



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



VERACRUZ  
GOBIERNO  
DEL ESTADO



SEV  
Secretaría  
de Educación



DET  
Dirección de Educación  
Tecnológica del Estado  
de Veracruz



# INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE TANTOYUCA



## DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**” DISEÑO DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO PARA EL  
MONITOREO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO  
REFORZADO MEDIANTE EL MÉTODO DE EMISIONES  
ACÚSTICAS Y TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0”**

**TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
INDUSTRIAL**

**PRESENTA:  
ING. MAURO LEONEL GUERRERO GONZALEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. LEOBARDO MENDO OSTOS**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:  
DR. OMAR WILFRIDO VAZQUEZ ESTRADA**

**TANTOYUCA VER, AGOSTO 2025**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y salud para seguir adelante en cada etapa de este camino. Por ser guía y refugio en los momentos de incertidumbre y por bendecirme con personas valiosas a mi lado.

A mi madre, por ser mi mayor referente profesional, por su fortaleza inquebrantable y por enseñarme con el ejemplo a nunca rendirme.

A mi padre, por inculcarme valores que han guiado cada paso en mi formación personal y académica.

A mi hermana, por su apoyo incondicional y constante aliento en los momentos más importantes.

A mi novia, por su compañía, respaldo y comprensión a lo largo de este camino.

A mi madrina, por su cariño, confianza y por estar siempre presente.

A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de este logro.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis docentes, por compartir sus conocimientos con dedicación, exigencia y compromiso, y por haber sembrado en mí la pasión por aprender y superarme constantemente.

A mis amigos, por su compañía, motivación y por estar presentes en los momentos clave de esta etapa. Su amistad ha sido un pilar importante en este camino.

Al Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente en un ambiente de excelencia, apoyo y crecimiento profesional.

Al Instituto Tecnológico Superior de Misantla y al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM, por abrirme las puertas de sus laboratorios y permitirme realizar estancias académicas que enriquecieron enormemente mi formación y experiencia investigadora.

Al COVEICIDET por el respaldo económico otorgado, el cual fue fundamental para llevar a cabo las estancias de mi formación de posgrado.

A cada una de las personas e instituciones que contribuyeron de alguna forma a la realización de este trabajo, les expreso mi más sincero agradecimiento.

**AGRADECIMIENTOS ESPECIALES**

Al SEHICITI, por el valioso apoyo brindado durante mis estudios de posgrado. Gracias a su respaldo, pude dedicarme plenamente al desarrollo de la investigación que hoy presento, contribuyendo de manera significativa a la consolidación de este trabajo académico.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	12
ABSTRACT.....	13
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES/GENERALIDADES .....</b>	<b>14</b>
1.1.    Antecedentes/Revisión de literatura .....	15
1.1.1 Metodología de revisión de literatura. ....	16
1.1.2 Resultados de revisión de literatura .....	17
1.2 Planteamiento del problema / Caso de estudio .....	37
1.3 Pregunta de investigación .....	37
1.4 Hipótesis .....	37
1.5 Objetivos .....	38
1.6 Justificación .....	39
1.7 Alcances .....	39
1.8 Limitaciones:.....	40
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>41</b>
2.1 Industria 4.0 .....	42
2.2 Despliegue de la función de la calidad (QFD).....	44
2.3 AMEF (Análisis de Modo Efecto Falla).....	45
2.4 El Sonido.....	46
<b>2.5 Series de Fourier .....</b>	<b>47</b>
2.5.1 Transformada Rápida de Fourier.....	52
2.6 Espectro en el tiempo y frecuencia .....	55
2.7 Relevancia de EA en el monitoreo estructural.....	58
2.8 Tubo de KUNDUT.....	59
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>61</b>
<b>MARCO METODOLOGICO.....</b>	<b>61</b>
3.1 Diseño de la investigación .....	63
3.1.2 Población y muestra.....	64
Unidad de análisis 1 .....	64
Unidad de análisis 2 .....	66
Unidad de análisis 3 .....	67
3.1.3 Técnicas e instrumentos .....	68
3.1.4 Objeto de Análisis de Estudio .....	69

3.1.5 Tipo de estudio científico.....	69
3.2 Metodología .....	70
3.2.1 QFD (Despliegue de la Función de la Calidad) .....	70
3.2.2 Aplicación de encuestas .....	71
3.2.3 Matriz de evaluación.....	71
3.2.4. Análisis de Modo Efecto Falla.....	82
3.2.5 Matriz AMEF.....	85
3.3 Fichas técnicas de componentes.....	95
3.4 Diseño 3D .....	102
CAPITULO IV. MARCO OPERATIVO .....	103
4.1 Procedimiento operativo .....	104
4.1.2 Diagrama de Bloques (Unidad de análisis 1).....	105
4.1.3 Tabla de componentes. ....	106
4.1.4 Diseño del sistema electrónico en plataforma Proteus. ....	107
4.1.5 Programación en Arduino IDE.....	108
4.1.6 Impresión de carcasa de prototipo. ....	109
4.1.7 Programación en MATLAB para el análisis de señales acústicas.....	111
Unidad de análisis 2 .....	121
Unidad de análisis 3 .....	131
CONCLUSIONES .....	134
DISCUSIONES .....	135
RECOMENDACIONES.....	136
BIBLIOGRAFIA .....	137

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Metodología para la selección y análisis de los métodos no destructivos.....16

Figura 2. Mapa de sismicidad anual 2024.....27

Figura 3. Mapa de sismicidad anual 2023.....27

Figura 4. Mapa de sismicidad anual 2022.....28

Figura 5. Mapa de sismicidad anual 2021.....28

Figura 6. Mapa de sismicidad anual 2020.....29

Figura 7. Registro de sismo en CDMX 2025.....30

Figura 8. Estados y municipios afectados por agrietamientos del suelo en México.....31

Figura 9. Derrumbe de departamentos.....30

Figura 10. Mapa de colapsos observados en la CDMX en el sismo de 2017.....33

Figura 11. Cocina-comedor de una vivienda con agrietamientos visibles en la zona norte de Veracruz.....34

Figura 12. Grietas que comprometen la integridad de la estructura de concreto reforzado.....35

Figura 13. Agrietamiento en loza.....35

Figura 14. Función periódica de periodo.....49

Figura 15. Funciones cosenoidales y senoidales con periodo común  $2\pi$ .....50

Figura 16. Onda Senoidal General.....56

Figura 17. Vibración de un pulso o tono puro la onda senoidal.....57

Figura 18. Representación del tubo de Kundt.....60

Figura 19. Metodología para el diseño de prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado.....62

Figura 20. Geometría de especímenes de pruebas.....64

Figura 21. Armado de probetas.....	65
Figura 22. Probetas de concreto reforzado.....	65
Figura 23. Representación de tubo Kundt para estudio de ondas senoidales.....	66
Figura 24. Representación de tubo de Kundt relleno de concreto con espaciados de aire.....	67
Figura 25. Colocación de espumas en tubo Kundt para evitar pérdidas de presión.....	67
Figura 26. Matriz QFD (Quality Function Deployment) .....	71
Figura 27. Encuesta aplicada a expertos del área civil.....	73
Figura 28. Evaluación de criticidad.....	79
Figura 29 Interrelación de los como.....	80
Figura 30. Diagrama de Ishikawa de posibles fallas en el prototipo de monitoreo.....	84
Figura 31. Diseño 3D de carcasa de prototipo de monitoreo de estructuras de concreto.....	102
Figura 32. Colocación de prototipo en vigas y columnas.....	104
Figura 33. Diagrama de bloques del dispositivo electrónico.....	105
Figura 34. Diagrama esquemático del circuito electrónico del dispositivo.....	107
Figura 35. Diseño impreso de carcasa en PLA de prototipo. (vista trasera) .....	109
Figura 36. Diseño impreso de carcasa en PLA de prototipo. (vista frontal) .....	110
Figura 37. Logo de prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado.....	110
Figura 38. Funcionamiento representativo del monitoreo de estructuras de concreto.....	115
Figura 39. Prototipo físico ensamblado.....	114
Figura 40. Análisis en las probetas de concreto reforzado.....	116
Figura 41. Representación de espectrograma de pulso acústico de ultrasonido.....	117
Figura 42. Análisis de señales en probeta agrietada verticalmente.....	118
Figura 43. Análisis de señales en probeta agrietada horizontalmente.....	119

Figura 44. Análisis de señales en probeta en buenas condiciones.....120

Figura 45. Tubo de Wundt.....121

Figura 46. Desplazamiento de micrófono en tubo de Wundt.....122

Figura 47. Ventana de comandos de algoritmo.....132

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Resumen de métodos no destructivos y sus aplicaciones.....21

Tabla 2. Relación de autores y aspectos clave en el monitoreo de estructuras de concreto.....23

Tabla 3. Diagrama de Gantt para la aplicación de la metodología QFD.....72

Tabla 4 Requerimientos del cliente.....77

Tabla 5 Requisitos técnicos por voz del cliente.....78

Tabla 6. Características técnicas del producto.....80

Tabla 7. Diagrama de Gantt de AMEF .....83

Tabla 8 Matriz AMEF con enfoque en Metodo.....85

Tabla 9 Matriz AMEF con enfoque en Maquinas.....86

Tabla 10 Matriz AMEF con enfoque en Medición.....87

Tabla 11 Matriz AMEF con enfoque en Materiales.....88

Tabla 12 Matriz AMEF con enfoque en Mano de obra.....89

Tabla 13 Matriz AMEF con enfoque en Medio Ambiente.....90

Tabla 14. Instrumentos Utilizados en el Monitoreo de estructuras de concreto.....92

Tabla 15. Parámetros de calibración en el Monitoreo de estructuras de concreto Reforzado.....93

Tabla 16. Parámetros utilizados para validar las señales captadas por el sistema de monitoreo....94

Tabla 17. Lista de componentes.....106

Tabla 18. Resultados de la evaluación de la medición de la potencia instantánea(agua).....127

Tabla 19. Resultados de la evaluación de la medición de la potencia instantánea(aire).....129

Tabla 20. Valores de la potencia instantánea en el tubo de concreto y aire.....131

**INDICE DE GRAFICAS**

Gráfico 1. Distribución porcentual de métodos no destructivos utilizados en el monitoreo de estructuras de concreto reforzado.....18

Gráfico 2. Experiencia de los entrevistados en el área civil.....74

Gráfico 3. Años de experiencia de los usuarios entrevistados.....74

Gráfico 4. Conocimientos sobre dispositivos de monitoreo estructural.....75

Gráfico 5. Criterio de evaluar estructuras.....75

Gráfico 6. Conocimientos de empresas de la región de monitoreo estructural.....76

Gráfico 7. Características ideales del dispositivo de acuerdo con expertos.....76

Gráfico 8. Representación de la señal senoidal en el tubo con agua.....128

Gráfico 9. Representación de la señal senoidal en el tubo con aire.....130

Gráfico 10. Representación de la señal senoidal en el tubo con concreto y aire.....133

Gráfico 11. Representación de la señal senoidal en el código de recepción de la unidad de análisis 3.....133

## RESUMEN

El objetivo de esta tesis es diseñar un prototipo electrónico para el monitoreo de estructuras de concreto reforzado en México, utilizando el método de emisiones acústicas y tecnologías de la Industria 4.0. El prototipo está construido a partir de un sensor acústico de alta sensibilidad y un microcontrolador, los cuales hacen posible la recopilación de datos en tiempo real y su transmisión vía Bluetooth a una interfaz desarrollada en MATLAB. La metodología utilizada incorpora herramientas de ingeniería de calidad, el (QFD) permitió transformar los requerimientos del usuario en especificaciones técnicas para el prototipo, desde el periodo de desarrollo. Se llevaron a cabo experimentos en probetas de concreto reforzado bajo normativas de construcción y experimentos complementarios con el tubo de Kundt, empleando dos unidades de análisis en tubos de concreto que presentan cavidades internas como si fueran fracturas. El procesamiento digital abarcó la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT) para el análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia, así como la aplicación de un filtro pasa banda. El prototipo fue capaz de identificar fracturas con un 90 % de exactitud y una frecuencia de muestreo efectiva entre 21 y 25 kHz, lo que se encuentra entre los resultados más destacados. Asimismo, con la evaluación de AMEF se mostró una disminución media del 55 % en el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) después de implementar mejoras técnicas en el diseño inicial propuesto. En conclusión, el prototipo demuestra ser útil y reproducible, con posibilidades de ser utilizado en trabajos de inspección estructural y mantenimiento. Su diseño multidisciplinario, que incluye calidad, electrónica, estructuras y procesamiento de señales, respalda su factibilidad como una solución tecnológica eficaz para el monitoreo de infraestructuras.

Palabras clave: Salud estructural, Industria 4.0, Monitoreo inteligente.

## ABSTRACT

The objective of this thesis is to design an electronic prototype for monitoring reinforced concrete structures in Mexico, using the acoustic emissions method and Industry 4.0 technologies. The prototype is built from a high-sensitivity acoustic sensor and a microcontroller, which enable real-time data collection and transmission via Bluetooth to an interface developed in MATLAB. The methodology used incorporates quality engineering tools (QFD) that allowed the user requirements to be transformed into technical specifications for the prototype, from the development period. . Experiments were carried out on reinforced concrete specimens under construction regulations, and complementary experiments were carried out with the Kundt tube, using two test units in concrete tubes that exhibit internal cavities resembling fractures. Digital processing included the application of the fast Fourier transform (FFT) for time and frequency domain analysis, as well as the application of a band-pass filter. The prototype was able to identify fractures with 90% accuracy and an effective sampling rate between 21 and 25 kHz, which is among the most notable results. Furthermore, the FMEA evaluation showed an average 55% decrease in the Risk Priority Number (RPN) after implementing technical improvements to the initial proposed design. In conclusion, the prototype proves to be useful and reproducible, with potential for use in structural inspection and maintenance work. Its multidisciplinary design, which includes quality, electronics, structures, and signal processing, supports its feasibility as an effective technological solution for infrastructure monitoring.

