 3.33619E-05 | 1.86595E-05   | 1.77117E-05 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

Tabla A.10 Datos de armónicos de envolvente de señal de EA en canal 1

| 1X-fast     | 2X-fast     | 3X-fast     | 4X-fast     | 5X-fast     | Suma-fast   | 1X-slow     | 2X-slow     | 4X-slow     | 5X-slow     | Suma-slow   | Banda Lateral | Engrane 1   | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 1.9329E-05  | 1.2533E-05  | 4.02832E-06 | 5.041E-05   | 2.83139E-06 | 8.28258E-05 | 1.0377E-06  | 1.36452E-06 | 1.64986E-06 | 8.9744E-07  | 4.9489E-06  | 3.47978E-06   | 1.77967E-06 | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 9.57913E-06 | 7.56143E-06 | 6.1865E-06  | 6.1759E-05  | 1.1823E-05  | 9.6825E-05  | 1.56122E-06 | 7.25932E-07 | 1.41466E-06 | 1.1818E-06  | 4.88289E-06 | 3.88786E-06   | 2.1155E-06  | 20Hz       | 0A       | soltera   |
| 6.86782E-06 | 6.9563E-06  | 9.3679E-06  | 1.31122E-05 | 5.1477E-06  | 4.54782E-05 | 1.09164E-06 | 8.95934E-07 | 3.08492E-06 | 1.2565E-06  | 6.32854E-06 | 2.92754E-06   | 1.38158E-06 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 9.8601E-06  | 1.038E-05   | 4.34438E-06 | 8.81478E-06 | 7.99432E-06 | 4.13143E-05 | 9.56841E-07 | 1.31549E-06 | 1.15336E-06 | 8.04295E-07 | 4.22998E-06 | 3.72543E-06   | 2.06138E-06 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 7.63586E-06 | 1.46394E-06 | 6.839E-06   | 5.4545E-05  | 7.742E-06   | 9.1321E-05  | 1.96946E-06 | 1.35832E-06 | 1.16787E-06 | 1.22821E-06 | 5.72386E-06 | 4.34589E-06   | 2.5699E-06  | 40Hz       | 0A       | soltera   |
| 2.8382E-05  | 1.1942E-05  | 8.828E-06   | 6.0152E-06  | 1.7377E-06  | 5.60396E-05 | 3.0778E-06  | 1.2662E-06  | 1.83368E-06 | 1.87428E-06 | 8.04639E-06 | 5.07134E-06   | 1.61279E-06 | 10Hz       | 0.5A     | sano      |
| 8.7492E-06  | 4.81322E-06 | 1.9674E-06  | 1.14884E-05 | 1.76313E-05 | 4.46494E-05 | 1.8688E-06  | 4.00053E-06 | 9.3241E-07  | 1.4247E-06  | 8.2223E-06  | 4.00611E-06   | 4.8211E-06  | 10Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 1.0694E-05  | 3.81886E-05 | 4.06374E-06 | 4.85854E-06 | 1.56155E-06 | 3.43628E-05 | 2.5203E-06  | 1.01965E-06 | 8.8273E-07  | 1.2563E-06  | 5.67895E-06 | 1.61279E-06   | 1.02161E-06 | 20Hz       | 0.5A     | sano      |
| 1.03258E-05 | 4.1424E-06  | 3.1785E-06  | 1.51711E-05 | 3.15828E-06 | 3.6473E-05  | 1.71849E-06 | 9.9398E-07  | 1.2257E-06  | 1.3197E-06  | 5.2414E-06  | 2.42695E-06   | 6.92975E-07 | 20Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 9.78561E-06 | 1.23596E-05 | 1.46567E-06 | 4.5462E-06  | 1.76478E-06 | 2.81219E-05 | 7.75158E-06 | 3.1836E-06  | 3.17173E-06 | 1.0019E-06  | 1.5328E-06  | 2.37661E-06   | 3.53716E-06 | 30Hz       | 0.5A     | sano      |
| 7.24453E-06 | 8.1046E-06  | 3.18797E-06 | 8.54656E-06 | 1.34762E-06 | 2.8437E-05  | 5.16262E-06 | 1.2386E-06  | 5.85592E-06 | 1.856E-06   | 1.41126E-05 | 2.2541E-06    | 4.3175E-06  | 30Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 5.81841E-06 | 9.29741E-06 | 1.7429E-06  | 2.8359E-06  | 1.4912E-06  | 2.11821E-05 | 1.255E-06   | 1.4716E-06  | 1.1498E-06  | 1.39884E-06 | 5.15635E-06 | 8.2347E-06    | 9.77343E-07 | 40Hz       | 0.5A     | sano      |
