

ANÁLISIS DE SONIDO DE UNA AUTOCLAVE

Jann Nikolas Mayorga Ovalle

Id. 000243299

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Floridablanca

2019

ANÁLISIS DE SONIDO DE UNA AUTOCLAVE

ii

Jann Nikolas Mayorga Ovalle

Id. 000243299

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

INGENIERO ELECTRÓNICO

Director del Proyecto

RAUL RESTREPO AGUDELO

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Floridablanca

2019

Esta tesis está dedicada a mis abuelos que siempre estuvieron preocupados por mí y siempre estuvieron dispuesto a apoyarme si lo necesitaba, a mi padre y mi madre que me dieron la oportunidad de estar aquí, al resto de mi familia que siempre mostraron interés y me aconsejaron a lo largo de mi experiencia.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a toda mi familia que siempre me daban un empujón cuando lo necesitaba y a mis compañeros y docentes de la universidad de los que aprendí muchas cosas y con los cuales nos apoyamos mutuamente a lo largo de la carrera y por supuesto a la Universidad Pontificia Bolivariana por brindarme esta oportunidad y permitirme vivir esta experiencia en estos últimos años de mi vida.

Tabla de Contenido

v

Introducción	3
Antecedentes	7
Justificación	10
Objetivos	11
Marco Teórico.....	12
Metodología	15
Capítulo 1: Inicio del proyecto	16
Capítulo 2: Creación de la base de datos	21
Capítulo 3: Análisis de las señales en el dominio de la frecuencia.	30
Capítulo 4: Análisis de las señales en el dominio del tiempo.....	35
Capítulo 5: Lógica de los algoritmos	49
Capítulo 6: Comprobación de los resultados	61
Capítulo 7: Sistema de detección de fallas por medio del sonido.....	63
Capítulo 8: Resultados y Discusión	71
Conclusiones y Recomendaciones	73
Lista de Referencias	75
Anexos	76

Figura 1. Autoclave.....	16
Figura 2. Micrófono CJMU-4466.	17
Figura 3. Diagrama de conexión entre micrófono y portátil.....	18
Figura 4. Montaje del micrófono de la máquina, el micrófono esta señalado con un círculo rojo.	19
Figura 5. Muestra de sonido afectada por la temperatura de la máquina.	22
Figura 6. Otra muestra de sonido afectada por la temperatura de la máquina.	22
Figura 7. Otra muestra de sonido afectada por una falla mecánica.	24
Figura 8. Muestra afectada por la continuidad del cable del micrófono.....	25
Figura 9. Muestra de sonido de la máquina funcionando con agua.....	27
Figura 10. Muestra de sonido de la máquina funcionando con agua.....	27
Figura 11. Muestra de sonido de la máquina funcionando con agua.....	28
Figura 12. Muestra de sonido de la máquina funcionando sin agua.	28
Figura 13. Muestra de sonido de la máquina funcionando sin agua.	29
Figura 14. Muestra de sonido de la máquina funcionando sin agua.	29
Figura 15. A) Muestra de sonido en el dominio del tiempo, en operación con agua,	30
Figura 16. A) Otra muestra de sonido en el dominio del tiempo, en operación con agua,	31
Figura 17. A) Muestra de sonido en el dominio del tiempo, en operación sin agua,	32
Figura 18. A) Otra muestra de sonido en el dominio del tiempo, en operación sin agua,	33
Figura 19. Muestra de sonido funcionando con agua (azul), separada en estado transitorio y permanente respectivamente.	36
Figura 20. Muestra de sonido funcionando con agua (azul), separada en estado transitorio y permanente respectivamente.	36
Figura 21. Muestra de sonido funcionando sin agua (naranja), separada en estado transitorio y permanente respectivamente.	37
Figura 22. Muestra de sonido funcionando sin agua (naranja), separada en estado transitorio y permanente respectivamente.	37
Figura 23. Valores maximos de la señal con agua “*”, valores maximos de la señal sin agua “o” VS el numero de las muestras.	39
Figura 24. Valor RMS calculado con la señal completa con agua “*”, sin agua “o” VS el número de las muestras.	41
Figura 25. Valores RMS del estado transitorio con agua “*”, sin agua “o” VS el número de las muestras.	43
Figura 26. Diferencia entre el valor RMS permanente y el RMS transitorio, con agua “*”, sin agua “o” VS el número de las muestras.....	45
Figura 27. El valor de la constante K para muestras con agua “*”, sin agua “o” VS El número de las muestras.	47
Figura 28. Diagrama de flujo del proceso de lectura de datos.....	50
Figura 29. Diagrama de flujo de la lógica para el cálculo del valor eficaz y el recorte de la señal.	53
Figura 30. Diagrama de flujo para el calculo del valor eficaz o RMS.....	57
Figura 31. RMS calculado con la Función “rms” de MATLAB, de distintas muestras.	59
Figura 32. RMS calculado con la ecuación de valor eficaz utilizando un algoritmo basado en el diagrama de flujo de “Calculo del Rms”.	59

Figura 33. Valores de K de una autoclave distinta funcionando con agua representados con un asterisco (*), y valores de K de la autoclave funcionando sin agua representados con un circulo (°) VS número de las muestras, Las dos líneas perpendiculares al eje X (Número de muestras), corresponden al umbral mencionado entre 0.6 y 0.7.....	vii 62
Figura 34. Interfaz gráfica.....	63
Figura 35. Primera parte o parte izquierda de la interfaz gráfica.....	65
Figura 36. Segunda parte o parte derecha de la interfaz gráfica.	67
Figura 37. Interfaz con una muestra de sonido correspondiente a el funcionamiento de la máquina con agua en el sistema.....	68
Figura 38 Interfaz con una muestra de sonido correspondiente a el funcionamiento de la máquina sin agua en el sistema.....	69
Figura 39. Interfaz después de haber procesado y clasificado varias muestras de sonido en una misma sesión.	69

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DE SONIDO DE UNA AUTOCLAVE

AUTOR(ES): JANN NIKOLAS MAYORGA OVALLE

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): RAUL RESTREPO AGUDELO

RESUMEN

En el proyecto se realizó el análisis del sonido producido por una bomba de vacío de una autoclave con el fin de identificar características que nos permitan distinguir cuando el equipo funciona normalmente o cuando hay una falla. Para lograr esto se utilizó un sistema compuesto por un computador y un micrófono, el cual fue ubicado cerca de la bomba, este sistema permitió captar el sonido que la bomba produce al iniciar. Con la ayuda de este sistema se construyó una base de datos, compuesta por muestras de sonido de cuando la autoclave arrancaba normalmente y cuando arrancaba en falla. Con esta base de datos se realizó un análisis de cada muestra utilizando Matlab como herramienta, ya que este nos permite procesar los datos de forma numérica, lo cual facilitó el análisis en el dominio tiempo y en el dominio de la frecuencia. Todo esto con el fin de identificar alguna característica o tendencia que permita distinguir entre los estados de funcionamiento de la bomba.

PALABRAS CLAVE:

Bomba de vacío, sonido, Análisis en tiempo y frecuencia, Falla.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: SOUND ANALYSIS OF AN AUTOCLAVE

AUTHOR(S): JANN NIKOLAS MAYORGA OVALLE

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: RAUL RESTREPO AGUDELO

ABSTRACT

In the project, the analysis of the sound produced for a vacuum pump of an autoclave was carried out in order to identify characteristics that allow us to distinguish when the equipment operates normally or when there is a problem with it. To achieve this, a system consisting of a microphone connected to a computer was used to collect data, this microphone was located near the pump, which allowed it to capture the sound it produced at startup. With the help of this system, a database was built with the sound samples taken when the autoclave was started normally and when it was started without water. With this database, an analysis of each sample was made using Matlab, which allows the data to be processed numerically, which made the analysis easier in the time domain and the frequency domain. This was done in order to identify any characteristic or tendency that allows to distinguish between the operating states of the pump.

KEYWORDS:

Vacuum pump, sound, Analysis in time and frequency, Failure.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

En todo centro hospitalario debe garantizarse la esterilidad del instrumental quirúrgico, del vestuario del personal de la institución y, en general, de todos los elementos que puedan guardar microorganismos perjudiciales para los pacientes. Si no hay garantía de esterilidad en estos elementos, se detienen las actividades quirúrgicas del centro hospitalario, pues ese es el requisito fundamental de seguridad para poder llevar a cabo las cirugías.

La esterilización del instrumental quirúrgico y los demás elementos mencionados puede hacerse por medios físicos o por medios químicos. Entre los medios físicos se cuentan: la esterilización por aire caliente seco, la esterilización por vapor saturado y la esterilización por radiación ultravioleta. Entre los medios químicos se encuentran: la esterilización por medio de peróxido de hidrógeno, la esterilización por formaldehído, entre otros. De estos, el método más utilizado en todo el mundo es el de esterilización por vapor saturado, que se hace por medio de equipos conocidos como autoclaves, que es, precisamente, el tipo de equipo en el que se centró el trabajo de este proyecto.

El corazón de una autoclave es lo que se conoce como cámara de esterilización, que es el recinto en el que se deposita el material a esterilizar. La cámara de esterilización cuenta con una o dos puertas que pueden cerrarse herméticamente, gracias a que cuentan con empaques plásticos que impiden que de la cámara entre o salga aire o vapor de agua. Dichos empaques están fabricados con un tipo de silicona especial que los hace resistentes al calor y a las altas presiones.

El proceso de esterilización consiste, a grandes rasgos, en lo siguiente: Una vez que se ha depositado el material en el interior de la cámara de esterilización, se cierran las puertas y se pone en funcionamiento una bomba de vacío, con el objetivo de extraer todo el aire del interior de la cámara. Cuando se ha logrado el nivel de vacío suficiente, una servoválvula permite que a la cámara ingrese vapor de agua a alta presión. Gracias al vacío que se había hecho previamente, el vapor penetra en el instrumental hasta sus puntos de más difícil acceso. Una vez que el vapor que está en el interior de la cámara alcanza una temperatura de 134 °C y una presión de 30 psi, el sistema de control de la autoclave mantiene esas condiciones durante un tiempo que depende del tipo de material que se está esterilizando (alrededor de 18 minutos). Transcurrido ese tiempo, una servoválvula deja salir el vapor y, luego, se hace actuar nuevamente la bomba de vacío para garantizar completamente la extracción del vapor, con el fin de asegurar que no quede humedad residual en el instrumental, pues la presencia de humedad arruinaría el proceso.

Como puede verse, la bomba de vacío es una pieza fundamental en el proceso de esterilización, ya que de ella depende la buena penetración del vapor para hacer efectivo el proceso, al tiempo que evita la presencia de humedad en el material esterilizado.

Las bombas de vacío utilizadas por las autoclaves Stericlinic, una empresa santandereana dedicada a la fabricación de estos equipos, son del tipo de anillo líquido; este tipo de bombas basa su

operación en la creación de un anillo de agua que captura las partículas de aire para luego⁵ expulsarlas. Para que lo anterior pueda suceder, la bomba requiere un suministro constante de agua, pues, si dicho suministro se interrumpe, la bomba no logra hacer vacío. Además de lo anterior, la operación sin agua somete a la bomba a esfuerzos superiores a los que tendría que hacer en condiciones normales, y esto hace que su temperatura se eleve hasta niveles inadmisibles.

El personal de Stericlinic, que está familiarizado con la operación y el mantenimiento de las autoclaves, logra identificar el momento en que una bomba de vacío se encuentra funcionando sin suministro de agua, simplemente porque en esas condiciones la máquina genera un sonido diferente al que produce cuando funciona con el suministro normal de agua. Esta diferenciación auditiva dio pie para desarrollar un proyecto que permita identificar por medios electrónicos la condición de falla de una bomba de vacío, cuando dicha falla es provocada por la ausencia de agua.

Para dar inicio al proyecto, se hizo una visita a la planta de producción de Stericlinic, ubicada en el Barrio Gaitán de Bucaramanga. Allí se contó con el acompañamiento del Director Técnico de la empresa, el ingeniero electrónico John Peter Gómez Vargas, quien, además de hacer una exposición detallada del proceso de esterilización, puso en funcionamiento una autoclave para hacer una demostración de la diferencia entre el sonido emitido por la bomba de vacío cuando tiene agua y cuando no la tiene. El ingeniero Peter comentó que este tipo de falla se presenta con frecuencia en los hospitales y clínicas en donde están instaladas las autoclaves, debido a que, cuando allí hacen labores de mantenimiento locativo, el personal suele hacer cortes de agua en el

edificio, dejando así sin suministro a la bomba de vacío, con las consecuencias ya mencionadas.⁶

Una vez expuesto el problema, se decidió adelantar el presente proyecto con miras al desarrollo de un sistema que permita identificar cuándo la bomba de vacío arranca normalmente y cuándo arranca sin un suministro de agua.

El primer paso del proyecto fue la identificación de las características del sonido producido por la bomba de vacío en ambas condiciones de funcionamiento: operación normal y operación en condición de falla. Para esto, se implementó un sistema para capturar y almacenar el sonido mediante un micrófono electret y un computador portátil. Hecho esto, durante los siguientes cuatro meses se tomaron muestras de sonido de una de las autoclaves de Stericlinic, y con estas muestras se creó una base de datos. Esta base de datos se analizó con el propósito de encontrar diferencias entre los sonidos que se presentan en funcionamiento de la bomba con suministro de agua (funcionamiento normal) y en funcionamiento sin suministro de agua (funcionamiento en condición de falla).

El análisis de la base de datos se realizó en Matlab, teniendo en cuenta que este software facilita el procesamiento de archivos de sonido; además, hay fácil acceso a gran cantidad de información acerca de este software. Los algoritmos utilizados para el desarrollo del proyecto están en la sección de anexos del documento.

El diagnóstico de maquinaria rotatoria a partir del sonido producido durante su funcionamiento ha sido un tema que ha atraído a muchos investigadores, pues, como se ha comprobado, resulta un método relativamente económico y bastante confiable para evaluar las condiciones en las que operan las máquinas, lo que ha facilitado las labores de mantenimiento preventivo, que conllevan considerables beneficios en cuanto a la reducción de tiempos muertos en las plantas de producción, en la disminución de costos en reparaciones y en el aumento de la vida útil de los equipos. Ya que estos beneficios cubren a las máquinas rotativas en general, pueden aprovecharse las experiencias que ya existen en este campo para aplicarlas al diagnóstico de las bombas de vacío.

Entre los muchos estudios que se han realizado en este campo, vale la pena mencionar los siguientes:

J. Calhoun, J. Moore y R. Forni, en su artículo “*Stick-Slip Squeal in a Dry Scroll Vacuum Pump*”¹, adelantado como fruto del proceso de diseño de una nueva bomba de vacío silenciosa, presentaron el estudio que hicieron sobre el ruido generado por una bomba. Gracias al análisis que realizaron al sonido emitido por la bomba, lograron determinar que un ruido estridente detectado durante las pruebas de funcionamiento estaba relacionado con un efecto de deslizamiento que dependía de las

¹ J. Calhoun, J. Moore y R. Forni, «Stick-Slip Squeal in a Dry Scroll Vacuum Pump,» International Compressor Engineering Conference, USA, 2016.

dimensiones del motor y de la flexibilidad del material. La identificación del problema permitió,⁸ entonces, hacer las correcciones en el diseño y evitar definitivamente el problema.

Por otra parte, R. Birajdar, R. Patil y K. Khanzode, en su artículo “*Vibration and noise in centrifugal pumps - sources and diagnosis methods*”², hicieron un estudio sobre la importancia del sonido y la vibración en máquinas que utilizan bombas centrífugas en el que clasifican en tres clases las fuentes del sonido y las vibraciones de una máquina de la siguiente manera:

Mecánicas: Asociadas con problemas en las partes de la máquina, como alguna parte suelta, la expansión del material por la temperatura, partes dobladas o dañadas, entre otras.

Hidráulicas: Producidas por problemas con el producto o el fluido, por ejemplo, la vaporización del producto, recirculación interna o turbulencia en el sistema.

Periféricas: Producidas por otras fuentes, como la vibración de otro equipo o la operación de la bomba a una velocidad crítica.

Los investigadores A. Dufaux, L. Besacier, M. Ansorge y F. Pellandini, escribieron el artículo “*Automatic sound detection and recognition for noisy enviroment*”³, dan la visión general de un sistema de detección y reconocimiento de sonido que contempla la grabación continua de la actividad en el área. En este artículo se presenta un sistema que posee un módulo de detección que se encarga de procesar la señal del micrófono para detectar anomalías, y, mediante un análisis de

² R. Birajdar, R. Patil y K. Khanzode, «VIBRATION AND NOISE IN CENTRIFUGAL PUMPS - SOURCES AND,» Kirloskar Brothers Ltd., India, Porto, Portugal, 2009.

³A. Dufaux, L. Besacier, M. Ansorge y F. Pellandini, «AUTOMATIC SOUND DETECTION AND RECOGNITION,» Institute of Microtechnology, University of Neuchâtel, Suiza, -.

tiempo y frecuencia, determina el tipo de sonido gracias a la identificación de determinadas⁹ características de la señal, para hacer así el reconocimiento del ruido ambiental.

T. Harparik, J. Bocko y K. MaslÁková, publicaron un artículo *titulado “Frequency analysis of acoustic signal using the fast fourier transformation in Matlab”*⁴, en el cual aprovechan las ventajas de la transformada de Fourier para hacer un análisis en el dominio de la frecuencia del sonido producido por maquinaria rotativa. Los autores proponen el uso de la FFT, aduciendo el corto tiempo requerido para el procesamiento, y se realizan ejercicios que permiten observar y extraer la información importante de estos tipos de análisis.

⁴T. Harparik, J. Bocko y . K. MaslÁková, «Frequency analysis of acoustic signal using the Fast Fourier Transformation in Matlab,» Procedia Engineering , Vols. %1 de %2-, nº 48, pp. 199-204, 2012.

En toda clínica u hospital en donde se realicen cirugías es indispensable contar con un equipo que garantice la esterilización del instrumental médico, la ropa del personal de la institución y, en general, todos los elementos que estén propensos a portar microorganismos y que puedan entrar en contacto con los pacientes.

Los esterilizadores más utilizados en el sector hospitalario son las autoclaves de vapor saturado, que utilizan una bomba de vacío como una de sus partes fundamentales. Si esta bomba de vacío falla, el proceso de esterilización no es satisfactorio y sale de operación el equipo hasta cuando se repare el daño.

Una buena parte de las fallas de la bomba de vacío puede detectarse por el tipo de sonido que ella emite durante su operación, pues este sonido cambia si se alteran las condiciones de funcionamiento. Sin embargo, estas diferencias en el sonido sólo logra identificarlas el personal técnico experto en la operación y el mantenimiento de las autoclaves, pues un usuario común no logra hacer un diagnóstico del estado del equipo con base en lo que escucha. Si se desarrolla un sistema electrónico que identifique ese cambio en el sonido, es posible emitir alarmas que den alertas tempranas al personal técnico para actuar a tiempo y evitar un daño severo en la bomba.

La empresa santandereana Stericlinic® produce autoclaves de vapor saturado como las que se han descrito. Estos equipos pueden salir de operación si su bomba de vacío queda sin suministro de agua. Por esta razón, y con ayuda de la empresa, se justifica adelantar un trabajo que haga un estudio que permita la identificación de la falla con el fin de incluir una alarma en el sistema que permita detectarla y dar aviso de este problema al operario y al sistema.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema que utilice el sonido emitido por una bomba de vacío de una autoclave para analizar su desempeño.

Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar los sonidos emitidos por la bomba de vacío y correlacionarlos con los diferentes estados de falla del equipo.
- ✓ Diseñar un sistema que indique el estado de la operación de la bomba de vacío a partir de las señales sonoras obtenidas.

Una autoclave es un equipo que trabaja con vapor de agua a alta presión y que tiene como uno de sus objetivos principales eliminar los gérmenes en el instrumental, los recipientes y el vestuario de uso hospitalario. Este equipo posee un recipiente conocido como cámara de esterilización que está diseñado para soportar presiones elevadas y temperaturas superiores a los 100°C. La acción conjunta de temperatura, vapor y presión produce la coagulación de las proteínas que son esenciales para la vida y la reproducción de los microorganismos, lo que básicamente lleva a la eliminación de ellos. Debido a esto, la autoclave es utilizada en la industria y en los centros de salud con fines de descontaminación o esterilización. La esterilización es definida como el proceso por el cual se obtiene un producto o materias libres de microorganismos; en el caso de este proyecto, ese material libre de microorganismos son las prendas y el instrumental médico.

El sonido, está definido como cualquier fenómeno que involucre la propagación de ondas mecánicas a través de un medio elástico. Estas ondas, además, podrían ser captadas por medio de un transductor como un acelerómetro o un micrófono, los cuales las convierten, en señales analógicas equivalentes o señales de audio. Aunque el rango audible del ser humano está entre 20 Hz y 20 kHz, existen sonidos por encima de dicho rango (ultrasonidos) y por debajo de él (infrasonidos) que pueden contener información de interés; de hecho, al analizar algún fenómeno por medio del sonido, las bandas que están por fuera del rango audible de los humanos pueden contener información relevante. Cuando se diseña un sistema de diagnóstico de maquinaria basado en el sonido y su objetivo sea identificar lo que escucha una persona, no es necesario que el ancho de banda del sistema exceda el rango de audición humano.

Cuando hablamos de un sonido podemos distinguir tres atributos básicos: intensidad, tono y timbre:

- **Intensidad:** Cuando una fuente sonora vibra, producirá ondas a una determinada amplitud. La intensidad de la señal es un valor proporcional al cuadrado de dicha amplitud. Habrá, entonces, sonidos más fuertes cuando la intensidad es alta y más suaves cuando la intensidad es baja.
- **Tono:** El tono permite distinguir los sonidos graves de los agudos; los sonidos graves son producidos por fuentes sonoras que vibran a frecuencias bajas y los agudos por fuentes sonoras que vibran a frecuencias altas.
- **Timbre:** Esta cualidad permite distinguir dos sonidos con igual intensidad y tono producidos por dos fuentes distintas. El timbre de una señal depende de los armónicos que la conforman. A manera de ilustración, puede verse el caso de dos instrumentos musicales diferentes (por ejemplo, un violín y una trompeta) que, a pesar de estar dando una misma nota, uno puede distinguir cuál es cuál. La razón es que, aunque ambos sonidos tienen la misma frecuencia fundamental, sus armónicos son diferentes. Esa diferencia en el contenido armónico de la señal es lo que se conoce como timbre.

Ya que nuestro objetivo es utilizar una máquina para realizar el trabajo de un ser humano, necesitamos técnicas que permitan a una máquina percibir las distintas características y atributos de un sonido. Para lograr esto la máquina deberá realizar un análisis de la señal de sonido y extraer información de la misma. Esto se logró por medio de la observación de la señal en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia.

El dominio del tiempo facilita la observación de la señal de audio a lo largo de toda su duración;¹⁴ esto permite identificar características que podrían ser relevantes como: la amplitud, el periodo, la forma, el valor RMS, la duración del régimen transitorio y permanente, entre otras. El dominio de la frecuencia, por su parte, permite observar y comparar las amplitudes de las diferentes componentes espectrales de la señal.

Habiendo mencionado anteriormente la información que deseamos obtener de las señales de audio y teniendo la intención de trabajar con miras al objetivo principal del proyecto de identificar el sonido emitido por una bomba de una autoclave cuando está funcionando correctamente o cuando no lo hace, se decidió que la herramienta software con la que se trabajaría sería Matlab. Esta herramienta nos permite observar los valores numéricos correspondientes a la señal de audio en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, y graficar los vectores correspondientes a ambos dominios; adicional a esto, Matlab también posee un lenguaje de programación propio, lo cual permite la creación de un algoritmo que extraiga la información relevante y, si se logra la identificación de un comportamiento, tendencia y/o característica, en Matlab también se puede hacer un algoritmo que identifique el estado de la autoclave.

Metodología

Para el desarrollo del trabajo se adoptó una metodología experimental mediante la creación de un ambiente controlado en el cual se provocaron las diferentes condiciones de operación del equipo, que son las siguientes: a) el funcionamiento correcto de la bomba de la autoclave cuando la bomba tiene agua; b) el funcionamiento en condición de falla de la bomba, debido a la ausencia de agua en ella.

En este ambiente se instaló un sistema digital para la captura del sonido, el cual estuvo compuesto por un micrófono y un computador portátil. Con este equipo fue posible la captura y el almacenamiento de la señal acústica, gracias a lo cual se pudo crear una base de datos compuesta por sonidos de la bomba de vacío en ambos estados. Una vez construida y ordenada la base de datos, a todas las muestras se les realizaron distintos análisis con el objetivo de identificar una característica o comportamiento que compartieran entre ellas.

Después de determinar una característica con resultados consistentes, se diseñó un algoritmo que pudiera tomar un archivo de audio y realizar la respectiva identificación del estado de funcionamiento de la bomba de vacío por medio de la señal proporcionada.

En el desarrollo del proyecto lo primero que se realizó fue una visita a Stericlinic con el objetivo de conocer la instalación y la operación y los detalles de las autoclaves. Además de esto se organizó una reunión con el ingeniero John Peter Gómez Vargas, Director Técnico de la empresa, con lo cual se pudo delimitar el alcance y las expectativas del proyecto. En esta reunión se definió que el trabajo sería sobre el problema más común que suelen presentar las autoclaves, el cual consistía en iniciar el proceso de esterilización sin que haya suministro de agua a la bomba de vacío; esto motivaba la intención de detectar esa falla por medio de un dispositivo electrónico. Ante esta necesidad, la solución que se propuso para el desarrollo del presente proyecto fue la identificación de este problema por medio del sonido generado por la bomba de vacío.



Figura 1. Autoclave.

Se observó el equipo en operación y se realizaron pruebas de funcionamiento en las cuales se¹⁷ pudieron apreciar las diferencias en el sonido generado por la máquina cuando trabajaba normalmente y cuando trabajaba sin agua. Mediante estas pruebas se determinó en qué momento del ciclo de esterilización podría actuar un sistema electrónico. En esta misma visita se decidió abordar el problema iniciando con el análisis de la señal en el dominio de la frecuencia y luego realizar el análisis en el dominio del tiempo, teniendo como característica principal la intensidad del sonido.

Después de obtener una idea de lo que se deseaba lograr con el proyecto y habiendo observado el proceso de la máquina, lo siguiente era diseñar un sistema para iniciar con la toma de datos lo más pronto posible.

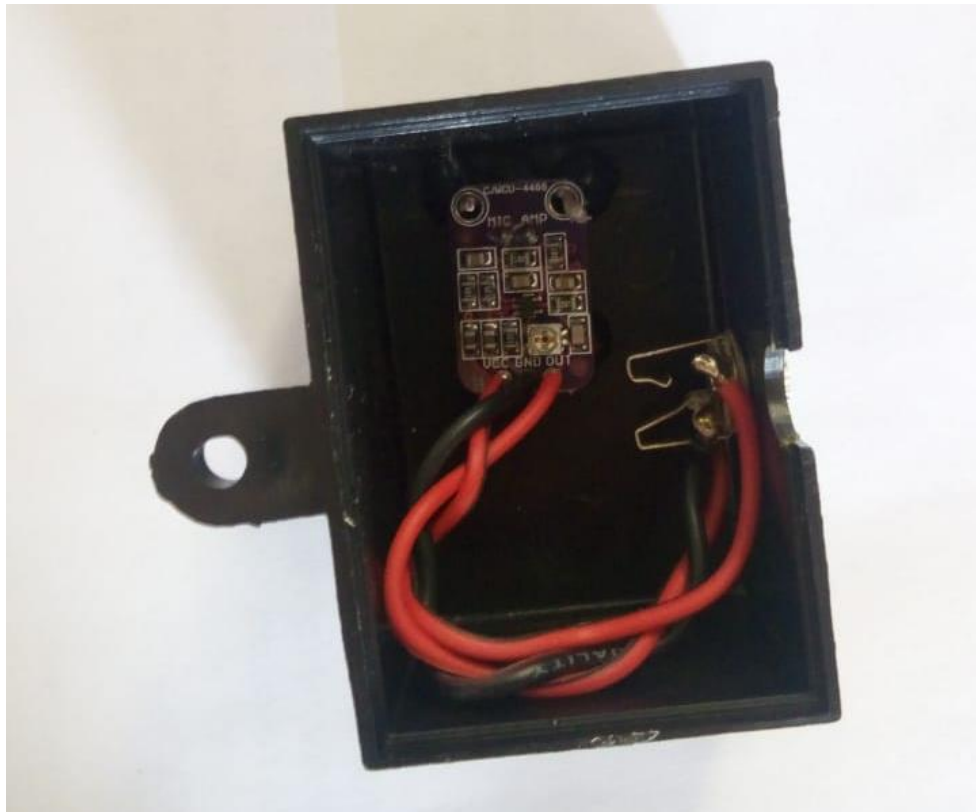


Figura 2. Micrófono CJMU-4466.

Para el sistema de recolección de datos se decidió usar un micrófono de referencia CJMU-4466,¹⁸ el cual podría ser implementado en el producto final. El micrófono se acomodó dentro de una caja plástica disponible comercialmente en Bucaramanga (como se muestra en la Figura 2) y se soldó de forma que pudiera ser conectado fácilmente a un computador. Para la conexión se utilizó un cable apantallado, con el fin de garantizar que la transmisión de la señal hasta el computador se haga en condiciones que aseguren una buena inmunidad ante el ruido externo. Este cable cuenta en sus dos extremos con terminales TRS de 3.5mm y es conocido popularmente como cable auxiliar. En la figura 3, se muestra un diagrama de lo que se utilizó como sistema de captura de datos.

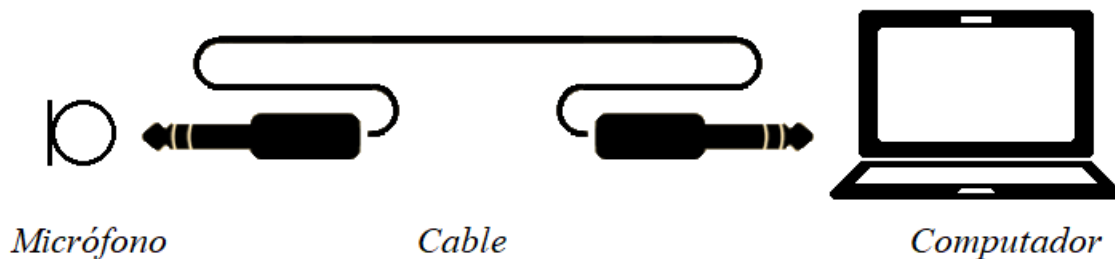


Figura 3. Diagrama de conexión entre micrófono y portátil.

Se decidió utilizar un programa para edición y procesamiento de audio, llamado Audacity, que es un software de uso libre que permite, además de grabar las muestras de sonido, seleccionar trozos de la grabación para eliminar lo innecesario. Se utilizó también un computador portátil para facilitar la creación, organización y procesamiento de la base de datos compuesta por las muestras que se tomaran a lo largo del proyecto. Después de tener una idea del montaje y arreglar varios

micrófonos en sus respectivas cajas se acordó nuevamente una visita a la empresa para tomar la 19 primera ronda de muestras de sonido.



Figura 4. Montaje del micrófono de la máquina, el micrófono esta señalado con un círculo rojo.

El micrófono fue posicionado dentro de la máquina cerca del motor (como se muestra en la figura 4), y de forma tal que el cable auxiliar pudiera conectarse al mismo y pasar por debajo de la máquina al computador portátil. La fijación del micrófono se hizo mediante un resorte fabricado con un alambre flexible, con el fin de emular las características de los sistemas de “montaje flotante” que se utilizan en estudios de grabación, cuyo objetivo es evitar que las vibraciones del punto de apoyo (que en este caso es la estructura de la misma autoclave) lleguen al micrófono y perturben la señal que se desea capturar.

Después de tener una idea del sistema deseado, se le presentó al ingeniero Peter Gómez, quien dio el visto bueno y permitió hacer la primera toma de datos. El objetivo de esta primera toma de datos era probar el sistema de recolección de datos y obtener muestras con las cuales se pudiera iniciar

el análisis de ellas en Matlab. Adicional a lo anterior, esta primera sesión arrojó unas muestras²⁰ de sonido que, como pudo verse más tarde, se distorsionaron debido a la alta temperatura de la bomba debido a que se sometió a trabajo continuo. En esta primera visita se tomaron alrededor de 30 muestras.

El proceso de toma de muestras dio como resultado la creación de una base de datos de alrededor de 223 muestras. Este proceso se realizó en un periodo de aproximadamente dos meses. Desafortunadamente se presentaron tres anomalías que requirieron la revisión de la base de datos, ya que estas podrían afectar las muestras a un nivel que arrojaría resultados indeseados en el proyecto. Estas anomalías fueron: Altas temperaturas en la bomba de vacío, fallas mecánicas en la bomba, y problemas de continuidad en los cables de conducción de la señal de audio.

A. **Altas temperaturas:** En las primeras sesiones de tomas de datos, la bomba se sometió repetidamente a acciones de encendido y apagado, lo que representó para ella una exigencia superior a la que corresponde a su funcionamiento normal. Debido a esta operación intermitente, sumado al hecho de que la mitad de las pruebas tenían que hacerse sin agua, la temperatura de la bomba se elevó demasiado; esta elevada temperatura hizo que la bomba empezara a producir un ruido que aumentaba progresivamente de intensidad. La figura 5 muestra una gráfica de la señal emitida por la bomba cuando está caliente; en dicha figura puede apreciarse cómo, al elevarse su temperatura, aumenta el ruido que produce. En la figura 6 se puede observar un comportamiento aún más extremo como consecuencia del calentamiento de la bomba; en esa figura se aprecia que el ruido es amplitud moderada

durante el corto periodo de tiempo cercano al arranque de la bomba, pero que la²² intensidad del ruido aumenta con el paso del tiempo.

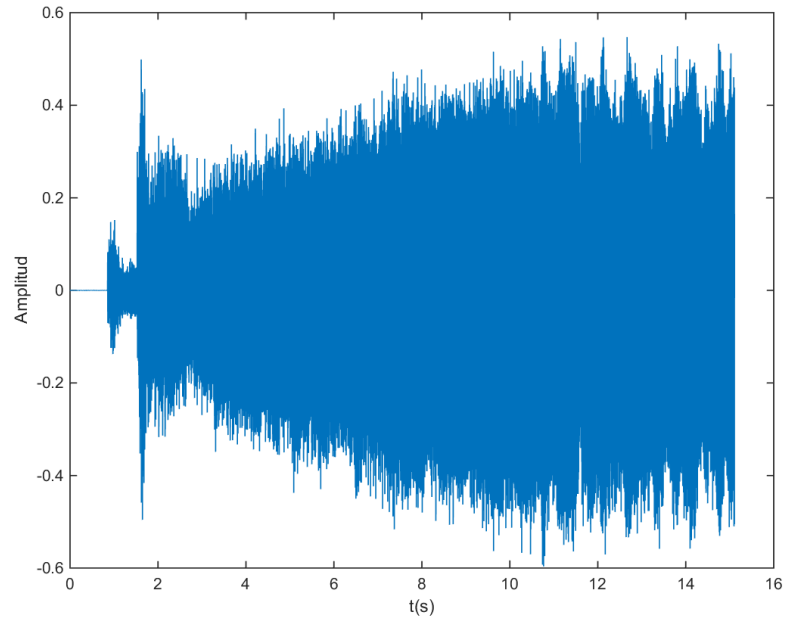


Figura 5. Muestra de sonido afectada por la temperatura de la máquina.

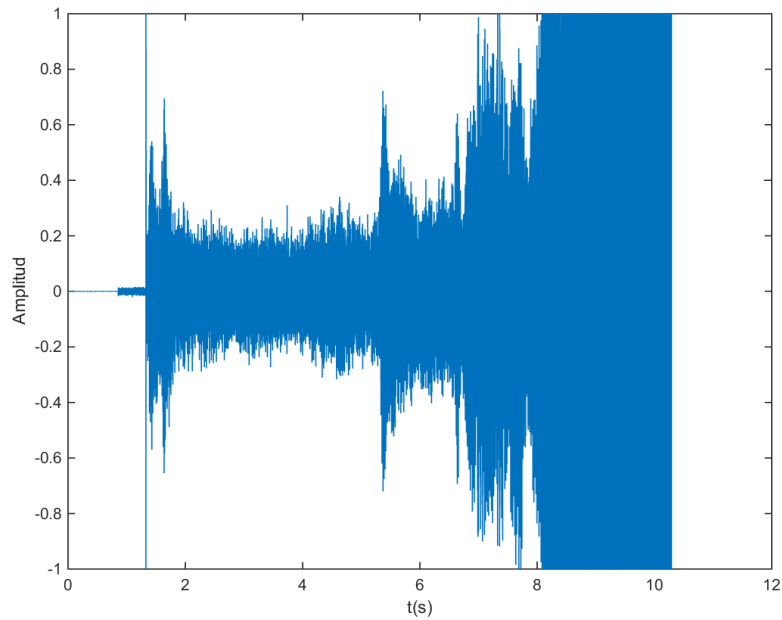


Figura 6. Otra muestra de sonido afectada por la temperatura de la máquina.

B. **Fallas mecánicas:** Debido a la frecuente operación intermitente de la bomba de vacío, lo cual no corresponde a una operación normal, como se mencionó en el literal A, se produjo un daño en su interior, el cual consistió en el desprendimiento de uno de los álabes; este álabe suelto generó un ruido adicional que, como pudo evidenciarse en algunas muestras tomadas mientras persistió el daño, perturbó la señal de audio. En las figuras 7 y 8 pueden identificarse unos picos a lo largo de la señal que, sin duda, no corresponden al comportamiento esperado de la bomba; estos picos en la señal se produjeron como consecuencia del álabe suelto.