Keywords: Structural health, Industry 4.0, Smart monitoring.

# CAPÍTULO I. ANTECEDENTES / GENERALIDADES

## 1.1. Antecedentes/Revisión de literatura

El Monitoreo de Salud (Health Monitoring en inglés) es una herramienta importante para evaluar la salud y el desempeño de las estructuras civiles a través del registro continuo, periódico o permanente de parámetros que indican su estado (Garita, 2016). Este enfoque permite anticipar e identificar fallas y daños, lo cual es esencial para garantizar la seguridad y extender la vida útil de las estructuras (Illescas y Chuisaca, 2022). En particular, el concreto reforzado es el segundo material más utilizado en el mundo, y está expuesto al deterioro por condiciones extremas como cargas excesivas, corrosión del hierro incrustado, heladas o sobrecargas (Taheri, 2019). Estos factores pueden comprometer la integridad estructural, especialmente cuando las fisuras en la superficie del concreto indican que la corrosión ya se encuentra en una fase avanzada (Rodrigues et al., 2021).

Las grietas en el concreto reforzado no solo son un indicador de daño, sino que también facilitan la penetración de iones corrosivos, acelerando tanto la corrosión como el proceso de agrietamiento (Fan y Bao, 2021). Aunque el agrietamiento es un fenómeno natural en este material, las grietas de gran tamaño pueden comprometer la durabilidad y estabilidad de las estructuras (Berrocal et al., 2021). Por ello, es fundamental implementar técnicas de monitoreo que permitan detectar estos problemas de manera temprana sin dañar en la evaluación las estructuras ya deterioradas (QVER, 2021).

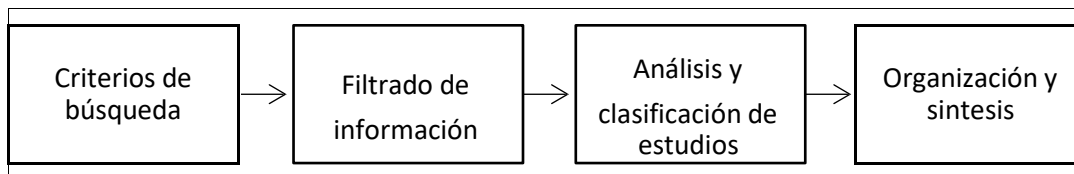
En este contexto, los métodos no destructivos han ganado relevancia debido a su capacidad para evaluar la integridad estructural sin alterar las propiedades físicas del material (Kot et al., 2021). Entre estos métodos destacan la emisión acústica, el ultrasonido, los sensores de fibra óptica y las técnicas avanzadas de análisis de datos, los cuales permiten monitorear grietas, corrosión y otros daños de manera eficiente (Zhang et al., 2020; Abdel-Jaber y Glisic, 2019). Sin embargo, la efectividad de estos métodos puede variar según las propiedades específicas del concreto y la geometría de la estructura, lo que plantea la necesidad de adaptaciones y mejoras continuas (Cai, 2019).

El objetivo de esta revisión de literatura es analizar y sintetizar el conocimiento existente sobre el monitoreo de estructuras de concreto reforzado, con el fin de proporcionar un marco de referencia que oriente futuras investigaciones y desarrollos en el área de salud estructural. Esta revisión se

enfoca en métodos no destructivos, destacando sus principales contribuciones y limitaciones, así como su potencial para ser implementados en diversos contextos. Se plantea la hipótesis de que los métodos no destructivos, aunque efectivos a nivel global, podrían requerir adaptaciones para su aplicación en contextos específicos, considerando variaciones en materiales, condiciones ambientales y técnicas constructivas.

### 1.1.1 Metodología de revisión de literatura.

La revisión de literatura se llevó a cabo siguiendo un enfoque sistemático para garantizar la recopilación y análisis de información relevante y de alto impacto en el ámbito académico. Este proceso se desarrolló en varias etapas: planificación, ejecución de la revisión y presentación de resultados (Covarrubias et al., 2022). La figura 1 muestra los pasos detallados que se siguieron para la selección y análisis de los estudios.



**Figura 1.** Metodología para la selección y análisis de los métodos no destructivos utilizados para el monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Fuente: El autor.

**Identificación de bases de datos y criterios de búsqueda:** Se seleccionaron bases de datos reconocidas por su rigor académico y cobertura en temas relacionados con la ingeniería civil, la ciencia de materiales y los sistemas de monitoreo estructural. Entre las bases de datos consultadas se incluyen Redalyc, ScienceDirect, Springer, ResearchGate, Scielo, Elsevier, Google Patentes, WIPO, FPO y Espacenet. El criterio de búsqueda se basó en palabras clave como: concrete structures, acoustic emission, structural monitoring, y SHM systems.

**Filtrado de información:** Se aplicó un filtro temporal para seleccionar estudios publicados entre 2018 y 2024, asegurando que la información revisada fuera actualizada y relevante. Este conjunto incluyó estudios experimentales, revisiones de literatura y desarrollos tecnológicos relacionados con el monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Además, se eliminaron estudios duplicados y aquellos que no cumplían con los criterios de calidad establecidos.

**Análisis y clasificación de estudios:** Los estudios seleccionados fueron analizados en función de su relevancia y el método de monitoreo no destructivo empleado. Se clasificaron según las siguientes categorías principales: métodos basados en emisión acústica, métodos ópticos y de visión artificial, sensores de fibra óptica, análisis modal y vibracional, métodos basados en ultrasonido y tomografía computarizada, sensores piezoeléctricos, acelerometría y resistividad eléctrica y técnicas avanzadas de análisis de datos.

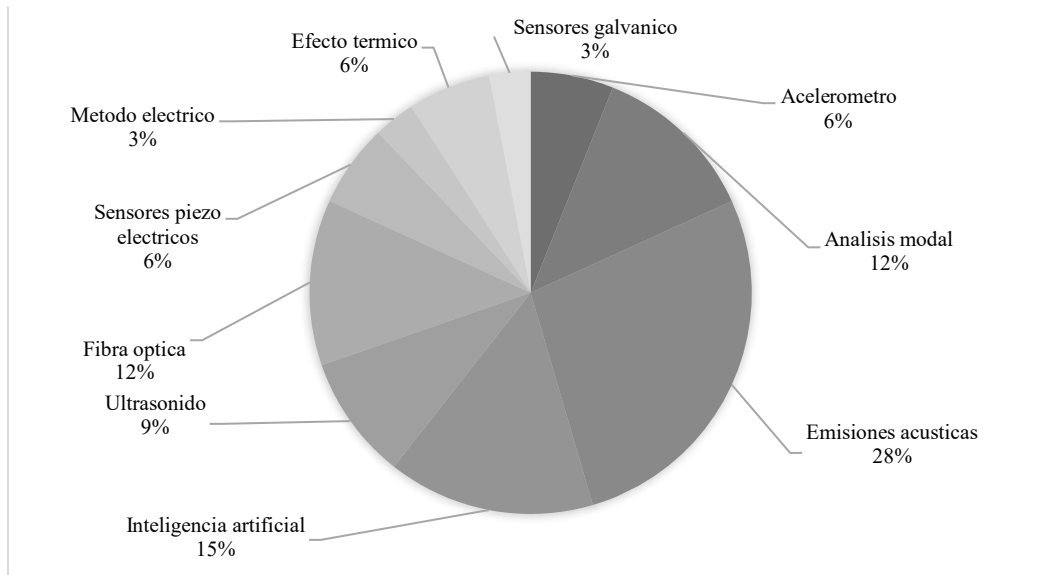
**Organización y síntesis de la información:** La información recolectada fue organizada en una tabla que relaciona los autores con los aspectos clave en el monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Esta tabla agrupa los aspectos clave en tres categorías principales: parámetros de monitoreo estructural (adquisición de datos, frecuencias altas y bajas), factores de deterioro estructural (corrosión, resistencia y temperatura), y procesos y tecnologías de análisis (aplicación de algoritmos).

**Presentación de resultados:** Finalmente, los resultados se presentaron de manera estructurada, destacando las contribuciones principales de cada método no destructivo y su potencial aplicación en el monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Este enfoque permitió identificar tendencias, limitaciones y áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

### 1.1.2 Resultados de revisión de literatura

La revisión de literatura permitió identificar y clasificar los métodos no destructivos más utilizados para el monitoreo de estructuras de concreto reforzado en el periodo 2018-2024. A continuación, se presentan los resultados organizados según las categorías principales de métodos no destructivos, destacando sus contribuciones, aplicaciones y limitaciones. Además, se incluye una gráfica que resume la distribución porcentual de los métodos más utilizados en los estudios revisados.

El gráfico 1 muestra el porcentaje de métodos no destructivos utilizados en los estudios revisados durante el periodo 2018-2024. Como se observa, los métodos basados en **emisión acústica (EA)** y **sensores de fibra óptica (OFS)** son los más predominantes, representando un **28%** y **12%** del total, respectivamente. Estos métodos destacan por su capacidad para detectar grietas y corrosión de manera precisa y no invasiva. Por otro lado, técnicas como la **visión artificial** y el **análisis modal** han ganado relevancia en los últimos años, representando un **15%** y **12%**, respectivamente, debido a su integración con tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático.



**Gráfico 1.** Distribución porcentual de métodos no destructivos utilizados en el monitoreo de estructuras de concreto reforzado (2018-2024) Fuente: El autor.

### Métodos Basados en Emisión Acústica (EA)

Los métodos de emisión acústica (EA) se destacan por su capacidad para detectar defectos activos, como grietas y corrosión localizada, mediante ondas elásticas generadas por cambios en la tensión del material (Zhang et al., 2020; Cai, 2019). Los sensores de EA captan estas ondas en la superficie del concreto, permitiendo analizar el origen y la evolución del daño (Verstryngte et al., 2022; Burud y Kishen, 2021). Técnicas avanzadas, como la descomposición wavelet y el modelo de mezcla gaussiana (GMM), han demostrado ser efectivas para identificar patrones de daño con alta

precisión (Wang et al., 2022; Yu et al., 2024). Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones relacionadas con las propiedades específicas del concreto y la geometría de la estructura, lo que requiere ajustes para su implementación en diferentes contextos.

### **Métodos Ópticos y de Visión Artificial**

La inteligencia artificial (IA) y la visión artificial han revolucionado el monitoreo de estructuras al permitir el análisis de grandes volúmenes de datos y la detección de patrones estructurales complejos (Salazar y López, 2024). La visión artificial, en particular, permite evaluar la estructura mediante imágenes capturadas en distintos intervalos de tiempo, utilizando algoritmos avanzados para comparar datos de monitoreo con métodos convencionales (Dong y Catbas, 2021; Tyson II, 2022). Estas técnicas han demostrado ser especialmente útiles en la supervisión continua de infraestructuras como puentes, donde se integran métodos de escaneo por triangulación dinámica y reconocimiento de imágenes para una evaluación precisa y en tiempo real (Flores-Fuentes et al., 2022).

### **Sensores de Fibra Óptica (OFS)**

Los sensores de fibra óptica (OFS) se basan en la transmisión de luz a través de un cable de fibra óptica para detectar y monitorear la evolución de grietas y la corrosión en el concreto reforzado (Bado et al., 2021; Berrocal et al., 2021). Estos sensores aplican algoritmos de corrección de anomalías, lo que mejora la precisión en el análisis del estado estructural y la evaluación de pérdidas de pretensado (Fan y Bao, 2021; Abdel-Jaber y Glisic, 2019). Aunque son altamente precisos, su implementación puede ser costosa y técnicamente compleja, lo que limita su uso en proyectos convencionales.

### **Análisis Modal y Vibracional**

El análisis modal evalúa la respuesta dinámica de una estructura a partir de sus parámetros modales, como la frecuencia, el amortiguamiento y la forma de modo (Liu et al., 2021). Métodos como el exponencial complejo de mínimos cuadrados multicanal (LSCE) y el promedio móvil autorregresivo multicanal (ARMA) han mejorado la precisión en la identificación de daños estructurales (Zhuo et al., 2021). Este enfoque es particularmente útil para la detección de daños múltiples y la actualización de modelos estructurales (González-Estrada et al., 2020).

### **Métodos Basados en Ultrasonido y Tomografía Computarizada**

El ultrasonido mide el tiempo de propagación de ondas ultrasónicas para detectar grietas y estimar la resistencia del concreto (Carcaño, 2021; Soejima y Nakano, 2023). La tomografía ultrasónica permite la localización precisa de anomalías estructurales y el monitoreo del deterioro progresivo (Li et al., 2021; Basu et al., 2021). Estas técnicas son altamente efectivas para evaluar la integridad de estructuras de concreto reforzado, aunque su aplicación puede verse limitada por la complejidad del equipo requerido.

### **Sensores Piezoeléctricos**

Los sensores piezoeléctricos, como los sensores de agregado inteligente, se utilizan para detectar grietas y evaluar su propagación en estructuras de concreto (Yan et al., 2020). Tubos cerámicos piezoeléctricos permiten filtrar señales estructurales, mejorando la precisión del monitoreo (Kong et al., 2023). Estos sensores son altamente sensibles, pero su implementación puede ser costosa y requerir un mantenimiento especializado.