| 9.78968E-06 | 1.44198E-05 | 1.85697E-06 | 1.7299E-06  | 1.7633E-06  | 3.49295E-05 | 2.1969E-06  | 1.2582E-06  | 1.68827E-06 | 5.8444E-06  | 1.09478E-05 | 3.1536E-06    | 2.49949E-06 | 40Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 1.00393E-05 | 3.39785E-06 | 2.23894E-05 | 2.8264E-06  | 1.2954E-06  | 3.98877E-05 | 1.47732E-06 | 2.08828E-06 | 1.414E-05   | 3.08627E-06 | 2.07523E-05 | 3.74821E-06   | 1.00658E-05 | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 1.43618E-05 | 3.71549E-06 | 1.42988E-05 | 1.55925E-06 | 2.9786E-06  | 3.75434E-05 | 2.5529E-06  | 1.02264E-06 | 2.5132E-06  | 2.7717E-06  | 8.831E-06   | 3.78672E-06   | 9.385E-06   | 10Hz       | 1A       | soltera   |
| 9.624E-06   | 1.33156E-06 | 8.29897E-07 | 1.4196E-06  | 1.48277E-06 | 1.46272E-05 | 1.05535E-06 | 1.23589E-06 | 1.00887E-06 | 1.00887E-06 | 1.35326E-05 | 2.3368E-06    | 2.95793E-06 | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 9.9745E-06  | 4.1858E-06  | 1.3633E-06  | 1.64525E-06 | 1.2715E-06  | 1.83711E-05 | 1.47121E-06 | 3.32461E-06 | 1.1826E-06  | 1.56676E-06 | 5.44345E-06 | 5.593E-06     | 1.7195E-06  | 30Hz       | 1A       | soltera   |
| 2.9241E-06  | 1.71858E-06 | 3.9534E-06  | 1.62559E-06 | 1.32711E-06 | 1.39834E-05 | 1.87713E-06 | 3.2461E-06  | 1.6524E-06  | 6.61342E-06 | 1.3424E-06  | 3.4846E-06    | 7.75193E-06 | 30Hz       | 1A       | soltera   |
| 4.38184E-06 | 5.5443E-06  | 3.4454E-06  | 4.28272E-06 | 3.05999E-06 | 2.06725E-05 | 1.8696E-06  | 4.11363E-06 | 1.41293E-06 | 4.24548E-06 | 1.579E-06   | 8.2466E-06    | 7.83792E-06 | 30Hz       | 1A       | soltera   |
| 8.36093E-06 | 3.42374E-06 | 1.7128E-06  | 3.15132E-06 | 2.0416E-06  | 5.75295E-05 | 5.38153E-06 | 1.83745E-06 | 2.4121E-06  | 1.53861E-05 | 1.12533E-05 | 9.69382E-06   | 40Hz        | 1A         | soltera  |           |
| 1.21462E-05 | 1.4723E-05  | 1.45628E-05 | 1.1329E-05  | 6.01784E-06 | 6.8377E-05  | 7.218E-06   | 1.43535E-05 | 2.58695E-06 | 1.33487E-05 | 3.78494E-06 | 2.26724E-05   | 1.96458E-05 | 40Hz       | 1A       | soltera   |
| 6.07245E-06 | 2.34451E-06 | 3.4569E-06  | 1.9358E-06  | 1.73643E-06 | 1.5653E-05  | 2.07684E-06 | 1.13732E-06 | 2.08487E-06 | 1.91228E-06 | 7.21131E-06 | 5.4532E-06    | 7.06639E-06 | 10Hz       | 1.5A     | sano      |
| 8.56652E-06 | 2.79627E-06 | 2.89979E-06 | 5.25314E-06 | 1.46954E-05 | 3.41241E-05 | 2.403E-06   | 4.38639E-06 | 9.12677E-07 | 1.13539E-06 | 8.83745E-06 | 3.65181E-06   | 4.8371E-06  | 10Hz       | 1.5A     | soltera   |
| 4.7275E-06  | 4.65091E-06 | 1.2189E-06  | 2.27641E-06 | 2.4038E-06  | 1.52581E-05 | 2.0252E-06  | 2.24573E-06 | 1.9184E-06  | 1.24324E-06 | 7.39333E-06 | 3.97582E-06   | 8.06617E-06 | 20Hz       | 1.5A     | sano      |
| 1.97467E-05 | 6.34317E-06 | 1.1636E-06  | 1.92488E-06 | 3.0225E-06  | 3.2733E-05  | 1.5487E-06  | 2.05974E-06 | 1.1352E-06  | 1.22396E-06 | 5.96097E-06 | 3.61721E-05   | 2.72678E-06 | 20Hz       | 1.5A     | soltera   |
| 4.0704E-06  | 4.56456E-06 | 1.2562E-06  | 1.75709E-06 | 1.34606E-05 | 2.0634E-05  | 2.14231E-06 | 2.4904E-06  | 1.9963E-06  | 7.9257E-06  | 1.1585E-06  | 6.1113E-06    | 5.95835E-06 | 30Hz       | 1.5A     | sano      |
| 2.43889E-06 | 5.02139E-06 | 4.49829E-06 | 3.6645E-06  | 2.2668E-06  | 1.8546E-05  | 3.0769E-06  | 2.5263E-06  | 3.7584E-06  | 2.2536E-06  | 1.1585E-06  | 1.0211E-05    | 4.9666E-06  | 30Hz       | 1.5A     | soltera   |