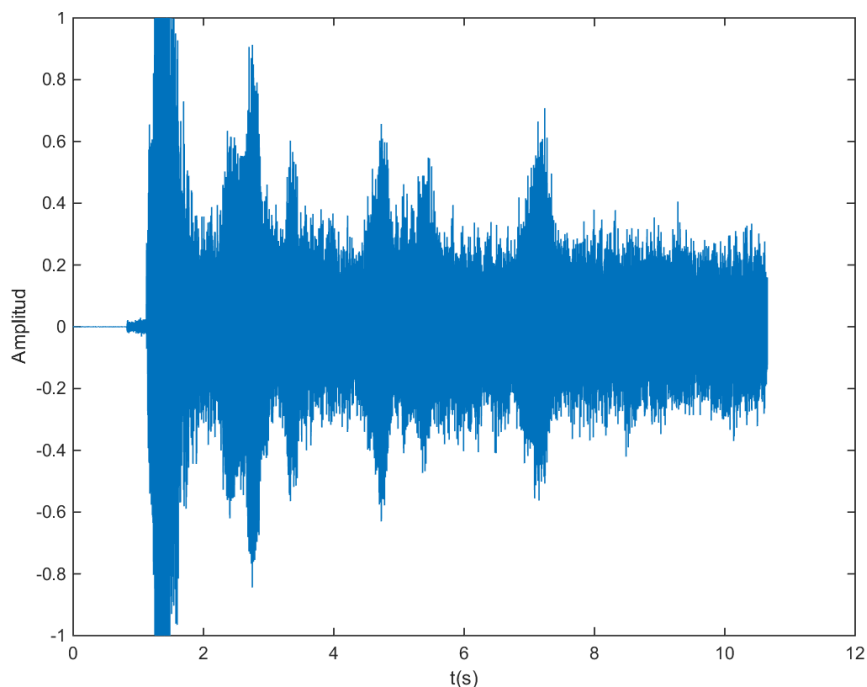


Figura 7. Muestra de sonido afectada por una falla mecánica.

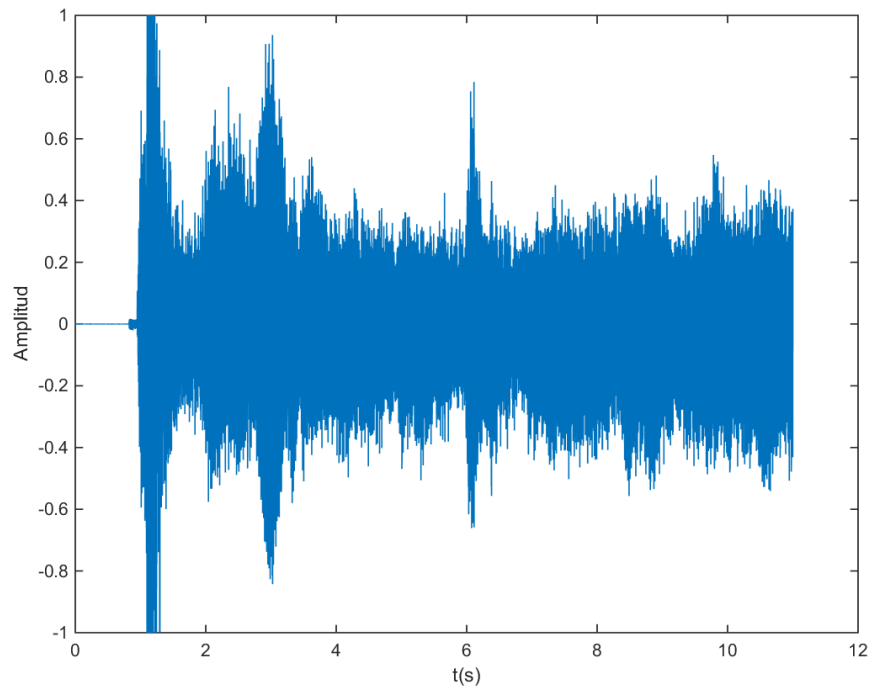


Figura 7. Otra muestra de sonido afectada por una falla mecánica.

C. **Problemas de continuidad:** Otro de los problemas que se presentó fue la rotura del cable (discontinuidad) por el que se transmitieron los datos desde el micrófono hasta el computador. Este problema provocó una distorsión de la señal, de manera que, mientras persistió el inconveniente, se obtuvieron formas de onda como la que se muestra en la gráfica de la figura 8.

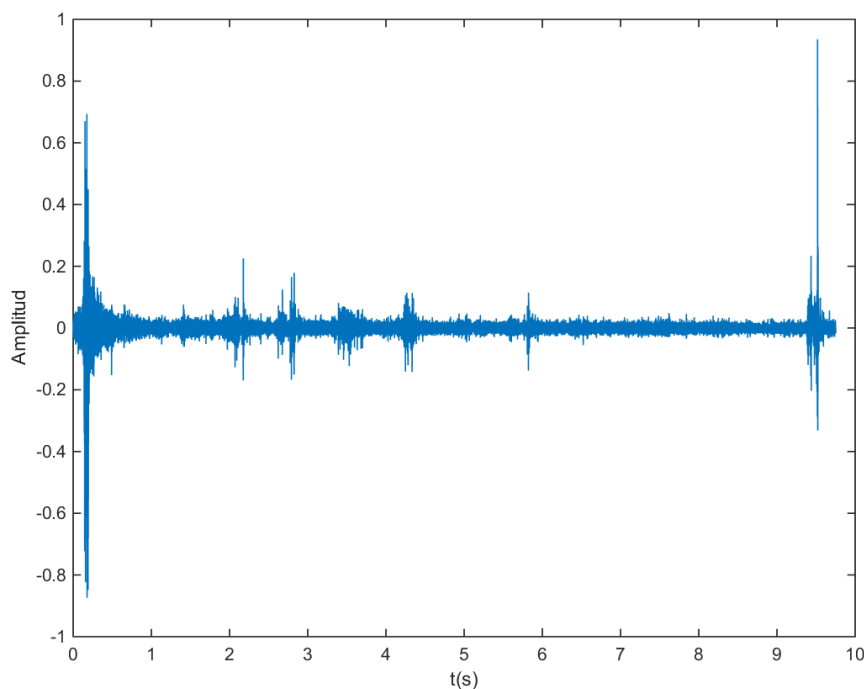


Figura 8. Muestra afectada por la continuidad del cable del micrófono.

Otra situación que se presentó fue que en las primeras capturas del sonido la señal que llegaba al computador se saturaba, produciéndose recortes en los valores máximos, especialmente durante su período transitorio. Para evitar este recorte que se produce por la saturación de la señal, se ajustó la amplificación del micrófono, reduciéndola de 24 dB a de 12 dB. Sin embargo, las señales de las primeras muestras no se descartaron y, como se verá más adelante en este documento, fueron útiles en el momento de analizar el comportamiento de la máquina. Con todo esto, el resultado final fue que se pudo construir una base de datos de alrededor de 150 muestras compuestas principalmente por dos grupos: las muestras correspondientes al nivel de amplificación de 24 dB y las correspondientes al nivel de 12 dB.

Como ya se mencionó, se pudo observar que cuando la máquina trabaja sin agua la temperatura²⁶ se eleva y se pueden generar daños mecánicos en la bomba. Afortunadamente, gracias a que estos problemas se identificaron en las primeras etapas del proyecto, hubo claridad para decidir que se hicieran tomas de las nuevas pruebas dejando tiempo suficiente entre una y otra, de manera que se le permitiera a la bomba reducir convenientemente su temperatura. Aunque esta medida hizo que se redujera el número de muestras que podían tomarse cada día, las señales obtenidas fueron más fieles a la realidad, ya que, en la operación habitual de las autoclaves, la bomba de vacío trabaja sólo en pequeños intervalos de tiempo que están bastante distanciados entre sí, lo que evita que la bomba se caliente excesivamente.

Por otra parte, con el fin de descartar alguna eventual distorsión o atenuación de la señal que pudiera ocasionarse por el elemento en particular que se estuviera utilizando en la línea de la captura de la información, antes de montar el sistema de recolección de datos definitivo se hicieron pruebas con distintos micrófonos y diferentes cables hasta verificar que el sistema global presentaba características similares. A continuación, se presentan, a manera de ejemplo, algunas de las muestras obtenidas:

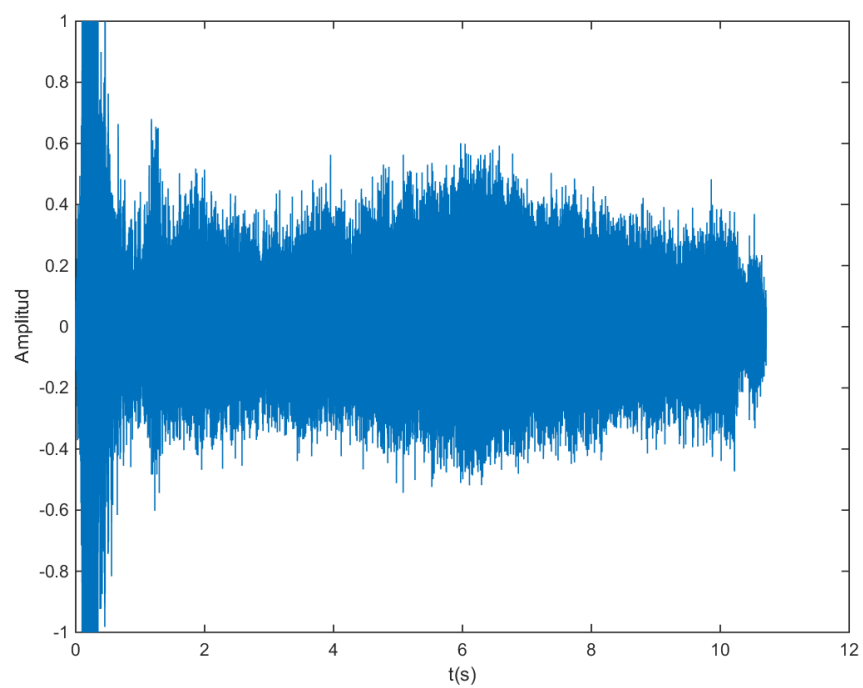


Figura 9. Muestra de sonido de la máquina funcionando con agua.

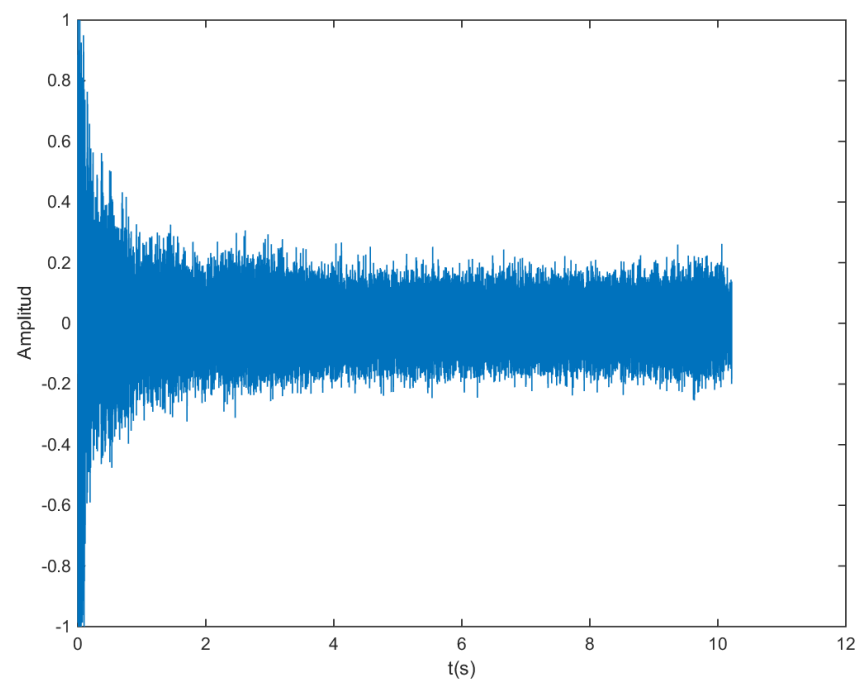


Figura 10. Muestra de sonido de la máquina funcionando con agua.

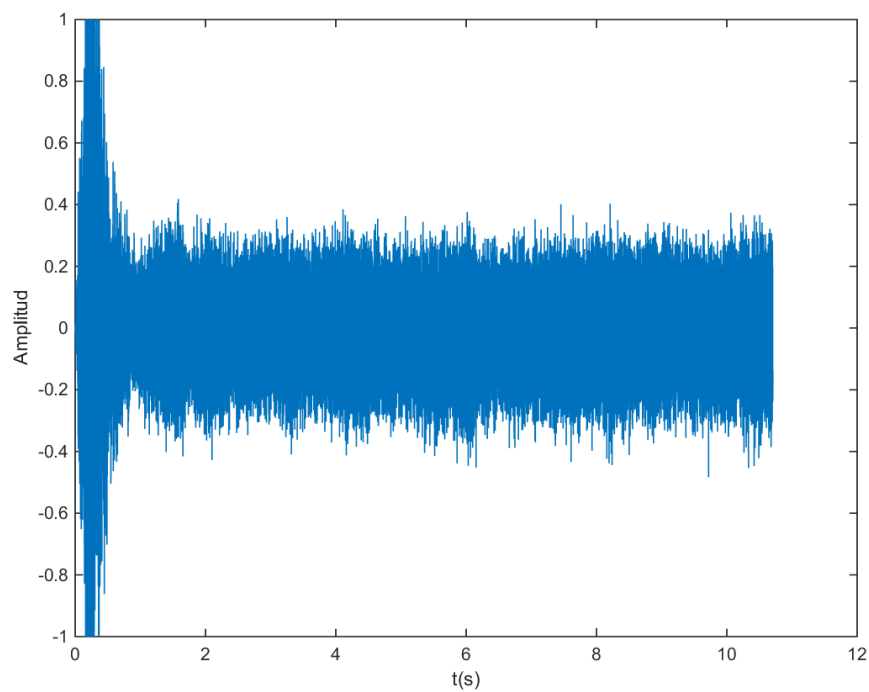


Figura 11. Muestra de sonido de la máquina funcionando con agua.

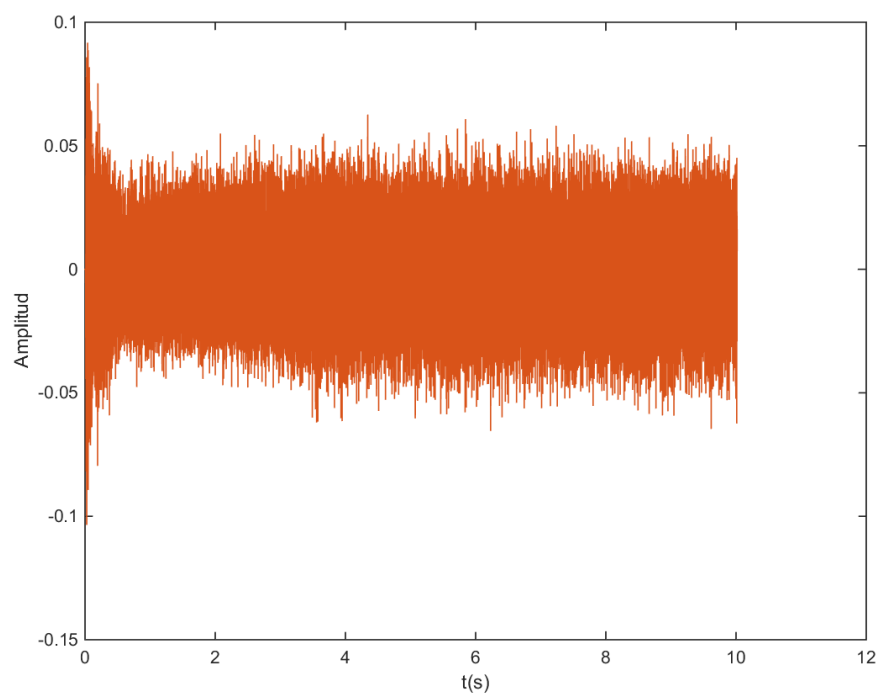


Figura 12. Muestra de sonido de la máquina funcionando sin agua.

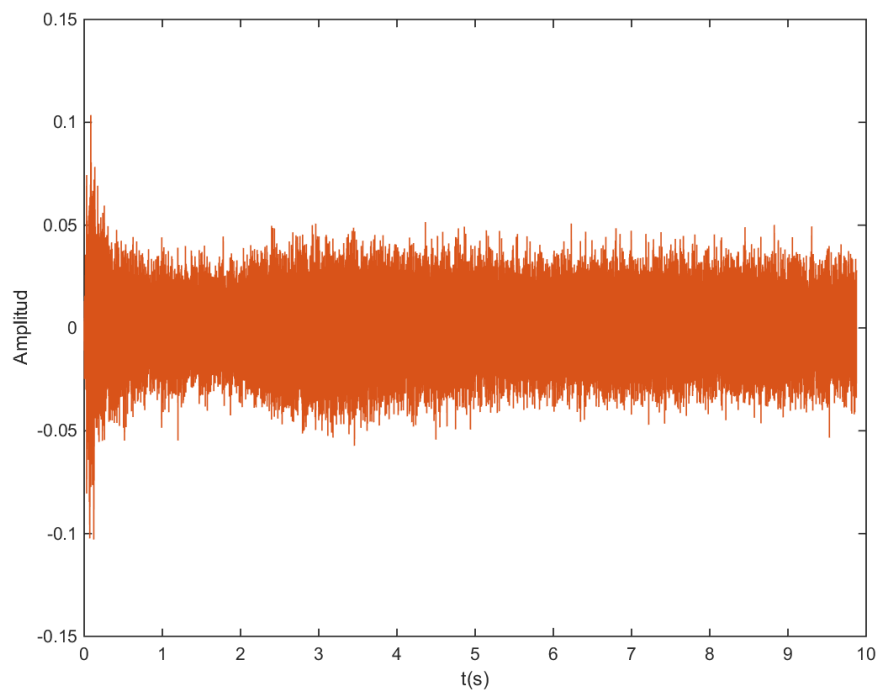


Figura 13. Muestra de sonido de la máquina funcionando sin agua.

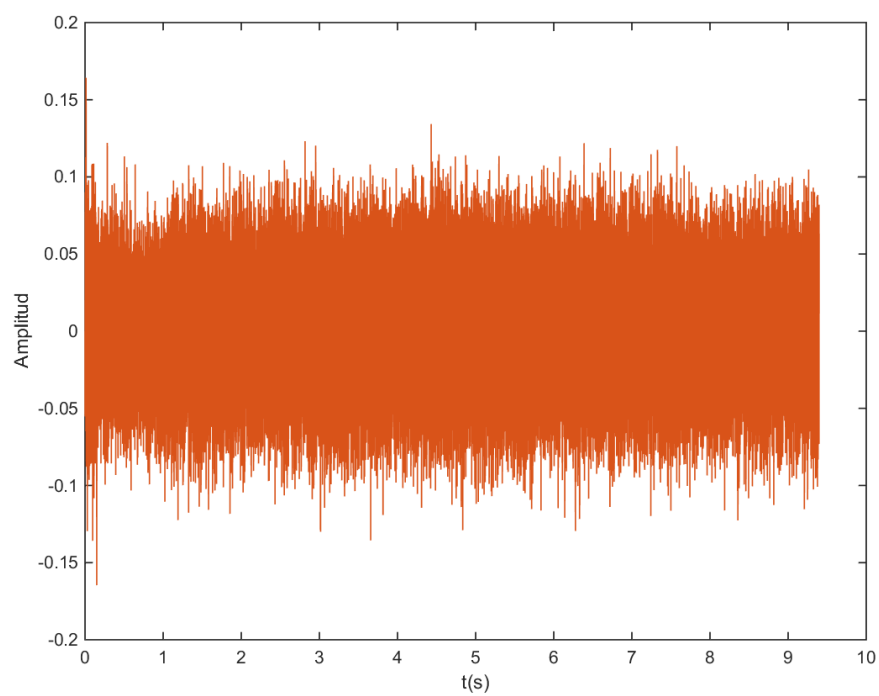


Figura 14. Muestra de sonido de la máquina funcionando sin agua.