### **Acelerometría y Resistividad Eléctrica**

La acelerometría evalúa la rigidez estructural y la fuerza de preesfuerzo a través de frecuencias naturales (Abdel-Jaber y Glisic, 2019). Por otro lado, la tomografía de resistividad eléctrica permite analizar la heterogeneidad del material y detectar corrosión (Rodrigues et al., 2021). Estas técnicas son prometedoras, pero su efectividad puede verse afectada por variaciones en las condiciones ambientales.

### **Técnicas Avanzadas de Análisis de Datos**

La distorsión temporal dinámica y los algoritmos de compensación de temperatura han demostrado ser efectivos para la detección de daños estructurales, minimizando el impacto de variaciones térmicas en los datos obtenidos (Li et al., 2024; Kang et al., 2019). Estas técnicas avanzadas permiten una evaluación más precisa de anomalías estructurales, aunque su implementación requiere un alto nivel de expertise técnico.

Los resultados demuestran que los métodos no destructivos son altamente efectivos para el monitoreo de estructuras de concreto reforzado, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. La combinación de métodos, como la emisión acústica con sensores de fibra óptica o el ultrasonido

con técnicas avanzadas de análisis de datos, muestra un potencial prometedor para mejorar la precisión y eficacia del monitoreo estructural. Sin embargo, el alto costo y la complejidad técnica de algunas de estas tecnologías pueden limitar su accesibilidad en proyectos convencionales.

**Tabla 1.** Resumen de métodos no destructivos y sus aplicaciones

<b>Método</b>	<b>Aplicación principal</b>	<b>Limitaciones</b>
Emisión Acústica (EA)	Detección de grietas y corrosión localizada	Depende de las propiedades del concreto y la geometría de la estructura
Visión Artificial e IA	Análisis de imágenes y detección de patrones estructurales	Requiere infraestructura tecnológica avanzada
Sensores de Fibra Óptica (OFS)	Monitoreo de grietas y corrosión	Alto costo y complejidad técnica
Análisis Modal	Evaluación de la respuesta dinámica y detección de daños múltiples	Requiere equipos especializados y expertise técnico
Ultrasonido y Tomografía	Localización de anomalías y estimación de la resistencia del concreto	Equipamiento costoso y complejo
Sensores Piezoeléctricos	Detección de grietas y evaluación de su propagación	Sensibilidad a condiciones ambientales
Acelerometría	Evaluación de la rigidez estructural	Limitado por variaciones en las condiciones ambientales
Técnicas Avanzadas de Datos	Compensación de temperatura y detección de daños estructurales	Requiere expertise técnico y procesamiento de grandes volúmenes de datos

Datos tomados de artículos del periodo de 2018-2024 de métodos no destructivos para el análisis de estructuras de concreto. Fuente: El autor

Los métodos basados en **emisión acústica (EA)** y **sensores de fibra óptica (OFS)** demostraron ser altamente efectivos para la detección temprana de grietas y corrosión. Sin embargo, su implementación universal enfrenta limitaciones relacionadas con las propiedades específicas del concreto y la geometría de las estructuras.

La integración de **inteligencia artificial (IA)** y **visión artificial** ha revolucionado el monitoreo estructural, permitiendo el análisis de grandes volúmenes de datos y la detección de patrones complejos. Estas tecnologías muestran un potencial prometedor, aunque su adopción en proyectos convencionales aún enfrenta desafíos como el alto costo y la falta de infraestructura tecnológica. La combinación de métodos no destructivos, como la emisión acústica con ultrasonido o sensores de fibra óptica con técnicas avanzadas de análisis de datos, ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la precisión y eficacia del monitoreo estructural. Esta sinergia permite abordar limitaciones individuales y optimizar la detección de daños. Se identificó una escasez de estudios que aborden las características particulares del concreto utilizado en regiones con condiciones ambientales y materiales específicos. Esto resalta la necesidad de investigaciones adaptadas a contextos locales, considerando factores como la humedad, la temperatura y las técnicas constructivas.

La tabla 2 relaciona los autores con los aspectos clave en el monitoreo de estructuras de concreto, además agrupa los aspectos clave en el monitoreo de estructuras de concreto en tres grandes categorías: Parámetros de monitoreo estructural (adquisición de datos, frecuencias altas y bajas), factores de deterioro estructural (corrosión estructural, resistencia y temperatura) y procesos y tecnología de análisis (aplicación de algoritmos).

**Tabla 2.** Relación de autores y aspectos clave en el monitoreo de estructuras de concreto.

Autor	Parámetros		Factores de Deterioro			Tecnologías
	Adquisición de datos	Frecuencias altas y bajas	Corrosión estructural	Resistencia	Temperatura	Aplicación de algoritmos
Abdel-Jaber y Glisic (2019a)		✓				
Abdel-Jaber y Glisic (2019b)			✓			
Bado et al. (2021)				✓		
Basu et al. (2021)		✓		✓		
Berrocal et al. (2021)				✓		
Burud y Kishen (2021)		✓				
Cai (2019)			✓			
Cárdenas y Medina (2021)		✓				
Carcaño (2021)		✓		✓		
Dong y Catbas (2021)	✓					
Fan y Bao (2021)			✓			
Flores-Fuentes et al. (2022)	✓					✓
González-Estrada et al. (2020)		✓				
Kang et al. (2019)	✓				✓	
Li et al. (2021)	✓				✓	
Li et al. (2024)			✓		✓	
Liu et al. (2021)		✓		✓		
Rather et al. (2024)		✓		✓		
Rodrigues et al. (2021)			✓	✓		
Soejima y Nakano (2023)		✓				
Tyson II (2022)			✓			
Valdés et al. (2021)			✓		✓	
Verstrynge et al. (2022)		✓	✓			
Wang et al. (2022)						
Xia y Ni (2018)			✓			
Yan et al. (2020)	✓					
Yu et al. (2024)	✓					
Zhang et al. (2020)		✓				
Zhuo et al. (2021)	✓	✓	✓			
Ziehl (2023)	✓					

**Fuente:** Resumen de estudios relevantes sobre el monitoreo de estructuras de concreto reforzado, organizados según los principales parámetros de monitoreo estructural, factores de deterioro estructural y procesos y tecnologías de análisis utilizados en la literatura revisada. La literatura revisada demuestra la importancia de abordar múltiples factores, y considerar la adquisición de datos, la resistencia, la temperatura, corrosión, aplicación de algoritmos y las frecuencias en los estudios de monitoreo de estructuras de concreto.

Los resultados de esta revisión tienen implicaciones significativas para la práctica de la ingeniería civil y el monitoreo de estructuras. La implementación de métodos no destructivos puede prolongar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, reducir costos de mantenimiento y mejorar la seguridad. Sin embargo, es esencial considerar las limitaciones técnicas y económicas de estas tecnologías, especialmente en proyectos de menor escala o en regiones con recursos limitados.

Las recomendaciones para futuras investigaciones se centran en tres aspectos clave: adaptación a contextos locales, integración de tecnologías y reducción de costos.

**Adaptación a Contextos Locales:** Futuras investigaciones deberían enfocarse en adaptar los métodos no destructivos a las condiciones específicas de regiones con características ambientales y materiales particulares. Esto incluye el desarrollo de protocolos de monitoreo ajustados a las variaciones en humedad, temperatura y técnicas constructivas.

**Integración de Tecnologías:** Es fundamental investigar la combinación de tecnologías innovadoras, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, con enfoques convencionales, con el fin de aumentar la exactitud y eficacia en el monitoreo de la salud estructural

**Reducción de Costos:** Es fundamental investigar estrategias para reducir los costos asociados con la implementación de métodos no destructivos, especialmente en proyectos de infraestructura pública y en países en desarrollo.

Los resultados respaldan la hipótesis de que los métodos no destructivos, aunque efectivos a nivel global, podrían requerir adaptaciones para su aplicación en contextos específicos. Por ejemplo, las variaciones en las propiedades del concreto y las condiciones ambientales pueden afectar la efectividad de estos métodos, lo que resalta la necesidad de investigaciones adaptadas a cada contexto.

Esta revisión de literatura proporciona un marco de referencia sólido para el desarrollo de metodologías eficaces y adaptadas a las necesidades específicas del entorno local e internacional. La hipótesis central de esta investigación plantea que, aunque los métodos no destructivos son altamente efectivos a nivel global, su aplicación en contextos específicos —considerando variaciones en materiales, condiciones ambientales y técnicas constructivas— podría requerir adaptaciones para optimizar su eficacia. Esta hipótesis se sustenta en los hallazgos que demuestran que las propiedades del concreto, la geometría de las estructuras y las condiciones ambientales influyen significativamente en la efectividad de estos métodos.

La combinación de tecnologías tradicionales y emergentes, como la emisión acústica, los sensores de fibra óptica y la inteligencia artificial, muestra un potencial prometedor para mejorar la precisión y eficiencia del monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Sin embargo, su implementación en proyectos convencionales enfrenta desafíos, como el alto costo y la complejidad técnica, lo que limita su accesibilidad en regiones con recursos limitados. Por ello, es fundamental enfocarse en la reducción de costos y la adaptación de estas tecnologías a condiciones locales, garantizando así su aplicabilidad en diversos contextos.

Futuras investigaciones deberían validar esta hipótesis mediante estudios de caso en diferentes contextos geográficos y ambientales, con el objetivo de desarrollar protocolos de monitoreo ajustados a las particularidades de cada región. Además, se recomienda explorar la integración de tecnologías avanzadas, como el aprendizaje automático y la visión artificial, con métodos no destructivos tradicionales, para optimizar la detección de daños y prolongar la vida útil de las estructuras civiles. La adaptación de los métodos no destructivos a contextos específicos, junto con la combinación de tecnologías tradicionales y emergentes, será clave para garantizar la seguridad, durabilidad y sostenibilidad de las estructuras de concreto reforzado en el futuro. Esta revisión no solo orienta futuras investigaciones, sino que también promueve el desarrollo de metodologías más eficaces y accesibles para el monitoreo de la salud estructural a nivel global.

En conclusión, esta revisión no solo proporciona un marco de referencia para futuras investigaciones, sino que también promueve el desarrollo de metodologías más eficaces y accesibles para el monitoreo de la salud estructural. La adaptación de los métodos no destructivos a contextos específicos será clave para garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras civiles en el futuro.

### 1..1.2 Causas del agrietamiento estructural

Los daños en las estructuras pueden originarse tanto por causas naturales como por acciones humanas. Entre estas últimas se incluyen el uso inapropiado de la edificación, la sobrecarga más allá de su capacidad de diseño, la falta de mantenimiento y una construcción deficiente sin supervisión profesional. En cuanto a los fenómenos naturales, los más relevantes son los geológicos como sismos, actividad volcánica, deslizamientos de tierra y hundimientos y los hidrometeorológicos, tales como huracanes, lluvias intensas, desbordamiento de ríos e inundaciones(CENAPRED, 2025).

Durante el sismo de 2017 el principal factor que influyó en los daños estructurales fue la amplificación sísmica del suelo en la zona del antiguo lago en la Ciudad de México, específicamente en las zonas clasificadas como IIIa y IIIb. La mayoría de las afectaciones se registraron en edificaciones construidas antes de 1985, año en que se modificó y fortaleció la normatividad estructural del entonces Distrito Federal(Hernández et al., 2019). A raíz de los sismos ocurridos el 7 y el 19 de septiembre de 2017, se registraron daños en más de 170 mil viviendas. De estas, aproximadamente 115 mil presentaron afectaciones de tipo moderado que pueden ser reparadas, mientras que cerca de 60 mil sufrieron daños severos que hacen necesaria su reconstrucción(Palacio Legislativo de San Lázaro, 2023).

El Servicio Sismológico Nacional reportó que, en México del 2020-07-01 al 2025-07-06 , han sucedido **145796** sismos reportados, buscando a partir de todas las magnitudes, todas las profundidades y en todo el país(SSN UNAM, 2025).Un análisis de viviendas y edificios comerciales en la Ciudad de México tras el sismo de septiembre de 2017 reportó que la mayoría de las estructuras colapsadas se encontraban en zonas donde la influencia del periodo fundamental del suelo aumentaba las demandas dinámicas, evidenciando cómo los efectos del sismo inducen grietas al superar los esfuerzos resistentes(Sánchez & Angulo, 2019) .

A continuación, se presentan los mapas anuales de sismicidad de México para el período 2020-2024, que permiten visualizar la distribución geográfica y la frecuencia de los eventos sísmicos ocurridos durante ese periodo.





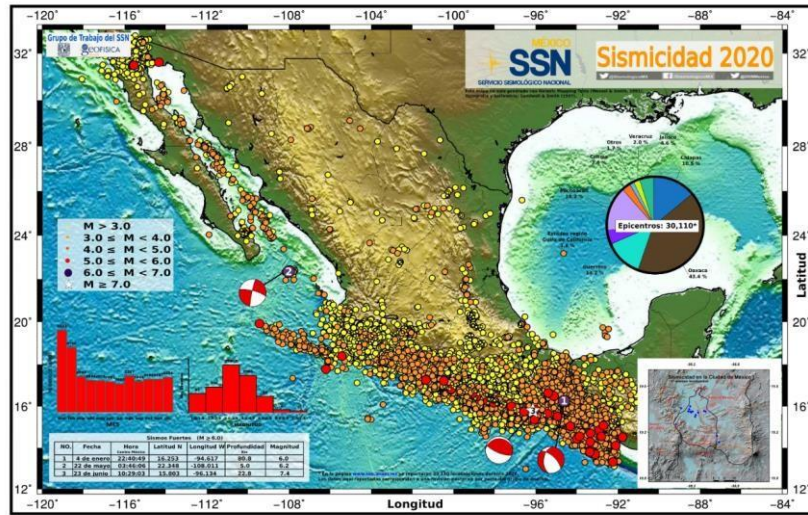


Figura 6. Mapa de sismicidad anual 2020. Fuente: Servicio Sismológico Nacional.