| 1.52588E-05 | 8.4188E-06  | 4.89141E-06 | 3.51243E-06 | 7.61351E-06 | 3.9678E-05  | 8.7157E-06  | 8.2625E-06  | 6.04937E-06 | 5.01496E-06 | 2.79258E-05 | 1.5292E-05    | 1.35197E-05 | 40Hz       | 1.5A     | sano      |
| 1.24197E-05 | 7.82215E-06 | 6.9879E-06  | 6.0643E-06  | 6.3971E-06  | 4.02845E-05 | 5.78685E-06 | 4.3765E-06  | 5.11851E-06 | 6.55963E-06 | 2.18356E-05 | 1.1736E-05    | 1.39866E-05 | 40Hz       | 1.5A     | soltera   |

Tabla A.11 Datos de armónicos de envolvente de señal de EA en canal 2

| 1X-fast     | 2X-fast     | 3X-fast     | 4X-fast     | 5X-fast     | Suma-fast   | 1X-slow     | 2X-slow     | 4X-slow     | 5X-slow     | Suma-slow   | Banda Lateral | Sum mech    | Engrane 1   | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 0.000135562 | 0.2114E-05  | 5.24718E-05 | 3.6483E-05  | 3.9355E-05  | 0.000355551 | 1.17887E-06 | 2.68538E-06 | 2.23474E-06 | 1.66261E-06 | 7.76159E-06 | 1.5905E-05    | 0.000460698 | 6.47251E-06 | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 0.000155636 | 0.74729E-05 | 5.4196E-05  | 4.24778E-05 | 4.2394E-05  | 0.000392086 | 2.06373E-06 | 2.43543E-06 | 2.85779E-06 | 1.71536E-06 | 9.07141E-06 | 2.2885E-05    | 0.000447527 | 7.17834E-06 | 20Hz       | 0A       | soltera   |
| 0.000257638 | 0.00014774  | 6.7415E-05  | 7.21875E-05 | 6.2242E-05  | 0.000607221 | 3.7648E-06  | 2.05311E-06 | 2.95223E-06 | 3.12268E-06 | 1.18928E-05 | 6.32264E-05   | 0.00074284  | 2.11667E-05 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 0.00043592  | 0.00022027  | 0.000124849 | 8.98456E-05 | 6.4022E-05  | 0.000839536 | 6.11759E-06 | 3.39470E-06 | 4.27489E-06 | 4.12549E-06 | 1.79127E-05 | 3.638E-05     | 0.000937563 | 1.69875E-05 | 30Hz       | 0A       | soltera   |
| 0.000394868 | 0.00021879  | 0.000102698 | 9.8676E-05  | 8.8079E-05  | 0.000869687 | 1.8422E-05  | 5.71991E-06 | 4.27489E-06 | 3.7453E-06  | 2.5934E-05  | 7.6669E-05    | 0.00108714  | 4.82194E-05 | 30Hz       | 0A       | soltera   |
| 0.000485546 | 0.000320247 | 0.000170886 | 0.000102296 | 8.1875E-05  | 0.001159264 | 6.10946E-06 | 8.3789E-06  | 5.24338E-06 | 6.2191E-06  | 2.6018E-05  | 7.22238E-05   | 0.001385655 | 3.37785E-05 | 40Hz       | 0A       | soltera   |
| 3.9315E-05  | 2.7761E-05  | 1.44243E-05 | 9.72912E-06 | 8.65692E-06 | 9.98719E-05 | 1.2214E-06  | 7.07156E-07 | 8.11444E-07 | 1.1264E-06  | 3.84647E-06 | 7.3314E-06    | 0.000191243 | 3.8693E-06  | 10Hz       | 0.5A     | sano      |
| 3.77143E-05 | 2.5862E-05  | 1.4922E-05  | 1.22947E-05 | 9.66869E-06 | 0.00100458  | 9.73743E-07 | 1.26348E-06 | 1.22374E-06 | 1.2297E-06  | 4.66394E-06 | 5.19432E-06   | 0.000121779 | 3.05986E-06 | 10Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 0.000139571 | 9.59492E-05 | 5.6682E-05  | 4.2461E-05  | 3.9544E-05  | 0.000374201 | 4.14148E-06 | 1.46872E-06 | 1.83184E-06 | 2.13866E-06 | 9.5807E-06  | 3.3327E-05    | 0.000467881 | 1.4534E-05  | 20Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 0.000158166 | 0.000100186 | 6.06285E-05 | 4.3366E-05  | 5.37539E-05 | 0.000402701 | 4.18518E-06 | 1.7467E-06  | 2.16369E-06 | 2.23956E-06 | 1.03291E-05 | 2.3264E-05    | 0.000458991 | 3.765E-06   | 20Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 0.000265958 | 0.000164558 | 8.61014E-05 | 7.1689E-05  | 5.35281E-05 | 0.000641916 | 6.7983E-06  | 2.8397E-06  | 5.01867E-06 | 4.86642E-06 | 1.95141E-05 | 4.7746E-05    | 0.000805761 | 2.24255E-05 | 30Hz       | 0.5A     | sano      |