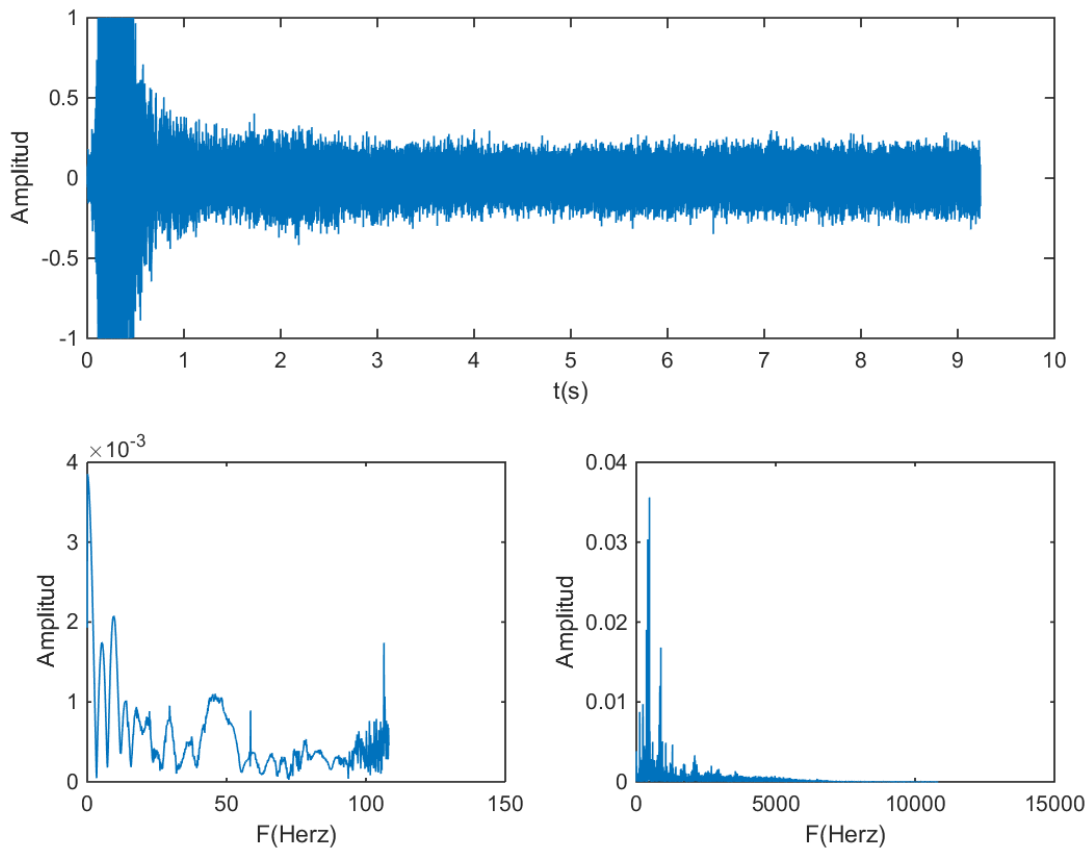
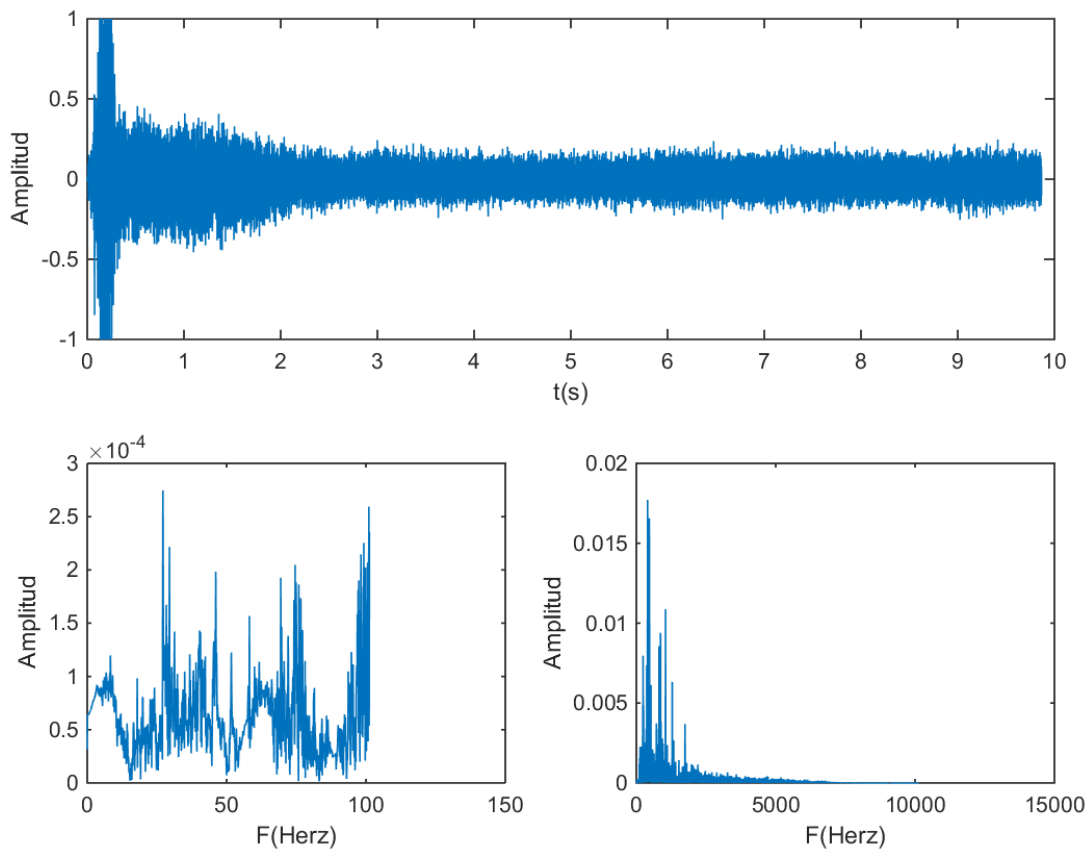


Figura 15. A) Muestra de sonido en el dominio del tiempo, en operación con agua,
 B) transformada rápida de Fourier (FFT) en la banda de los primeros 100 Hertz
 C)FFT de la banda completa.



*Figura 16. A) Otra muestra de sonido en el dominio del tiempo, en operación con agua,
 B) transformada rápida de Fourier (FFT) en la banda de los primeros 100 Hertz
 C)FFT de la banda completa.*

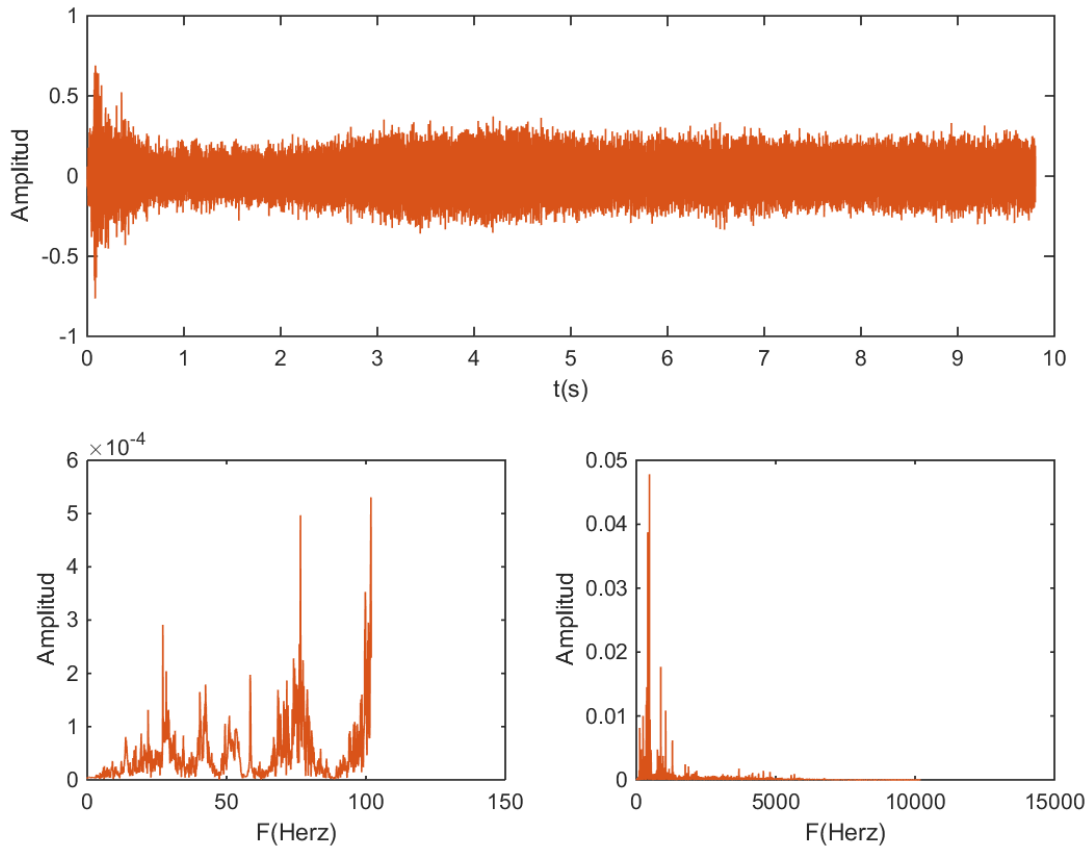
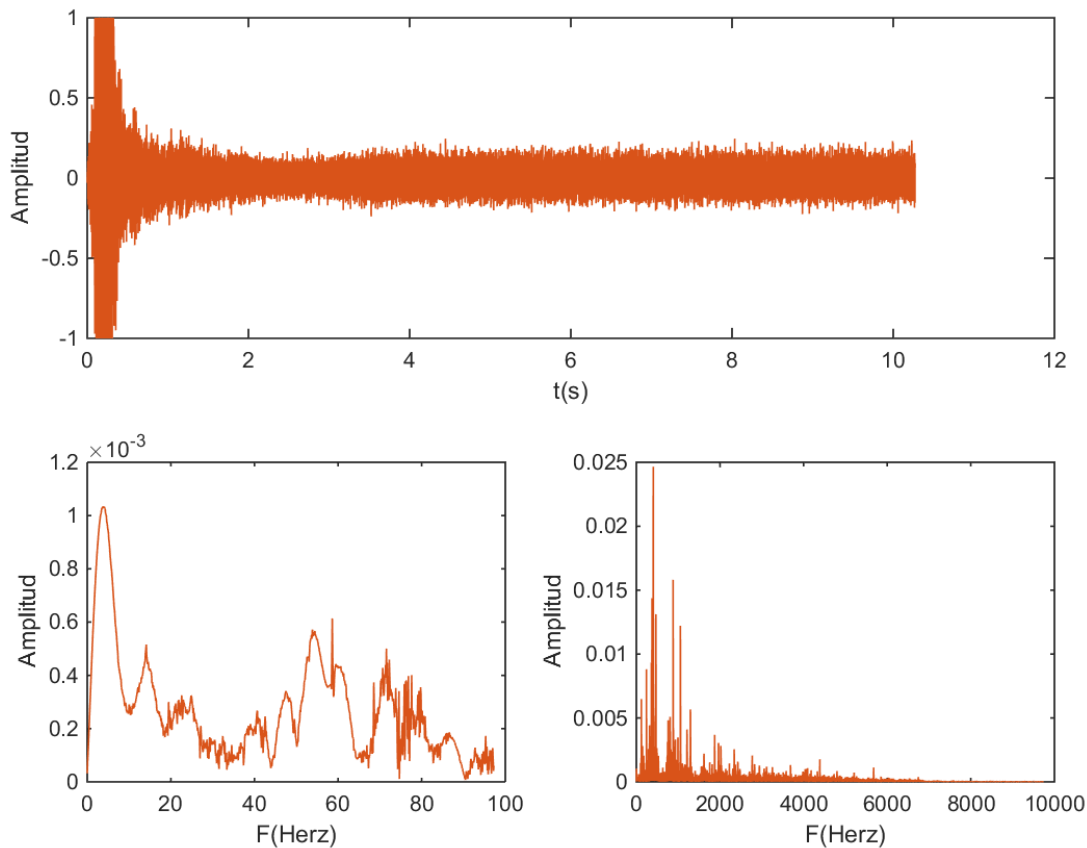


Figura 17. A) Muestra de sonido en el dominio del tiempo, en operación sin agua, B) Transformada rápida de Fourier (FFT) en la banda de los primeros 100 Hertz C) FFT de la banda completa.



*Figura 18. A) Otra muestra de sonido en el dominio del tiempo, en operación sin agua,
 B) transformada rápida de Fourier (FFT) en la banda de los primeros 100 Hertz
 C)FFT de la banda completa.*

Como se mencionó antes, lo primero que se hizo fue el análisis en el dominio de la frecuencia, el cual se realizó en *Matlab*. El primer método utilizado consistió en la conversión de la señal al dominio de la frecuencia por medio la transformada rápida de Fourier, o FFT, con el fin de identificar en dónde se concentraban las componentes de mayor amplitud de la señal y observar si había forma de usar otros métodos como el cálculo de la densidad espectral o la identificación de picos en la señal (figura 15,16, 17, y 18). En cada figura se puede observar una muestra, con agua

en color azul o sin agua en color naranja, con su respectiva FFT. Como se puede apreciar en las³⁴ gráficas, en el dominio de la frecuencia no se encontraron diferencias o características, que permitieran identificar si la bomba estaba trabajando con el suministro de agua conectado o si estaba trabajando sin el suministro de agua.

Después de obtener los resultados del análisis en el dominio de la frecuencia, se realizó un análisis en el dominio del tiempo. Como se puede observar en las figuras 19, 20, 21 y 22, cuando la bomba tiene agua (lo que corresponde a las gráficas en color azul) produce un ruido fuerte durante el arranque o periodo transitorio, y su amplitud baja considerablemente en el estado estable. Este comportamiento se debe al alto par resistente ocasionado por la presencia del agua en la bomba, lo que implica que su motor tenga que hacer un gran esfuerzo en el momento del arranque. Al comparar este comportamiento con el de la bomba cuando no hay agua presente (como se muestra en las gráficas en color naranja), se puede observar que la intensidad del ruido en el estado transitorio es menor cuando la bomba arranca sin el suministro de agua. Además, al realizar la observación y análisis de las señales en el dominio del tiempo, se encontró que la duración promedio del periodo transitorio para la mayoría de las señales es de alrededor de 2.5 s. Este tiempo se utilizó como base para delimitar el fin del transitorio y el inicio del régimen permanente para todas las señales. Además, el hecho de mantener el tiempo de transitorio como un valor fijo facilitó la implementación de un algoritmo para la extracción de las características de las señales.

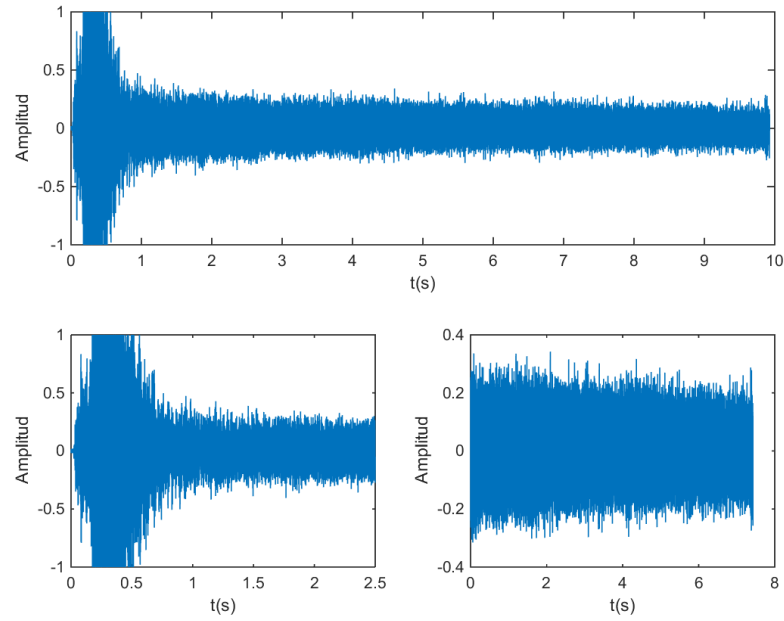


Figura 19. Muestra de sonido funcionando con agua (azul), separada en estado transitorio y permanente respectivamente.

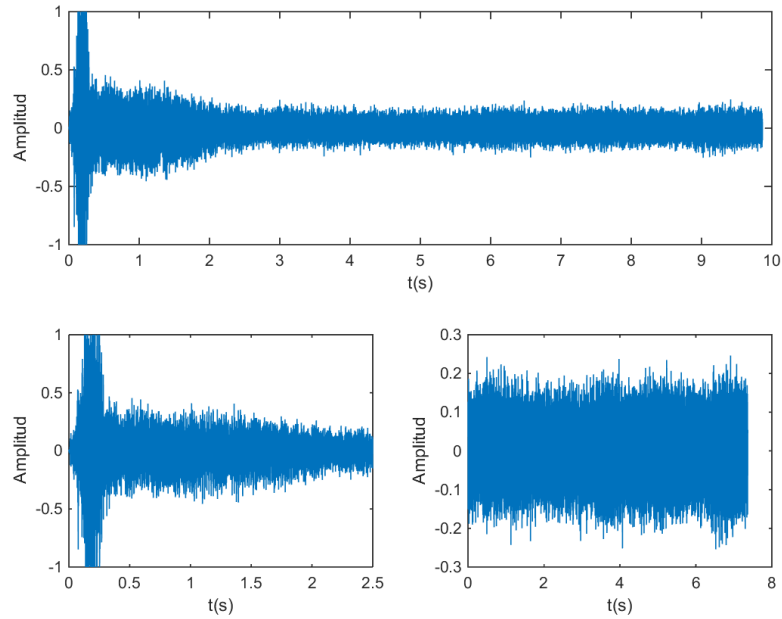


Figura 20. Muestra de sonido funcionando con agua (azul), separada en estado transitorio y permanente respectivamente.

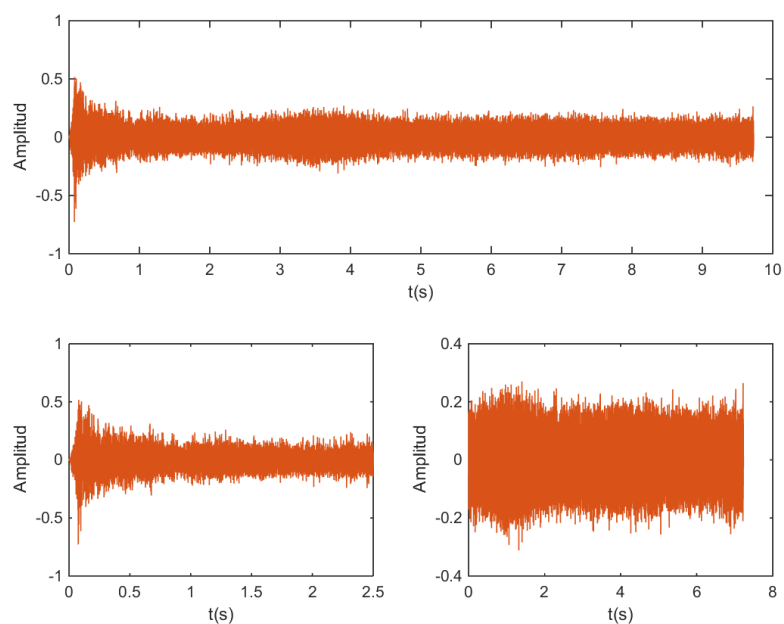


Figura 21. Muestra de sonido funcionando sin agua (naranja), separada en estado transitorio y permanente respectivamente.