Se concluye que los sismos, junto con los asentamientos del suelo, constituyen dos de las principales causas de agrietamiento en viviendas en México. Estos fenómenos generan esfuerzos estructurales y deformaciones que, al superar la capacidad resistente de los materiales o con deficiencias constructivas, provocan la aparición de fisuras y daños en muros, losas y elementos de las estructuras.

La figura 7 muestra el registro de un sismo captado por una estación acelero gráfica perteneciente al CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), específicamente la estación CENA\_HL, ubicada en la Ciudad de México. El evento sísmico ocurrió el 28 de febrero de 2025, con una magnitud de 5.1 y fue registrado por una estación acelero gráfica en suelo basáltico (alta rigidez). Se observaron aceleraciones sísmicas de hasta 2.20 g en el componente NS, indicando un movimiento fuerte en esa dirección, lo que causo serios agrietamientos en viviendas.

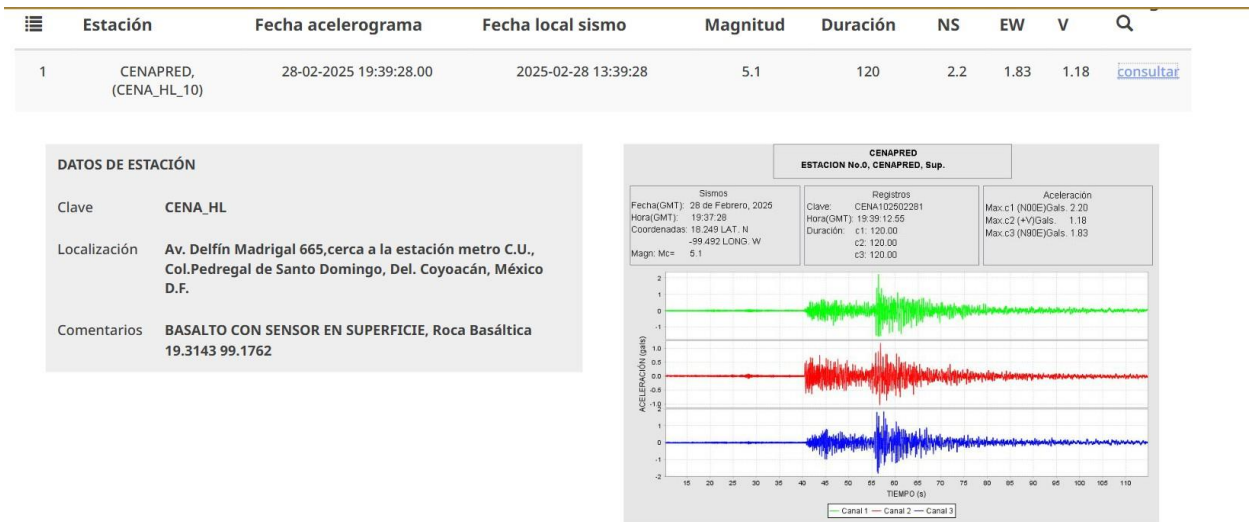


Figura 7. Registro de sismo en CDMX 2025. Fuente: CENAPRED

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) ha registrado diversos casos de hundimientos y agrietamientos del suelo en México. Hasta diciembre de 2021, se han identificado afectaciones en al menos 324 municipios y 15 alcaldías del país, que han impactado viviendas, vialidades, infraestructura, industrias, zonas agrícolas, tuberías y puentes. Las causas de estos fenómenos varían; algunos están relacionados con la extracción de agua subterránea, otros con lluvias intensas, pero la mayoría de los hundimientos son eventos súbitos originados por fugas o fallas en los sistemas de agua potable y drenaje. En la Figura 8 se presenta un mapa que localiza todos los municipios afectados, clasificados según el detonante principal que provocó el daño en cada zona.

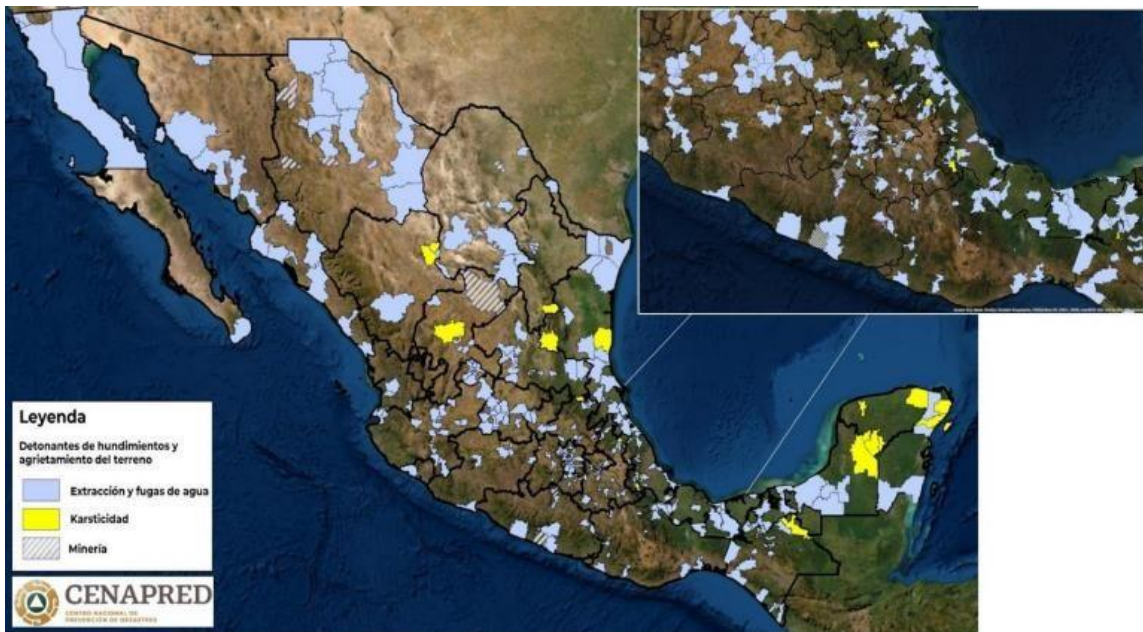


Figura 8. Estados y municipios afectados por agrietamientos del suelo en México. Fuente: CENAPRED

La Figura 9 muestra las devastadoras consecuencias estructurales ocasionadas por un colapso en un edificio de departamentos, producto de un evento sísmico. Este tipo de imágenes evidencian la vulnerabilidad de muchas edificaciones ante fenómenos naturales, resaltando la importancia del monitoreo estructural y la aplicación de normativas de construcción adecuadas. La documentación gráfica, como la presentada por el Centro de Estudios Demográficos Urbanos y Ambientales (2017), permite reflexionar sobre la necesidad de reforzar medidas de prevención y resiliencia en zonas urbanas densamente pobladas.



Figura 9. Derrumbe de departamentos. Centro de estudios demográficos urbanos y ambientales. 2017

Según un artículo de Rodríguez (2019) en la revista Ingeniería Sísmica de México (ver figura 10), la mayoría de los edificios analizados presentaban fracturas o agrietamientos. El sistema estructural típico se basa en marcos de concreto reforzado con o sin mamposteros divisorios, conocido como "planta baja débil", lo cual se debe a la presencia de elevaciones sobre el nivel del suelo, con o sin mamposteros. Por su naturaleza, estas estructuras basadas en marco estructuras puede que no tengan suficiente rigidez lateral. La cantidad de esfuerzo invertido en ellas no cumple con los estándares internacionales para el diseño de estructuras en zonas sísmicas, principalmente porque desde antes de 1985 hasta después de esta fecha la normativa por sismo en la ciudad de México permitía la construcción de marcos de concreto reforzado sin los requisitos especiales de diseño para elementos estructurales en zonas sísmicas.

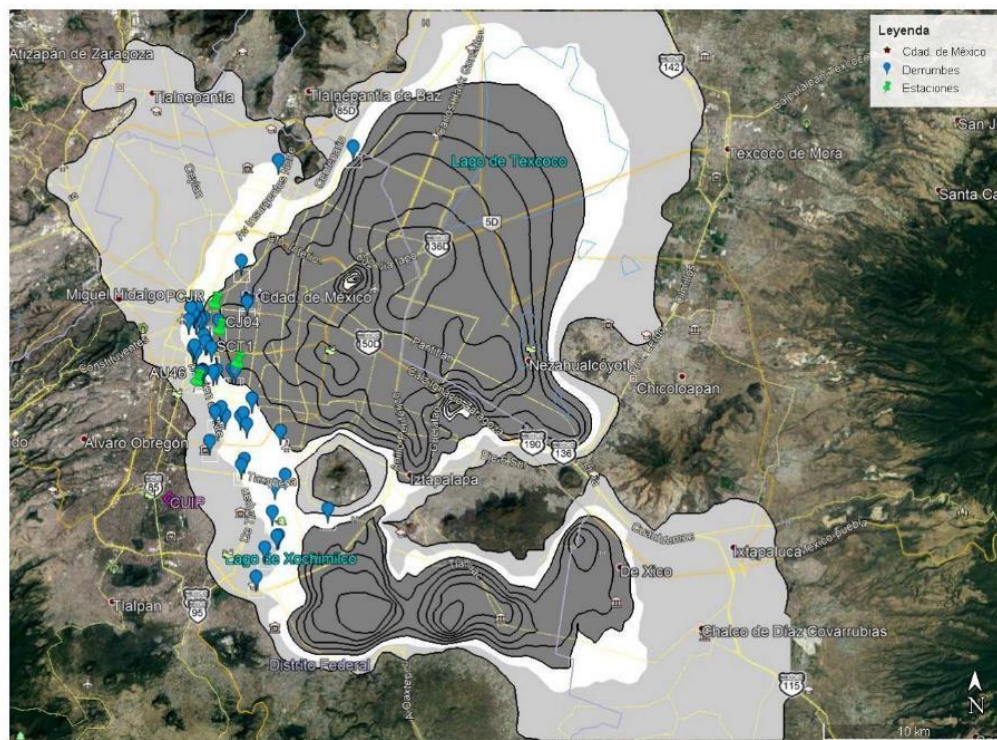


Figura 10. Mapa de colapsos observados en la CDMX en el sismo de 2017 de acuerdo a Rodríguez 2019, en la Revista Sísmica de México.

En las Figuras 11, 12 y 13 se muestra el agrietamiento progresivo de una vivienda ubicada en la zona norte del estado de Veracruz, donde es evidente la aparición de fisuras en elementos estructurales como muros, columnas y losa. Estas grietas presentan distintas orientaciones y longitudes, lo que sugiere afectaciones por asentamientos diferenciales del terreno, deterioro por humedad y desgaste de materiales. El análisis visual de estas fotografías permite identificar patrones de daño que podrían comprometer la estabilidad de la vivienda, por lo que resulta necesario complementar con estudios técnicos de mecánica de suelos, resistencia de materiales y monitoreo estructural continuo para evaluar el riesgo y definir acciones correctivas o preventivas.



Figura 11. Cocina-comedor de una vivienda con agrietamientos visibles en la zona norte de Veracruz. Fuente: El autor.



Figura 12. Grietas que comprometen la integridad de la estructura de concreto reforzado.

Fuente: El autor



Figura 13. Agrietamiento en loza. Fuente: El autor

Los edificios de concreto reforzados en áreas de alta sismicidad, no solo en la Ciudad de México, sino también en otras regiones sísmicas del país, deben ser diseñados con las especificaciones para elementos estructurales especiales que establece el ACI 318. Esto significa que las regulaciones de construcción en la Ciudad de México y en el país no deben permitir el uso de estructuras con ductilidad restringida en áreas propensas a sismos. Se trata de estructuras diseñadas con  $Q=2$ , un valor que se toma normalmente para el diseño de edificaciones a prueba de sismos en la mayoría del territorio mexicano (Rodríguez, 2019).

## 1.2 Planteamiento del problema / Caso de estudio

Se han reportado colapsos estructurales inesperados en edificaciones residenciales y construcciones en México, lo que demuestra la ausencia de sistemas eficaces de Monitoreo de Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés). Aunque existen métodos avanzados para la evaluación del estado estructural —como sensores de fibra óptica, ultrasonido y análisis modal— su uso en viviendas y edificios de pequeña escala continúa siendo limitada, debido principalmente al alto costo de los equipos especializados, la necesidad de personal capacitado y la complejidad de su integración operativa. En este contexto, resulta importante impulsar el desarrollo de soluciones tecnológicas accesibles, y de bajo consumo energético, que faciliten el monitoreo, la detección temprana de anomalías y la toma de decisiones orientadas a la gestión preventiva del riesgo estructural.

## 1.3 Pregunta de investigación

P1

¿Como realizar un prototipo para monitorear estructuras de concreto reforzado con el método de emisiones acústicas que permita detectar grietas o fisuras para prevenir colapsos inesperados?

## 1.4 Hipótesis

Al crear e implementar un prototipo de monitoreo para estructuras de concreto reforzado utilizando el método de emisiones acústicas, se espera lograr la detección temprana de fisuras y grietas que puedan comprometer la integridad estructural. Esta capacidad de diagnóstico anticipado permitirá reducir significativamente el riesgo de colapsos inesperados, contribuyendo así a mejorar la seguridad estructural de las edificaciones y la protección de las personas que las habitan o utilizan.