| 0.000349496 | 0.000229663 | 0.000136905 | 0.00010358  | 6.8382E-05  | 0.00087898  | 1.16742E-05 | 2.6648E-06  | 4.52344E-06 | 4.39944E-06 | 3.2576E-05  | 4.52927E-05   | 0.00104338  | 2.312E-05   | 30Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 0.000398275 | 0.000240197 | 0.000117365 | 9.58175E-05 | 7.19848E-05 | 0.000923639 | 1.14533E-05 | 5.8278E-06  | 4.02941E-06 | 3.88135E-06 | 2.98669E-05 | 5.75843E-05   | 0.001146169 | 4.9125E-05  | 40Hz       | 0.5A     | sano      |
| 0.000471501 | 0.000334386 | 0.000202577 | 0.000126554 | 8.1574E-05  | 0.00121757  | 1.81224E-05 | 1.0149E-06  | 3.98122E-06 | 3.72961E-06 | 4.88799E-05 | 6.68832E-05   | 0.001455858 | 6.68832E-05 | 40Hz       | 0.5A     | soltera   |
| 4.5598E-05  | 3.2164E-05  | 1.7539E-05  | 1.2123E-05  | 1.01299E-05 | 0.00117847  | 8.95591E-07 | 1.34272E-06 | 1.78888E-06 | 1.3692E-06  | 5.38828E-06 | 8.534E-06     | 0.000143645 | 5.02895E-06 | 10Hz       | 1A       | sano      |
| 4.29213E-05 | 2.9645E-05  | 1.73731E-05 | 1.2897E-05  | 1.13731E-05 | 0.000114178 | 1.1934E-06  | 1.05421E-06 | 1.67856E-06 | 1.89758E-06 | 5.82348E-06 | 6.85794E-06   | 0.000137966 | 2.53632E-06 | 10Hz       | 1A       | soltera   |
| 0.000171991 | 0.000104235 | 4.8795E-05  | 3.5281E-05  | 3.32279E-05 | 0.000392914 | 8.4877E-06  | 1.6345E-06  | 9.1908E-06  | 8.94284E-06 | 3.9164E-05  | 1.03378E-05   | 0.000600647 | 3.1851E-05  | 20Hz       | 1A       | sano      |
| 0.00022322  | 0.000111038 | 3.23667E-05 | 3.44E-05    | 4.1488E-05  | 0.000441116 | 5.05152E-06 | 1.4819E-05  | 1.71271E-06 | 2.14455E-0  |             |               |             |             |            |          |           |

**Tabla A.13** Parámetros de señales de vibraciones mecánicas en canal 1

| RMS         | Kurtosis     | Factor de cresta | Entropía    | Componente max | Frecuencia max | Centroide   | Desviación espectral | STD-vib     | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|--------------|------------------|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 0.026715993 | 0.108207698  | 4.540781891      | 10.85284364 | 0.004921777    | 438.5          | 621.1217416 | 1.913153704          |             | 10Hz       | 0A       | sano      |
| 0.025995654 | 0.3305914    | 5.950862855      | 11.03568999 | 0.008631133    | 400.1          | 645.5671234 | 2.451623519          |             | 10Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.107598616 | 0.704199805  | 5.500420622      | 9.526032544 | 0.028180844    | 400.9          | 647.16225   | 5.281589154          | 0.231366938 | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 0.138705458 | 0.585368668  | 5.951005193      | 10.47251149 | 0.0477375      | 400.6          | 653.8092835 | 6.45369291           | 0.32914861  | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.116087321 | 0.265195624  | 4.38099329       | 9.22217771  | 0.019998758    | 405.7          | 652.7963469 | 5.53624751           | 0.330562468 