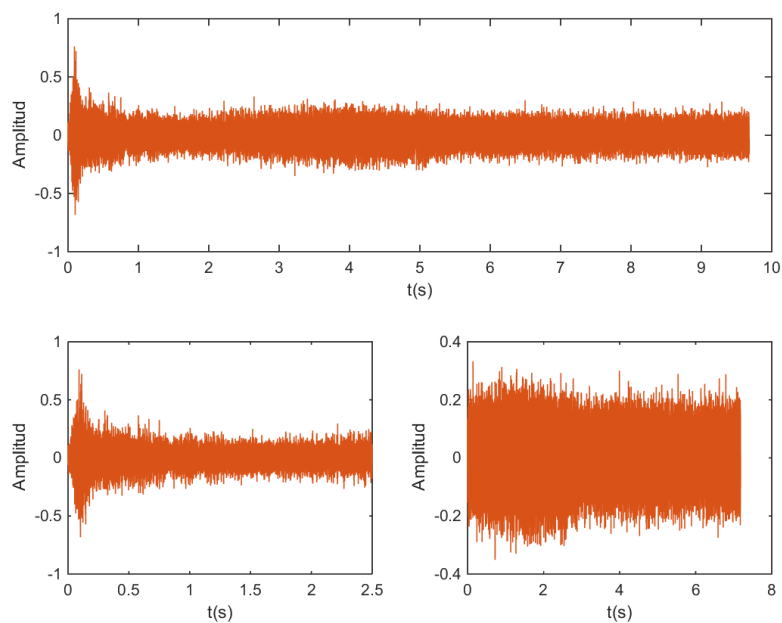


Figura 22. Muestra de sonido funcionando sin agua (naranja), separada en estado transitorio y permanente respectivamente.

Ya que el objetivo del proyecto es identificar una característica en las señales de sonido que permita distinguir entre el estado de funcionamiento con agua y el estado de funcionamiento sin agua, se buscó hacer una clasificación de las muestras con el fin de identificar en ellas un patrón que condujera a la identificación del comportamiento. Para esto, se consideraron las siguientes opciones:

- Clasificar las señales con base en su valor máximo.
- Clasificar las señales por medio su valor eficaz (o valor RMS).
- Clasificar las señales con base en la comparación entre el valor eficaz de su régimen permanente y el valor eficaz del régimen transitorio.
- Clasificar las señales con base en el cociente entre el valor eficaz de su régimen permanente y el valor eficaz del régimen transitorio.

Clasificación de las señales con base en su valor máximo: Se compararon los valores máximos de todas las muestras obtenidas y se hizo una correlación entre estos valores máximos y los dos estados posibles de operación. Aunque hubo algunos hallazgos interesantes que permitían ver una ligera relación entre el valor máximo de la señal y el estado de operación de la bomba, también se pudo observar que en la mayoría de las señales obtenidas cuando la máquina trabajó con agua, su valor máximo tendía a ser 1 (uno), como se muestra en la figura 23. Este valor de 1 puede ser ambiguo (y es muy probable que así sea), pues, como el software normaliza la señal, ese es el mayor valor posible. Por lo tanto, un valor de estos puede corresponder a una señal saturada, como la que se muestra en la figura 20. Adicionalmente, a pesar de que los resultados obtenidos fueron aceptables al clasificar las señales con base en su valor máximo, se decidió descartar este método

debido a que presenta muy alta sensibilidad al ruido externo. De hecho, si se presenta algún³⁹ ruido por fuera, en el circuito electrónico o en la misma máquina, al utilizar un solo valor de la señal, la posibilidad de que el ruido sea el que se detecte como valor máximo es bastante alta.

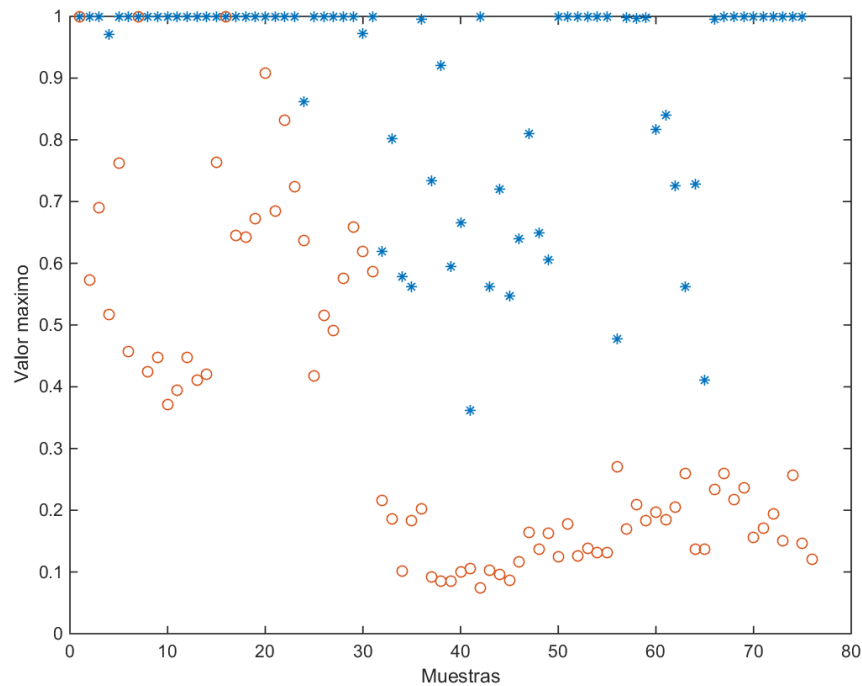


Figura 23. Valores maximos de la señal con agua “”, valores maximos de la señal sin agua “o” VS el numero de las muestras.*

Como se observa en la Figura 23, las muestras con agua, que son las que están identificadas con un asterisco (*), tienden a ser mayores que las muestras sin agua, que son las marcadas con un círculo (°). Esto se debe a que la intensidad del sonido en las muestras de la máquina funcionando con agua son mayores que su contraparte sin agua, por lo tanto, las muestras tomadas con la bomba con agua van a tender a saturar la señal o simplemente ser mayores en la gran mayoría de casos.

Cálculo del valor RMS de la señal completa: Debido a las limitaciones mencionadas al⁴⁰ clasificar las señales con base en su valor máximo, se optó por la alternativa de mirar su valor eficaz o valor RMS, ya que este valor está relacionado con su potencia sonora, la cual, a juzgar por la identificación que hace el personal experto, resulta ser un parámetro de gran interés en la identificación de las fallas de las bombas de vacío. Como se sabe de la teoría de circuitos eléctricos, el valor eficaz de una señal periódica de voltaje $v(t)$, con período T , está dado por la raíz cuadrada del valor promedio del cuadrado de la señal, según lo muestra la siguiente expresión:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (1)$$

Con base en esta expresión, se realizaron los cálculos del valor eficaz en *Matlab*, y con ellos se construyó una nueva gráfica, cuyos resultados fueron los siguientes:

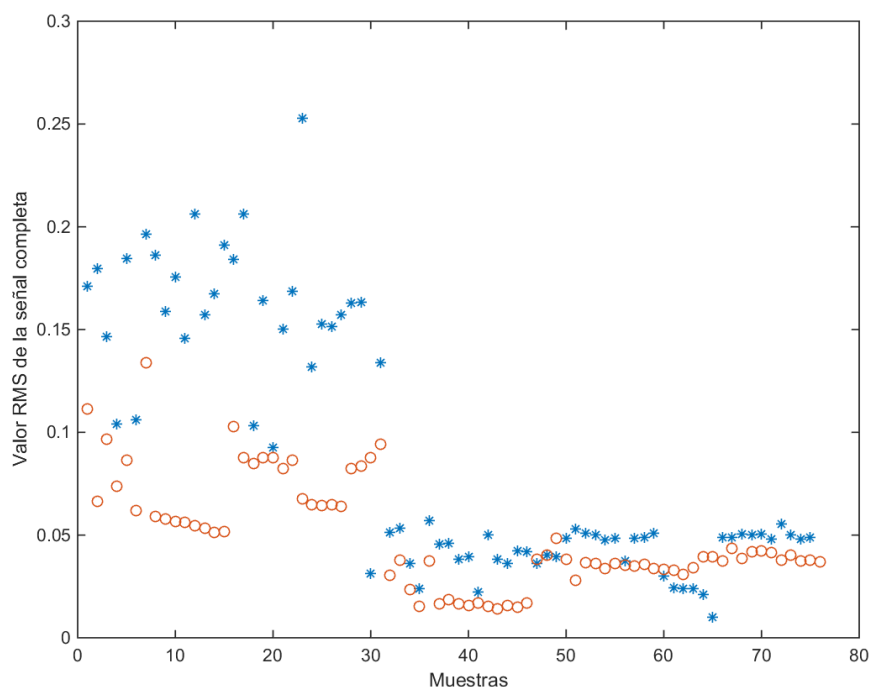


Figura 24. Valor RMS calculado con la señal completa con agua “”, sin agua “o” VS el número de las muestras.*

En la Figura 24 se pueden observar dos grupos de muestras (en estas muestras se usó un menor valor de amplificación para evitar la saturación de la señal). Además de poder distinguir entre estos dos grupos, también es posible diferenciar las muestras tomadas cuando la bomba operó con agua (marcadas con asterisco) y las muestras cuando la bomba funcionó sin agua (marcadas con círculo). Si se comparan estos resultados con los obtenidos cuando la amplificación era de 24 dB (muestras desde la 0 hasta la 30), puede notarse que allí los resultados facilitaban más la identificación del estado de operación de la bomba, mientras que, si se observan las muestras con amplificación de 12db (muestra número 31 y siguientes), la diferencia en la operación es menos evidente. Por esta razón, se pensó en hacer una evaluación de cada señal mediante la comparación del valor RMS de su régimen permanente con el valor RMS de su período transitorio.

Clasificación de las señales con base en la comparación entre el valor eficaz de su régimen permanente y el valor eficaz del régimen transitorio: Al observar rigurosamente las muestras de sonido, una característica que destacaba en ellas era que cuando la bomba funcionaba con agua dichas muestras eran más ruidosas al arrancar. Al parecer, esto se debía al esfuerzo que necesitaba hacer el motor para vencer la gran inercia del agua que estaba presente en este momento en el sistema. Este hecho dio pie para pensar en dividir cada una de las señales en dos partes: la correspondiente al estado transitorio y la del régimen permanente. En un principio, al separar las señales de esta manera, se pensó en mirar sólo el régimen transitorio para buscar un patrón que permitiera identificar los casos en los que se tiene el funcionamiento de la bomba con agua o sin agua. Al hacerlo, se observaron diferencias mayores que cuando se atendió al simple dato del valor eficaz de la señal completa, y esto dio resultados parecidos a los de la Figura 24, aunque se encontraron diferencias más notables entre las muestras tomadas con la bomba trabajando con agua y trabajando sin agua.

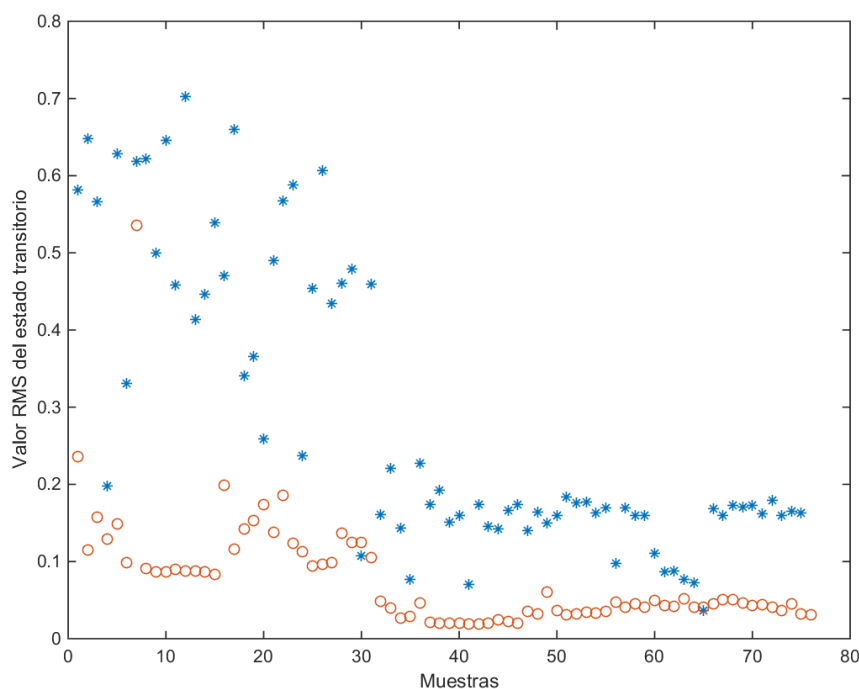


Figura 25. Valores RMS del estado transitorio con agua “”, sin agua “o” VS el número de las muestras.*

En la Figura 25 se muestran los resultados del cálculo del valor RMS de la porción correspondiente al régimen transitorio de cada señal. Como puede verse, esta vez es más evidente que hay una diferencia entre los valores correspondientes al funcionamiento con agua y al funcionamiento sin agua. Con base en estos resultados, podría trazarse una línea que separara los valores obtenidos para la operación de la bomba con agua de los de la operación de la bomba sin agua, y con esa línea se definiría un criterio para determinar el estado de operación de la bomba.

Los métodos mencionados anteriormente en los que se analizó la señal con respecto al tiempo aportaron resultados importantes para el proyecto ya que se pudo observar e identificar la diferencia entre el funcionamiento de la máquina cuando tiene agua y cuando no tiene agua. Podría

pensarse que con esos resultados es posible implementar un sistema para la identificación del⁴⁴ estado de la máquina, sin embargo, la diferencia entre unos y otros resultados no se consideró suficientemente clara como para implementar el sistema. Por esta razón, se decidió contemplar el uso de otros métodos que pudieran arrojar mejores resultados.

Ya que se estaba trabajando en el dominio del tiempo, era necesario evaluar la forma como evolucionaba la señal a medida que el tiempo transcurría. En este sentido, se presentó una primera propuesta, que consistió en mirar la diferencia entre el valor RMS en estado transitorio y RMS en estado permanente. Esta idea fue similar a la utilizada al principio, cuando el análisis se concentró en la identificación de los valores máximos de la señal, sólo que ahora se decidió utilizar la diferencia entre el valor RMS en estado transitorio y el valor RMS en estado permanente. Los resultados obtenidos al hacer esta diferencia se graficaron y son los que se muestran en la figura 26.

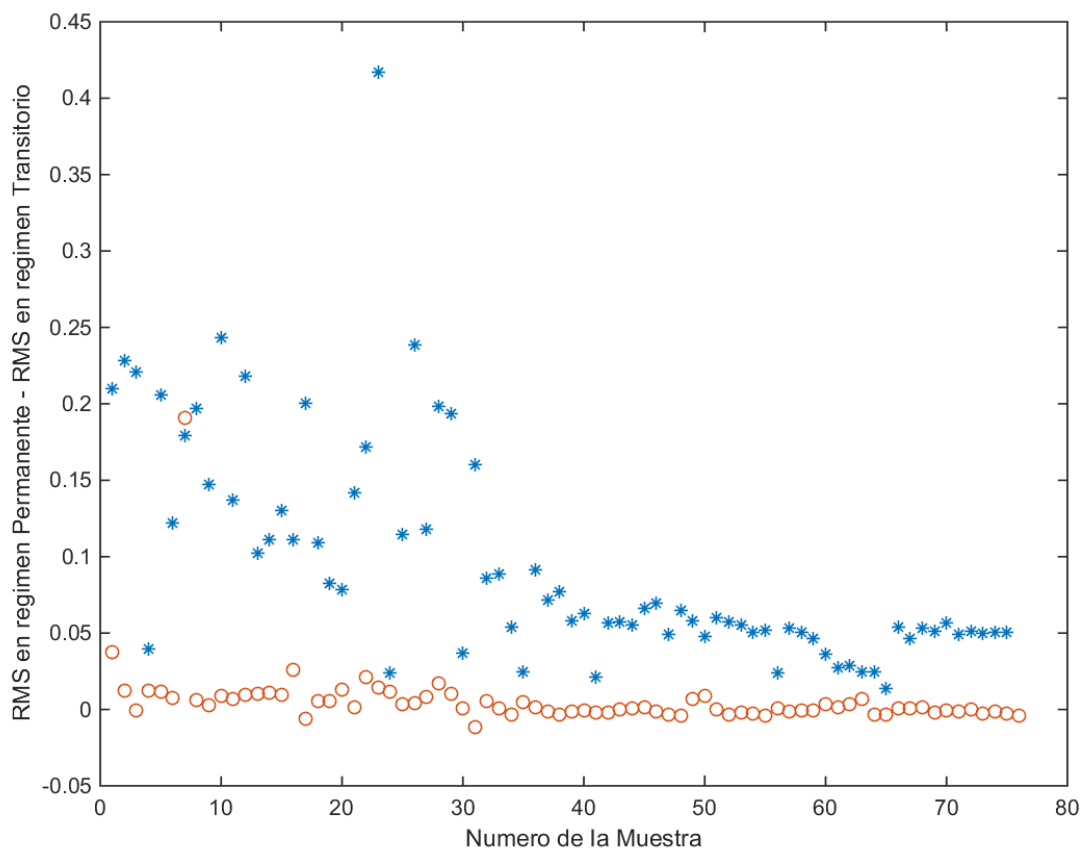


Figura 26. Diferencia entre el valor RMS permanente y el RMS transitorio, con agua “”, sin agua “o” VS el número de las muestras.*

Esta fue la primera vez que se obtuvieron resultados tan claros en el proyecto. Si se observa la Figura 26, los voltajes RMS de las muestras correspondientes a la bomba sin agua tienen valores cercanos a cero; esto se debe a que, como se había mencionado antes, cuando la bomba arranca sin que haya agua en el sistema, ella no tiene que hacer un esfuerzo demasiado grande para empezar a girar, lo cual da como resultado un pico de arranque pequeño o prácticamente imperceptible, y adicionalmente se mantiene una intensidad estable a lo largo de toda la gráfica, como puede verse en la muestra de la Figura 21.

Clasificación de las señales con base en el cociente entre el valor eficaz de su régimen permanente y el valor eficaz del régimen transitorio: Una conclusión importante a la que se llegó en este punto fue que cuando la máquina funcionaba con agua la intensidad de la señal en el régimen transitorio es mayor que la del régimen permanente, lo cual significaba que el valor RMS del estado transitorio cuando la bomba funcionaba con agua sería mayor que el valor RMS del estado transitorio al trabajar sin agua y también sería mayor que el valor de cualquier estado permanente. Los resultados presentados en la Figura 26 fueron muy ilustrativos, pues el hecho de comparar los valores RMS de las dos partes de la señal permitía identificar si la máquina estaba funcionando sin agua o con agua. Sin embargo, se pensó en comparar esos dos valores RMS mediante un cociente entre ellos, pensando en aprovechar la ventaja de lograr una especie de normalización de los valores a través del cálculo de dicho cociente. Esta operación ofrece, además, la ventaja de mostrar resultados sin depender del nivel de amplificación de la señal, con lo cual todas las señales capturadas serían evaluadas de manera equitativa. Con esto en mente, se decidió calcular la relación entre los valores RMS del régimen transitorio y el régimen permanente para mirar qué tanto permitían diferenciar los dos estados de operación de la bomba de vacío. La relación obtenida de esta manera se indicó por medio una constante K, que se definió como se indica a continuación:

$$K = \frac{RMS \text{ en regimen permanente}}{RMS \text{ en regimen transitorio}} \quad (2)$$

Al calcular la constante K para cada muestra se obtuvieron los resultados que pueden verse en la figura 27.

