

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL
MONITOREO EN LÍNEA DE LAS TUBERÍAS DE TRANSPORTE
PETROLERO UTILIZANDO UN SISTEMA ACÚSTICO.**

**DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE
SENSADO, DEL ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES Y DEL SISTEMA
DE COMUNICACIÓN EN LÍNEA Y TRANSMISIÓN DE DATOS ENTRE EL
SISTEMA DE SENSADO Y UN COMPUTADOR PORTÁTIL DEL
PROTOTIPO PARA EL MONITOREO EN LÍNEA DE LAS TUBERÍAS DE
TRANSPORTE PETROLERO UTILIZANDO UN SISTEMA ACÚSTICO.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

KATYA MIREYA PASTUÑA SIGCHA

katya.pastuna@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr. FAUSTO EDUARDO AVALOS CASCANO

eduardo.avalos@epn.edu.ec

DMQ, octubre 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Katya Mireya Pastuña Sigcha declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Srta. Katya Pastuña

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Katya Mireya Pastuña Sigcha, bajo mi supervisión.

Dr. Fausto Eduardo Avalos Cascano
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Srta. Katya Mireya Pastuña Sigcha

Dr. Fausto Eduardo Avalos Cascano

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con profundo cariño y gratitud a mis padres Anita y Wilson, quienes siempre han sido mi fuente inquebrantable de apoyo, amor y aliento a lo largo de mi vida y de esta travesía académica. Su constante sacrificio y dedicación me han inspirado a superar cualquier desafío y a esforzarme por alcanzar mis metas.

A mis amadas hermanas Melany y Alison, por su amor incondicional. Juntas, hemos compartido risas, lágrimas, aventuras y secretos. A través de las altas y bajas de la vida, su amor incondicional ha sido un refugio seguro para mí.

A mis queridos tíos: Álvaro, Flavio, Fernando, Mirian y Jenny cuyo aliento y comprensión me han sostenido durante este arduo proceso. Sus palabras de ánimo y su confianza en mí han sido un faro luminoso en los momentos más oscuros.

A mi querida abuela Rosalía por su amor y por sus consejos que han dejado una huella imborrable en mi corazón.

A mis profesores y mentores, quienes me han guiado con sabiduría y paciencia, brindándome su conocimiento y orientación, les expreso mi gratitud pues sus enseñanzas han sido fundamentales para mi crecimiento académico y personal.

Por último, dedico este logro a mi yo del futuro, como un recordatorio constante de que con determinación y perseverancia se puede superar incluso los desafíos más complejos.

Con gratitud y cariño,

Katya

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 MARCO TEÓRICO.....	4
1.4.1 Ensayos no destructivos.....	4
1.4.1.1 Monitoreo por inspección visual	4
1.4.1.2 Monitoreo por líquidos penetrantes	4
1.4.1.3 Monitoreo por ondas electromagnéticas.....	4
1.4.1.4 Monitoreo por radiografía	5
1.4.1.5 Monitoreo por emisión acústica.....	5
1.4.1.6 Ensayo de emisión acústica	6
1.4.1.7 Elementos en un ensayo de emisión acústica.....	7
1.4.1.8 Equipo básico para ensayos de emisión acústica	8
1.4.1.9 Transductor de emisión acústica	8
1.4.1.10 Principio físico	10
1.4.1.11 Señales de emisión acústica.....	10
1.4.1.12 Características de la señal acústica.....	11
1.4.1.13 Factores que afectan la señal de emisión acústica.....	12
1.4.1.14 Tipos de sensores de emisión acústica	14
1.4.2 Sensor GI40.....	15
1.4.3 Preamplificador PPS50.....	15
1.4.4 Microcontrolador Arduino uno.....	16

1.4.5	Amplificador operacional LM741.....	17
1.4.6	Reguladores de voltaje LM317	18
1.4.7	Convertidor DC/DC XL4015	19
1.4.8	Adaptador AC/DC del preamplificador.....	20
1.4.9	Adaptador AC/DC con salida 5Vdc.....	21
1.4.10	Transformadores	22
1.4.11	Puente de diodos KBP307.....	22
1.4.12	Módulo bluetooth HC05	23
1.4.13	Pantalla Nextion.....	24
1.4.14	Fusible	25
1.1.6	Diodo Zener.....	26
2	METODOLOGÍA.....	27
2.1	Desarrollo del prototipo	27
2.2	Diseño de Hardware.....	28
2.2.1	Sensor de emisión acústica	28
2.2.2	Circuito de acondicionamiento.....	29
2.2.3	Etapa de eliminación de ruido	30
2.2.4	Etapa de multiplicación para la ganancia	31
2.2.5	Etapa sumadora de voltaje offset	32
2.2.6	Simulación de cada etapa del circuito de acondicionamiento.....	32
2.2.7	Fuentes de alimentación.....	33
2.2.8	Alimentación para el circuito de acondicionamiento	33
2.2.9	Alimentación para el microcontrolador y la pantalla Nextion	34
2.2.10	Alimentación para el preamplificador.....	34
2.2.11	Requerimientos del microcontrolador	34
2.2.12	Protección de sobre corriente.....	35
2.2.13	Protección de sobrevoltaje	35
2.2.14	Implementación del sistema en PCB.....	35
2.3	Diseño de Software	38
2.3.1.1	Presentación de datos en Pantalla.....	38
2.3.2	Almacenamiento de datos	39
2.3.3	Transmisión inalámbrica de datos	39
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
3.1	Resultados	40

3.1.1	SISTEMA IMPLEMENTADO	40
3.1.1.1	Alimentación del equipo	40
3.1.2	Voltajes en el circuito de acondicionamiento	42
3.1.3	Voltajes medidos ante golpes repentinos por medición directa	42
3.1.4	Señales medidas por el sistema	42
3.1.5	Medición del sistema ante perturbaciones a diferentes decibeles	43
3.1.6	Almacenamiento de datos	49
3.1.7	Transmisión inalámbrica	50
3.2	Conclusiones.....	52
3.3	Recomendaciones.....	52
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
5	ANEXOS.....	56

RESUMEN

El presente escrito describe el diseño, desarrollo y pruebas de un equipo para la detección de fallas en tuberías de petróleo. En la etapa de diseño, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las tecnologías disponibles para la detección de fallas considerando el método por emisión acústica para la concepción del equipo. Durante la etapa de desarrollo, se diseñó y construyó un circuito de alimentación y acondicionamiento de señal para el sensor de emisión acústica. El circuito de acondicionamiento tiene la función de adecuar la señal acústica de tal forma que sea legible y procesable por un microcontrolador. Una vez completado el circuito de acondicionamiento de señal, se ha desarrollado una interfaz gráfica que muestra la forma de onda de las señales capturadas por el equipo. Esta interfaz cuenta con un histórico que permite al usuario tener una referencia cuantitativa de las diferentes señales acústicas generadas en la tubería.

El equipo tiene incorporado un módulo bluetooth que establece su comunicación con un computador utilizando el protocolo de comunicación USART. Gracias a esta configuración las señales obtenidas por el sensor se visualizarán en tiempo real desde un computador.

Finalmente se realizaron pruebas con el equipo en un entorno controlado en donde se generaron situaciones de fallas como golpes intermitentes y perturbaciones continuas. De esta forma se pudo evaluar la capacidad del equipo para capturar las señales acústicas ocasionadas por cualquier perturbación en un oleoducto.

PALABRAS CLAVE: circuito de acondicionamiento, comunicación inalámbrica, emisión acústica, perturbación, sensor, tubería.

ABSTRACT

This document describes the design, development and testing of an equipment for the detection of faults in oil pipelines. In the design phase, an exhaustive analysis of the technologies available for fault detection was carried out considering the acoustic emission method for the conception of the equipment. During the development phase, a power supply and signal conditioning circuit for the acoustic emission sensor was surveyed and built. The signal conditioning circuit has the function of adapting the acoustic signal in such a way that it is readable and processable by a microcontroller. Once the signal conditioning circuit has been completed, a graphic interface has been developed that shows the waveform of the signals captured by the equipment. This interface has a history that allows the user to have a quantitative reference of the different acoustic signals produced in the pipeline.

The equipment has a built-in bluetooth module that establishes its communication with a computer using the USART communication protocol. Thanks to this configuration, the signals obtained by the sensor will be displayed in real time from a computer.

Finally, tests were carried out with the equipment in a controlled environment where failure situations such as intermittent blows and continuous disturbances were generated. In this way it was possible to evaluate the ability of the equipment to capture the acoustic signals caused by any disturbance in an oil pipeline.

KEYWORDS: signal conditioning circuit, wireless communication, acoustic emission, disturbance, sensor, pipeline.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha visto un significativo avance tecnológico en la aplicación de ensayos no destructivos para el monitoreo de tuberías de petróleo. De esta forma se han desarrollado distintos métodos que garantizan la integridad de las tuberías además de una pronta detección de fallas o daños. Un ensayo no destructivo se refiere al proceso de supervisar una tubería sin la necesidad de modificar su estructura. Al producirse una perturbación en el oleoducto se puede adquirir una caracterización de dicha anomalía y analizar si los impactos representan un peligro para la estructura de la tubería. [1]

Entre los distintos métodos de inspección no destructivos se tiene las pruebas de inspección visual, pruebas de termografía infrarroja, pruebas mediante emisión acústica (EA), pruebas mediante señales electromagnéticas, etc.[2] El presente proyecto ha utilizado el método de inspección por emisión acústica cuya tecnología permitirá detectar y analizar las señales sonoras que recibe el sensor a través del contacto directo con la tubería.

El sensor recibirá las ondas sonoras que se generan por algún acontecimiento de emisión acústica a través del material debido a la liberación energética dada por un golpe o perforación.[2] Al recoger las señales sonoras detectadas por el sensor, se llevará a cabo un proceso de acondicionamiento de señal, permitiendo que este valor sea leído por un microcontrolador.

Los datos procesados por el microcontrolador serán mostrados en una pantalla de modo que el usuario pueda visualizar la forma de onda dada por cualquier perturbación. Al ser una pantalla táctil se podrá navegar en la interfaz gráfica y acceder a los datos históricos tomados por el equipo. Al mismo tiempo que los datos se visualizan en la pantalla táctil, se establece una comunicación inalámbrica con un computador con la finalidad de que, en tiempo real, se transmitan las señales de emisión acústica.

Para verificar que el equipo tiene la capacidad de capturar cualquier tipo de perturbación, se realizarán pruebas con golpes intermitentes y perturbaciones continuas en una tubería. Por cada fallo producido se verá en pantalla una señal representada en una medida de voltaje, cuyo valor dependerá de la fuerza con la que se realice el impacto.

1.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de sensado acústico para el monitoreo de tuberías de petróleo, que detecte cualquier perturbación a través del método de inspección por emisión acústica.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una investigación sobre las tecnologías disponibles para el monitoreo no invasivo en tuberías de petróleo. Identificando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones.
2. Seleccionar un sensor de emisión acústica que capture las ondas sonoras generadas en una tubería ante una perturbación.
3. Desarrollar un circuito electrónico que permita acondicionar las señales captadas por el sensor de emisión acústica, asegurando que sean adecuadas para su procesamiento dentro de un microcontrolador.
4. Definir los parámetros y características necesarias para las entradas y salidas del microcontrolador
5. Seleccionar un microcontrolador adecuado que cumpla con los requisitos de procesamiento, almacenamiento y comunicación para el sistema de medición por emisión acústica.
6. Desarrollar un algoritmo que procese las mediciones del sensor y pueda mostrar los datos adquiridos en una pantalla.
7. Crear una interfaz gráfica intuitiva y amigable que permita al usuario visualizar en tiempo real las señales captadas por el sensor.
8. Implementar un algoritmo que permita el almacenamiento adecuado de los datos captados por el sensor.
9. Implementar un protocolo de comunicación entre el microcontrolador y un computador para la transmisión de datos de forma inalámbrica.
10. Llevar a cabo pruebas con el sistema diseñado para comprobar que tiene la capacidad de detectar las perturbaciones producidas en una tubería.

1.3 Alcance

Se realizará una investigación bibliográfica sobre las tecnologías utilizadas para el monitoreo no invasivo en tuberías de transporte de petróleo. Identificando las ventajas, limitaciones y aplicaciones de cada método.

Se seleccionará un sensor de emisión acústica que capture las ondas sonoras producidas por diferentes perturbaciones en una tubería de petróleo.

Se desarrollará un circuito electrónico que acondicione las señales de voltaje del sensor de emisión acústica, asegurando que el nivel de voltaje sea el adecuado para su ingreso al pin analógico del microcontrolador.

Se definirán los parámetros y características necesarias de las entradas y salidas para el microcontrolador, de tal forma que se permita el desarrollo de un algoritmo para procese las mediciones del sensor.

Se elegirá un microcontrolador adecuado que cumpla con los requisitos de procesamiento, almacenamiento y comunicación del sistema de medición por emisión acústica.

Se creará una interfaz gráfica que permita al usuario visualizar las formas de onda de las señales captadas por el sistema

Se implementará un algoritmo que permita el almacenamiento de las señales percibidas por el sensor.

Se seleccionará un protocolo de comunicación entre el microcontrolador y el computador para la transmisión inalámbrica de datos.