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 0.204703486 | 0.045498864  | 4.236024873      | 10.734029   | 0.068989922    | 400.4          | 643.3688292 | 6.902072251          | 0.426398883 | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.100100456 | 0.922392796  | 5.644094813      | 3.256866044 | 0.01663801     | 393.6          | 626.7066411 | 4.811552663          | 0.367732188 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 0.73381361  | -0.993236997 | 2.741059749      | 10.49618297 | 0.716364136    | 400.1          | 657.3203865 | 8.863763422          | 0.2837525   | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.126064635 | 0.262723952  | 3.995861719      | 7.225124964 | 0.071850156    | 500.2          | 751.5091348 | 4.777438349          |             | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 0.132820176 | 0.266296075  | 4.046126629      | 6.739560416 | 0.062253288    | 700.3          | 738.9288853 | 4.016412935          |             | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.172000857 | 0.17730274   | 4.523953752      | 5.456471664 | 0.101651432    | 801.9          | 769.6755376 | 6.973967043          | 0.183789694 | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 0.22009715  | 0.41101959   | 4.22078481       | 6.809076612 | 0.130468568    | 601            | 724.3446004 | 5.84637292           | 0.254443699 | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.289813845 | -0.699973816 | 3.184874169      | 5.232618942 | 0.209062934    | 599.6          | 809.7492093 | 8.862234566          | 0.310368867 | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 0.285758303 | -0.728307708 | 3.04411699       | 5.123945413 | 0.220178648    | 599.5          | 760.4543936 | 6.665860049          | 0.326431362 | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.559060633 | -0.74880399  | 2.616109946      | 3.904350941 | 0.458506864    | 400.1          | 820.0630282 | 11.50613155          | 0.426362462 | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 0.564969251 | -0.792752961 | 2.739969402      | 3.924276757 | 0.479676988    | 400.1          | 830.2245102 | 11.52073986          | 0.300140896 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.14** Parámetros de señales de vibraciones mecánicas en canal 2

| RMS         | Kurtosis     | Factor de cresta | Entropía    | Componente max | Frecuencia max | Centroide   | Desviación espectral | STD-vib     | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|--------------|------------------|-------------|----------------|----------------|-------------|----------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 0.006469195 | 0.563850604  | 4.660431255      | 11.33461136 | 0.004759955    | 300.1          | 606.6543998 | 1.913153704          |             | 10Hz       | 0A       | sano      |