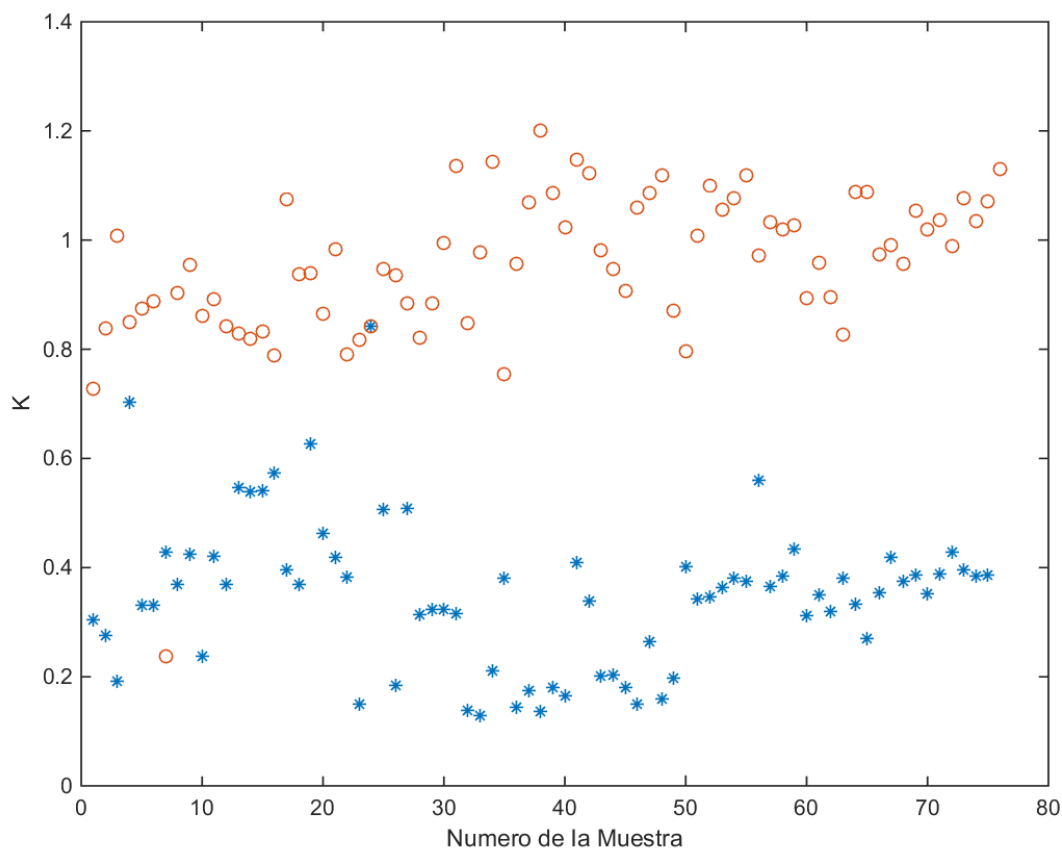


Figura 27. El valor de la constante K para muestras con agua “*”, sin agua “o” VS El número de las muestras.

Como se puede observar en la Figura 27, los valores de K correspondientes a la máquina funcionando con agua tienen los menores valores, puesto que en ese caso el valor RMS del transitorio es mayor que cuando la bomba no tiene agua. En la Figura 27 se puede ver que la mayoría de los valores de K de las muestras correspondientes a la bomba con agua tienen valor inferior a 0,6, mientras que los valores de K de las muestras correspondientes a la bomba sin agua tienen valores superiores a 0,7. Ya que con este cálculo se logra una diferenciación relativamente clara, esta información se puede utilizar para el diseño de un sistema de identificación del estado

de funcionamiento de la máquina. Además, por el hecho de haber normalizado los datos, los⁴⁸ resultados se vuelven más robustos al no depender de la amplificación o atenuación que pueda sufrir la señal original; de hecho, esta normalización facilita la implementación de un algoritmo en distintos lenguajes y herramientas.

En esta sección se pretende dar una explicación a la lógica utilizada en los algoritmos implementados para el análisis de la base de datos hasta este punto. La herramienta utilizada para implementar los algoritmos fue *Matlab*, que posee su propio lenguaje de programación conocido como lenguaje M, el cual es muy similar a C. Aun así, en esta sección se realizarán las respectivas explicaciones de los algoritmos con sus respectivos diagramas de flujo y el pseudocódigo.

A lo largo del proyecto se desarrollaron y utilizaron varios algoritmos. A continuación, se explicará la lógica en la que se basan los algoritmos de: Lectura de datos, extracción de información y Recorte del audio, y cálculo del valor eficaz, que fueron los más relevantes para el proyecto.

- **Algoritmo de lectura de datos**

Como ya se ha dicho, los datos se obtuvieron a través de un micrófono electret que se conectó a la entrada de audio de un computador. Las muestras se guardaron como archivos de audio en formato .wav, y recibieron nombres como OP_sin_agua_1.wav (para las correspondientes a la bomba sin agua) o OP_con_agua_1.wav (para las correspondientes a la bomba con agua). El diagrama de flujo de la subrutina de lectura de los datos fue el siguiente:

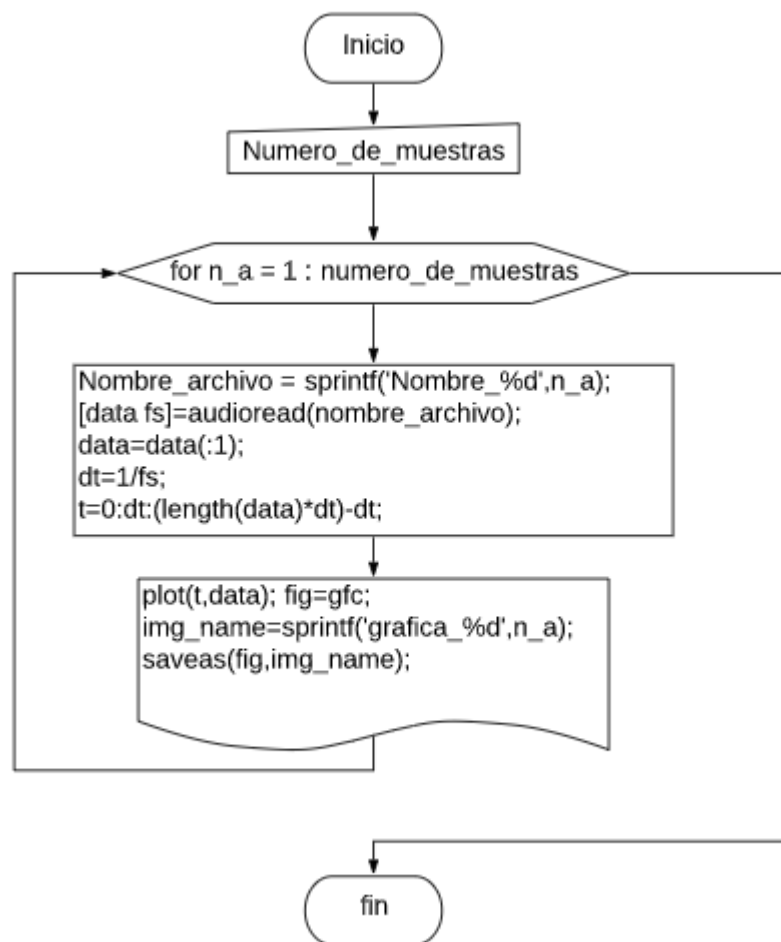


Figura 28. Diagrama de flujo del proceso de lectura de datos.

Este algoritmo permite hacer una lectura de todos los archivos de audio dentro de una carpeta con la condición de que el nombre de esos archivos inicie con los mismos caracteres y termine con un número consecutivo, como los del siguiente ejemplo: OP_sin_agua_1, OP_sin_agua_2, OP_sin_agua_3, ..., OP_sin_agua_N. Por lo tanto, como se puede observar en el diagrama de flujo, se necesita especificar el número de muestras y el nombre bajo el cual están organizadas. Este nombre se define en la variable *nombre_archivo*, en la cual por medio del comando *sprintf* se crea un vector de caracteres, con el fin de cambiar el número en la variable tipo caracter

nombre_archivo, de manera que permita cargar cada archivo a medida que el ciclo *for* hace su⁵¹ conteo hasta el número total de muestras indicado en la variable *Numero_de_muestras*.

En este caso el diagrama de flujo de *Lectura de datos* no tiene un procedimiento o análisis en su lógica; éste sólo representa un algoritmo que carga la base de datos, archivo por archivo, en una variable llamada *data*, y guarda la frecuencia de muestreo en la variable *fs* por medio del comando *audioread* de Matlab. Después se extrae sólo un canal de audio de la señal que está guardada en la matriz *data*, convirtiéndola así en un vector, con el cual eventualmente se realizarán todas las operaciones y análisis en el futuro.

En el caso específico de Matlab, si se quiere graficar el vector *data*, con la línea “*plot(data);*” dicho vector será graficado con respecto a la posición y número de muestras dentro del vector *data*, así que, para graficarlo con respecto al tiempo, se utiliza la variable *fs* o la frecuencia de corte que arroja la función *audioread*. Para calcular el equivalente al tiempo de cada posición en el vector *data* y con el equivalente de tiempo por muestra de la señal, se crea un vector *t* del mismo tamaño del vector *data*. De ese modo, si se grafica el vector *data* con respecto a *t*, “*plot(t,data);*”, se obtiene la gráfica de la señal con respecto al tiempo. Finalmente, se utiliza nuevamente un vector de caracteres y el comando de Matlab, “*saveas*”, para guardar la figura actualmente graficada, con el fin de almacenar en la carpeta del proyecto cada grafica con su respectivo número.

- **Algoritmo de cálculo del valor eficaz y el recorte de la señal.**

El diagrama de flujo de la Figura 28 fue utilizado para hacer todos los algoritmos de análisis, ya que, en palabras simples, nos permitía cargar, observar, procesar, entre otras cosas todos los

archivos de la base de datos uno por uno, con la opción de agregar funciones al algoritmo que⁵² nos permitan extraer los resultados de los procesamientoos o modificar los mismos archivos. Por ejemplo, el siguiente diagrama de flujo fue la base para un algoritmo en el que se realizó el recorte de la señal y unos cálculos adicionales; y además está basado en la lógica del diagrama de flujo de *Lectura de datos*.

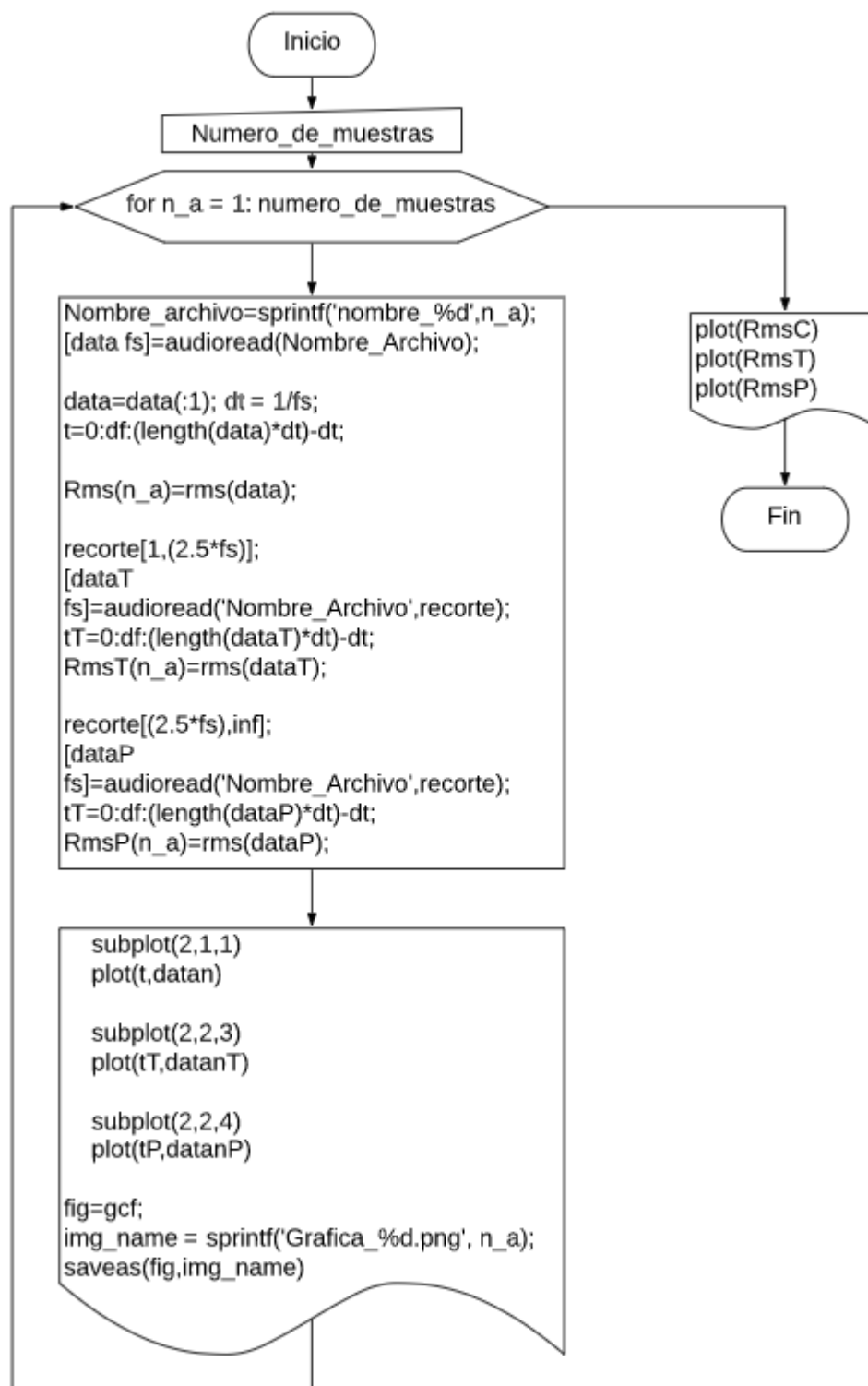


Figura 29. Diagrama de flujo de la lógica para el cálculo del valor eficaz y el recorte de la señal.

En el diagrama de flujo mostrado en la Figura 29 se utilizó la misma estructura de que en el de *lectura de datos* mencionado anteriormente. En este caso se mostrará cómo se obtuvo y se extrajo la información de la base de datos y adicionalmente se explicará el método utilizado para hacer el recorte de la señal.

La forma en la que se carga cada archivo de audio es la misma utilizada en la lectura de datos, de manera que también debe cumplirse la condición de que el nombre de esos archivos inicie con los mismos caracteres y termine con un número consecutivo, como se indicó anteriormente mediante un ejemplo. Por lo tanto, también es necesario especificar la cantidad de datos y el nombre de los archivos. En este caso, dentro del ciclo *for* se realiza el cálculo de tres valores RMS: el del transitorio de la señal, el del régimen permanente de la señal y el de la señal completa.

El archivo de audio de la señal completa (o sea la señal que incluye el transitorio y el régimen permanente) se guarda en el vector *data*. A ese archivo se le calcula el valor eficaz y el resultado se guarda en un nuevo vector llamado *RmsC*, de la siguiente manera: El valor de la muestra #1 es el elemento 1 del vector *RmsC*, el valor de la muestra #2 es el elemento 2 del vector *RmsC*, y así sucesivamente hasta obtener un vector como el del siguiente ejemplo: [0.7, 0.95, 0.82,].

Matlab permite procesar matrices y vectores de distintas formas, lo cual significa que existen distintos métodos para separar o recortar el vector que contiene la señal. Como ya se había determinado que la duración del transitorio estaba alrededor de 2,5 segundos, este tiempo se usó como criterio para segmentar la señal en los dos intervalos de interés: el régimen transitorio

(correspondiente a los primeros 2,5 segundos) y el régimen permanente (compuesto por los⁵⁵ valores posteriores a los 2,5 segundos). La solución que se dio fue la de utilizar el comando *audioread* de Matlab para cargar solo una parte del archivo de audio original. La parte del audio que se desea cargar está definida por un vector que contiene dos valores correspondientes a la posición desde donde se carga y la posición hasta la que se carga el vector correspondiente al archivo de audio. Es importante tener en cuenta que para el comando *audioread* la primera posición del archivo siempre será “1”. Como la longitud del vector depende del tamaño del archivo, la última posición puede indicarse con “inf”, como se muestra en el siguiente ejemplo: *[data,fs]=audioread('nombre_del_archivo',[10 100]);*, esta línea carga desde la posición 10 a la posición 100 del vector al que correspondería la muestra de audio, dando como resultado un vector ‘data’ de 90 posiciones.

Con este proceso se ha guardado la señal en la variable *data*. A continuación, se calcula a cuántas muestras corresponden 2,5 segundos. Para esto se crea una variable llamada *recorte* en la que se asignan los límites del segmento de la señal que se desea almacenar. Para determinar cuántas muestras del vector representan los 2.5 segundo del régimen transitorio, simplemente se multiplicó 2,5 por la frecuencia de muestreo de la señal *fs*. Este proceso dio como resultado las siguientes líneas de código:

Para el régimen transitorio “*recorte=[1,(2.5*fs)]*”

Para el régimen permanente “*recorte=[(2.5*fs),inf]*”.

Así pues, con la ayuda del comando *audioread*, y los valores de posición del vector calculados con el valor de la frecuencia de corte, se segmentó la señal en dos partes: régimen transitorio y régimen

permanente. Además de esto, se calculó el valor eficaz de cada parte y el resultado se guardó en⁵⁶ los siguientes vectores:

$RmsT$, para valores calculados solo en el régimen transitorio.

$RmsP$, para valores calculados en el régimen permanente.

Teniendo la información correspondiente a los valores eficaces de la señal en sus distintas partes, se consideraron dos opciones: exportar esta información, ya sea a Excel u otro tipo de programa, o graficar y exponer los resultados directamente en Matlab. Se consideró que sería más eficiente y rápido hacerlo directamente en Matlab, por lo tanto, en el caso de este diagrama de flujo, cuando el ciclo *for* finalice, se graficarán los valores RMS guardados en los vectores, $RmsC$, $RmsT$ y $RmsP$. En la Figura 25 se puede observar un ejemplo de los resultados que daría la implementación de esta lógica.

- Algoritmo de cálculo del valor eficaz y el recorte de la señal.