## 1.5 Objetivos

### **General**

Diseñar un prototipo electrónico para el monitoreo de estructuras de concreto reforzado, mediante el método de emisiones acústicas y tecnologías de la industria 4.0, con el fin de detectar fallas tempranas en las estructuras.

### **Específicos**

- Realizar una revisión de literatura especializada sobre métodos de monitoreo de estructuras de concreto y tecnologías emergentes aplicadas al sector de la construcción.
- Identificar y priorizar los requisitos técnicos y de usuario en el diseño del prototipo con el Despliegue de la Función de Calidad (QFD).
- Aplicar el Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) para evaluar y mitigar posibles riesgos en el diseño y funcionamiento del prototipo.
- Diseñar el prototipo integrando componentes electrónicos y estructuras fabricadas mediante técnicas de impresión 3D.
- Realizar experimentación y pruebas para validar el funcionamiento, precisión y eficiencia del prototipo en condiciones reales.

## 1.6 Justificación

El monitoreo de estructuras de concreto reforzado es fundamental para prevenir fallas estructurales que puedan poner en riesgo la vida de las personas y generar pérdidas económicas significativas. Sin embargo, la aplicación de tecnologías avanzadas de monitoreo estructural ha sido limitada en el sector de la construcción, principalmente por el alto costo de los equipos comerciales y la complejidad de su implementación. Ante este panorama, el desarrollo de un prototipo electrónico accesible, basado en tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) y la fabricación aditiva, representa una alternativa viable e innovadora. Este proyecto no solo busca reducir los costos de implementación, sino también facilitar la detección temprana de fisuras y grietas en estructuras de concreto, contribuyendo a una cultura preventiva en la ingeniería civil. Además, se enmarca dentro de los pilares de la Industria 4.0, promoviendo la digitalización, la conectividad y la inteligencia artificial en el sector de la construcción.

## 1.7 Alcances

- ✓ Diseñar un prototipo funcional capaz de monitorear estructuras de concreto reforzado en tiempo real.
- ✓ Integrar de sensores acústicos, microcontroladores y estructuras impresas en 3D.
- ✓ Validar el prototipo mediante pruebas experimentales en condiciones controladas o simuladas.
- ✓ Elaborar el prototipo a partir de tecnologías accesibles y de bajo costo, lo que permite su posible aplicación en entornos de vivienda o infraestructura básica.

## 1.8 Limitaciones:

- ✓ El prototipo fue evaluado únicamente en estructuras de concreto a escala o en condiciones de laboratorio, no en edificaciones reales a gran escala.
- ✓ La precisión en la detección de fallas está limitada por la sensibilidad de los sensores disponibles y el nivel de ruido ambiental.
- ✓ La implementación del sistema depende de los recursos tecnológicos y materiales disponibles durante el desarrollo del proyecto.
- ✓ El alcance de la conectividad IoT se restringe al entorno local de pruebas, sin considerar una infraestructura en la nube o monitoreo masivo.

# CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

## 2.1 Industria 4.0

El concepto de Industria 4.0 surgió en Hannover, Alemania, alrededor del año 2011, con la finalidad de impulsar la manufactura digital, aprovechando el notable crecimiento en la capacidad de procesamiento y conectividad, el desarrollo de nuevas herramientas de análisis e inteligencia empresarial, así como innovadoras formas de interacción entre humanos y máquinas (Carro Suárez et al., 2019). La Industria 4.0 ofrece múltiples beneficios en cuanto a la generación de valor, los modelos de negocio, los servicios complementarios y la organización laboral. Para aprovechar estas ventajas, las empresas deben avanzar mediante una serie de etapas, distribuidas en cinco áreas clave: recolección y obtención de datos, análisis de la información, interacción entre humanos y máquinas, producción adaptable, y gestión de la propiedad intelectual (Sachon, 2018).

La relevancia del impacto que tiene la Industria 4.0 en la sociedad y en la formación de profesionales, especialmente en áreas vinculadas a la tecnología, se basa en los nueve pilares fundamentales de esta cuarta revolución industrial. Estos pilares son: 1) Big Data, 2) Robots autónomos, 3) Simulación, 4) Internet de las Cosas (IoT), 5) Ciberseguridad, 6) Computación en la nube, 7) Manufactura aditiva, 8) Realidad aumentada y 9) Inteligencia artificial (Habib Mireles, 2022).

El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la interconexión de dispositivos u objetos físicos a través de una red abierta, en la que estos elementos inteligentes pueden gestionarse de forma autónoma, intercambiar datos e información, compartir recursos y responder de manera activa ante cambios en su entorno (PÉREZ, 2019). Los componentes que integran el Internet de las Cosas (IoT) suelen organizarse bajo lo que se conoce como "Arquitectura IoT", la cual puede estructurarse en tres capas, según el nivel de detalle. En su forma simplificada de tres capas, se distingue lo siguiente: la Capa de Percepción, que emplea sensores y actuadores para identificar y recolectar información del entorno; la Capa de Red, encargada de transmitir los datos captados por los sensores y convertirlos a un formato digital; y la Capa de Aplicación, donde se desarrollan los servicios IoT enfocados a entornos como hogares inteligentes, ciudades inteligentes o fábricas automatizadas (Berrío, 2024).

En los últimos años, muchas empresas han comenzado a implementar la manufactura aditiva o impresión 3D, lo que les permite diseñar y fabricar sus propios prototipos, así como producir piezas individuales. Dentro del contexto de la Industria 4.0, este enfoque se utiliza ampliamente para la creación de pequeños lotes de productos personalizados, brindando beneficios como diseños más livianos y con mejor desempeño, especialmente útiles en sectores como el aeroespacial y el automotriz. Sin embargo, para aplicar la manufactura aditiva es fundamental contar con un sistema de escaneo que permita generar un modelo digital en 3D (Carro Suárez et al., 2019).

La fabricación aditiva, y en especial la impresión 3D, se ha consolidado como una técnica de manufactura relevante en la actualidad. Si bien en sus inicios se empleaba principalmente para la creación de prototipos, los avances tecnológicos han ampliado su aplicación hacia la producción de componentes funcionales en diversos sectores industriales, incluyendo el automotriz, electrónico, médico y de la construcción, entre otros (Barriga-Machado, 2020).

El micrófono es un dispositivo que convierte las ondas sonoras en señales eléctricas. Su función principal consiste en transformar las variaciones de presión del aire, provocadas por el sonido, en impulsos eléctricos que mantienen una correspondencia proporcional con dichas variaciones. De este modo, se genera una representación eléctrica análoga del sonido original, la cual puede posteriormente ser almacenada, amplificada, difundida o transmitida a través de distintos medios (Asiten, 2022).

La sensibilidad de un micrófono es una característica clave, junto con su respuesta en frecuencia. Esta se refiere a la relación que existe entre la presión del sonido que recibe y la amplitud de la señal eléctrica que genera como salida (Wagemakers, 2007).

## 2.2 Despliegue de la función de la calidad (QFD)

El despliegue de la función de la calidad ( QFD) es una metodología inteligente que puede ser utilizada y desarrollada en formato libre , y si se trabaja en conjunto con otras metodologías, pueden ser un potenciador importante (Cruz-Rivero *et al.*, 2023). El QFD se originó a finales de 1960 en Japón, ante la necesidad de crear un proceso logístico adecuado al proceso de construcción, hace uso de técnicas como encuestas, entrevistas y resultados de quejas, que se agrupan y organizan para el análisis de datos (Herrera De la Barrera & Narváez Zúñiga, 2017).

El QFD es reconocido como una herramienta avanzada de planificación de la calidad que le permite a las organizaciones actuar proactivamente con sus clientes y partes interesadas, es una herramienta que aporta un número significativo de datos para la planificación de la calidad (González Cruz *et al.*, 2024). Vázquez Loret *et al.*, (2019) mencionan que Quality Function Development (QFD) es un método estructurado para traducir los requisitos del cliente, donde se puede priorizar el más importante requerido por el cliente y concluir en que ese puede invertir el dinero sin obtener una pérdida ya que es lo que cliente desea.

La voz del cliente (VOC, por sus siglas en inglés) es un proceso crucial para captar los requisitos y necesidades de los clientes en el desarrollo de productos y el diseño de servicios; implica métodos de investigación tanto cualitativos como cuantitativos para recopilar información detallada de los clientes, que luego se organiza, prioriza y analiza (Aguwa *et al.*, 2012). Los datos de la VOC se pueden utilizar para mejorar la satisfacción del cliente, reducir los problemas y mejorar la calidad del producto. Se ha hecho hincapié en la importancia de la participación de las partes interesadas en la ciencia traslacional, y los sistemas de VOC ayudan a garantizar la relevancia de la investigación y a abordar las necesidades de la comunidad (Volkov *et al.*, 2018). Los nuevos enfoques para la recopilación de VOC, como "VOC 3.0", se centran en la correlación con el cliente, con el objetivo de generar valor a través de actividades colaborativas y aprovechar el conocimiento tanto de los clientes como de las empresas.

En México, la preservación de la infraestructura se ha vuelto una actividad estratégica, donde la gestión eficaz de los recursos financieros es crucial (Crespo *et al.*, 2023). La monitorización de salud estructural (SHM) es un campo de investigación de expansión. Este enfoque permite evaluar el estado de una estructura mediante la vigilancia de su comportamiento, (Illescas & Chuisaca, 2022). Facilita la detección de daños en una estructura mediante el análisis de las variaciones en sus parámetros estáticos y dinámicos, utilizando técnicas de modelación analítica y análisis de datos para interpretar estos cambios (Marulanda, 2000).

Ha sido crucial para las edificaciones, ya que ofrece una gran cantidad de información en condiciones operativas, lo que permite desarrollar soluciones para mitigar desastres causados por fenómenos naturales (Cisneros *et al.*, 2023). El reto del SHM ha sido contar con un resultado confiable, han emergido diversas tecnologías que han originado múltiples sistemas de monitoreo, los cuales se ajustan a las particularidades de la estructura monitoreada, adaptando sus métodos de aplicación e implementación de acuerdo a sus características específicas (Flores-Fuentes *et al.*, 2022).

Resulta fundamental realizar un monitoreo continuo del estado estructural y la detección regular de este tipo de grietas para asegurar el funcionamiento seguro de los componentes mecánicos (Cai, 2019). Actualmente, existe una cantidad reducida de dispositivos diseñados específicamente para el monitoreo de estructuras de concreto mediante emisiones acústicas, lo que evidencia la necesidad de más investigación y desarrollo en esta área.

### 2.3 AMEF (Análisis de Modo Efecto Falla)

La implementación de la metodología AMEF (Análisis de Modo Efecto Falla) es crucial, ya que permite identificar fallas, así como evaluar y clasificar de manera objetiva sus efectos, causas y factores de detección, con el fin de prevenir su ocurrencia (Fernandez, 2019), busca recopilar toda la información acerca de las fallas de los equipos y evaluarlas mediante 3 criterios (Gallo Marín, 2022). El AMEF se ha utilizado extensamente en el ámbito de la ingeniería de confiabilidad. La evaluación del riesgo se basa en el Número de Prioridad de Riesgo (RPN), calculado como el producto de la Ocurrencia (O), Severidad (S) y Detección (D) de una falla (Cruz-Rivero *et al.*, 2022), el AMEF fue creado por el ejército estadounidense a finales de la década de 1940, como respuesta a la insatisfacción con las fallas en el funcionamiento de las municiones. Esta situación los motivó a diseñar una metodología orientada a identificar y eliminar todas las posibles causas

raíz de los fallos (dataalyzer, 2022), tiene como propósito evidenciar tanto el nivel de optimización como el grado de detalle necesarios para generar valor en un producto determinado. Esto cobra especial relevancia en las industrias más competitivas a nivel global, ya que se trata de sectores donde los productos suelen ser altamente complejos y representan ejemplos destacados de la innovación tecnológica actual (MONTALBAN-LOYOLA, 2015), existen dos tipos de AMEF, el de diseño se utiliza para identificar fallas potenciales en los productos antes de su fabricación, analizando deficiencias en el diseño a nivel de sistema, subsistema y componente. En cambio, el de proceso se enfoca en detectar fallas derivadas de problemas en la fabricación o ensamblaje (Salazar et al., 2020), por otro lado el Diagrama de Ishikawa es una herramienta ampliamente utilizada en diversos ámbitos para analizar el problema central que impacta la calidad de un producto o servicio. Su enfoque se basa en la interrelación de causa y efecto, lo que permite identificar las razones que generan variabilidad y estructurar de manera ordenada la relación entre las distintas causas involucradas (Delgado et al., 2021).

## 2.4 El Sonido

La acústica es una disciplina científica dedicada al análisis de los diferentes aspectos relacionados con el sonido, incluyendo su origen, transmisión y captación en distintos medios, así como su conversión mediante transductores, su percepción sensorial y sus múltiples aplicaciones tecnológicas. Se trata de un campo con un marcado enfoque multidisciplinario, que integra conocimientos desde la física fundamental hasta áreas como la biología y las ciencias sociales (Miyara, 2003). El sonido se define como una variación de presión que se genera en un medio físico, comúnmente el aire, a causa de la vibración de un cuerpo. Por esta razón, el sonido debe entenderse como un fenómeno dinámico y no como un objeto tangible; es decir, constituye una manifestación del movimiento. Cabe destacar que en medios sólidos la propagación del sonido es considerablemente más rápida, debido a la proximidad entre las partículas del material (Serena, 2003).