| 0.007039997 | 0.357228384  | 4.393697236      | 11.61062461 | 0.005367524    | 400.1          | 589.6944324 | 1.175839673          |             | 10Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.024788769 | 3.261616027  | 8.00161922       | 11.41002375 | 0.00525898     | 400.9          | 664.0308017 | 5.281589154          |             | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 0.026749997 | 3.147923738  | 7.251832509      | 11.30639378 | 0.005334201    | 402.1          | 653.3352966 | 2.920205705          |             | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.027351176 | 1.676862293  | 7.849047997      | 10.68911131 | 0.005027934    | 383.8          | 678.3944672 | 5.53624751           | 0           | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 0.040151248 | 0.702931552  | 5.1175818        | 12.05489664 | 0.012399519    | 299.7          | 692.3786444 | 4.643206135          | 0.092621712 | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.020955048 | 3.666119617  | 9.225892322      | 5.7206247   | 0.005275656    | 393.6          | 623.9237964 | 4.811552663          | 0.081307252 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 0.066554253 | -0.576110128 | 4.236714215      | 12.04821693 | 0.055869865    | 400.1          | 728.8805088 | 4.416403794          | 0.163409015 | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 0.024627785 | 0.159777459  | 3.757265043      | 6.343942892 | 0.017716949    | 500.2          | 771.2820946 | 4.777438349          |             | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 0.024688097 | 0.196750625  | 4.493512365      | 6.545577014 | 0.019092358    | 500.2          | 892.7392188 | 4.262049201          |             | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.053601052 | 0.318205289  | 3.576534596      | 5.807122121 | 0.034953567    | 601.4          | 818.6316987 | 6.973967043          |             | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 0.045286345 | 0.016595836  | 3.882225458      | 5.640056822 | 0.026491678    | 601            | 923.2084313 | 6.039862682          |             | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.050878434 | 0.715620397  | 11.62107356      | 6.28095009  | 0.028151471    | 599.6          | 1021.862005 | 8.862234566          | 0.170684181 | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 0.052233441 | 7.607866334  | 30.60243154      | 6.249959473 | 0.031601967    | 599.5          | 1556.442348 | 11.69851435          | 0.188433609 | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.0662374   | 0.478721929  | 18.10558517      | 5.372372308 | 0.065478736    | 800.4          | 1380.25548  | 11.50613155          | 0.200961983 | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 0.074543074 | 0.382001456  | 12.77477486      | 4.658654375 | 0.060941152    | 800.4          | 1288.849238 | 10.25559087          | 0.241082534 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.15** Componentes en señales de vibraciones mecánicas en canal 1

| 1X-fast     | 2X-fast     | 3X-fast     | 4X-fast     | 5X-fast     | Suma-fast   | 1X-slow     | 2X-slow     | 4X-slow     | 5X-slow     | Suma-slow   | Banda Lateral | Engrane 1   | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|------------|----------|-----------|
| 3.38684E-05 | 5.29356E-05 | 6.31569E-05 | 5.154E-05   | 2.87843E-05 | 0.000201461 | 0.000158612 | 3.65836E-05 | 1.71775E-05 | 2.4214E-05  | 0.000246241 | 8.28722E-05   | 0.000119689 | 10Hz       | 0A       | sano      |