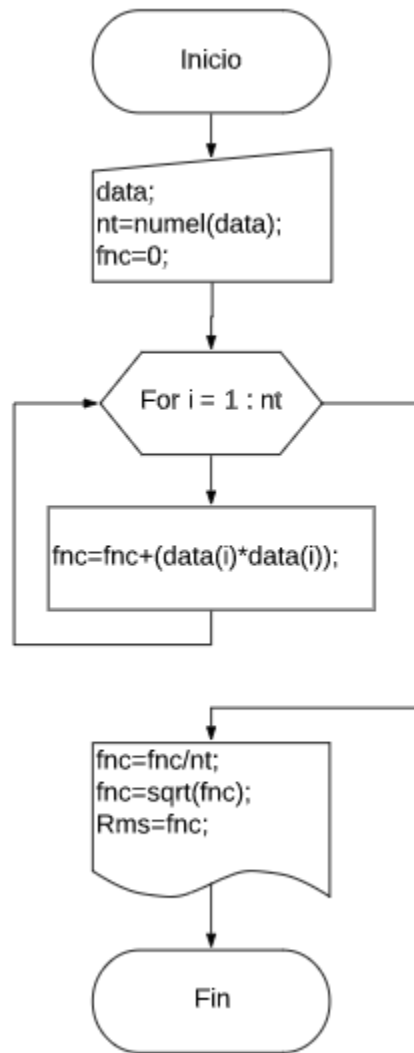


Figura 30. Diagrama de flujo para el calculo del valor eficaz o RMS.

Como fue mencionado anteriormente, se utilizó Matlab como herramienta principal a lo largo del desarrollo del proyecto. Matlab posee varias ventajas en comparación con otras herramientas y lenguajes; una de ellas consiste en que facilita el procesamiento de los archivos de audio al convertirlos en una matriz o un vector. Otra gran ventaja es que tiene una gran lista de funciones

integradas que están a la disposición del usuario a la hora de crear un algoritmo. Debido a esto,⁵⁸ si se desea implementar la solución encontrada en este proyecto en otras plataformas o lenguajes, basta con guiarse por los diagramas de flujo recientemente presentados para crear estas funciones con estas otras aplicaciones de software. En estas condiciones, la subrutina de la de la función *rms* utilizada puede ser reemplazada por la función descrita en el diagrama de flujo de la Figura 30, que describe la lógica necesaria para hallar el valor eficaz o RMS basado en la siguiente ecuación:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (1)$$

En la fórmula $v(t)$ representa el valor del vector en la posición t y la constante T corresponde al período de la señal. Esta ecuación aplica para una señal periódica en tiempo continuo. La ecuación equivalente para una señal en tiempo discreto es la siguiente:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(n)} \quad (2)$$

En el diagrama de flujo anterior se describe la lógica que se tendría que utilizar para calcular el valor RMS de un vector guardado en una variable de nombre “*data*”. En la ecuación (2), $v(n)$ representa el valor del vector en la posición n , que correspondería a $data(n)$, y la constante N corresponde al número de datos del vector. En las figuras 31 y 32 se puede observar que los resultados de la función de Matlab son prácticamente los mismos que para la función basada en el diagrama de flujo, para 20 las muestras que se utilizaron en este análisis.

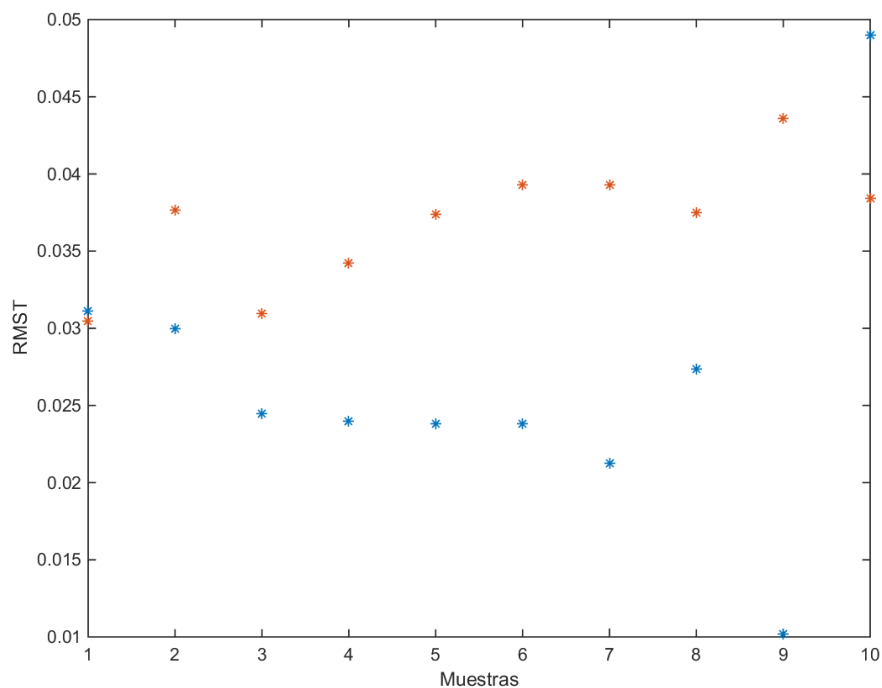


Figura 31. RMS calculado con la ecuación de valor eficaz utilizando un algoritmo basado en el diagrama de flujo de “Cálculo del Rms”.

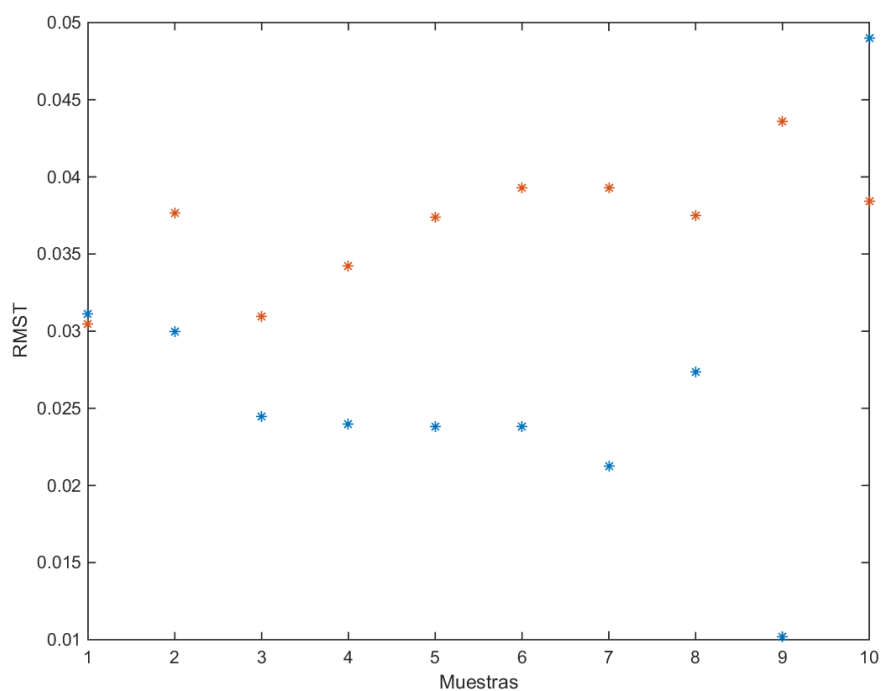


Figura 32. Valor eficaz calculado con la Función “rms” de Matlab, de distintas muestras.

A partir del diagrama de flujo mostrado en la figura 30, se desarrolló un algoritmo para el cálculo⁶⁰ del valor RMS de la señal. Con este algoritmo se hicieron pruebas con veinte muestras diferentes, cuyos resultados son los que se muestran en la figura 31. El desarrollo de este algoritmo es fundamental para la implementación del sistema sin que él dependa de una herramienta digital específica, de manera que es igualmente posible correr el algoritmo sobre una plataforma como Arduino, RaspberryPi o cualquiera otra.

Para validar la efectividad del algoritmo, se utilizó la función “*rms*” de Matlab, haciendo pruebas con las mismas veinte muestras aplicadas al algoritmo, y se obtuvieron los mismos resultados, como puede verse en la figura 32.

El trabajo realizado hasta este punto fue desarrollado tomando las muestras de operación de una sola autoclave. El propósito, sin embargo, es obtener un sistema que permita hacer un diagnóstico confiable del estado de operación de la bomba de vacío de cualquiera de las autoclaves de la misma referencia. Para verificar si la solución desarrollada da resultados aplicables a otros equipos, se tomaron muestras en una nueva autoclave y se hicieron los respectivos análisis a esas muestras. Luego de efectuar este análisis, se encontró que, nuevamente, el cálculo de la constante K permitió hacer la identificación del estado de funcionamiento de la bomba de vacío de la autoclave, ya que en este nuevo caso también se encontró que la mayoría de los valores de K menores a 0.6 corresponderían al funcionamiento de la bomba con agua, y los mayores a 0.7 al funcionamiento de la bomba sin agua. Los resultados en este caso fueron los que se muestran en la figura 33:

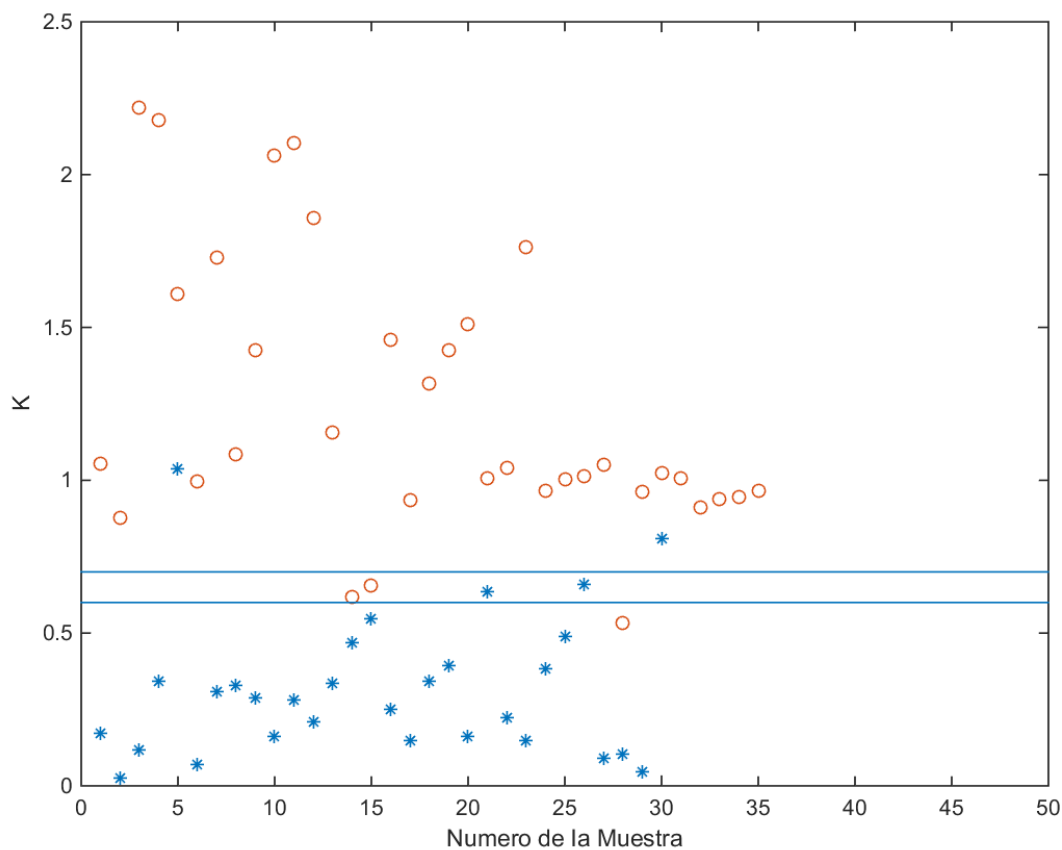


Figura 33. Valores de K de la segunda autoclave funcionando con agua, representados con un asterisco (), y valores de K de la autoclave funcionando sin agua, representados con un círculo (°) VS número de las muestras, Las dos líneas horizontales corresponden a los valores 0.6 y 0.7.*

Como se puede observar en la Figura 33, para la mayoría de las muestras (más exactamente el 80%) la ubicación en el gráfico indica correctamente el estado de operación en que se encuentra la bomba de vacío de la autoclave, puesto que la mayoría de los valores de K correspondientes a las muestras de la bomba con agua se encuentran por debajo de la línea de valor 0,6, y los valores de K correspondientes a las muestras de la bomba sin agua se encuentran por encima de la línea de valor 0,7.

Para el sistema de detección de fallas se utilizó el mismo sistema de toma de datos que se muestra en el diagrama de la Figura 3, en el que se conecta un micrófono a un computador, solo que en este caso se utilizó Matlab para clasificar las muestras de sonido. La solución propuesta fue la de crear un algoritmo que permitiera observar la muestra de sonido y que la clasificara según el funcionamiento. Este algoritmo fue implementado en una interfaz gráfica que permita clasificar de manera sencilla las muestras de sonido. En la siguiente sección de este documento se explicará qué es lo que hace cada parte de la interfaz y se indicará cómo usarla.

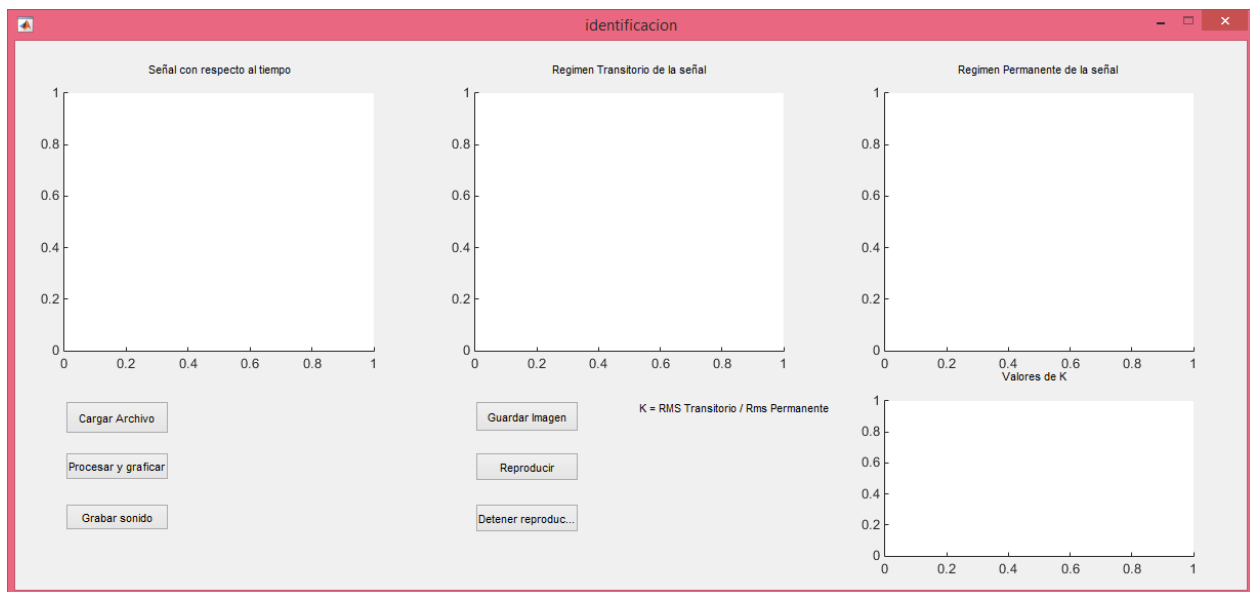


Figura 34. Interfaz gráfica.

Como se puede observar en la figura 34, la interfaz gráfica está compuesta por seis botones.⁶⁴

Estos botones son los siguientes:

- *Cargar archivo,*
- *Procesar y graficar,*
- *Grabar sonido,*
- *Guardar imagen,*
- *Reproducir,*
- *Detener reproducción*

Adicional a esto, existen cuatro gráficas en blanco en la ventana, las cuales representan: la señal completa, el transitorio de la señal, el régimen permanente de la señal y una última grafica en la que se mostrarán los valores calculados de la constante K de cada muestra que sea procesada.

Como usar la interfaz gráfica:

En esta sección se dará una explicación de cómo utilizar la herramienta de detección desarrollada en el proyecto. Primero cabe aclarar que como método de clasificación se utilizará la constante K, en vista de que este fue el que dio los mejores resultados. Para esta herramienta, el valor de K que determina la condición de operación de la bomba de vacío se definió por medio de la siguiente relación: “Operación_con_agua<0.65<=Operación_sin_agua”, lo que en otras palabras significa que si, al calcular el valor de K de la muestra actual este es menor a 0.65, se indicará que la máquina está trabajando con agua, y si este valor es mayor o igual a 0.65, la indicación será que la máquina está trabajando sin agua.

Para explicar la función de cada componente de la interfaz se separará en dos partes: la primera⁶⁵ corresponderá a la selección de la muestra de sonido y la segunda principalmente explicará los resultados entregados por el programa.

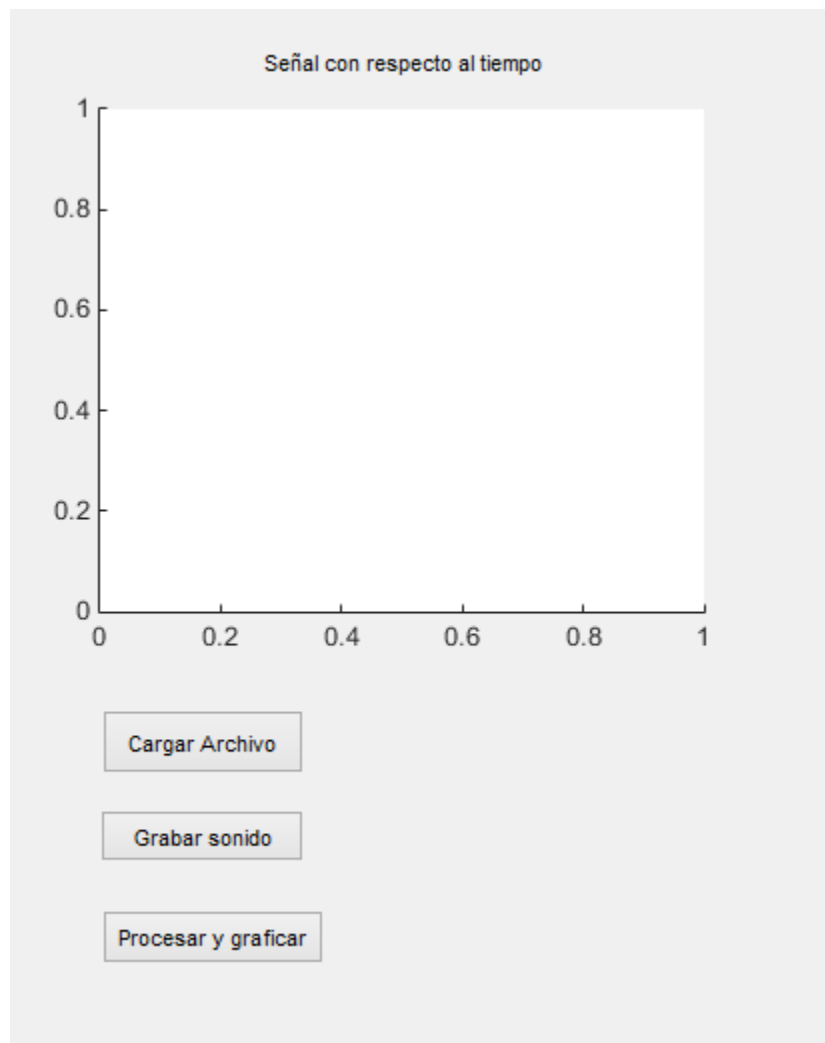


Figura 35. Parte izquierda de la interfaz gráfica.

En la parte izquierda de la interfaz, mostrada en la Figura 35, se pueden observar tres botones: “Cargar archivo”, “Grabar sonido” y, “Procesar y graficar”. Ya que lo primero que se necesita

hacer al iniciar la herramienta es decidir cómo se va a introducir la muestra de sonido, en este⁶⁶ caso se crearon dos funciones distintas.