Se ejecutarán pruebas del sistema diseñado para comprobar que el equipo puede mostrar las señales de emisión acústica, almacenar sus valores y transmitirlos de forma inalámbrica hacia un computador.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Ensayos no destructivos

1.4.1.1 Monitoreo por inspección visual

El ensayo por inspección visual se basa en la detección de defectos en tuberías a simple vista, tales como grietas, abolladuras y otros aspectos similares. Aunque esta técnica puede proporcionar una evaluación rápida, no garantiza la verdadera condición del material analizado. Para una evaluación más completa y precisa del estado del material, se requiere del uso de herramientas complementarias que permitan un análisis más profundo, ya que el material podría tener defectos importantes que el ojo humano no puede detectar. Dejar de lado estas imperfecciones, puede provocar que a futuro se tengan fugas importantes en los conductores de petróleo. [1]

1.4.1.2 Monitoreo por líquidos penetrantes

Mediante un líquido aplicado en la superficie de la tubería se puede detectar si se presenta algún defecto en el material, ya sea de aluminio, cobre, titanio, plástico, etc. El líquido aplicado penetra en las áreas que tengan discontinuidades que alteren la superficie de inspección. Mediante un cepillado, inmersión o rociado, se aplica el compuesto penetrante en la tubería y al limpiar el exceso se revelará los defectos que a simple vista no eran perceptibles. A pesar de que este método puede realizarse de forma rápida y a un bajo costo, no se puede realizar de forma continua, pues es un proceso de inspección puntual y manual que requiere de tiempo para cubrir la superficie total de inspección.[3]

1.4.1.3 Monitoreo por ondas electromagnéticas

Para este método se utilizan ondas electromagnéticas en la superficie de monitoreo. Su aplicación requiere de un sensor que emita estas ondas a través del material. Cuando las ondas se encuentren con un defecto de la tubería, serán reflejadas y capturadas por un receptor, permitiendo así un análisis de las señales capturadas. Este método es de gran ayuda para no modificar la estructura de tubería y realizar un monitoreo de la tubería. Aun así, este método tiene ciertas desventajas pues no se puede detectar defectos que estén muy cercanos al material y su respuesta se ve afectada por las condiciones ambientales en las que se realiza el ensayo.[4]

1.4.1.4 Monitoreo por radiografía

Este método emite rayos X que penetran los materiales hechos de metal. Si hay un vacío o discontinuidad en el objeto, se tendrá un mayor paso de rayos X. La sensibilidad de los rayos X es aproximadamente del 2% del espesor del material, por ende, la radiografía puede detectar discontinuidades con dimensiones de al menos 0.5 milímetros.[5]

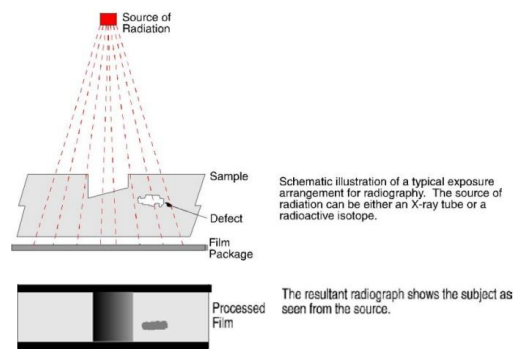


Figura 1.1 Monitoreo de tuberías por radiografía[5]

Algunos materiales o aleaciones pueden ser más difíciles de monitorear usando este método ya que su funcionamiento depende de la capacidad de absorción de radiación, lo que puede reducir la sensibilidad y la precisión de las pruebas. En algunos casos, estos ensayos pueden representar un riesgo para la salud de los operadores ya que los rayos X son radiactivos y se requiere de tomar las precauciones necesarias para evitar la exposición a la radiación.[5]

1.4.1.5 Monitoreo por emisión acústica

Las emisiones acústicas (EA), se refieren a las ondas sonoras que surgen cuando un material experimenta un estrés producido por una fuerza externa que puede ser un golpe o una perforación. [6] Las emisiones acústicas ocurren cuando un material experimenta una perturbación que libera energía generando ondas de sonido. Las ondas sonoras producidas son captadas por un sensor piezoeléctrico que convierte la onda sonora en una señal eléctrica medida en voltios[7]. El método de ensayo de Emisiones Acústicas (EA) resulta ser eficaz para detectar el comportamiento sonoro que tienen una variedad de materiales, como metales, plásticos, hormigón, madera, etc. Algunas aplicaciones comunes de este ensayo incluyen la detección de fallos y fugas en depósitos a presión, sistemas de tuberías y tanques de almacenamiento.[6]

A través del ensayo por emisión acústica, se puede hacer una distinción del daño que se produce en una estructura o componente al producirse un impacto en el material. Sin embargo, para obtener resultados cuantitativos del deterioro ocasionado, es necesario combinar este ensayo con otros métodos de análisis.[6]

Ventajas:

- El uso del método por emisión acústica permite identificar y evaluar la importancia de discontinuidades en toda la estructura mediante un solo ensayo. [8]
- Tiene una gran sensibilidad al crecimiento de los defectos y a los cambios en la estructura del material. Por ende, no depende de la presencia de defectos estáticos.[8]
- Al ser un ensayo no direccional no tiene importancia la posición entre el sensor y la discontinuidad en el material.[6]
- Se puede detectar discontinuidades ubicadas a varios metros, dependiendo de las propiedades del material analizado.[8]
- Al ser un método no destructivo puede prevenir posibles fallos catastróficos en el sistema de tuberías sin la necesidad de modificar su estructura.[9]

1.4.1.6 Ensayo de emisión acústica

Al someter a cierto material a un estímulo, se genera una condición de tensión que produce una señal acústica. Estos estímulos son llamados "fuentes de emisión acústica", y el proceso que las origina es conocido como un "evento". Tras originarse un evento de emisión acústica, la energía expulsada por el impacto se almacena en un campo de tensión que es liberada en forma de ondas sonora las cuales se propagan en todas las direcciones.[10]

Cuando las ondas acústicas llegan a la superficie del material propagan las ondas sonoras y estas puede ser detectadas mediante un transductor adecuado. Los sensores de EA, acoplados a estas superficies, convierten las ondas sonoras en señales eléctricas, que luego se envían a un sistema de detección.[10]

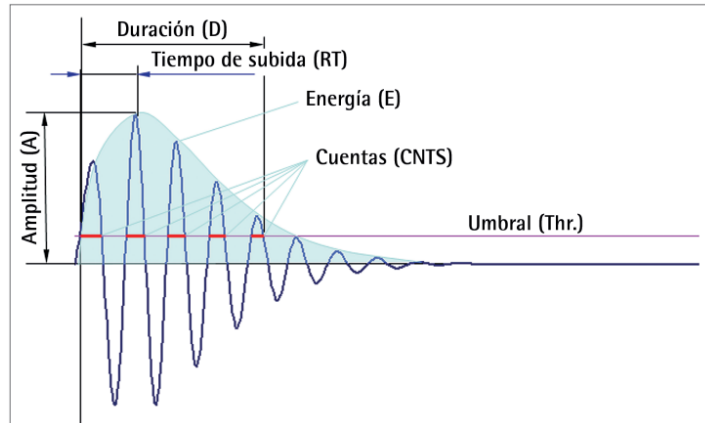


Figura 1.2 Señal de emisión acústica [6]

La emisión acústica se produce en formas de pulsos de energía, lo que significa que las ondas generadas contienen energía en todas las frecuencias, llegando a ser mayores a 1 MHz. Generalmente, los ensayos de EA se enfocan en el rango de 100 a 500 kHz, aunque dependiendo de las aplicaciones, se pueden usar rangos más elevados o más bajos.[6]

El ensayo de EA permite detectar distintas discontinuidades sin importar la posición relativa del defecto respecto a la posición del sensor. [6]

1.4.1.7 Elementos en un ensayo de emisión acústica

A continuación, se ilustran los componentes esenciales involucrados en un ensayo de Emisión Acústica (EA).

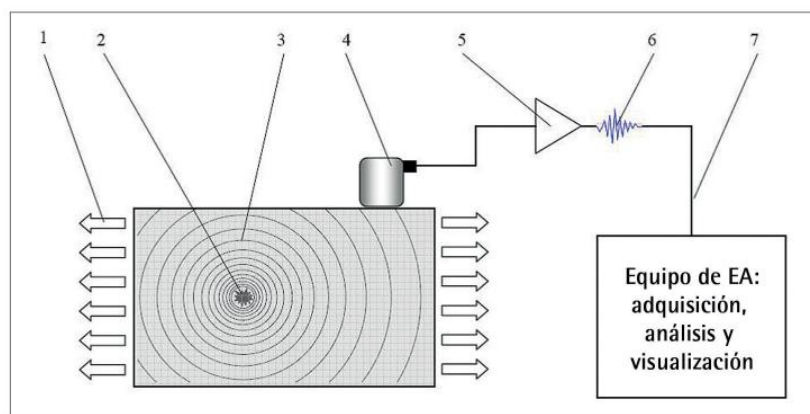


Figura 1.3 Esquema de los elementos que intervienen en un ensayo de EA [6]

1. Estímulo
2. Discontinuidad creciente (fuente de EA)
3. Ondas de EA
4. Sensor de EA
5. Pre-amplificador
6. Señal de EA
7. Equipo de EA: Detección, medida, y visualización de las señales de EA

1.4.1.8 Equipo básico para ensayos de emisión acústica

Un equipo básico para realizar pruebas de emisión acústica generalmente incluye los siguientes elementos:

- Sensor de emisión acústica: El sensor es el componente principal que detecta las ondas sonoras emitidas en el material al producirse un fallo. [11]
- Sistema de adquisición de datos: Este sistema es responsable de recopilar y amplificar las señales captadas por el sensor de emisión acústica. Puede incluir un preamplificador y un sistema de acondicionamiento de señales.[11]
- Software de análisis: El software especializado se utiliza para analizar y visualizar los datos recopilados por el equipo de emisión acústica. Proporciona herramientas para identificar eventos acústicos, caracterizar defectos o perturbaciones y evaluar la integridad del material.[11]
- Fuente de excitación: En algunos casos, se puede requerir una fuente de excitación, como un martillo o un generador de pulsos. Usando estas fuentes se podrá estimular la emisión acústica en el material bajo prueba.[11]

1.4.1.9 Transductor de emisión acústica

Un sensor de emisión acústica (EA) consiste en un elemento piezoeléctrico colocado dentro de una carcasa protectora que aísla el transductor de influencias externas y proporciona protección mecánica. Estos sensores fueron desarrollados por Beattie en 1983 y se fundamentan exclusivamente en el principio del efecto piezoeléctrico. [12]

El material más comúnmente empleado es el plomo circonato-titanato, también conocido como PZT. Este material presenta la particularidad de generar campos eléctricos cuando se somete a deformaciones. Los sensores de efecto piezoeléctrico son altamente sensibles

al desplazamiento normal de la superficie en la que se encuentran ubicados. Además, la elección del tipo de sensor tiene un fuerte impacto en la forma de la señal eléctrica registrada, ya que esta varía su respuesta de frecuencia dependiendo de las ondas sonoras detectadas. [11]

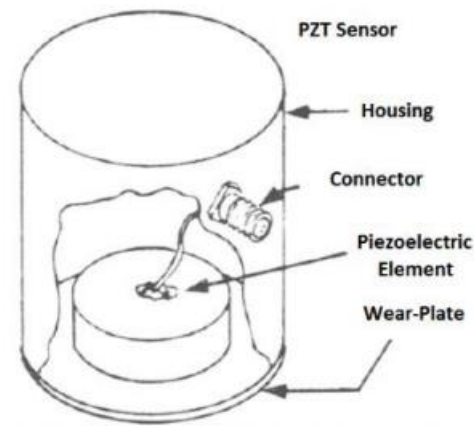


Figura 1.4 Sensor de EA hecho de material piezoeléctrico [12]

El material piezoeléctrico responde de manera sensible a la energía de la onda y como resultado, genera una tensión que es proporcional a dicha energía a través del conector. Los sensores emisión acústica podrían ser confundidos con sensores de vibración ya que ambos pueden detectar ondas de sonido. Sin embargo, los sensores de vibración son más sensibles a las ondas de baja frecuencia, mientras que los sensores de emisión acústica son más sensibles a las ondas de alta frecuencia. Por ejemplo, los sensores de vibración operan en frecuencias comprendidas entre 1 Hz y 20 kHz, mientras que los sensores de EA funcionan en un rango más amplio, entre 20 kHz y 1 MHz. Por ende, los sensores de EA presentan una mayor sensibilidad a frecuencias más altas. [12]

Los sensores de emisión acústica producen una tensión de amplitud extremadamente baja, medida en microvoltios (uV) o algunos milivoltios (mV). Debido a esta característica, se requiere una etapa de amplificación de la señal. Las ganancias más frecuentemente empleadas para amplificar las señales de EA son de 20 dB, 40 dB y 60 dB, dependiendo de la magnitud de la fuente de señal. [11]

1.4.1.10 Principio físico

El principio físico de los sensores de AE se basa en el efecto piezoeléctrico. La piezoelectricidad es la propiedad que tienen algunos materiales de generar una carga eléctrica cuando se someten a tensión o compresión. [13] Cuando una onda sonora incide en un sensor de AE, el material del sensor se deforma, lo que genera una carga eléctrica. Esta carga eléctrica se puede amplificar y medir para detectar la presencia de ondas sonoras.[13]

Los sensores de AE se pueden utilizar para detectar una amplia variedad de defectos en materiales y componentes, incluidos:

- Grietas
- Separación de capas
- Delaminación
- Inclusiones
- Porosidad
- Defectos de soldadura

Si la fuerza aplicada en cierto material es pequeña, no representa un cambio significativo, pues este mantiene su forma original. Si la energía acumulada en el material alcanza su límite máximo, esta se libera y provoca una deformación, lo que implica que el material no se regrese a su forma original. La carga eléctrica que generará el sensor dependerá de las características del impacto. [12]

1.4.1.11 Señales de emisión acústica

Las señales capturadas por el sensor de emisión acústica pueden ser: [14]

- Señal de ráfagas (bursts)
- Señal continua

La señal de ráfagas se produce cuando el impacto en el material no es repetitivo. Es decir que la tubería presenta un solo golpe con una duración de centésimas de segundos. En comparación con la señal continua esta presenta distintos valores de frecuencia y amplitud lo que indicaría que se tiene una fricción continua en la tubería.[14]

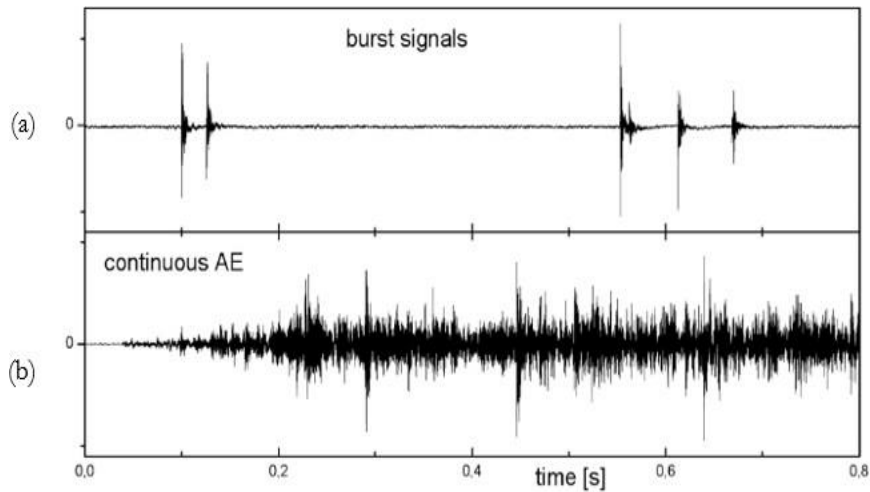


Figura 1.5 a) Señal de ráfaga, b) Señal continua [14]

Las gráficas mostradas muestran los tipos de señal que se espera obtener con el sensor dependiendo del impacto que se realice en la tubería. Al dar un solo golpe o impacto se recibiría la señal correspondiente a la Figura 1.5 (a). Al provocar un impacto continuo se estima conseguir una señal similar a la Figura 1.5 (b).

1.4.1.12 Características de la señal acústica

Las características del voltaje producido a la salida del preamplificador servirán para analizar el impacto detectado por el sensor.