Históricamente, se ha utilizado el método de golpear frutas y hortalizas para evaluar su madurez según el sonido emitido. Inspirados en esta práctica, algunos investigadores han creado dispositivos que aplican la técnica de "impulso acústico" o "respuesta acústica al impacto", donde se golpea la muestra de manera controlada para analizar su respuesta. Otros emplean métodos de

"vibración forzada", en los que la muestra es sometida a vibraciones con frecuencias específicas. (B.Diezma, 2010)

Las propiedades fundamentales de un sonido son: la altura, el timbre, la duración y la intensidad. El timbre es lo que permite distinguir el sonido característico de cada instrumento. Cada nota musical se compone de una combinación de ondas sinusoidales, donde una de ellas posee la frecuencia principal asociada a la nota (conocida como frecuencia fundamental), mientras que las demás presentan frecuencias que son múltiplos de esta denominadas armónicos (Chiuro, 2021).

## 2.5 Series de Fourier

Las series de Fourier permiten analizar matemáticamente señales periódicas complejas al descomponerlas en una suma de funciones sinusoidales más simples, es decir, senos y cosenos. Esto se basa en el teorema de Fourier, el cual establece que cualquier señal compleja periódica puede representarse como la combinación de múltiples señales sinusoidales.

Cuando la función  $f \in \mathbb{R}^2(-L, L)$  es real regularmente se usa la expansión trigonométrica real

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right)$$

$f(x)$ : la función periódica que se quiere representar.

$a_0$ : es el término constante o el promedio de la función en el intervalo.

$a_n$ : coeficiente de la función coseno, que representa la parte par de la función.

$b_n$ : coeficiente de la función seno, que representa la parte impar de la función.

$L$ : es la mitad del periodo de la función (es decir, el intervalo completo es  $[-L, L]$ )

$n\pi x$ : es el argumento de las funciones seno y coseno; determina la frecuencia.

Las ecuaciones que rigen estas series de Fourier según García (2011) son:

- Serie de Fourier de señales continuas (FS, por sus siglas en inglés):

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} = \frac{1}{T} \int_{\langle t \rangle} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$



Se usa la función exponencial compleja (relacionada con senos y cosenos por la fórmula de Euler) es otra manera de expresar la serie de Fourier trigonométrica. Es útil en el procesamiento de señales, electrónica, las telecomunicaciones y el análisis matemático más avanzado, son los coeficientes complejos, que contienen toda la información de amplitud y fase de cada frecuencia.

Transformada de Fourier de la forma discreta, versión computacional del análisis de Fourier.

- Serie de Fourier de señales discretas (DFS, por sus siglas en inglés):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}$$

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi}{N} kn}$$

Donde:

$x[n]$ : es una señal discreta y periódica, es decir, una serie de números.

$X[k]$ : son los coeficientes de Fourier discretos, que indican las componentes de frecuencia presentes en la señal.

$N$ : es el número total de muestras (la longitud del periodo de la señal).

$e^{\pm j \frac{2\pi}{N} kn}$ : funciones base complejas.

Las series de Fourier se utilizan en la reconstrucción de señales, para estudiar el comportamiento de un circuito, para diseñar filtros digitales, en las tomografías computarizadas. Dentro de este contexto, la Serie de Fourier se presenta como una herramienta eficaz, ya que permite reconstruir la información mediante una función ajustada a los datos conocidos, proporcionando una estimación razonable de los valores no observados. Aunque originalmente fue concebida para describir funciones periódicas, su aplicación puede extenderse a funciones no periódicas, al considerarlas como casos límite de funciones periódicas con periodo tendiente a infinito (Gómez, 2015).



Una función  $f(x)$  es periódica si está definida para todo  $x$  real y existe algún número positivo  $T$ , (llamado periodo de  $f(x)$ ) tal que para todo  $x \in \mathbb{R}$ .

$$f(x + T) = f(x)$$

La grafica de una función periódica (ver figura 14) se obtiene mediante la repetición periódica de la gráfica de dicha función en cualquier intervalo de longitud  $T$  (Gijon, 2023).

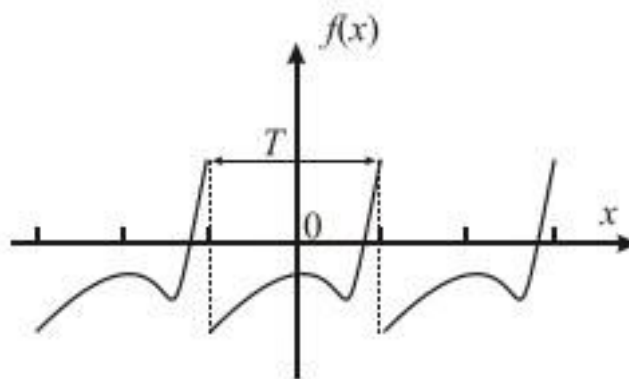


Figura 14. Función periódica de periodo

Se puede comprobar fácilmente que si  $f(x)$  tiene periodo  $T$ , entonces  $f(nx)$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ , admite por periodo  $T$

La figura 15 muestra cuatro gráficas de funciones trigonométricas:  $\text{Cos } x$  y  $\text{Sen } x$  (arriba izquierda y abajo izquierda) representan las funciones coseno y seno básicas, con un periodo de  $2\pi$ , es decir, completan un ciclo entre 0 y aproximadamente 6.28 ( $\approx 2\pi$ ).

$\text{Cos } 2x$  y  $\text{Sen } 2x$  (arriba derecha y abajo derecha) son funciones con el doble de frecuencia, por lo que completan dos ciclos en el mismo intervalo. Esto significa que su periodo es la mitad ( $\pi$ ).

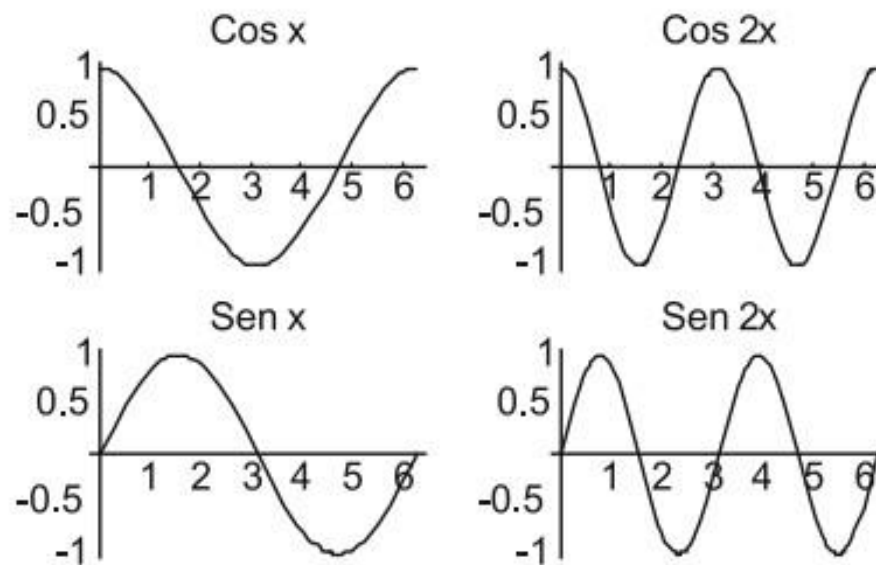


Figura 15. Funciones cosenoidales y senoidales con periodo común  $2\pi$ .

La utilidad de las Series de Fourier radica en su capacidad para transformar una función compleja del dominio del tiempo en una representación más manejable en el dominio de la frecuencia. Esto es especialmente útil en la detección de patrones, análisis de señales con ruido, y reconstrucción de datos incompletos, como ocurre en economía, ingeniería estructural o electrónica. (Boyce, 2017)

Aplicación de las series de Fourier

En problemas mecánicos o eléctricos suele utilizarse la serie de Fourier para encontrar la solución de este tipo de ejercicios:

Encontrar la serie de Fourier de la función  $f(x)$ , de periodo  $2\pi$  definida por:

$$f(x) = \begin{cases} -1 & -\pi < x < 0 \\ 1 & 0 < x < \pi \end{cases}$$

Solución:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{-\pi}^0 -1 dx + \int_0^{\pi} 1 dx \right] = \frac{1}{2\pi} [-x]_{-\pi}^0 + \frac{1}{2\pi} [x]_0^{\pi} = \frac{1}{2\pi} [0 - (-\pi)] + \frac{1}{2\pi} [\pi - 0] = \frac{1}{2\pi} [\pi + \pi] = \frac{1}{2\pi} [2\pi] = 1$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^0 -1 \cos(nx) dx + \int_0^{\pi} 1 \cos(nx) dx \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[ -\frac{1}{n} \sin(nx) \Big|_{-\pi}^0 + \frac{1}{n} \sin(nx) \Big|_0^{\pi} \right] = \frac{1}{\pi} \left[ -\frac{1}{n} \sin(0) + \frac{1}{n} \sin(-n\pi) + \frac{1}{n} \sin(n\pi) - \frac{1}{n} \sin(0) \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[ 0 - \frac{1}{n} \sin(n\pi) + \frac{1}{n} \sin(n\pi) - 0 \right] = \frac{1}{\pi} [0] = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^0 -1 \sin(nx) dx + \int_0^{\pi} 1 \sin(nx) dx \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{n} \cos(nx) \Big|_{-\pi}^0 - \frac{1}{n} \cos(nx) \Big|_0^{\pi} \right] = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{n} \cos(0) - \frac{1}{n} \cos(-n\pi) - \frac{1}{n} \cos(n\pi) + \frac{1}{n} \cos(0) \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{n} [1 - \cos(n\pi)] - \frac{1}{n} [\cos(n\pi) - 1] \right] = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{n} [1 - \cos(n\pi) - \cos(n\pi) + 1] \right] = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{n} [2 - 2\cos(n\pi)] \right] = \frac{2}{\pi n} [1 - \cos(n\pi)]$$

Como  $\cos(-n\pi) = \cos(n\pi)$  y  $\cos(0) = 1$ , entonces

$$a_n = \frac{1}{2\pi} [2\pi \cdot 0 - 2\pi(-2\pi) - 2\pi \cdot 2\pi + 2\pi \cdot 0] = \frac{1}{2\pi} (-1 - 2\pi^2)$$

Como los  $a_n$  y  $b_n$  son 0, la serie de Fourier es:

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} (1 - 2\pi^2 n^2) \cos nx$$

$$= \frac{4}{\pi} \left( \cos x + \frac{1}{3} \cos 3x + \frac{1}{5} \cos 5x + \dots \right)$$

Las sumas parciales son:  $S_1 = \frac{4}{\pi} \sin(\omega t)$  ,  $S_2 = \frac{4}{\pi} \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) \right)$  , ...

### 2.5.1 Transformada Rápida de Fourier

Cuando se desea aplicar el análisis de Fourier a funciones no periódicas, se recurre a la Transformada de Fourier, que extiende el concepto de serie a un dominio continuo de frecuencias. Se considera que el periodo tiende a infinito, permitiendo analizar señales no repetitivas o definidas en intervalos finitos (Boyce, 2017) :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Ecuación de la transformada discreta de Fourier (DFT) y su utilidad en la detección de frecuencias de fractura

La Transformada de Fourier Discreta (TFD) posibilita obtener una representación espectral, en términos de frecuencias discretas, de una señal también discreta limitada a un intervalo de tiempo finito. Este tipo de análisis es relativamente simple de implementar y resulta muy efectivo en aplicaciones como la reducción de ruido presente en una señal, así como en diversos procesos de filtrado, tales como filtros pasa bajos, pasa altos o pasa banda (Medina, 2010).

Un desafío importante al aplicar las transformadas de Fourier de señales en tecnología es la dificultad de realizarlas en tiempo real. Si el proceso requiere un costo elevado, ya sea en términos de tiempo o recursos, pierde utilidad práctica para el usuario. Por esta razón, adquiere relevancia la llamada Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), la cual no representa una nueva formulación matemática ni una modificación de las existentes, sino que constituye un algoritmo eficiente que optimiza el cálculo de la transformada de Fourier discreta al reducir significativamente la cantidad de operaciones necesarias (Duoandikoetxea, 2003).

La Transformada Rápida de Fourier (FFT) es uno de los métodos más empleados para el análisis de frecuencia, debido a su eficacia en el estudio de señales transitorias y su capacidad para extraer información relevante en el dominio de la frecuencia. La FFT es una versión optimizada de la Transformada Discreta de Fourier (DFT), que permite un procesamiento más eficiente (Pazos et al., s/f).

El procesamiento de señales mediante la FFT es una técnica que facilita la identificación precisa de frecuencias, así como la determinación de amplitudes y anchos de picos en el espectro, todo ello a partir del análisis directo de los datos obtenidos.(Slezak, 2000)

Fourier evidenció múltiples aplicaciones en el ámbito del sonido, lo que motivó el estudio del uso de las series de Fourier para suprimir los armónicos musicales. Este enfoque se fundamentó en los principios del diseño de filtros, es decir, dispositivos capaces de excluir de la señal de salida aquellas frecuencias distintas a la frecuencia principal. En conclusión, el objetivo era eliminar los armónicos y aislar un tono puro. Esta tarea se llevó a cabo mediante el desarrollo de un dispositivo implementado en el software matemático MATLAB(Infante Beltr et al., 2024).La comparación de señales inicia con la introducción de la señal en el software de procesamiento de datos (Matlab), el cual facilita el análisis de los espectros en cuanto a frecuencias y amplitudes. Esto permite contrastar las señales de vibración y de emisión acústica a través de la visualización gráfica de los espectros y la organización de los datos en tablas(Pacheco Córdova et al., 2022).