| 2.3988E-05  | 1.45282E-05 | 4.48546E-05 | 3.7845E-05  | 5.11492E-05 | 0.000121096 | 0.000160039 | 5.73365E-05 | 1.4051E-05  | 1.9326E-05  | 0.000255334 | 0.000165391   | 0.000146578 | 10Hz       | 0A       | soltura   |
| 6.36732E-05 | 9.1411E-05  | 0.000110389 | 0.000130899 | 0.00025684  | 0.000396002 | 0.000134175 | 5.53258E-05 | 3.7905E-05  | 2.65638E-05 | 0.00021908  | 0.003083732   | 0.0044248   | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 0.000103475 | 2.78928E-05 | 0.000117405 | 0.000120423 | 0.000417855 | 0.000369196 | 0.000132757 | 5.71E-05    | 3.07852E-05 | 2.57775E-05 | 0.000324016 | 0.002375581   | 0.003082573 | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 3.7091E-05  | 3.58323E-05 | 5.89714E-05 | 0.00014453  | 6.9299E-05  | 0.000276425 | 5.5528E-05  | 4.4547E-05  | 4.4821E-05  | 7.2134E-05  | 0.000181505 | 0.003187856   | 0.001140855 | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 0.000134622 | 6.26438E-05 | 0.000314376 | 0.00020237  | 0.000245856 | 0.000714012 | 9.02274E-05 | 6.72315E-05 | 6.19185E-05 | 6.03373E-05 | 0.000354    | 0.017430897   | 0.036694326 | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 3.29116E-05 | 3.02723E-05 | 3.65795E-05 | 4.26275E-05 | 0.000102114 | 0.000142391 | 2.11552E-05 | 2.3294E-05  | 1.99681E-05 | 2.4471E-05  | 9.7644E-05  | 0.012457845   | 0.013449916 | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 0.000427501 | 0.000139843 | 0.000473818 | 0.00038461  | 0.000696279 | 0.001425772 | 0.000143308 | 0.000125469 | 0.000124600 | 0.00012891  | 0.000820884 | 0.235024816   | 0.716364136 | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 7.1343E-05  | 1.69338E-05 | 2.88476E-05 | 3.2794E-05  | 4.3762E-05  | 0.000149545 | 0.000194222 | 3.42433E-05 | 1.94641E-05 | 2.23128E-05 | 0.000318963 | 0.000177222   | 0.000540355 | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 6.98981E-05 | 1.7714E-05  | 2.9797E-05  | 3.63948E-05 | 5.02658E-05 | 0.000153713 | 0.000108414 | 3.4537E-05  | 1.45917E-05 | 1.7767E-05  | 0.00022744  | 0.000191145   | 0.001204217 | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.00016382  | 6.65794E-05 | 0.000102638 | 0.000150811 | 0.000366159 | 0.000483848 | 0.000100439 | 3.66243E-05 | 3.82918E-05 | 1.33955E-05 | 0.000339175 | 0.001075139   | 0.002229363 | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000247762 | 6.12498E-05 | 8.8374E-05  | 0.000131252 | 0.000402929 | 0.000528571 | 0.000109577 | 4.2375E-05  | 3.24373E-05 | 2.8321E-05  | 0.000431814 | 0.001800672   | 0.001643152 | 20Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000479139 | 0.000140414 | 0.000219422 | 0.00020676  | 0.000301953 | 0.001045735 | 3.47646E-05 | 2.0356E-05  | 1.881E-05   | 1.91771E-05 | 0.000553055 | 0.006864246   | 0.027501559 | 30Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000530194 | 0.000162212 | 0.000275706 | 0.000224534 | 0.000255126 | 0.001192646 | 6.45218E-05 | 2.72446E-05 | 2.263E-05   | 2.96151E-05 | 0.000644591 | 0.009590418   | 0.017916235 | 30Hz       | 15A      | soltura   |
| 0.000841394 | 0.000275802 | 0.000403367 | 0.000209658 | 0.000681821 | 0.001730221 | 3.91348E-05 | 2.2105E-05  | 2.18116E-05 | 3.04565E-05 | 0.00092446  | 0.074840741   | 0.458506864 | 40Hz       | 15A      | sano      |