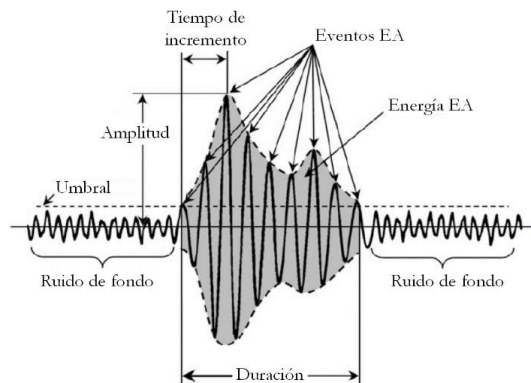


Figura 1.6 Características de una señal acústica

- **Amplitud:** Es el voltaje pico de la señal cuyo valor en dB es:

$$A(\text{dB}_{\text{AE}}) = 20 \log \frac{V_p}{V_{\text{ref}}}$$

Donde:

Vp: voltaje máximo

Vref: voltaje de referencia

- **Tiempo de llegada:** tiempo en el cual se obtiene la primera señal de perturbación en la tubería.
- **Tiempo de incremento:** tiempo que le toma llegar al voltaje máximo desde que se cruza el nivel de voltaje umbral.
- **Duración:** tiempo que le toma a la onda en volver a cruzar el voltaje umbral desde que su primer cruce.
- **Eventos:** es el número de pulsos que se tiene por cada impacto en la tubería.
- **Energía:** área bajo la envolvente de la señal de tiempo

1.4.1.13 Factores que afectan la señal de emisión acústica

La amplitud del voltaje ante una perturbación tendrá distintos niveles dependiendo de la fuerza con la que se produzca el impacto y las características físicas de la tubería

En cuantos a las causas que podrían alterar la amplitud de la señal EA, se tienen las inclusiones se refieren a los defectos presentes en un objeto que pudieran generar emisiones acústicas. Cuando se prescribe una tensión libre de estrés, llamada tensión propia sobre un cuerpo elástico. El tamaño de estas inclusiones puede es muy pequeño llegando a ser de unos cuantos cientos de átomos. Las precipitaciones son eventos acústicos que ocurren cuando una partícula sólidas o burbujas se rompen repentinamente dentro de un material o estructura[15]. Tanto las precipitaciones como inclusiones al aplicarse una tensión en el material pueden provocar una deformación o ruptura que generen ondas sonoras detectables por el sensor de emisión acústica.

La señal de emisión acústica (AE) se pueden ver afectadas por los siguientes factores:

- La magnitud y la frecuencia del estrés: La magnitud del estrés es la fuerza con la que se produce una perturbación en el material, por ende, la frecuencia del estrés dependerá de la fuerza con la que se realice el impacto y las características físicas de la misma.[16]

- El tamaño y la forma del objeto que produce la perturbación: El tamaño del objeto con el que se produce el impacto generará diferentes señales acústicas dependiendo de las características del material.[16]
- El tipo de material: El tipo de material afecta la forma en que el material emite ondas sonoras. Algunos materiales son más propensos a emitir ondas sonoras que otros. Las propiedades acústicas y mecánicas del material o estructura en cuestión determinarán cómo se generan y propagan las ondas acústicas. Cada material puede producir señales de emisión acústica con diversas características.[16]
- Las condiciones ambientales: Las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, también pueden afectar la señal de emisión acústica.[16]
- Estado y calidad del material: La calidad, integridad y estado del material o estructura afectarán la generación y propagación de las ondas acústicas. Por ejemplo, grietas, fisuras, corrosión o daños internos.[16]

1.4.1.14 Tipos de sensores de emisión acústica

A continuación, se presentan algunos tipos comunes de sensores de emisión acústica:

Tabla 1 Tipo de sensores EA [17]

Tipo	Descripción	Sensor
Acero elevado	Al tomar contacto con la superficie deja una cama de aire reduciendo el ruido y presentando alta sensibilidad para la adquisición de datos.	
Diferencial	Poseen dos sensores con direcciones opuestas de polarización con cables que se conectan a un preamplificador para eliminar el ruido.	
Para frecuencia plana	Alta respuesta a frecuencias planas, eliminando el ruido por medio de una identificación de la fuente	
Propósito general	Aísla los terminales de detección eléctricamente, por lo que resulta conveniente para cualquier aplicación. Por su aislamiento eléctrico introduce ruido a la señal.	
Para altas temperaturas	Cumple con requisitos IP66 para funcionar a muy altas temperaturas. Cuenta con recubrimiento de un polímero especial	

1.4.2 Sensor GI40

El GI40 es un sensor AE piezoeléctrico pasivo con preamplificador de 40dB28V incorporado. Y el ancho de banda de 15kHz-70kHz lo hace adecuado para detección de emisión acústica de baja frecuencia señales (Anexo 1). La respuesta de baja frecuencia lo hace adecuado para monitorear las condiciones de grandes objetos como hormigón, estructuras de acero y estructuras geológicas. También podría usarse para monitoreo de fugas y corrosión del almacenamiento tanques o válvulas y para detectar descargas parciales.[18]



Figura 1.7 Sensor de emisión acústica GI40 [18]

Características técnicas:

Frecuencia de resonancia: 40kHz
Rango de frecuencia: 15kHz-70kHz
Pico de sensibilidad Ref: >75dB
Preamplificador integral: 40dB28V
Impedancia del preamplificador: 50Ω
Temperatura de trabajo: -20 to 50°C
Tamaño (DxH): 30x57mm

1.4.3 Preamplificador PPS50

El preamplificador PPS50 está diseñado para soportar a todos los sensores EA de la empresa AE QingCheng con alimentación de 5 a 30v (Anexo 2). Puede trabajar con un sólo sensor acústico a la vez, el cual puede ser de entrada simple. En la Figura 9 se presenta la forma física del preamplificador. La señal eléctrica generada por el sensor de

emisión acústica puede ser muy débil y susceptible al ruido y a las interferencias electromagnéticas, lo que dificulta su detección y procesamiento adecuado. Su función principal es amplificar la señal de salida del sensor antes de que esta sea enviada al sistema de acondicionamiento.[19]



Figura 1.8 Preamplificador y separador de señal. [19]

Características técnicas:

Impedancia de salida: 50Ω

Impedancia de entrada: 50Ω

Voltaje de alimentación: De 5V hasta 30V

Material principal: Aluminio moldeado

Tamaño geométrico: 116 mm × 36 mm × 30 mm

Adaptador: BNC

1.4.4 Microcontrolador Arduino uno

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores. [9] Este microcontrolador permite la recepción del voltaje correspondiente a la señal de sonido del sensor GI40. Mediante un acondicionamiento de voltaje se tendrá una variación en el pin analógico A1 cuya forma de onda se mostrará en la pantalla Nextion. Las entradas analógicas del modelo Uno son las correspondientes a los pines de A0 a A5. Se caracterizan por leer valores de tensión de 0 a 5 Voltios con una resolución de 1024 (10 bits). [9]



Figura 1.9 Microcontrolador Arduino Uno

Características técnicas:

Voltaje de funcionamiento: 5V.

Voltaje de entrada (pines I/O): 5V. Cuenta con pines específicos para trabajar con señales de 3.3V.

Corriente máxima por pin: 20 mA.

Corriente máxima total: 200 mA.

Memoria flash: 32KB.

SRAM (memoria de acceso aleatorio): 2KB.

EEPROM (memoria de solo lectura programable y borrable eléctricamente): 1KB.

Velocidad del reloj (Clock): 16 MHz.

Número de pines I/O digitales: 14 - 6 pines admiten salida PWM.

Número de pines analógicos: 6.

Interfaces de comunicación: UART, I2C y SPI.

1.4.5 Amplificador operacional LM741

El LM741 es un circuito integrado (CI) de 8 pines también conocido como op-amp por sus siglas en inglés (operational amplifier). Los LM741 se pueden configurar en diferentes modos, como amplificador inversor, amplificador no inversor, amplificador sumador, entre otros. Estas configuraciones determinan cómo la señal del sensor se disminuye y se lleva al Arduino Uno. En el acondicionamiento de voltaje, los amplificadores operacionales

reducen la amplitud de la señal de voltaje de manera controlada ya que se requiere que el voltaje enviado por el sensor varié de 0 a 5 v para ser leído por el pin analógico del Arduino. [20]

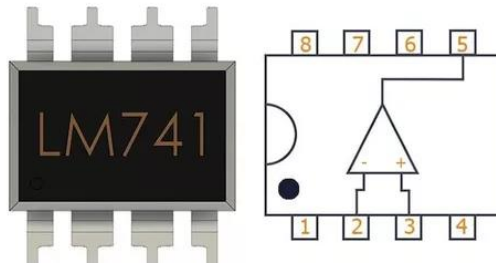


Figura 1.10 Amplificador operacional LM741[20]

Características técnicas:

Voltaje de alimentación (Vcc): $\pm 5V$ a $\pm 22V$.

Ancho de banda de ganancia en modo abierto: 1 a 1.5 MHz.

Voltaje de entrada diferencial: $\pm 30V$

Voltaje de entrada: $\pm 25V$

Rango de temperatura de funcionamiento: $-55^{\circ}C$ a $+125^{\circ}$

1.4.6 Reguladores de voltaje LM317

La serie LM317 de reguladores de voltaje positivo de 3 terminales ajustables es capaz de suministrar más de 1,5 A en un rango de salida de 1,2 V a 37 V. [11] El LM317 es usado para obtener el voltaje Offset que se suma al voltaje de acondicionamiento, con esto se busca cumplir con la ecuación de trabajo que siguen las configuraciones de los amplificadores operacionales para enviar el voltaje a la entrada analógica del Arduino Uno. [21]

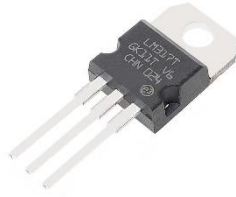


Figura 1.11 Regulador de voltaje LM317 [20]

Características técnicas:

Voltaje de entrada (V_{in}): 3V a 40V.

Voltaje de salida (V_{out}): de 1.25V a aproximadamente 37V.

Corriente de salida (I_{out}): 1.5 amperios (A).

Tensión de referencia (V_{ref}): La tensión de referencia interna del LM317 entre los pines ADJ y OUT es de 1.25V.

Rango de temperatura de funcionamiento: de 0°C a 125°C.

1.4.7 Convertidor DC/DC XL4015

El XL4015 es un convertidor de CC/CC reductor (reductor) PWM de frecuencia fija de 180 KHz, capaz de impulsar una carga de 5 A con alta eficiencia, baja ondulación y excelente regulación de línea y carga. Al requerir una cantidad mínima de componentes externos, el regulador es fácil de usar e incluye compensación de frecuencia interna y un oscilador de frecuencia fija. [14]



Figura 1.12 Convertidor DC/DC XL4015[14]

Características técnicas:

Voltaje de entrada (Vin): 4V a 38V

Voltaje de salida (Vout): 1.25V a 36V

Corriente de salida (Iout): Hasta aproximadamente 5A

Eficiencia: Alta eficiencia

Protección térmica: Sí

Regulación de línea y carga: Buena regulación

Protección contra cortocircuitos: Sí

Modo de funcionamiento: Modo de conmutación

1.4.8 Adaptador AC/DC del preamplificador

El preamplificador cuenta con un adaptador que brinda la energía necesaria para el funcionamiento del sensor por lo que este requiere de un conector para alimentarse a una red cuyo voltaje máximo de entrada es de 240VAC con una corriente máxima de 1.5A [22]



Figura 1.13 Adaptador AC/DC [22]

Características técnicas:

Voltaje de alimentación: 100-240 VAC

Frecuencia de operación: 50/60Hz

Máxima corriente de entrada: 1.5 A

Voltaje de salida: 28 Vdc

1.4.9 Adaptador AC/DC con salida 5Vdc

Este adaptador permite una entrada de 120VAC con una corriente máxima de 1.5A. Este adaptador permite obtener a su salida un voltaje de 5VDC, que permitirá alimentar el microcontrolador y la pantalla Nextion. [23]



Figura 1.14 Adaptador AC/DC 5Vdc [23]

Características técnicas:

Voltaje de salida: 5V

Corriente de salida: 1A

Potencia de salida: 5W

Voltaje de entrada: 100V a 240V

Eficiencia: Alta eficiencia

Regulación de voltaje: Buena regulación para mantener una tensión de salida estable

Protecciones: Protección contra sobrecorriente, sobretensión, cortocircuitos y sobrecalentamiento

Tipos de conector: USB-A

1.4.10 Transformadores

La función principal de los transformadores es cambiar el nivel de tensión entre dos circuitos eléctricos. Un transformador puede elevar (transformador elevador) o reducir (transformador reductor) el voltaje de la corriente alterna, lo que permite disminuir el voltaje que llega de la red (120VAC) a un voltaje de 24VAC. Desde este valor se reduce mediante los reguladores de voltaje a 18VDC que alimentan los amplificadores operacionales del circuito de acondicionamiento. Los transformadores usados tienen una salida de 24VDC. El transformador que se encarga de brindar un voltaje positivo (18VDC) al acondicionamiento puede entregar hasta 1500mA, mientras que el transformador encargado de entregar un voltaje negativo (-18VDC) puede entregar una corriente de hasta 500mA. [24]



Figura 1.15 Transformador de voltaje [24]

Características técnicas:

Voltaje de entrada: 110V a 120V AC

Voltaje de salida: 12V DC

Corriente de salida: 1000mA (1A)

1.4.11 Puente de diodos KBP307

El puente de diodos KBP307 contiene cuatro diodos rectificadores conectados en una configuración de puente, que le permite rectificar la corriente alterna en ambas mitades de la forma de onda. Cuando la tensión de entrada de CA se aplica a los terminales del puente de diodos, se convierte en una tensión de salida pulsante en corriente continua. [25]



Figura 1.16 Puente de diodos [25]

Características técnicas:

Corriente máxima de salida: 3 Amperios (3A)

Voltaje máximo de repetición inversa: 1000 Voltios (1000V)

Corriente de fuga inversa máxima: 10 μ A (microamperios)

Tensión de caída directa: 1.1 Voltios (1.1V) a 3 Amperios (3A)

1.4.12 Módulo bluetooth HC05

El módulo Bluetooth HC-05 permite la conexión con proyectos en Arduino de forma inalámbrica (Bluetooth), con la facilidad de operación de un puerto serial. La transmisión se realiza al conectar el módulo bluetooth en forma directa a los pines seriales del microcontrolador. Todos los parámetros del módulo se configurarán mediante comandos AT. [26]

La comunicación Bluetooth se da entre dos tipos de dispositivos: un maestro y un esclavo. El objetivo de esta comunicación es conectar el equipo con cualquier computador para enviar los datos de sonido obtenidos por el sensor. Para esto se necesita utilizar un módulo HC-05 configurado como maestro y un HC-05 configurado como esclavo. [26]



Figura 1.17 Módulo bluetooth HC05 [26]

Características técnicas:

Voltaje de alimentación: 5V

Corriente de operación: Aproximadamente 30mA a 40mA en modo de transmisión y recepción activa.