Según (Joel Spilsbury & Euceda, 2019) se toma como referencia la siguiente transformada de Fourier discreta para mostrar el fundamento teórico de la FFT

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W^{kn} \quad , n= 0 ,1 \dots, N-1$$

Donde se define  $W: W^{-2\pi/N}$

Es practico representar los enteros n y k como números binarios por ello si se toma  $N=4$ , entonces  $\gamma = 2$  se pueden representar k y n como números binarios de dos bits.

$$k = 0,1,2,3 \quad \text{o } k = (k1, k0) = 00, 01 ,10, 11$$

$$n=0,1,2,3 \quad \text{o } n = (n1, n0) = 00, 01 ,10, 11$$

Una forma práctica de escribir k y n es:

$$k=2k1+k0 \quad n=2n1+n0$$

donde  $k0, k1, n0$  y  $n1$  pueden tomar valores de 0 y 1.

Dado esto se puede reescribir la ecuación

$$X(N, 0) = \sum_{n_0=0}^1 \sum_{n_1=0}^1 X(n_1, n_0) X^{(2n_1+n_0)(2n_1+n_0)}$$

La sumatoria de la ecuación debe ser remplazada por  $\gamma$  sumatorias con el fin de evaluar todos los bits de la representación binaria de  $k$ .

$$X^{n_1+n_2} = X^{n_1} X^{n_2} \text{ entonces}$$

$$\begin{aligned} X^{(2n_1+n_0)(2n_1+n_0)} &= X^{(2n_1+n_0)2n_1} X^{(2n_1+n_0)2n_0} \\ &= (X^{4n_1n_1}) X^{2n_0n_1} X^{(2n_1+n_0)2n_0} \\ &= X^{2n_0n_1} X^{(2n_1+n_0)2n_0} \end{aligned}$$

Dado que lo que se encuentra entre paréntesis es igual a 1

$$X(N, 0) = \sum_{n_0=0}^1 \left[ \sum_{n_1=0}^1 X(n_1, n_0) X^{2n_0n_1} \right] X^{(2n_1+n_0)2n_0}$$

La ecuación representa el fundamento teórico del algoritmo de la FFT.

## 2.6 Espectro en el tiempo y frecuencia

Un método de simulación del espectro en el Tiempo, fue introducido por Yee a finales de los años 60 como una alternativa para modelar el comportamiento del campo electromagnético. Su fundamento original consistía en la discretización de las ecuaciones de Maxwell. Al operar en el dominio del tiempo, este enfoque permite abarcar un amplio rango de frecuencias, a diferencia de otros métodos que se limitan a frecuencias puntuales en la simulación del sonido (Nieves, 2020).

La mayoría de los sonidos que escuchamos constan de muchas frecuencias y son difíciles de identificar en una gráfica energía- tiempo, para un sonido complejo, para conocer que frecuencias componen el sonido con su correspondiente nivel de presión se recurre al espectro frecuencial, esta representación gráfica consta de una línea por cada frecuencia que compone el sonido (Jaramillo, 2007).

La frecuencia de una vibración determina el tono del sonido: cuanto mayor es la frecuencia, más agudo se percibe el sonido; mientras que una frecuencia más baja produce un tono más grave. El tono se expresa en hertzios (Hz), equivalentes a ciclos por segundo. Un oído humano sano es capaz de detectar sonidos cuyas frecuencias se encuentran en el rango de 16 Hz a 20,000 Hz; fuera de este intervalo, los sonidos no pueden ser percibidos (Serena, 2003).

La técnica del ultrasonido se basa en la emisión y recepción de sonidos de alta frecuencia, superiores a los 20 kHz. Este método fue desarrollado por Leslie y Cheesman, y su primera aplicación se centró en la evaluación del estado de estructuras de concreto en presas canadienses. Actualmente, sus principales funciones abarcan la detección de fisuras y la estimación de diversas propiedades físicas del concreto (Carcaño, 2021). La representación frecuencial de una señal de audio revela su contenido espectral, incluyendo la frecuencia fundamental y otras componentes denominadas armónicos o parciales. Mientras los armónicos son múltiplos enteros de la fundamental, los parciales pueden no estar relacionados. Esta información suele visualizarse mediante un espectro, donde cada línea representa una frecuencia y su altura indica la amplitud. Una señal sinusoidal pura se muestra con una sola componente (Martín, 2015).

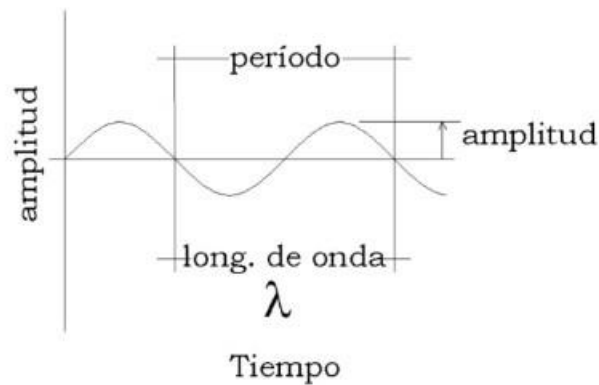


Figura 16. Onda Senoidal General. Fuente: El autor.

Longitud de onda ( $\lambda$ ):

Corresponde a la distancia física que recorre una onda durante un ciclo completo, es decir, desde una cresta hasta la siguiente o de un valle al siguiente.

Período (T):

Se refiere al intervalo de tiempo que transcurre para que una onda complete un ciclo completo de oscilación. Se mide en segundos.

Frecuencia (f):

Es la cantidad de ciclos u oscilaciones que ocurren en un segundo. Su unidad de medida es el Hertz [Hz], equivalente a ciclos por segundo. Esta propiedad está asociada al tono percibido: frecuencias altas generan tonos agudos y frecuencias bajas, tonos graves.

La relación entre la longitud de onda ( $\lambda$ ), la velocidad de propagación del sonido (c) y la frecuencia (f) se expresa mediante la fórmula:

Amplitud (A):

Se define como la presión sonora o la magnitud de la fuerza ejercida por unidad de superficie, ocasionada por el desplazamiento de las partículas del medio en un punto específico. Esta variable influye en la percepción de la intensidad del sonido. (Jaramillo, 2007)

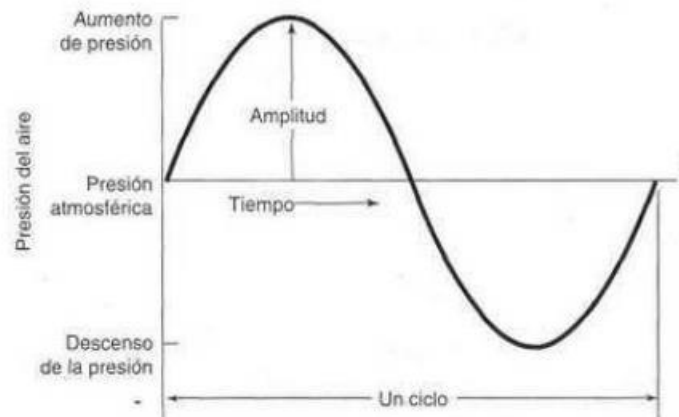


Figura 17. Vibración de un pulso o tono puro la onda senoidal. Fuente: La acústica en el dominio de la frecuencia. (2011).

Para una frecuencia fundamental  $f$ , cualquier múltiplo entero de  $f$  es un armónico.

Una serie armónica puede expresarse entonces:

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + \dots$$

De acuerdo a Caceres (2007)

Una función (señal)  $f(t)$  es periódica con periodo  $\tau$  si para cualquier  $t$ ,

$$f(t) = f(t + \tau), (-\infty < t < \infty)$$

La transformada discreta de Fourier en el método de emisiones acústicas es muy importante en la detección de monitoreo de estructuras, según Yan et al., (2025) para conocer la relación entre el número de fracturas y las señales se aplica la transformada de Fourier a los datos de la forma de onda y con esto se observa que existe una relación con la amplitud de la frecuencia a medida que se fractura más y este suceso o fenómeno se entiende que es por un efecto de energía mecánica liberada, entre más fracturas existe más liberación de tensión y por ello el aumento de la amplitud de la frecuencia principal cambia.

## 2.7 Relevancia de EA en el monitoreo estructural

La emisión acústica se basa en la detección de ondas elásticas transitorias generadas por la liberación repentina de energía interna en materiales sometidos a cargas mecánicas. Estas ondas, registradas mediante sensores piezoeléctricos o micrófonos de alta sensibilidad, contienen información crucial sobre la evolución del daño en la estructura. Este principio físico ha permitido que la AE se aplique exitosamente en estructuras de concreto, acero, materiales compuestos, recipientes a presión y torres eólicas. Su alta sensibilidad la convierte en una de las pocas técnicas capaces de detectar daños en etapas tempranas, incluso antes de que sean visibles a simple vista o perceptibles por otras metodologías(Ohtsu, 2008). Zhang et al. (2020) y Cai (2019) demostraron que las ondas elásticas registradas por sensores de EA son el resultado directo de cambios en el estado de tensión del material. En concreto reforzado, esto puede estar asociado a microfracturas internas o al inicio de procesos corrosivos, que no siempre son visibles desde la superficie. Los sensores captan estas señales en forma de picos o pulsos de alta frecuencia, que pueden luego ser analizados para estimar la ubicación del daño, su intensidad y evolución en el tiempo.

La relevancia de esta técnica ha aumentado con la incorporación de análisis avanzados de señal, como la descomposición wavelet y los modelos de mezcla gaussiana (GMM). Wang et al. (2022) aplicaron wavelets para descomponer las señales de EA en distintas bandas de frecuencia, facilitando la identificación de características específicas asociadas a distintos modos de daño. Por su parte, Yu et al. (2024) utilizaron GMM para clasificar automáticamente patrones de señal correspondientes a diferentes tipos de defectos estructurales, con una alta tasa de precisión. Estas herramientas aumentan significativamente la sensibilidad y especificidad del sistema de diagnóstico. Verstrynge et al. (2022) y Burud y Kishen (2021) aportan evidencia sobre el uso de EA en estructuras reales, como vigas y columnas de concreto en servicio, validando su capacidad para detectar daños antes de que se manifiesten en fallas visibles o colapsos inesperados. Esta característica es fundamental en la gestión preventiva de la infraestructura civil, especialmente en contextos de alto riesgo sísmico o en estructuras antiguas.

No obstante, la implementación de EA no está exenta de desafíos. Las propiedades específicas del concreto, como su heterogeneidad, porosidad y contenido de humedad, así como la geometría de la estructura, afectan significativamente la propagación de las ondas acústicas. Esto implica que los parámetros del sistema (posición de sensores, umbrales de detección, algoritmos de análisis)

deben ser cuidadosamente calibrados para cada caso de estudio, lo cual puede limitar su estandarización y escalabilidad.

A pesar de estas limitaciones, la evidencia sugiere que los métodos de emisión acústica ofrecen una solución robusta y adaptable para el diagnóstico de integridad estructural, especialmente cuando se integran con modelos de análisis estadístico o inteligencia artificial. Su aplicación en conjunto con otras tecnologías emergentes (como sensores IoT) puede potenciar el desarrollo de sistemas inteligentes de monitoreo en tiempo real, con aplicaciones tanto en nuevas construcciones como en estructuras existentes.

## 2.8 Tubo de KUNDUT

Las ondas sonoras es tema de estudio en todas las instituciones de Ciencias e Ingeniería. Los principales fenómenos acústicos que se estudian son de aplicación industrial y aplicación Tecnológica directa, Las técnicas más usadas para determinar la velocidad del sonido se pueden dividir en dos grupos, los métodos de tiempo de vuelo<sup>11</sup> y los asociados a resonadores acústicos. Entre estos últimos el método del tubo de Kundt es uno de los más usados(Novara et al., 2019).

El método de cámara reverberante, descrito en la norma ISO 354, se utiliza para evaluar las propiedades de absorción acústica de un material o incluso de un elemento constructivo completo. Por otro lado, el método de "dos micrófonos" o de "función de transferencia", regulado por la norma ASTM E1050 y su equivalente ISO 10534-2, emplea una onda estacionaria generada en el interior de un tubo para determinar el coeficiente de absorción acústica del material, es decir, su capacidad intrínseca de absorber sonido (Bartolomé & Raposo, 2018).

En los experimentos realizados con tubos de Kundt, diversos factores relacionados con la configuración experimental pueden influir en la variación del coeficiente de amortiguamiento. Entre estos se incluyen el diámetro del tubo, la temperatura del aire, la fricción en el movimiento del pistón y las características del recubrimiento de las paredes internas, entre otros(Amor et al., 2010).

En este contexto, el uso del tubo de Kundt (también conocido como tubo de impedancia) ofrece ventajas significativas: se trata de un equipo más sencillo, más económico y accesible para laboratorios pequeños; requiere únicamente muestras reducidas del material y su medición no se ve afectada en gran medida por el ruido ambiente. Por estas razones, el método del tubo de Kundt (ver figura 18) es actualmente uno de los más utilizados para medir tanto la absorción sonora como la impedancia acústica de distintos materiales, como respaldan las referencias citadas (Bartolomé & Raposo, 2018).

El montaje requiere de un voltímetro A.C, así como de un generador de audio frecuencia de ondas sinusoidales en el rango audible. El generador de audio proporciona una señal audible que se puede escuchar a través de la corneta que está ubicada dentro del tubo. Las ondas acústicas chocan contra un obstáculo (micrófono) e interfieren constructiva o destructivamente, dependiendo de la distancia corneta-micrófono (Reyes, 2007).