La primera, es la correspondiente al botón *Cargar archivo*, el cual abre una nueva ventana que permitirá seleccionar un archivo de audio en formato “.wav”. Inmediatamente después de seleccionar el archivo, la señal correspondiente será graficada en la primera tabla, cuyo nombre será *Señal con respecto al tiempo*.

El segundo botón, correspondiente a *Grabar sonido*, hace que se empiece a grabar un sonido de 10 segundos a través del dispositivo predeterminado del equipo, que, en este caso, es el micrófono electret. Una vez transcurridos los diez segundos, se graficará la señal resultante en la tabla *Señal con respecto al tiempo*.

El último botón, cuyo nombre es *Procesar y graficar*, segmenta la señal en dos partes, su estado transitorio y su estado permanente, grafica cada uno de estos segmentos, calcula la constante K de esta señal, la clasifica según el valor de K y muestra el valor de K en una ventana de texto y en una de las gráficas de la interfaz.

A continuación, en la Figura 36, se mostrará una imagen de la parte derecha de la interfaz gráfica y se explicará lo que hace cada botón y lo que muestra cada tabla.

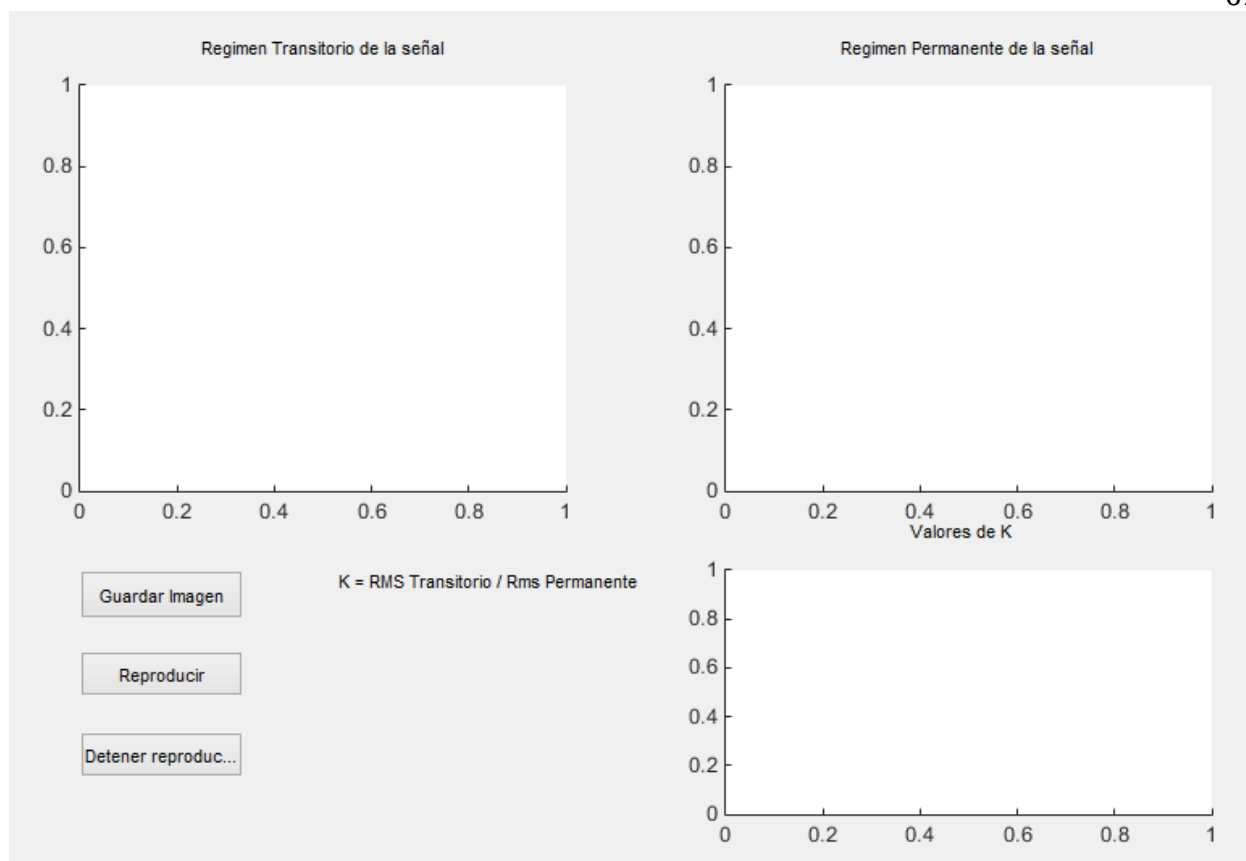


Figura 36. Parte derecha de la interfaz gráfica.

El primer botón en esta parte de la interfaz, *Guardar Imagen*, permite guardar una copia de la interfaz. Al oprimirlo, lo que muestre la interfaz en ese momento se guardará como una imagen en formato *png*; la imagen será almacenada en la carpeta desde la que se está ejecutando la interfaz.

Los últimos dos botones, *Reproducir* y *Detener Reproducción*, permiten al usuario reproducir el archivo de sonido que se encuentra graficado en la primera tabla y detenerlo en cualquier momento.

Las tres tablas que se pueden observar en la Figura 36 hacen lo que se describe a continuación: Al oprimir el botón *Procesar y Graficar*, se crearán las siguientes gráficas:

- Gráfica del estado transitorio de la muestra, mostrado en la primera tabla.
- Gráfica del régimen permanente, mostrado en la segunda tabla
- Gráfica del valor de K de la muestra actual y de las siguientes (hasta que el programa finalice), presentado en la última tabla.

A continuación, se presentarán algunos ejemplos de cómo se vería la interfaz grafica después de procesar uno o varios archivos de audio:

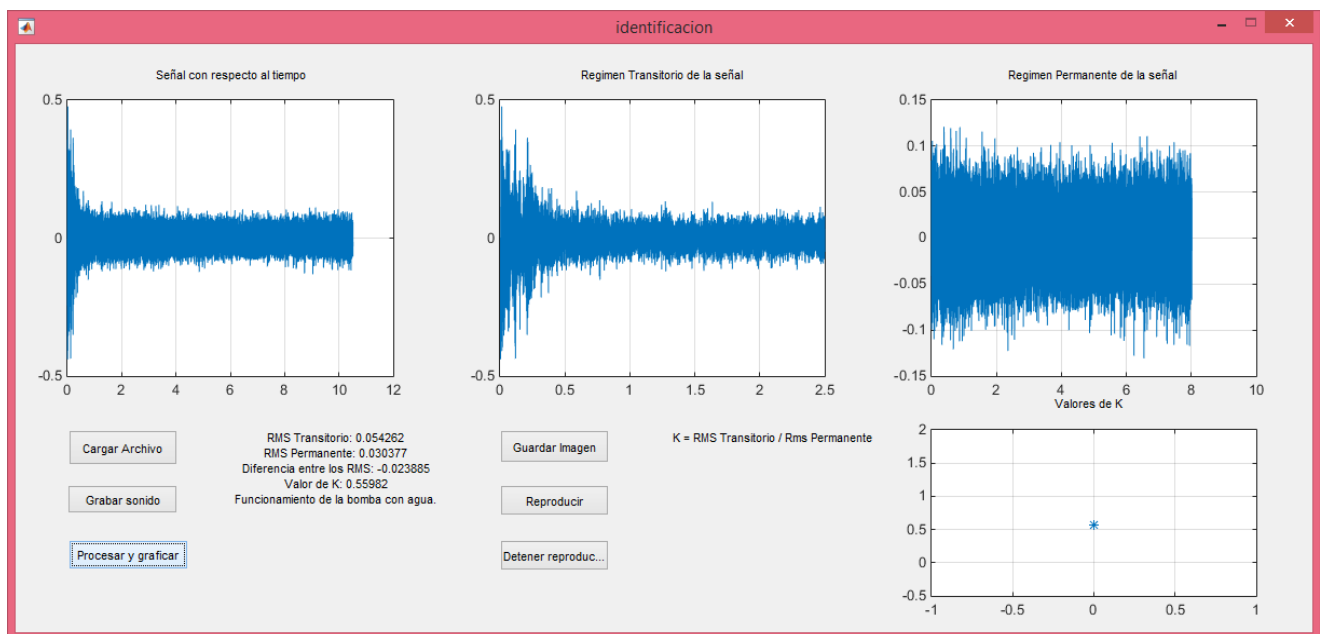


Figura 37. Interfaz con una muestra de sonido correspondiente a el funcionamiento de la bomba con agua.

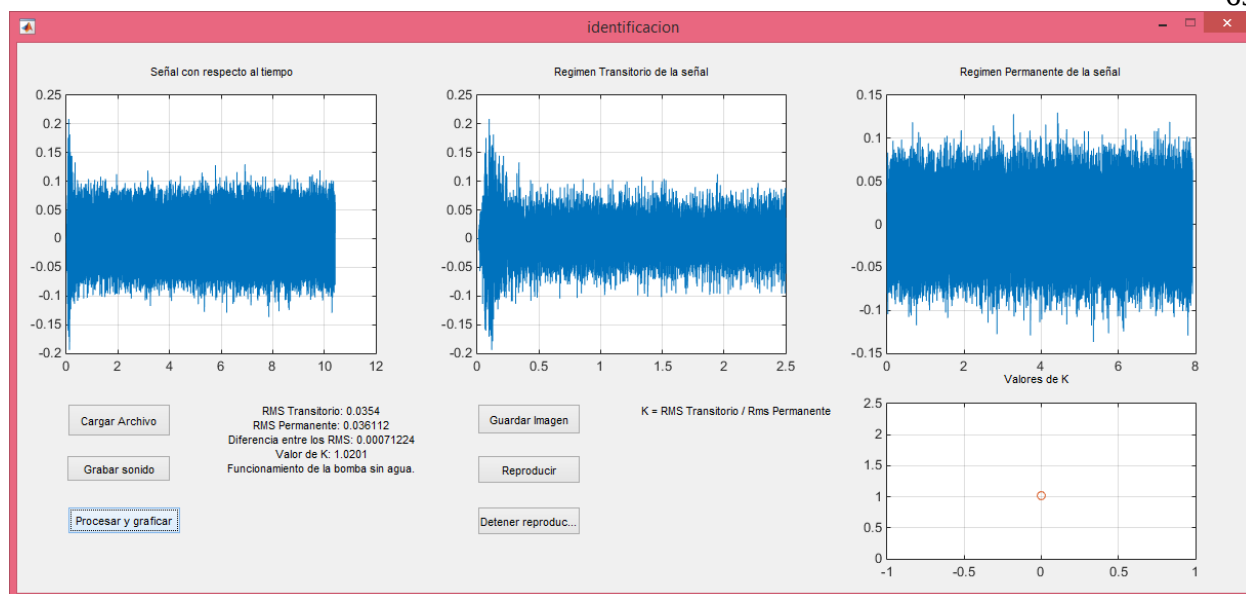


Figura 38 Interfaz con una muestra de sonido correspondiente a el funcionamiento de la bomba sin agua.

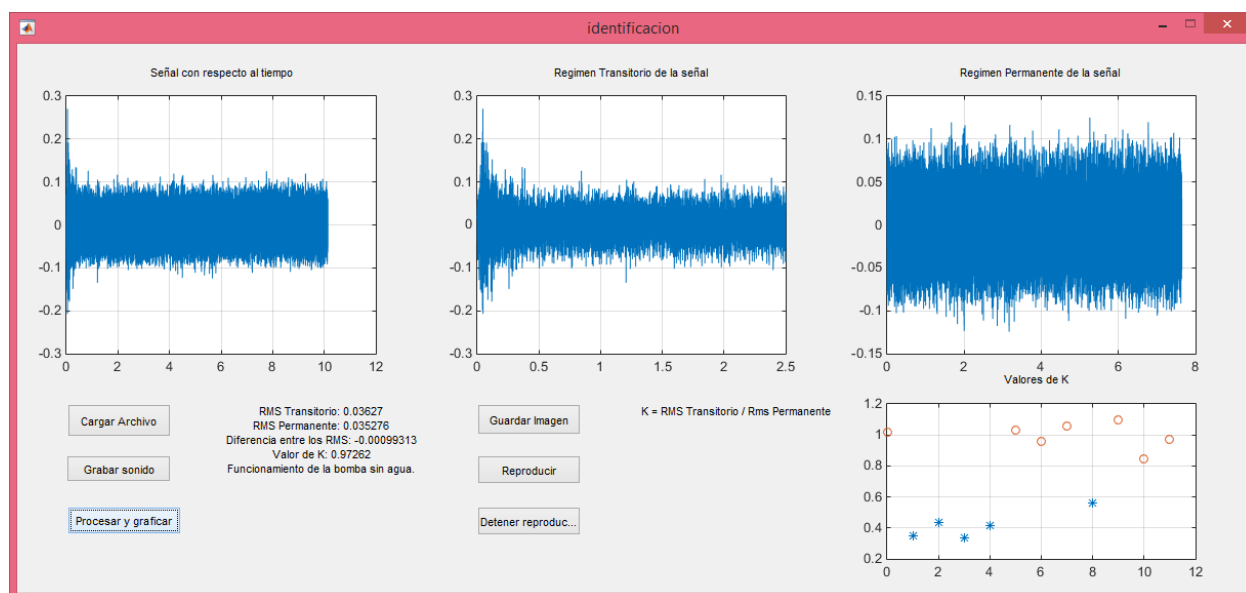


Figura 39. Interfaz después de haber procesado y clasificado varias muestras de sonido en una misma sesión.

Como se puede observar, la interfaz muestra una gráfica de la señal completa, su respectivo⁷⁰ régimen permanente y su régimen transitorio. Adicionalmente, el resultado del cálculo de la constante K se muestra en un cuadro de texto y se grafica en la última tabla para cada señal que sea procesada por el programa.

El trabajo de investigación realizado permitió llegar a la conclusión de que es posible identificar el estado de falla u operación normal de la bomba de una autoclave por medio del sonido que produce y, como se pudo observar a lo largo del desarrollo del proyecto, existen varios métodos que se podrían utilizar para esto. Para el presente proyecto se consideró que el método que presentó mejores resultados fue el de utilizar el valor de K como característica principal, ya que se hace una especie de normalización lo cual le da robustez a la solución, y para implementar este método como una solución solo se necesita hacer el cálculo de esta constante y compararlo con un valor que está entre 0,6 y 0,7. La principal ventaja al comparar la relación del valor RMS del régimen estacionario de cada señal con el valor RMS de su propio transitorio es que se logra determinar un comportamiento sin depender de las variaciones en los valores de amplitud que pudieran presentarse en cualquier parte del sistema de sonido e incluso otros sistemas.

Recapitulando, para llegar a esta solución, se realizó el diseño de un sistema de recolección de datos, compuesto por un micrófono, un cable apantallado estereofónico con terminales TRS de 3.5mm o cable auxiliar, y un computador. Con este sistema se tomaron las muestras de sonido que conformarían la base de datos usada y ampliada a lo largo del desarrollo proyecto. El análisis y los algoritmos diseñados fueron realizados e implementados en Matlab. Debido a la naturaleza de las muestras (señales sonoras), se realizó el análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Al analizar las gráficas obtenidas en el dominio de la frecuencia no se observaron resultados que ayudaran a identificar contundentemente el estado de funcionamiento de la bomba; por lo tanto, se optó por hacer el análisis en el dominio del tiempo, lo cual condujo al desarrollo de varios métodos para la identificación de funcionamiento de la señal. Finalmente se optó por

presentar el método que utilizaba la constante K como característica principal de la señal para⁷² clasificar las muestras de sonido de la bomba en sus estados de funcionamiento debido a que sus resultados ofrecieron una identificación más confiable.

- Después de los análisis realizados, se puede concluir que el valor de la constante K (valor RMS permanente / valor RMS transitorio), en las muestras correspondientes al funcionamiento de la bomba con agua, está por debajo de 0.6, mientras que los valores de K para muestras correspondientes al funcionamiento de la máquina sin agua son mayores que 0.7. Esto significa que, al calcular K, es posible identificar si en el momento del arranque una autoclave tiene agua o no por medio del sonido generado por la bomba.
- Otros métodos explorados a lo largo del proyecto, como la diferencia entre los valores Rms del régimen permanente y del régimen transitorio o un análisis profundo de la señal en el dominio de la frecuencia, podrían tener resultados útiles para esta aplicación. A manera de trabajo futuro, se podría profundizar más en estos análisis, junto con técnicas de aprendizaje automático.
- Contrario a lo esperado, las señales de las muestras con agua poseen un sobrepaso máximo más alto que las muestras sin agua. Esto se debe a que el agua dentro de la bomba provoca una gran resistencia al movimiento en el momento del arranque, al contrario de lo que sucede cuando la bomba está sin agua. Adicional a esto, la razón por la que se esperaba que la bomba generara más ruido al arrancar sin agua es que, cuando la bomba se mantiene encendida durante un tiempo prolongado sin agua en el sistema, se genera un ruido mucho más fuerte que el normal debido al fenómeno de expansión de sus partes internas como consecuencia del aumento de la temperatura. Este fenómeno, sin embargo, se presenta después de cierto tiempo de funcionamiento, y el ruido adicional producido puede significar que se están produciendo daños en la bomba.

- [1] J. Calhoun, J. Moore y R. Forni, «Stick-Slip Squeal in a Dry Scroll Vacuum Pump,» International Compressor Engineering Conference, USA, 2016.
- [2] R. Birajdar, R. Patil y K. Khanzode, «VIBRATION AND NOISE IN CENTRIFUGAL PUMPS - SOURCES AND,» Kirloskar Brothers Ltd., India, Porto, Portugal, 2009.
- [3] A. Dufaux, L. Besacier, M. Ansorge y F. Pellandini, «AUTOMATIC SOUND DETECTION AND RECOGNITION,» Institute of Microtechnology, University of Neuchâtel, Suiza, -.
- [4] T. Harparik, J. Bocko y . K. MaslÁková, «Frequency analysis of acoustic signal using the Fast Fourier Transformation in Matlab,» *Procedia Engineering* , Vols. %1 de %2-, nº 48, pp. 199-204, 2012.
- [5] A. Oppenheim, A. Willsky y H. Nawab, SEÑALES Y SISTEMAS, Mexico: Pearson Educacion , 1998, p. 956.
- [6] M. Roberts, Señales y Sistemas: Análisis mediante métodos de transformada y Matlab, México: McGraw Hill, 2005.
- [7] S. Soliman y M. Srinath, SEÑALES Y SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS, México: PRENTICE-HALL, 1999.
- [8] T. Giannakopoulos y A. Pikrakis, Introduction to Audio Analysis: A Matlab Approach, Ni: Academic Press, 2014.

En el Anexo A están los algoritmos utilizados para extraer la información de los archivos de audio que componen la base de datos, dicha base de datos está compuesta por archivos de sonido y se encuentra documentada como el Anexo B, las muestras de sonido que se tomaron a una autoclave distinta a la utilizada para el desarrollo del proyecto están en el Anexo C, las gráficas que representan los resultados del análisis de la base de datos, Anexo B, y los datos de la autoclave nueva, Anexo C, se encuentran en los Anexos D y E, respectivamente, y por último se incluyó el proyecto de Matlab de la interfaz gráfica creada con el propósito de identificar el funcionamiento de la autoclave en el Anexo F.