Potencia de transmisión: Alrededor de 4dBm (2.5mW) a 6dBm (4mW) en la mayoría de los casos.

Alcance inalámbrico: Generalmente de unos pocos metros a unos 10 metros, dependiendo del entorno y las condiciones.

Frecuencia de operación: 2.4GHz (banda ISM).

Interfaz: Comunicación UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter).

Tasa de baudios: Variable, generalmente admite tasas de baudios comunes como 9600, 57600, 115200, etc.

Protocolo: Admite el protocolo Bluetooth SPP (Serial Port Profile) para la comunicación serial con otros dispositivos Bluetooth.

Modo de operación: Puede funcionar en modo maestro o esclavo, y algunos modelos incluso admiten el modo maestro-esclavo (master-slave).

Nivel lógico: Generalmente es compatible con señales de 3.3V y 5V en la interfaz UART.

1.4.13 Pantalla Nextion

La pantalla Nextion funciona como interfaz hombre-máquina (HMI) permitiendo el desarrollo de un HMI para mostrar la forma de onda que toma el sensor ante un impacto en la tubería. La pantalla HMI de Nextion se conecta al Arduino Uno a través de una comunicación Serial TTL (5V, TX, RX, GND). [27]



Figura 1.18 Pantalla Nextion 5" [27]

Características técnicas:

Tamaño de pantalla: 5 pulgadas (diagonal)

Resolución: 800x480 píxeles

Tensión de alimentación: 5V DC (alimentación típica)

Corriente de operación: Alrededor de 300mA a 500mA (puede variar según el brillo y el contenido de la pantalla)

Interfaz: UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) y TTL (Transistor-Transistor Logic)

Nivel lógico: Es compatible con señales de 3.3V y 5V en la interfaz UART.

Ángulo de visión: Amplio ángulo de visión, generalmente alrededor de 70 grados o más en todas las direcciones.

Colores: Pantalla de color (generalmente 65,536 colores)

Tiempo de respuesta: Tiempo de respuesta típico de unos pocos milisegundos

1.4.14 Fusible

El fusible es un componente de seguridad ampliamente utilizado en circuitos eléctricos y electrónicos para proteger los dispositivos y equipos de posibles daños causados por corrientes eléctricas excesivas. Su principal función es interrumpir el flujo de corriente cuando ocurre una sobrecarga o cortocircuito, evitando así daños mayores en el circuito y previniendo posibles riesgos como incendios o choques eléctricos. [28]



Figura 1.19 Fusible de 300mA[28]

Características técnicas:

Corriente nominal (I_n): 300mA

Tensión nominal (U_n): 250V

Tensión Zener (V_z): 5V

1.1.6 Diodo Zener

Un diodo Zener de 5V es un componente semiconductor diseñado específicamente para trabajar en la región de ruptura inversa, lo que le permite mantener una tensión constante y estable a través de sí mismo cuando se polariza en inversa a un voltaje superior a su tensión Zener nominal.[29]



Figura 1.20 Diodo zener de 5v. [28]

Corriente Zener (I_z): 5mA.

Máxima potencia de disipación (P_z): 0.5 W.

Coefficiente de temperatura Zener (TCZ -2 a -7 mV/°C).

Voltaje Zener: 5v

2 METODOLOGÍA

2.1 Desarrollo del prototipo

Un prototipo de equipo de detección de fallas mediante emisión acústica (EA) debe incluir los siguientes componentes y características para su funcionamiento eficaz:

- **Sensor de emisión acústica:** Un sensor adecuado para captar las ondas acústicas generadas por las fallas o daños en el material o estructura que se está evaluando. El sensor de emisión acústica utilizado para el desarrollo del equipo utiliza el principio de funcionamiento piezoeléctrico.
- **Preamplificador:** Circuito de pre amplificación para amplificar las señales débiles captadas por el sensor. Esto es necesario para mejorar la relación señal-ruido y garantizar una detección más precisa de las emisiones acústicas. El sensor GI40 tiene su respectivo preamplificador con una salida de voltaje de -20 a 20 V.
- **Unidad de procesamiento de señales (DSP):** Un procesador digital de señales procesará las señales amplificadas del sensor. Mediante el procesador se podrá programar un algoritmo que permita el almacenamiento, muestreo y transferencia de datos.
- **Interfaz de usuario:** Un sistema de visualización y control que permita al operador interactuar con el equipo.
- **Fuente de energía:** Un suministro eléctrico adecuado para alimentar el prototipo de manera confiable durante las pruebas y operaciones.
- **Transmisor de datos:** Se instalará en el equipo un módulo bluetooth para enviar los datos de forma inalámbrica hacia el computador

1.4 Diagrama del sistema de detección de emisión acústica

Para el desarrollo del sistema se realizará un diseño de hardware y software cuyo trabajo en conjunto será detectar cualquier perturbación presente en una tubería de petróleo. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama del sistema. El diseño de Hardware tiene el fin de implementar un circuito de acondicionamiento que pueda enviar los voltajes del sensor hacia el microcontrolador, además de alimentar a todo el sistema de detección. El diseño de software se desarrollará en base a un código de programación que muestre las señales del sensor en pantalla, y que finalmente almacene y transmita los datos hacia una siguiente etapa de análisis de señal.

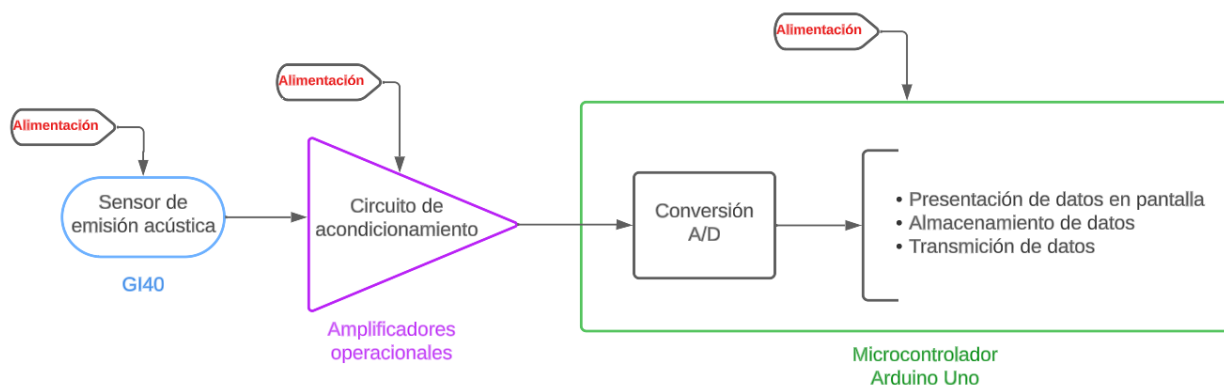


Figura 2.1 Diagrama general del sistema de detección de emisión acústica

2.2 Diseño de Hardware

2.2.1 Sensor de emisión acústica

El sensor de emisión acústica GI40 es sensible a los golpes en la superficie en que se encuentran ubicados. Su rango de frecuencia es de 15kHz hasta los 70kHz, con una frecuencia de resonancia de 40kHz (Anexo 1). Al colocar el sensor en una tubería receptorá las ondas de sonido en un rango de -20v a 20v. Mediante varias pruebas realizadas con el sensor GI40 se pudo obtener este rango al golpear una tubería metálica de forma intermitente y de forma continua con un taladro. (Anexo 3.1 – 3.2)

El rango de voltaje para los ensayos con un golpe fue de 12.44V máximo, y un voltaje mínimo de -16.6V (Anexo 3.1). En el ensayo realizado con una perturbación continua se obtuvo un voltaje máximo de 20.6v y un voltaje mínimo de -12V (Anexo 3.2). Es por esto que se ha seleccionado un rango de voltaje para la señal del sensor de -20V a 20V.

Tabla 2 Rango de medición del sensor GI40

Rango de voltaje del sensor GI40	
Voltaje mínimo	-20 VDC
Voltaje máximo	20 VDC

2.2.2 Circuito de acondicionamiento

La adquisición de datos para un microcontrolador implica capturar información externa, como señales analógicas o digitales, y convertirla en datos digitales que el microcontrolador pueda procesar y almacenar.[30] Al ser un sensor analógico se necesita de un convertidor analógico a digital (ADC) para digitalizar la señal del sensor. Es importante la configuración del ADC para la resolución y rango de entrada del sensor[30]. En cuanto a la lectura de datos, el microcontrolador lee los datos del sensor a través de la interfaz configurada. Esto implicará leer registros o pines específicos asociados al ADC correspondiente al sensor digital.

De acuerdo a pruebas realizadas con el sensor el voltaje que se obtiene con el preamplificador varía entre -20 y 20 V. El microcontrolador permite una señal analógica con un voltaje de 0 a 5v[30], por lo tanto, se ha realizado el acondicionamiento de voltaje para que el pin analógico pueda ser leído.

Tabla 3 Voltajes para el acondicionamiento del sensor

Rango de voltaje de entrada [V]	Rango de voltaje de salida [V]
-20	0
20	5

$$V_{out} = \frac{1}{8} \times V_{in} + \frac{5}{2} \quad [1]$$

$$V_{out} = 0.125 \times V_{in} + 2.5 \text{ [v]} \quad [2]$$

Donde:

V_{out}: Voltaje a la salida del acondicionamiento que tendrá un rango de 0 a 5v

V_{in}: Voltaje que se obtiene del sensor a la salida de su preamplificador.

0.125: Ganancia de voltaje obtenida con amplificadores operacionales.

2.5: Voltaje de offset, este se suma a la salida de la etapa de ganancia

Por la ecuación se determina que el circuito de acondicionamiento requiere de un amplificador operacional que multiplique el voltaje de entrada por una ganancia de voltaje $A_v = 0.125$, seguido de una etapa sumadora para incrementar el voltaje $v_{offset} = 2.5$.

2.2.3 Etapa de eliminación de ruido

Para cumplir con la ecuación (2) y obtener a la salida del acondicionamiento los voltajes se debe iniciar con la implementación de un amplificador operacional en modo diferencial para eliminar señales o voltajes no deseados. Estas señales indeseables se denominan voltajes inducidos por campos magnéticos parásitos en cables o conexiones de tierra, así como fluctuaciones en el suministro de voltaje. Al iniciar con esta etapa se evita la amplificación de estos voltajes no deseados eliminando el ruido en las salidas del amplificador diferencial. [31]

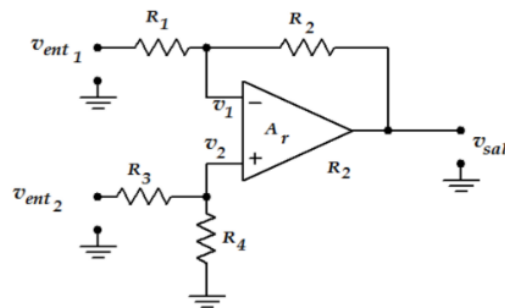


Figura 2.2 Amplificador operacional en modo diferencial [31]

Esta configuración asegura una respuesta uniforme y consistente en ambas entradas. Una de las principales ventajas del amplificador diferencial es su capacidad para rechazar o cancelar el ruido y las interferencias que se presentan en ambas entradas como "modo común". Al usar resistencias iguales, el amplificador diferencial puede igualar los niveles de señales no deseadas en ambas entradas, lo que mejora su capacidad para rechazar el ruido de modo común. [31]

Seleccionando por diseño $R_3 = R_1$ y $R_4 = R_2$, se obtiene la siguiente expresión:

$$v_{sal} = \frac{R_2}{R_1} (v_{ent2} - v_{ent1}) \quad [3]$$

Donde la ganancia de voltaje A_v del amplificador diferencia está dada por: $A_v = \frac{R_2}{R_1}$.

Si $R_3 = R_1 = R_4 = R_2 = 10\text{k}\Omega$ se logra que los caminos de entrada del amplificador diferencial sean simétricos, lo que significa que la ganancia de voltaje $A_v = 1$.

2.2.4 Etapa de multiplicación para la ganancia

En esta etapa se busca cumplir que la ganancia a salida sea $A_v = 0.125$. Se ha implementado un amplificador inversor cuya configuración se muestra en la Fig. 2.3. La entrada no inversora está conectada a tierra mientras que la entrada inversora se conecta al voltaje de entrada a través de una resistencia R_1 . La realimentación se da por medio de la resistencia R_r que conecta la salida con la entrada inversora del operacional.

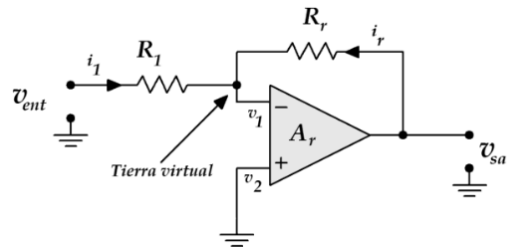


Figura 2.3 Amplificador inversor [19]

Se determina el valor de las resistencias conectadas al amplificador operacional para cumplir con $A_v = 0.125$. Por diseño $R_1 = 100\text{ k}\Omega$, con estos datos se calcula el valor de R_r

Reemplazando en la ecuación (4) se tiene que:

$$A_r = \frac{R_r}{100\text{ k}\Omega} \quad [4]$$

$$R_r = A_r \times 100\text{ k}\Omega \quad [5]$$

$$R_1 = 0.125 \times 100\text{ k}\Omega = 12.5\text{k}\Omega \quad [6]$$

Para implementar R_1 en el circuito se ha optado por usar una resistencia fija de $6.8\text{ k}\Omega$ en serie con un potenciómetro de $20\text{ k}\Omega$ para que la ganancia sea calibrada en el circuito físico.

2.2.5 Etapa sumadora de voltaje offset

En la última etapa de acondicionamiento se busca sumar el voltaje de 2.5 V calculado en la ecuación (2). El amplificador utilizado para esta operación funciona como sumador no inversor. [31]

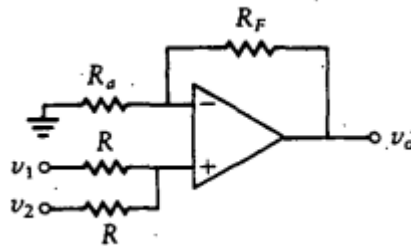


Figura 2.4 Sumador no inversor con ganancia

En esta etapa se han seleccionado resistencias de $10\text{k}\Omega$ para sumar los voltajes que vienen de ambas entradas

2.2.6 Simulación de cada etapa del circuito de acondicionamiento

Una vez calculado los valores de resistencia para cada etapa se procede a la simulación del circuito donde se incorpora cada etapa diseñada. Para comprobar su funcionamiento se ha implementado el circuito desde un protoboard.