| 0.000938628 | 0.00033124  | 0.000484662 | 0.000255643 | 0.001837565 | 0.002010173 | 4.7639E-05  | 2.7414E-05  | 2.54166E-05 | 2.5642E-05  | 0.00103815  | 0.008500101   | 0.479676988 | 40Hz       | 15A      | soltura   |

**Tabla A.16** Componentes en señales de vibraciones mecánicas en canal 2

| 1X-fast     | 2X-fast     | 3X-fast     | 4X-fast     | 5X-fast     | Suma-fast   | 1X-slow     | 2X-slow     | 4X-slow     | 5X-slow     | Suma-slow   | Banda Lateral | Engrane 1    | Frecuencia | Amperaje | Condicion |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------------|------------|----------|-----------|
| 4.7353E-05  | 2.28611E-05 | 1.8915E-05  | 1.92828E-05 | 1.75176E-05 | 0.000108407 | 7.22559E-05 | 3.52367E-05 | 4.7353E-05  | 3.56657E-05 | 0.000202199 | 8.1421E-05    | 0.000170224  | 10Hz       | 0A       | sano      |
| 3.5318E-05  | 3.118E-05   | 3.3849E-05  | 2.89569E-05 | 2.33248E-05 | 0.000128934 | 6.85147E-05 | 6.14588E-05 | 3.78361E-05 | 4.04172E-05 | 0.000202841 | 0.000127914   | 0.000279522  | 10Hz       | 0A       | soltura   |
| 2.2383E-05  | 2.7548E-05  | 2.793E-05   | 4.27262E-05 | 0.000368225 | 0.000120544 | 5.37661E-05 | 3.7557E-05  | 2.54583E-05 | 2.1812E-05  | 0.000138663 | 0.001430544   | 0.003243797  | 20Hz       | 0A       | sano      |
| 2.02112E-05 | 3.06141E-05 | 3.17453E-05 | 2.09761E-05 | 0.000579249 | 0.000103547 | 5.12189E-05 | 3.72888E-05 | 8.85923E-05 | 2.0966E-05  | 0.000137311 | 0.00204177    | 0.000293676  | 20Hz       | 0A       | soltura   |
| 1.8785E-05  | 1.67958E-05 | 2.14239E-05 | 2.0495E-05  | 4.6547E-05  | 7.7496E-05  | 4.67435E-05 | 2.3898E-05  | 2.11218E-05 | 2.14234E-05 | 0.000110544 | 0.00085608    | 0.000433138  | 30Hz       | 0A       | sano      |
| 2.7217E-05  | 3.4477E-05  | 3.9897E-05  | 5.45562E-05 | 2.8334E-05  | 0.000156135 | 3.5271E-05  | 3.12174E-05 | 1.91298E-05 | 1.52589E-05 | 0.000112765 | 0.000991474   | 0.012399519  | 30Hz       | 0A       | soltura   |
| 3.36914E-05 | 1.61738E-05 | 1.78482E-05 | 5.00695E-05 | 6.61936E-05 | 0.00011773  | 3.7722E-05  | 3.7828E-05  | 1.9945E-05  | 2.0116E-05  | 0.000128501 | 0.002305317   | 0.000981376  | 40Hz       | 0A       | sano      |
| 3.9445E-05  | 8.5326E-05  | 6.6919E-05  | 0.000205192 | 0.000307421 | 0.000396873 | 4.1341E-05  | 2.52573E-05 | 1.77322E-05 | 2.85254E-05 | 0.000123464 | 0.027009736   | 0.055869865  | 40Hz       | 0A       | soltura   |
| 4.18951E-05 | 2.31831E-05 | 2.4443E-05  | 2.6337E-05  | 1.98565E-05 | 0.000115516 | 6.3243E-05  | 4.98115E-05 | 2.95398E-05 | 2.72155E-05 | 0.000186451 | 5.71616E-05   | 0.000247498  | 10Hz       | 15A      | sano      |
| 5.8392E-05  | 2.92888E-05 | 2.95917E-05 | 1.8566E-05  | 1.39725E-05 | 0.000135838 | 5.3296E-05  | 5.78928E-05 | 2.91775E-05 | 2.45533E-05 | 0.000198736 | 6.52696E-05   | 0.00040904   | 10Hz       | 15A      | soltura   |
| 4.37615E-05 | 1.86895E-05 | 2.62917E-05 | 2.32972E-05 | 0.000507056 | 0.000112907 | 5.2715E-05  | 2.6281E-05  | 2.51541E-05 | 2.6767E-05  | 0.000147267 | 0.001193516   | 0.0007864399 | 20Hz       | 15A      | sano      |
| 3.49872E-05 | 1.79895E-05 | 2.34887E-05 | 2.35477E-05 |             |             |             |             |             |             |             |               |              |            |          |           |