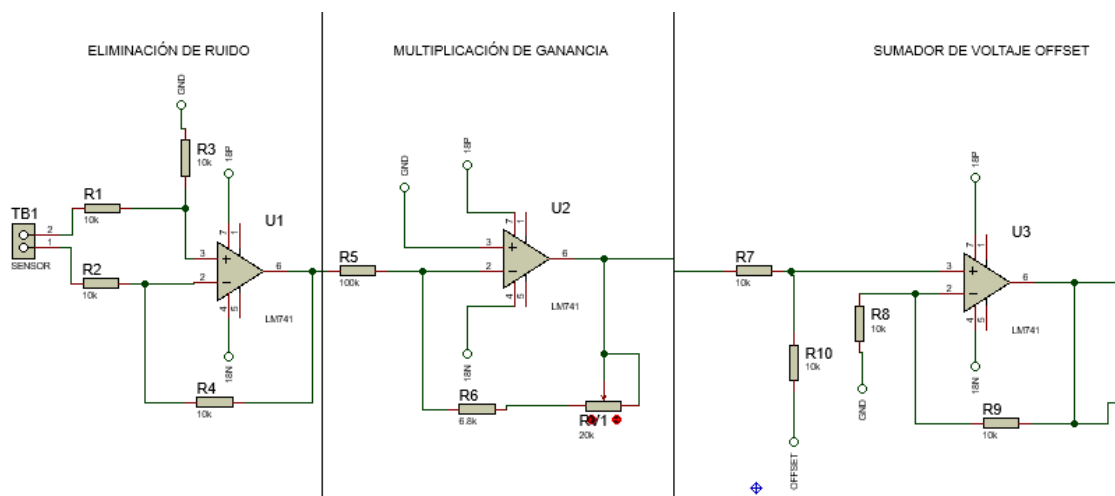


Figura 2.5 Diseño simulado del circuito de acondicionamiento

2.2.7 Fuentes de alimentación

De acuerdo al diagrama de la figura 2.1, Se necesita un circuito de alimentación para las siguientes etapas:

- Alimentación para el circuito de acondicionamiento: $\pm 20\text{Vdc}$
- Alimentación para el microcontrolador Arduino uno: 5Vdc
- Alimentación para la pantalla Nextion: 5Vdc
- Alimentación para el preamplificador del sensor: 28Vdc

Debido a estos requerimientos a continuación se desarrolla el circuito de alimentación para cada necesidad del sistema.

2.2.8 Alimentación para el circuito de acondicionamiento

Los amplificadores operacionales requieren de voltajes de alimentación tanto positivos como negativos dependiendo del tipo de señal que se dese amplificar a través de estos elementos. [31]

Para el tipo de señal que viene del preamplificador del sensor de emisión acústica se ha determinado que la señal de entrada al acondicionamiento estará entre -20 y 20 VAC (Tabla 3).

La alimentación desde la red está dada por 120VDC , Para el circuito de acondicionamiento se ha realizado una tapa de transformación, rectificación, filtrado y regulación con el propósito de obtener un voltaje de $\pm 20\text{Vdc}$

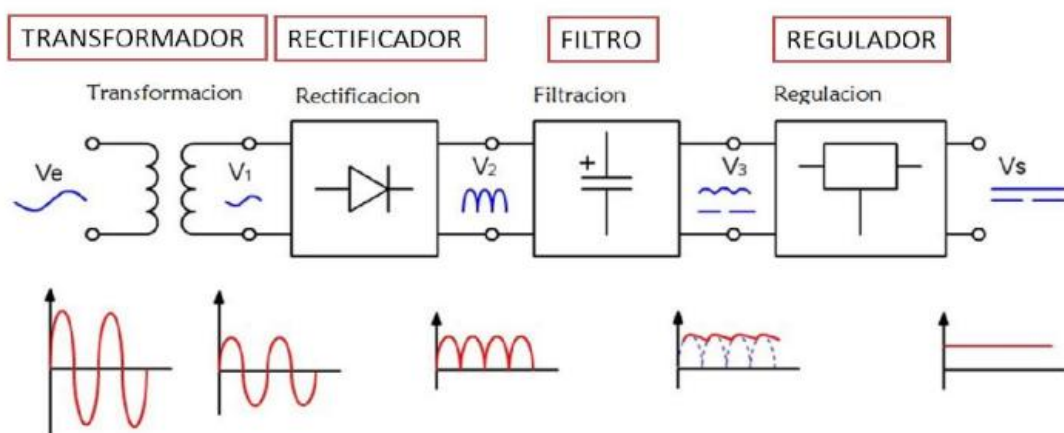


Figura 2.6 Diagrama de bloques de un convertidor AC/DC

Para evitar que la señal a la entrada del acondicionamiento se recorte, el voltaje de alimentación en los amplificadores operacionales debe ser de ± 20 Vdc. Este voltaje se obtiene del convertidor AC/DC XL4015.

2.2.9 Alimentación para el microcontrolador y la pantalla Nextion

Tanto el microcontrolador Arduino Uno, como la pantalla Nextion requieren de un voltaje de alimentación de 5VDC por lo que se utiliza un convertidor AC/DC cuya salida entrega la alimentación requerida.

2.2.10 Alimentación para el preamplificador

El preamplificador dispone de un convertidor AC/DC de 28 VAC. (Fig. 16). Para su funcionamiento únicamente requiere de su conexión a una red de alimentación de 120VAC con una corriente máxima de 1.5A.

2.2.11 Requerimientos del microcontrolador

El microcontrolador a utilizar requiere de las siguientes características para poner en marcha el funcionamiento del sistema. A continuación, se presenta una lista de los puertos necesarios para el equipo.

Tabla 4 Requerimientos del microcontrolador

Acción	Elemento / Software	Recursos
Recibir las señales de voltaje del sensor de emisión acústica	Sensor GI40	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alimentación de 5v ➤ 1 Pin de entrada analógica
Mostrar en una interfaz gráfica las señales del sensor	Pantalla Nextion 5"	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alimentación de 5 v ➤ 2 Pines de comunicación USART (RX, TX)
Transferencia de datos hacia el computador de forma inalámbrica.	Modulo bluetooth HC05	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alimentación de 5v ➤ 2 Pines de comunicación USART (RX, TX)

Se requiere en total de 1 pin analógico y 4 pines digitales que permitan su configuración para el protocolo de comunicación USART. Debido a esto se ha escogido el microcontrolador Arduino Uno, pues cuenta con los puertos necesarios para la conexión de cada elemento del sistema.

2.2.12 Protección de sobre corriente

Se ha medido la corriente máxima que fluirá a través del circuito bajo condiciones normales de funcionamiento. Esta corriente ha sido medida con un multímetro durante la fase de diseño, dando un valor de 100mA. Para garantizar la protección adecuada, es común elegir un fusible cuya corriente de ruptura sea ligeramente mayor que la corriente nominal del circuito. Esto se hace para evitar que el fusible se funda innecesariamente debido a fluctuaciones temporales de corriente.

Para una corriente máxima de $100mA \pm 2\%$ se ha utilizado un valor comercial cercano, siendo este un fusible de 300mA para proteger el equipo si se supera la corriente de funcionamiento.

2.2.13 Protección de sobrevoltaje

La protección de sobrevoltaje es esencial para salvaguardar las entradas analógicas de un microcontrolador contra tensiones altas. El microcontrolador Arduino Uno permita un voltaje de hasta 5V desde su entrada analógica por lo que se ha utilizado un diodo Zener de este valor para limitar el voltaje que ingresa al Arduino.

2.2.14 Implementación del sistema en PCB

Inicialmente el circuito diseñado en Simulación fue implementado en un protoboard para comprobar su funcionamiento. Para la alimentación del circuito acondicionamiento se utilizó fuentes externas que brinden el voltaje necesario para el circuito. Para visualizar la señal captada por el sensor se utilizó un osciloscopio en donde se observó la variación de voltaje ante distintas perturbaciones

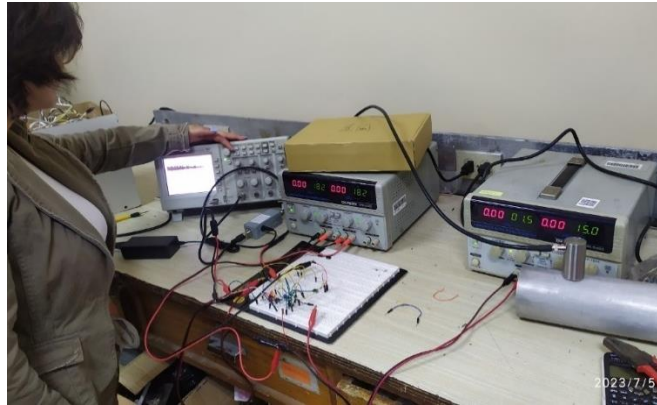


Figura 2.7 Circuito de acondicionamiento con fuentes externas

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito de acondicionamiento se alimenta el circuito con las fuentes de alimentación diseñadas usando los transformadores y reguladores de voltaje en cada etapa

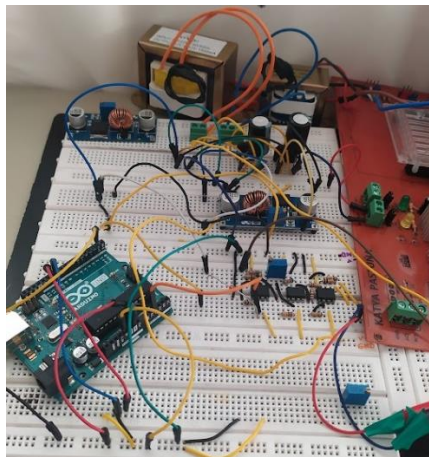


Figura 2.8 Circuito de acondicionamiento con las fuentes diseñadas

La implementación en una PCB permite optimizar el diseño para ocupar el menor espacio posible, lo que es fundamental para crear un equipo compacto y duradero. Una vez comprobado que el circuito de alimentación brinda el voltaje necesario al sistema completo se procede al diseño de la placa para el circuito de alimentación.



Figura 2.9 Vista posterior y frontal del PCB para el circuito de alimentación

Para implementar el circuito de acondicionamiento en PCB se realizó un diseño de la impresión del circuito en Proteus cuyo resultado se puede observar en el ANEXO 8.

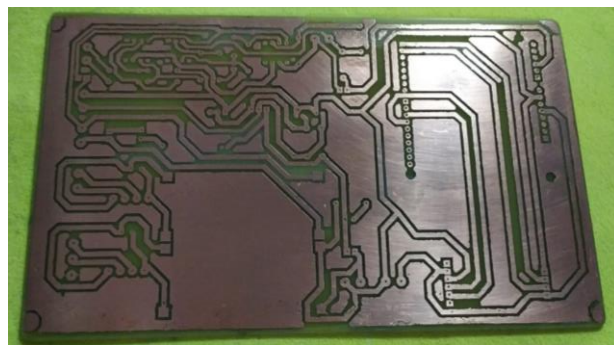


Figura 2.10 Circuito de acondicionamiento impreso

Una vez realizada la impresión del diseño se procede a la incorporación de los elementos del circuito.

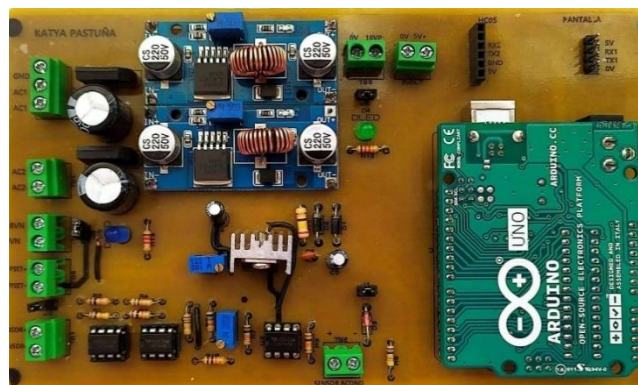


Figura 2.11 Circuito implementado en PCB

2.3 Diseño de Software

Para convertir la señal de voltaje analógico a digital con Arduino, se a utilizado la función `analogRead()` que viene incorporada en la librería de Arduino. Esta función realiza la conversión analógica a digital (ADC) en uno de los pines analógicos de la placa Arduino y devuelve un valor digital que representa el nivel de voltaje leído.

El programa leerá el valor analógico del pin A0 y lo imprimirá en el Monitor Serie cada medio segundo. El valor leído oscilará entre 0 y 1023, ya que el Arduino Uno tiene una resolución de 10 bits ($2^{10} = 1024$), lo que significa que puede representar valores entre 0 y 1023 correspondientes al rango de 0 a 5V en el pin A0.[30]

Al variar la señal de voltaje del sensor, se tendrá un cambió de valor en el Monitor Serie, lo que indica que el convertidor analógico a digital está funcionando correctamente y está convirtiendo la señal analógica de voltaje a valores digitales que pueden ser interpretados por el Arduino. (Anexo 4)

2.3.1.1 Presentación de datos en Pantalla

Para mostrar los valores obtenidos del convertidor analógico a digital en una pantalla Nextion, se ha configurado la pantalla utilizando el Editor Nextion.

Una vez realizado el diseño de la interfaz gráfica en el Editor Nextion se mostrará los valores de voltaje mediante una configuración desde el editor de pantalla.

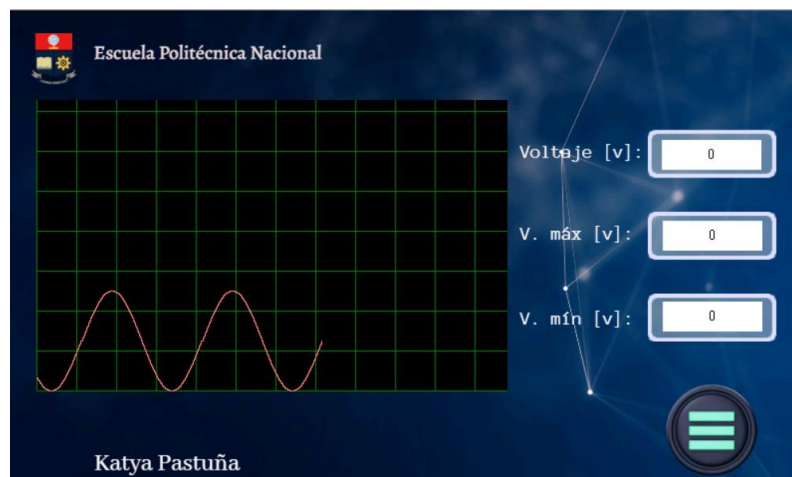


Figura 2.12 Configuración de la pantalla Nextion

Para enviar los datos obtenido se conectan los pines TX (transmisión) y RX (recepción) del Arduino y de la pantalla de modo que ambos dispositivos se comuniquen entre sí a través de la interfaz serial. (Anexo 5)

2.3.2 Almacenamiento de datos

El Arduino tiene una memoria EEPROM que permite almacenar datos permanentes incluso después de apagar el dispositivo. Mediante la librería EEPROM de Arduino se puede leer y escribir datos en la EEPROM.[30]

La EEPROM es útil para almacenar datos históricos o registros, evitando que se pierdan cuando el Arduino se apaga. Esto permite ahorrar recursos en la memoria RAM para otras tareas más críticas. (Anexo 6)

2.3.3 Transmisión inalámbrica de datos

Para establecer una comunicación inalámbrica entre dos módulos HC-05 desde Arduino, uno de los módulos actuará como maestro (Master) y el otro como esclavo (Slave). El módulo maestro enviará datos al módulo esclavo y este responderá con una confirmación. Cuando ambos módulos HC-05 estén configurados adecuadamente se establecerá comunicación inalámbrica y se transmitirán en tiempo real los datos obtenidos desde el sensor. (Anexo 7)

La velocidad de comunicación (baud rate) predeterminada del módulo HC-05 es de 9600 bps. Dentro de la programación se ha asegurado que la velocidad de comunicación coincida con la velocidad predeterminada.

Para la configuración del maestro y esclavo se ha utilizado comandos AT de modo que se establezca la comunicación entre ellos.

Una vez establecida dicha comunicación los datos se reciben en un computador y son mostrados desde un plot de Matlab. Mostrando las mismas formas de onda tanto en el equipo como el computador.

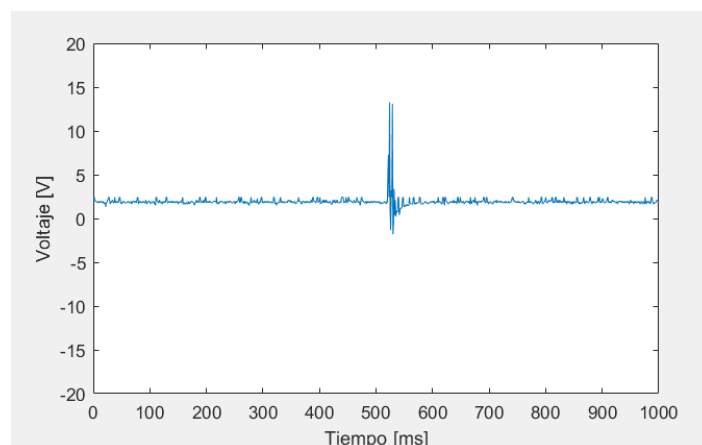


Figura 2.13 Transmisión de datos hacia el computador

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En este capítulo se presenta el resultado de implementar los circuitos diseños para el equipo y su funcionamiento. Se muestra los niveles de voltaje de alimentación obtenidos para la alimentación del equipo. Principalmente, se mostrará las gráficas obtenidas por el sensor ante cualquier perturbación detectada por el sistema. Los golpes y perturbaciones realizadas se han realizado a distintos niveles de presión sonora medidos por un sonómetro digital. Las medidas llevadas a cabo se han ejecutado siguiendo las pautas de la norma ASTM E976-18. De acuerdo con esta normativa, las pruebas necesitan una señal de prueba de referencia para generar una respuesta de valor conocido. Al repetir impactos similares en cada prueba, se posibilita una comparativa de los datos, con el fin de identificar cualquier variación en el voltaje al incrementar la intensidad del impacto.

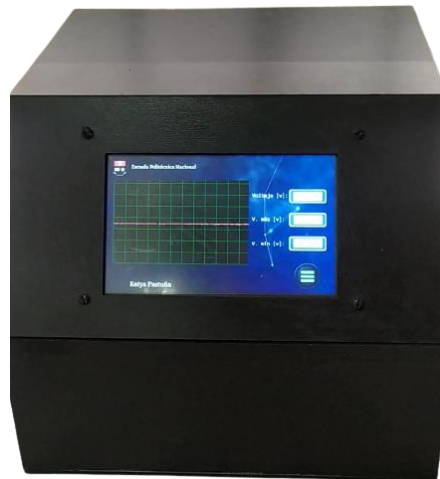


Figura 3.1 Sistema de monitoreo por emisión acústica

3.1.1 SISTEMA IMPLEMENTADO

3.1.1.1 Alimentación del equipo

Para brindar energía al sistema se utilizó un cable trébol y un interruptor ubicado en el lado inferior derecho del equipo. Al medir los niveles de voltaje que entran de la red se obtuvo un voltaje de 110V cuyo valor ingresa a todo el circuito de alimentación.

Al ingresar un voltaje de 110v desde la red, este ingresa a la etapa de transformación, cuyos voltajes de salida son de 24v y 30v, respectivamente. En la siguiente figura se

muestran los puntos de medición de cada voltaje que se requiere para la alimentación del circuito.



Figura 3.2 Puntos de medición de los voltajes de alimentación

Desde el punto de medición del transformador 1 se comprueba que el voltaje es de 26.1 Vac con lo que se comprobó su correcto funcionamiento. En el siguiente punto se mide el voltaje a la salida del transformador 2, cuyo valor fue de 30Vac. De esta manera se puede confirmar que los voltajes de alimentación son los necesarios para alimentar el resto del circuito que conforma el sistema

En la etapa de regulación mediante los reguladores XL4015, se puede variar el potenciómetro de precisión de los elementos para obtener el voltaje que se requiere, en este caso el circuito de acondicionamiento utiliza un voltaje de 20Vdc para su funcionamiento, es por esto que se ha calibrado este voltaje en la salida de los reguladores.

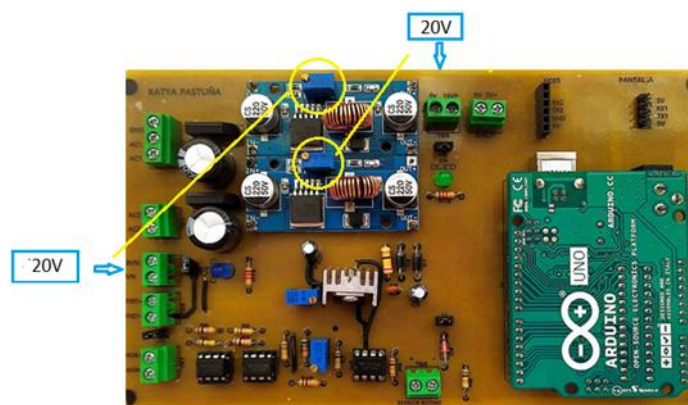


Figura 3.3 Voltaje en la etapa de regulación

El voltaje que se suma al circuito de acondicionamiento después de su etapa de ganancia debe ser de 2.5v, para regular este valor se varía el potenciómetro de precisión y una vez

calibrado el voltaje se observó que al medir este voltaje su valor es de 2.5v cuya precisión permite un acondicionamiento más exacto.

3.1.2 Voltajes en el circuito de acondicionamiento

Una vez comprobado que los niveles de voltaje fueron los esperados se midieron los voltajes obtenidos por el circuito de acondicionamiento ante cualquier perturbación que detecte el sensor. Para esto se probó realizando diferentes perturbaciones como golpes repentinos y perturbaciones continuas utilizando un taladro.

Los voltajes medidos a la salida del acondicionamiento están en un rango de 0 a 5Vdc. Permitiendo su ingreso al microcontrolador para ser vista desde la pantalla del equipo.

3.1.3 Voltajes medidos ante golpes repentinos por medición directa

Desde el punto de medida mostrado en la Fig. 35 se ha medido los voltajes que ingresan al microcontrolador cada vez que el sensor detecta un golpe.

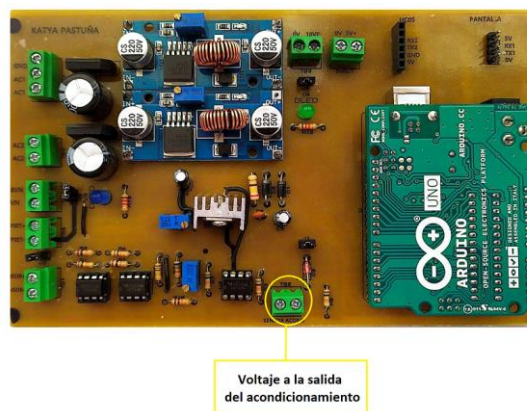


Figura 3.4 Punto de medida del voltaje de acondicionamiento

Al realizar diferentes golpes de forma intermitente se obtuvieron distintas medidas de voltaje desde un osciloscopio.

3.1.4 Señales medidas por el sistema

Después de la etapa de acondicionamiento el voltaje captado por el sensor pasa al microcontrolador cuyas señales se muestran en la pantalla Nextion. En pantalla se observa

el valor de voltaje máximo, el voltaje mínimo y valor medio de señal ante cualquier perturbación en la tubería.

Se pudo comprobar que, ante un solo impacto en la tubería, el equipo muestra un único pico de señal. Conocido como señal de ráfaga o señal burst.

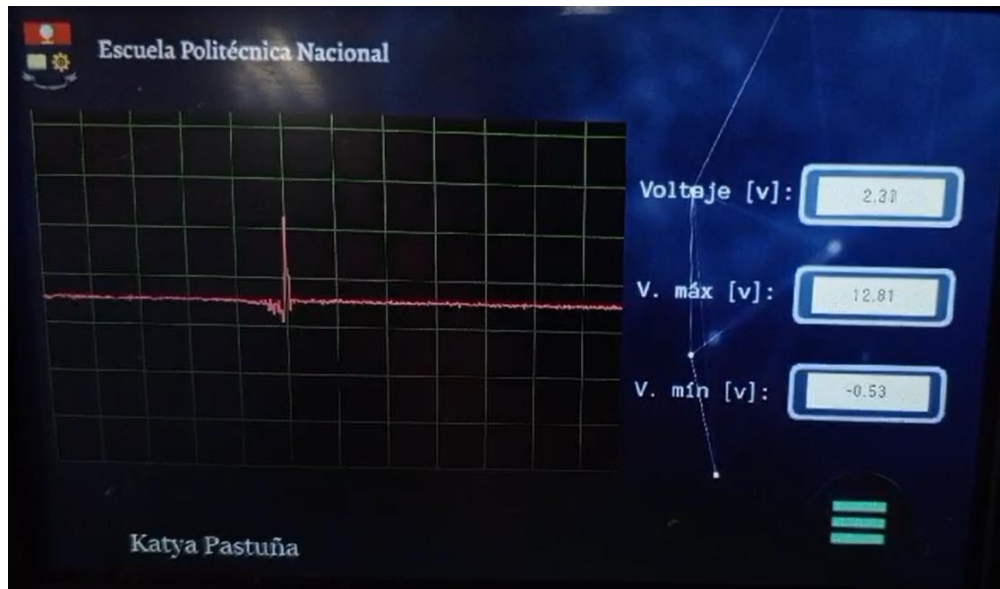


Figura 3.5 Señal del equipo ante una perturbación intermitente

Los voltajes mostrados en pantalla tienen un rango de -20 a 20 V. Este acondicionamiento se realizó mediante la programación de Arduino pues este es el rango original de medida que captura el sensor gracias a su preamplificador. Los voltajes tomados por el equipo fueron los siguientes:

Voltaje Máximo (V): La amplitud máxima de la señal de voltaje capturada durante el impacto del taladro en la tubería, en voltios.

Voltaje Mínimo (V): La amplitud mínima de la señal de voltaje capturada durante el impacto del taladro en la tubería, en voltios.

Voltaje (V): El valor promedio de la señal de voltaje durante el impacto del taladro en la tubería, en voltios.

3.1.5 Medición del sistema ante perturbaciones a diferentes decibeles

Mediante un sonómetro se captó las ondas sonoras correspondientes a distintas perturbaciones. Los valores en decibelios de cada falla representan el nivel de presión

sonora en el momento del impacto, de esta forma se pudo cuantificar la intensidad del sonido en decibelios (dB). Para esta medición se ha utilizado el sonómetro CESVA SC260.

Este equipo ha sido utilizado en conjunto con el equipo de detección con la finalidad de medir los decibelios de cada impacto en la tubería. El sensor CESVA SC260 utiliza un micrófono para detectar el sonido. El micrófono convierte las ondas sonoras en señales eléctricas, que luego son amplificadas y procesadas por el sensor. El sensor calcula el nivel de sonido en dB utilizando una fórmula estándar.



Figura 3.6 Sonómetro CESVA SC260

Este instrumento cuenta con el software CESVA Capture Studio, que muestra los datos tomados por el sonómetro. La aplicación muestra una pantalla principal con un gráfico que representa el nivel de sonido en tiempo real. En pantalla se muestran los siguientes datos cuyos datos corresponden a:

LAF: Nivel de presión sonora con promediado temporal rápido (FAST)

LATmáx: Nivel de presión sonora continuo equivalente con tiempo de integración T

LAE: Nivel de exposición sonora

El dato que se reconoce para la medición es el valor correspondiente a LAF, pues este representa el nivel de presión de cada impacto en la tubería.

Con la ayuda del Software CESVA se han capturado las siguientes formas de onda para impacto intermitentes, es decir un solo golpe cada cierto tiempo.[32]

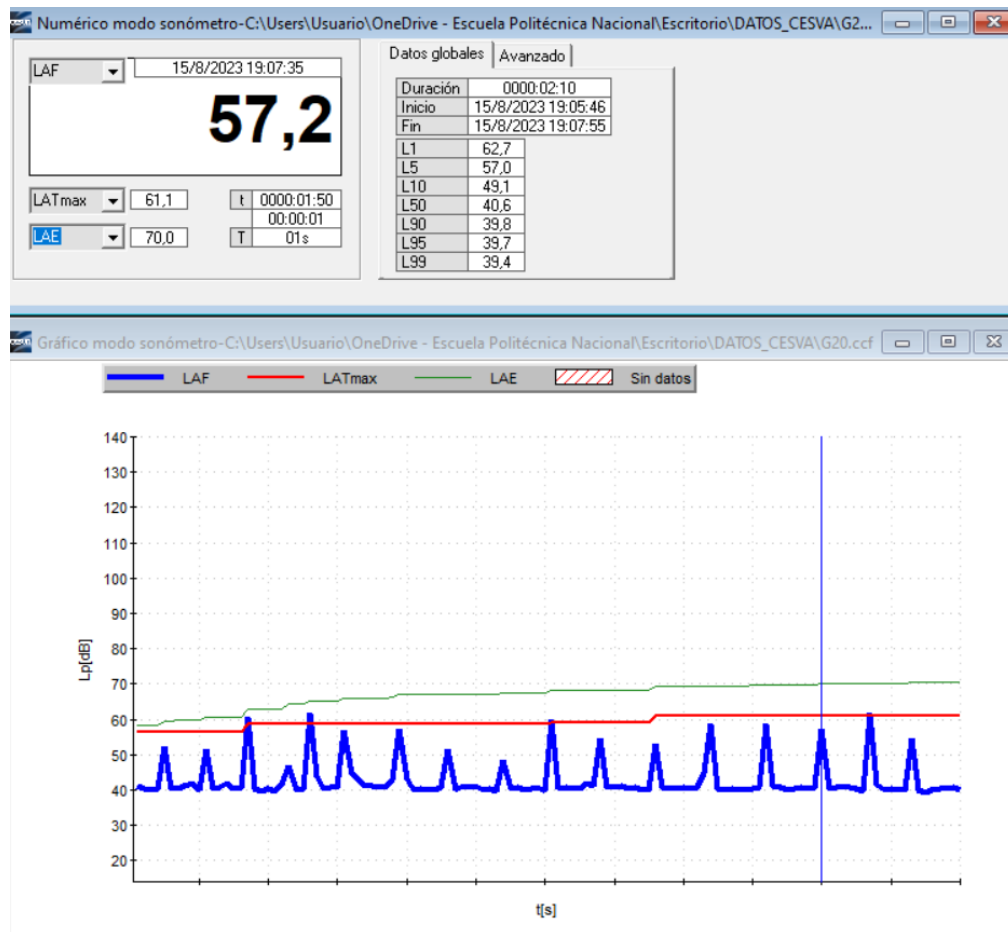


Figura 3.7 Sonómetro utilizado para la validación de datos

En la gráfica mostrada se puede observar que en cada impacto realizado en la tubería se tienen picos de señal que se espera, puedan ser captadas desde el equipo de medición. Cada variación de sonido presenta una medida en dB que variará según la intensidad del golpe en la tubería.

A continuación, se muestra la intensidad del sonido producido por cada golpe y las medidas de voltaje tomadas desde el sistema de detección desarrollado.

Tabla 5 Voltajes captados por el equipo de EA ante perturbaciones intermitentes

Golpe de prueba	Potencia en el SC260 [dB]	Voltaje en el equipo de EA [v]
Golpe 1	51,5	13,13
Golpe 2	52,3	13,66
Golpe 3	53	14,15
Golpe 4	54,4	15,18
Golpe 5	54,6	15,33
Golpe 6	56,9	17,2
Golpe 7	57,2	17,46
Golpe 8	57,3	17,55
Golpe 9	58,6	18,72
Golpe 10	58,7	18,82

La medición realizada se ha desarrollado en base a la norma ASTM E976-18, esta norma establece que las pruebas a realizar requieren de una señal de prueba conocida para generar una respuesta conocida. Los datos mostrados corresponden a golpes realizados con un martillo. Al dar golpes similares en cada prueba se puede realizar una comparación y analizar los datos para determinar si se tiene un aumento de voltaje al aumentar la intensidad del golpe.

De acuerdo a la curva de calibración del sensor GI40 (Anexo 2) se puede tener un mismo nivel en dB a distintas frecuencias. Al impactar la tubería con un objeto, las ondas sonoras producidas pueden tener diferentes respuestas en dB y en frecuencia ya que estas dependen de varios factores como el medio en el que se realizan las pruebas, características físicas del objeto de impacto, e incluso de la fuerza con la que se realiza el golpe. Con la finalidad de corroborar la veracidad de los datos tomados por el equipo desarrollado, se han tomado en cuenta los golpes con intensidades similares para comprobar si los voltajes mostrados por el equipo tienen una respuesta similar en cada impacto.

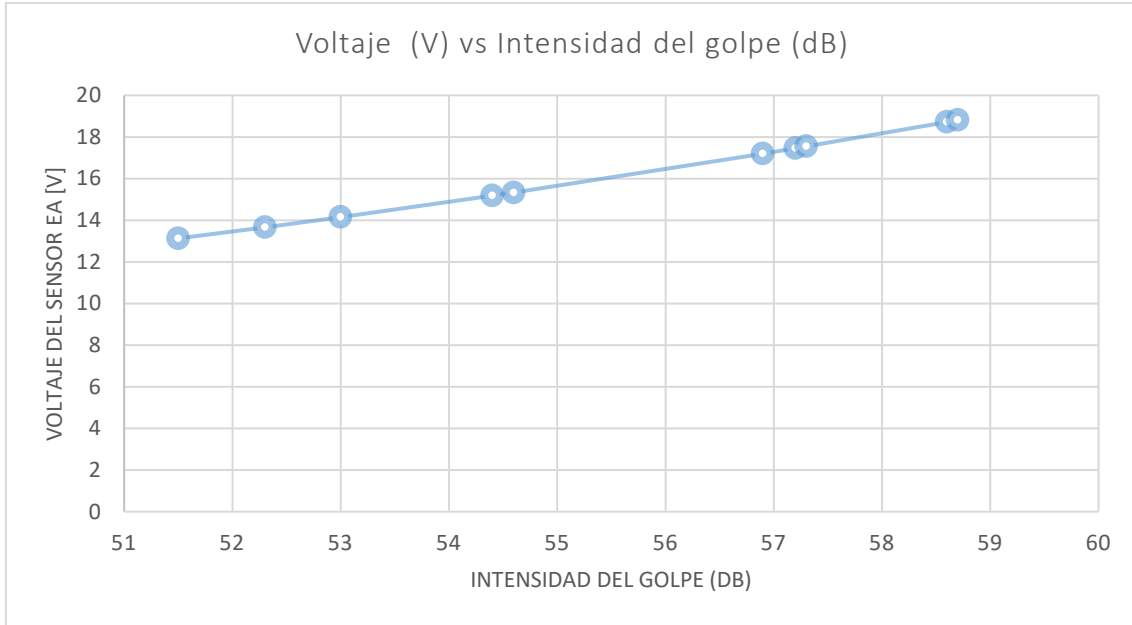


Figura 3.8 Voltaje medido por el equipo vs la intensidad de sonido de cada perturbación

Como se observa en la gráfica cuanto mayor es la intensidad de sonido del golpe en la tubería, el equipo de emisión acústica presenta un mayor voltaje.

Para probar el equipo ante una perturbación continua se utilizó un taladro, esta señal captada por el sensor se muestra en pantalla como una señal continua.

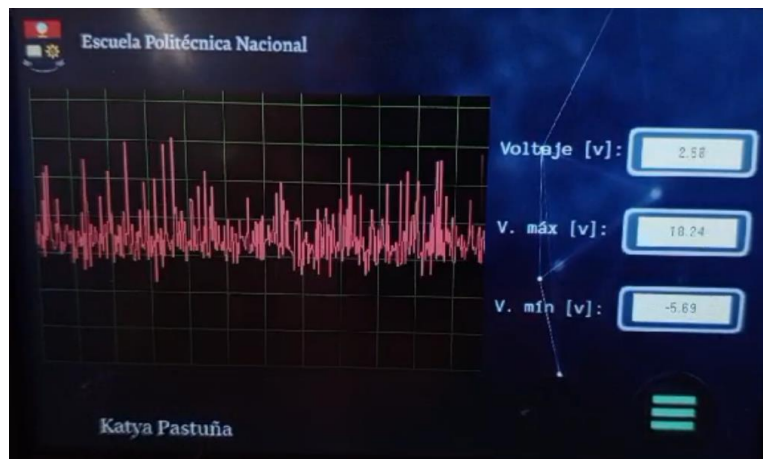


Figura 3.9 Señal del equipo ante una perturbación continua

Utilizando un sonómetro se pudo diferenciar que las señales tienen una mayor duración pues estas dependen del tiempo que dure el impacto en la tubería. Para esta prueba las medidas de la intensidad de sonido son similares pues el impacto producido por un taladro emite ondas sonoras similares.

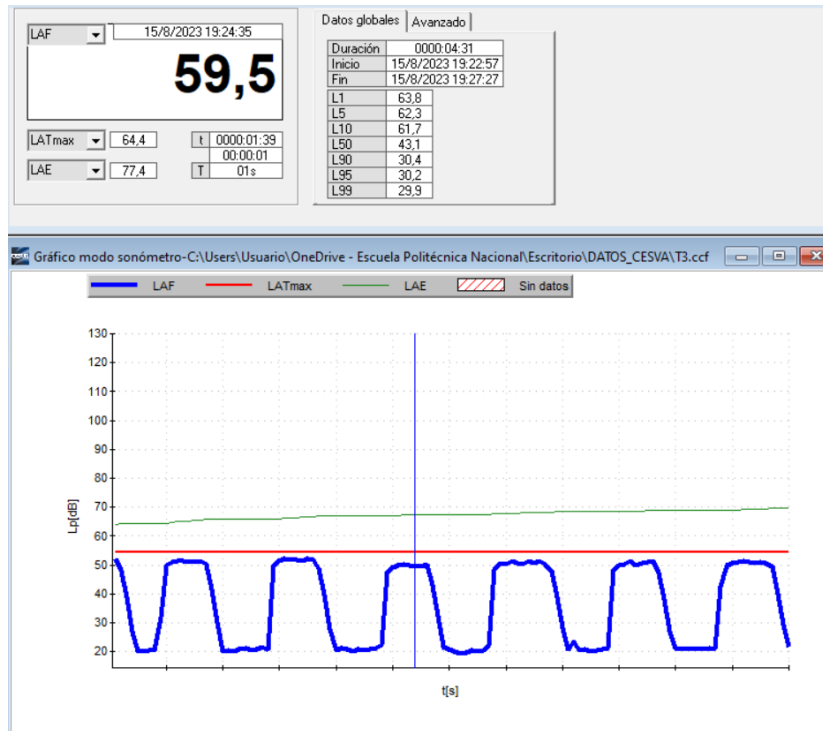


Figura 3.10 Sonómetro ante perturbaciones continuas

Los valores de voltaje tomados al taladrar la tubería se muestran en la tabla 8.

Tabla 6 Voltajes mostrados en pantalla ante perturbaciones continuas

Perturbación de prueba	Potencia en el SC260 [dB]	Voltaje en el equipo de EA [V]
Perturbación 1	56,9	17,2
Perturbación 2	57,7	17,9
Perturbación 3	57,8	17,99
Perturbación 4	58,2	18,35
Perturbación 5	58,3	18,44
Perturbación 6	58,8	18,91
Perturbación 7	58,9	18,91
Perturbación 8	59,2	19,29
Perturbación 9	59,3	19,39
Perturbación 10	59,5	19,58

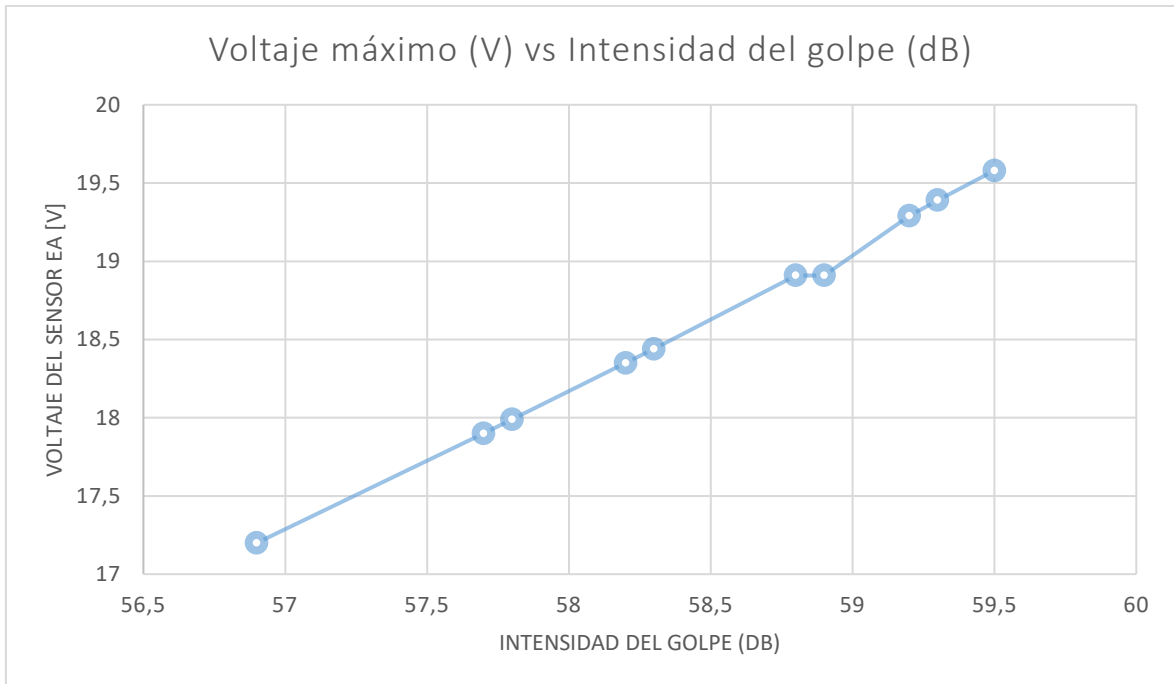


Figura 3.11 Voltaje máximo (V) vs Intensidad del golpe (dB) con perturbación continua

Las pruebas realizadas con la interferencia producida por el taladro aumentaron su valor cuando el taladro estaba cerca del sensor y cuando se lograba perforar la tubería. Después de distintas pruebas ante diferentes impactos se pudo comprobar el correcto funcionamiento del sistema al captar las señales de sonido que se producen al monitorear la tubería.

3.1.6 Almacenamiento de datos

Desde la pantalla principal, al presionar el botón señalado en la figura 38. Se despliega una venta que muestra en pantalla los valores que va capturando el equipo y los almacena en la memoria EPROM del microcontrolador.



Figura 3.12 Pantalla con datos históricos

Una vez almacenados los datos se van mostrando los últimos 10 datos guardados en la memoria EPROM del microcontrolador. En pantalla se pudo observar que cada variación de señal se guarda de forma consecutiva en la memoria y se muestran en pantalla permitiendo al operador observar la variación de voltaje tomadas por el equipo.

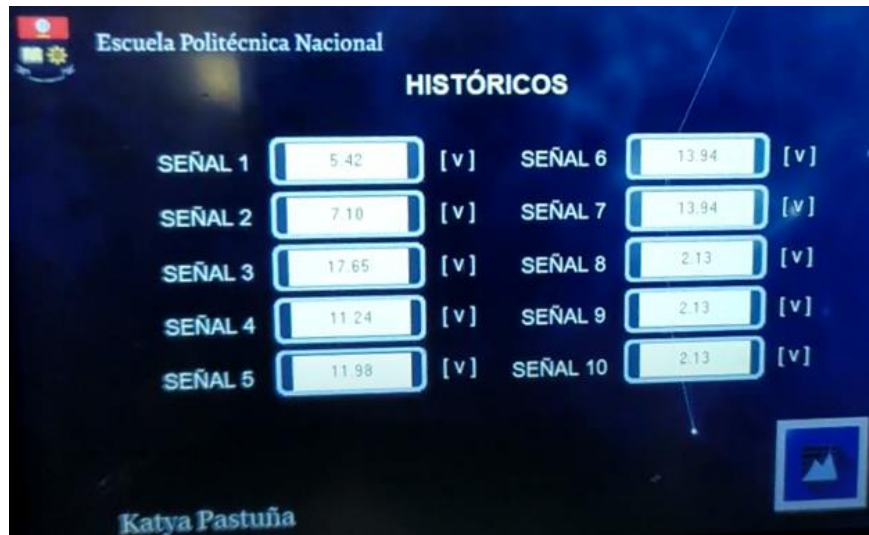


Figura 3.13 Históricos del equipo de detección

3.1.7 Transmisión inalámbrica

La transmisión de datos de forma inalámbrica se realiza mediante el módulo HC05. Una vez encendido el equipo, la comunicación entre los módulos maestro y esclavo se realiza de forma automática. Los datos recibidos por el computador se muestran desde un plot en Matlab.

Una vez captadas las señales por el equipo, una interfaz gráfica desde un computador recibe las señales enviadas desde el sistema. En la siguiente gráfica se muestra un ejemplo de la señal transmitida al dar un golpe a la tubería.

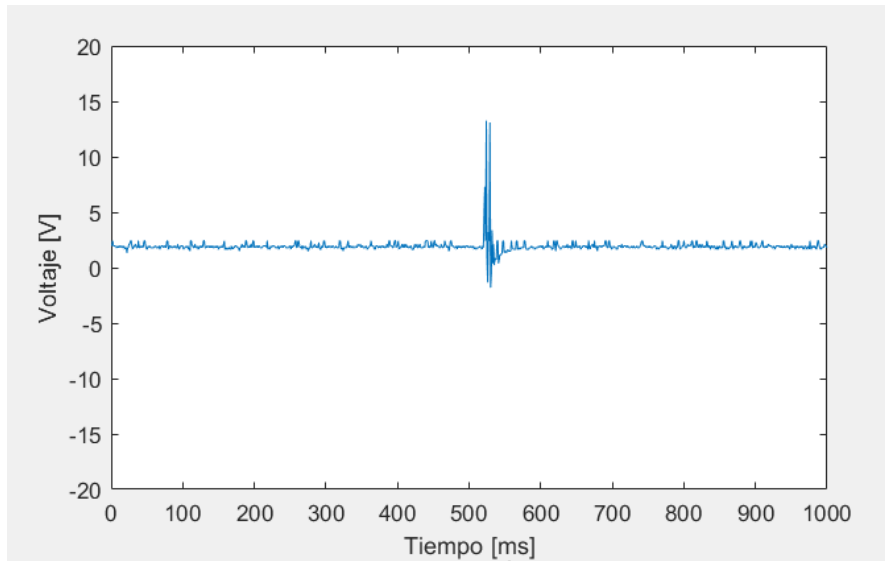


Figura 3.14 Transmisión de señal ante un golpe

Ante una perturbación continua las señales emitidas desde el equipo se muestran en el siguiente gráfico, comprobando que se puede transmitir en tiempo real cualquier señal captada por el sistema de detección por emisión acústica

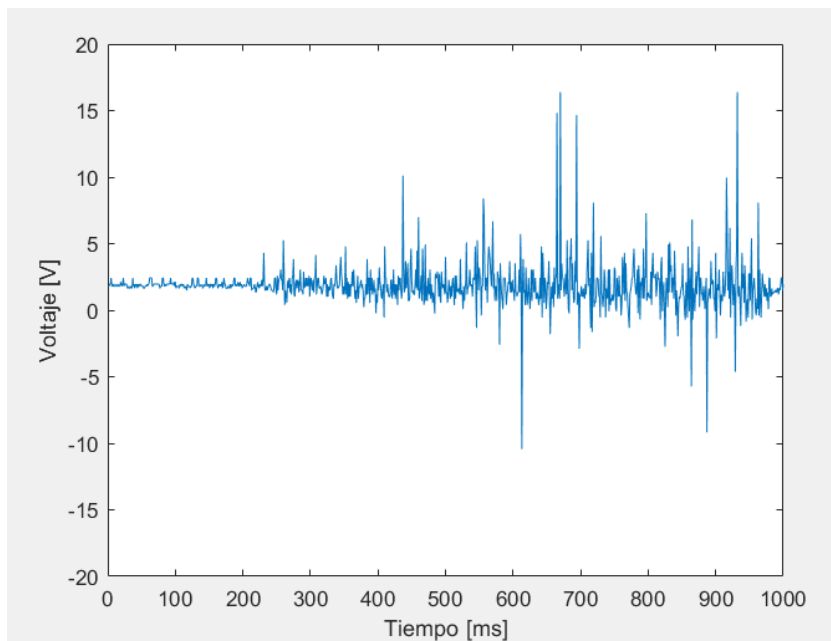


Figura 3.15 Transmisión de señal ante una perturbación continua

3.2 Conclusiones

- Se logró seleccionar un sensor de emisión acústica. Utilizando el sensor GI40 se pudo capturar las ondas sonoras producidas por diferentes perturbaciones en una tubería de petróleo.
- Se pudo acondicionar las señales del sensor mediante la realización de un circuito electrónico. Permitiendo así que el pin analógico del microcontrolador lea las variaciones de señal y las muestre en pantalla con la mayor resolución posible.
- Mediante el microcontrolador Arduino Uno se pudo captar las señales del sensor y procesar esta información para que se muestre en la interfaz gráfica del equipo.
- Mediante la implementación de un algoritmo de programación se pudo almacenar los valores cuantitativos de las señales del sensor. Con estos valores se pudo añadir una ventana en la interfaz gráfica que muestra los datos en tiempo real permitiendo determinar si hubo algún impacto en la tubería.
- Se pudo implementar un protocolo de comunicación entre el sistema desarrollado y un computador permitiendo la transmisión de datos de forma inalámbrica.
- Mediante el módulo bluetooth implementado en el equipo se pudo transmitir las señales del sensor, permitiendo la adquisición de los datos en computador utilizando Matlab.
- Se pudo crear una interfaz gráfica para visualizar las formas de onda de las señales captadas por el sistema
- Se realizaron pruebas del sistema diseñado comprobando que el equipo puede mostrar las señales de emisión acústica, almacenar sus valores y transmitirlos de forma inalámbrica hacia un computador.

3.3 Recomendaciones

- Se recomienda que al utilizar el equipo desarrollado se lea detenidamente el manual proporcionado para evitar daños en el instrumento.
- Si se desea aumentar la capacidad del equipo se puede buscar un microcontrolador con mayor memoria para que el equipo pueda almacenar más datos.

- El sensor utilizado tiene una gran capacidad para captar las señales sonoras a grandes distancias por lo que si se desea tener un mayor rango de medición se puede aumentar la distancia del cable que conecta el equipo con el sensor.
- Para futuros avances del sistema se recomienda implementar un algoritmo que permita visualizar en pantalla el análisis de señal de cada perturbación, utilizando un microcontrolador más avanzado con la capacidad de realizar esta evaluación.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, y P. A. Soni, “Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review”, *Mater Today Proc*, vol. 5, núm. 2, pp. 3690–3698, ene. 2018, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.11.620.
- [2] S. Gholizadeh, “A review of non-destructive testing methods of composite materials”, *Procedia Structural Integrity*, vol. 1, pp. 50–57, ene. 2016, doi: 10.1016/J.PROSTR.2016.02.008.
- [3] M. Strantza, D. G. Aggelis, D. De Baere, P. Guillaume, y D. Van Hemelrijck, “Evaluation of SHM System Produced by Additive Manufacturing via Acoustic Emission and Other NDT Methods”, *Sensors*, vol. 15, pp. 26709–26725, 2015, doi: 10.3390/s151026709.
- [4] S. Al-Hajeri, S. R. Wylie, A. Shaw, y A. I. Al-Shamma’A, “Real time em waves monitoring system for oil industry three phase flow measurement”, *J Phys Conf Ser*, vol. 178, 2009, doi: 10.1088/1742-6596/178/1/012030.
- [5] G. H. Roshani *et al.*, “Simulation study of utilizing x-ray tube in monitoring systems of liquid petroleum products”, *Processes*, vol. 9, núm. 5, 2021, doi: 10.3390/PR9050828.
- [6] E. Martínez González *et al.*, “Aplicación de la técnica de emisión acústica (EA) para auscultación en diversos tipos de materiales y estructuras”, *12 Congreso Español de Ensayos No Destructivos*, vol. 15, pp. 711–721, 2011, Consultado: el 17 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/13449>
- [7] M. Arnaout, L. Berquez, F. Baudoin, y D. Payan, “Contribution to improving the spatial resolution of a pulsed electro acoustic cell measurement - An analysis of acoustics waves propagation”, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD 2010*, 2010, doi: 10.1109/ICSD.2010.5567914.
- [8] J. Li *et al.*, “Acoustic Emission Characterization and Cracking Characteristics of Reinforced Concrete Pipe”, *KSCE Journal of Civil Engineering 2023 27:9*, vol. 27, núm. 9, pp. 3872–3886, jul. 2023, doi: 10.1007/S12205-023-2138-X.
- [9] D. Ozevin y H. Yalcinkaya, “Reliable Monitoring of Leak in Gas Pipelines Using Acoustic Emission Method”, *e-Journal of Nondestructive Testing*, vol. 18, núm. 04,

- abr. 2013, Consultado: el 17 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=13960>
- [10] J. A. Lara Magallanes y M. Sánchez Mtz, “Emisión Acústica: Método de Inspección No Destructivo Para La Evaluación De Componentes Soldados”, *Fax*, núm. 8, pp. 416–61.
- [11] J. L. Ferrando Chacon, V. Kappatos, W. Balachandran, y T. H. Gan, “A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique”, *Applied Acoustics*, vol. 89, pp. 88–100, mar. 2015, doi: 10.1016/J.APACOUST.2014.09.002.
- [12] D. Zurita Millán, “Mechanical fault detection by means of AE analysis”, 2013, Consultado: el 17 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/17580>
- [13] M. A. Hamstad, “A review: Acoustic emission, a tool for composite-materials studies”, *Exp Mech*, vol. 26, núm. 1, pp. 7–13, mar. 1986, doi: 10.1007/BF02319949/METRICS.
- [14] J. R. Naumann, “Acoustic Emission Monitoring of Wind Turbine Bearings”, 2016.
- [15] J. Douglas Eshelby y B. J. D EshELBY, “The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems The determination of the elastic field of an ellip soidal inclusion, and related p roblems”, *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, p. 241, 1957, doi: 10.1098/rspa.1957.0133i.
- [16] A. Terchi y Y. H. J. Au, “Acoustic emission signal processing”, *Measurement and Control*, vol. 34, núm. 8, pp. 240–244, 2001, doi: 10.1177/002029400103400804.
- [17] C. German, O. Farfán, I. Andrés, P. Rivera, I. René, y V. Sánchez, “Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas”, 2016, Consultado: el 18 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12951>
- [18] “GI40 Integral Preamplifier AE Sensor”. <https://www.aendt.com/acoustic/products/Sensors/IntegralPreamplifierSensors/2022/1122/116.html> (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [19] “PPS Preamplifier Power Supply& Signal Separator”. <https://www.aendt.com/acoustic/products/Accessories/2022/1123/143.html?spm=a2700.12243863.0.0.2ce83e5fdpYval> (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [20] “LM741 pdf, LM741 Description, LM741 Datasheet, LM741 view ::: ALLDATASHEET ”: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/228084/FAIRCHILD/LM741.html> (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [21] “LM317 pdf, LM317 Description, LM317 Datasheet, LM317 view ::: ALLDATASHEET ”: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1558621/STMICROELECTRONICS/LM317.html> (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [22] “Amazon.com: Adaptador de fuente de alimentación de 28 V 3 A 84 W AC DC 28 V3A interruptor DC 5,5 2,5/0.083 in : Electrónica”. <https://www.amazon.com/28V->

3A-Adaptor-Adapter-Charger/dp/B07F5G4CT4 (consultado el 18 de agosto de 2023).

- [23] “Amazon.com: GEONAV - Cargador rápido para iPhone, paquete de 2 unidades de 3 pies Lightning a USB, cable de transferencia de datos de carga rápida con alimentación USB, cargador de pared rápido compatible con iPhone/iPad/AirPods : Celulares y Accesorios”. https://www.amazon.com/-/es/GEONAV-Lightning-transferencia-alimentaci%C3%B3n-compatible/dp/B098MJ2BRB/ref=sr_1_11?keywords=cargador%2Bde%2Bcelular&qid=1692441689&refinements=p_36%3A2491155011&rnid=2491154011&srefix=c srgador%2Bde%2Bce%2Caps%2C167&sr=8-11&th=1 (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [24] “Amazon.com: Transformador de control 40 VA, primario 120, 208, 240 V secundario 24 V, horno HVAC multigrifo (paquete de 1) : Herramientas y Mejoras del Hogar”. https://www.amazon.com/-/es/Transformador-control-primario-secundario-multigrifo/dp/B07RDBS6NK/ref=d_bmx_dp_j7g9ya2n_sccl_3_2/142-9092815-1356558?pd_rd_w=YYKj8&content-id=amzn1.sym.ac0e4415-4980-44d9-aed6-ed7c7ceaa14f&pf_rd_p=ac0e4415-4980-44d9-aed6-ed7c7ceaa14f&pf_rd_r=JG0W6X71RW09SZB2ZCZY&pd_rd_wg=vN5On&pd_rd_r=bd6f5cde-9e21-46e7-af82-644a51857a5d&pd_rd_i=B07RDBS6NK&th=1 (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [25] “KBP307 pdf, KBP307 Description, KBP307 Datasheet, KBP307 view ::: ALLDATASHEET ”: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/810931/CHENDA/KBP307.html> (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [26] “HC-05 Bluetooth module HC-05-Bluetooth to Serial Port Module”, 2010.
- [27] “NX8048T050 - Nextion”. <https://nextion.tech/datasheets/nx8048t050/> (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [28] “Fusible de cartucho Eaton MDL-3-10-R 300mA Vidrio, 6.3 x 32mm | RS”. <https://es.rs-online.com/web/p/fusibles-de-cartucho/8527143> (consultado el 18 de agosto de 2023).
- [29] “N4728A to 1N4764A”, Consultado: el 18 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: www.vishay.com
- [30] Ó. Torrente Artero, “Arduino Curso Práctico de formación”, Consultado: el 18 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: www.FreeLibros.me
- [31] R. F. Coughlin Frederick F Driscoll Traducción Efrén Alatorre Miguel Lic en Ciencias Físicas y G. Aranda Flores Ingeniero Electrónico Universidad La Salle, “AMPLIFICADORES. . OPERACIONALES Y CIRCUITOS INTEGRADOS LINEALES / Revisión Técnica”, 1993.
- [32] “SC260 - Sonómetro y analizador de espectro Clase 2 - CESVA instruments”. <https://www.cesva.com/es/productos/sonometros/sc260/#supp> (consultado el 18 de agosto de 2023).