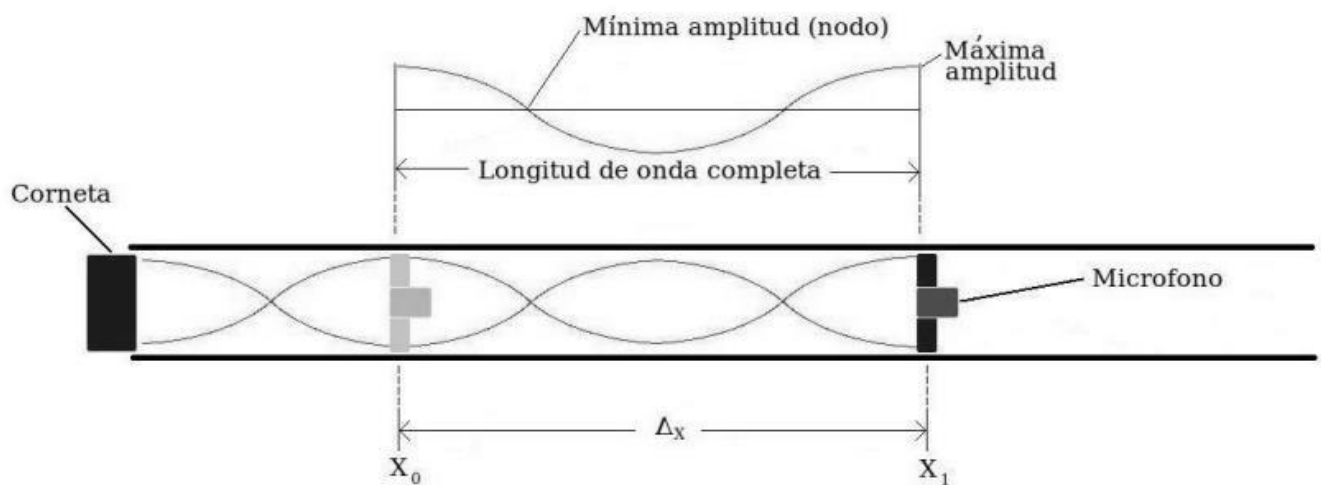


Figura 18. Representación del tubo de Kundt. Fuente: Universidad de los Andes 2007.

# CAPITULO III.

## MARCO METODOLOGICO

El marco metodológico (ver figura 19) en una investigación tiene como propósito identificar los supuestos del estudio para reorganizar la información con base en conceptos teóricos que suelen ser operacionalizados. Consiste en especificar y fundamentar cada elemento elegido para el desarrollo del proyecto, apoyándose en el juicio de expertos en la materia, con el fin de dar respuesta al “cómo” se llevará a cabo la investigación(Azuero , 2019).

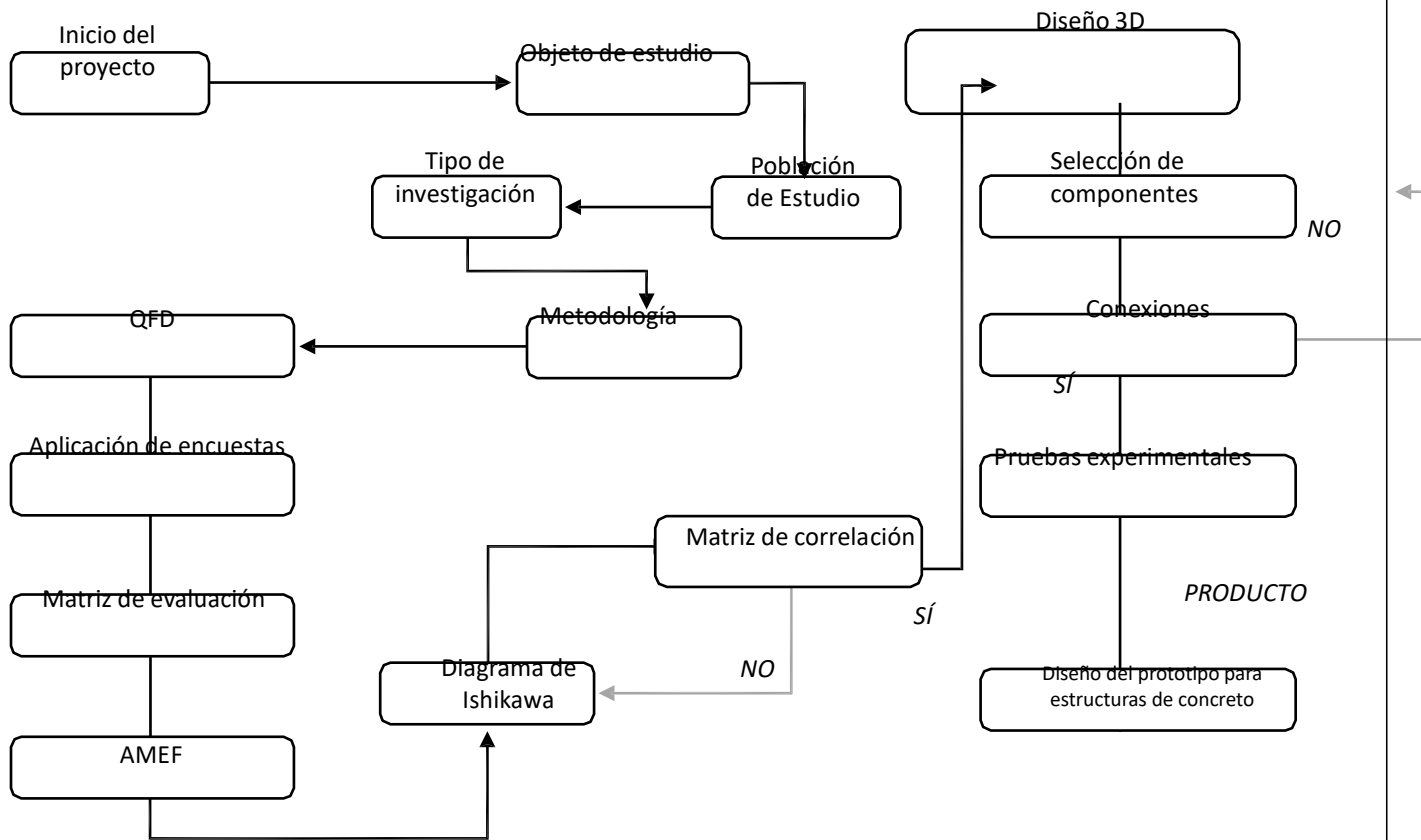


Figura 19. Metodología para el diseño de prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Fuente: El autor.

### 3.1 Diseño de la investigación

El presente estudio se clasifica como técnico-aplicado ya que pretende aportar una solución práctica pretende a una solución práctica a un problema específico en el ámbito de la ingeniería civil: el monitoreo de estructuras de concreto reforzado. El enfoque elegido enfoque es cuantitativo, lo que implica recopilar y analizar datos cuantificables y objetivos para confirmar la funcionalidad del sistema propuesto.

El estudio se centra específicamente en el diseño, la construcción y la evaluación de un prototipo funcional que utiliza la acústica de emisión (EA), como técnica no destructiva para detectar posibles daños estructurales, como fallas internas o micro fisuras, que no son visibles a simple vista.

El desarrollo tecnológico desarrollo implica la integración de sensores, procesamiento de señales y sistemas de comunicación en una plataforma basada en microcontroladores para capturar señales acústicas producidas por el material en respuesta a esfuerzos mecánicos, sensores, procesamiento de señales y sistemas de comunicación en una plataforma basada en microcontroladores para capturar señales acústicas producidas por el material en respuesta a esfuerzos mecánicos. muestras. Luego se examinan en términos de tiempo y frecuencia para encontrar patrones que indiquen un deterioro estructural en términos de tiempo y frecuencia para encontrar patrones que apunten a un deterioro estructural.

La investigación incluye pruebas de laboratorio controladas que permiten evaluar el rendimiento, la precisión, la confiabilidad y la capacidad del prototipo para adaptarse a diversos tipos de estructuras de concreto. El objetivo final es ayudar al desarrollo de herramientas de fácil acceso y efectivas para el monitoreo de predicción estructural que estén en línea con los principios de la Industria 4.0.

### 3.1.2 Población y muestra

#### Unidad de análisis 1

La unidad de análisis para este estudio serán 3 probetas de concreto reforzado de forma prismática cúbica, diseñada específicamente para ensayos de laboratorio. Las dimensiones de las probetas en la base cuadrada serán de 50 cm de alto y 15 cm de ancho (ver figura 19), cumpliendo con los estándares necesarios para la evaluación estructural a pequeña escala. Durante las pruebas, las señales se registrarán en Matlab producidas por un dispositivo de emisión acústico, se observará y analizará el comportamiento del viaje de ese pulso a través del medio en probetas de diferentes condiciones de agrietamiento y una en buenas condiciones. La elaboración y curado de las probetas se realizó conforme a la norma ASTM C31, la cual establece las prácticas adecuadas para la preparación de especímenes de concreto en campo, incluyendo el moldeo, transporte y almacenamiento en condiciones controladas (ver figura 20).

Los materiales utilizados fueron: 1 Varilla de 3/8, 2 kg de alambazón, 1 saco de cemento gris de 25 kg, 2 botes de grava triturada de 3/4 (bote de 19 lbs), 1 bote de arena, 1 kg de alambre quemado

Las probetas fueron curadas durante 28 días en cámara húmeda, a una temperatura constante de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y humedad relativa  $\geq 95\%$ , condiciones recomendadas por la misma norma para garantizar el desarrollo adecuado de las propiedades mecánicas del material.

Previamente al vaciado, se efectuó la prueba de revenimiento siguiendo la norma ASTM C143, con el fin de verificar la trabajabilidad del concreto fresco. El revenimiento obtenido fue de 8.5 cm, dentro del rango permitido para mezclas convencionales, (ver figura 20).

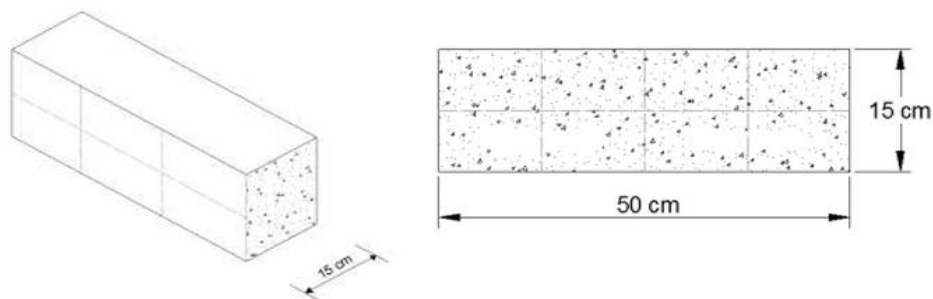


Figura 20. Geometría de especímenes de pruebas. Fuente: El autor



Figura 21. Armado de probetas. Fuente: El autor



Figura 22. Probetas de concreto reforzado. Fuente: El autor

## Unidad de análisis 2

Asimismo, se empleó como unidad de análisis un tubo de 1.5 metros de longitud, el cual presenta perforaciones en la parte superior a intervalos de 5 centímetros, (ver figura 23). En dichas perforaciones se colocó un sensor acústico, con el propósito de estudiar la propagación de una onda senoidal a través de diferentes medios: agua, aire. El análisis se realizó tomando como referencia la frecuencia de la onda (en Hertz) y su comportamiento en función del medio de propagación, considerando las diferencias en velocidad y atenuación de la señal según la densidad y rigidez del medio estudiado.



Figura 23. Representación de tubo Kundt para estudio de ondas senoidales en diferentes medios de propagación (agua y aire). Fuente: El autor.

### Unidad de análisis 3

La unidad de análisis 3 consistió en un tubo de 1 metro segmentado y relleno de concreto con espaciados de aire, con perforaciones cada 5 cm, como en el experimento anterior, (ver figura 24). El experimento consistió en desplazar el micrófono a lo largo del tubo para registrar la potencia de la onda en cada punto y observar su reconstrucción a lo largo del recorrido. Todas las perforaciones me mantuvieron tapadas para evitar fugas de presión salvo la analizada en ese momento (ver figura 25)



Figura 24. Representación de tubo de Kundt relleno de concreto con espaciados de aire. Fuente: El autor.



Figura 25. Colocación de espumas en tubo Kundt para evitar pérdidas de presión e intensidad. Fuente: El autor

### 3.1.3 Técnicas e instrumentos

El sensor MIC-2380, de alta sensibilidad, es un micrófono diseñado para capturar señales en un amplio rango de frecuencias; se utilizará para adquirir datos acústicos. Es ideal para aplicaciones de monitoreo estructural mediante emisiones acústicas (EA). Diseñado para capturar señales en un amplio rango de frecuencias, se utilizará para adquirir datos acústicos. Es ideal para aplicaciones de monitoreo estructural mediante emisiones acústicas (EA). Este El sensor está conectado a un microcontrolador ESP32 , que microcontrolador realiza el cual realiza la función de digitalizar la señal recibida y enviarla de manera inalámbrica a un ordenador mediante comunicación Bluetooth , facilitando así la movilidad y evitando interferencias relacionadas con el cable en el entorno de pruebas .la función de digitalizar la señal recibida y enviarla de manera inalámbrica a un ordenador a través de comunicación Bluetooth, facilitando así la movilidad y evitando interferencias relacionadas con el cable de pruebas.

Para identificar las resonancias características de los defectos estructurales internos, se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para transferir la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. El flujo de trabajo, desde la adquisición hasta el análisis de señales, tiene como objetivo establecer un sistema eficaz, portátil y asequible para la detección temprana de daños en estructuras de concreto reforzado, con potencial para ser modificado para su uso en aplicaciones reales de monitoreo predictivo. Para un voltaje diferente al que requiere el ESP32, se incluye un circuito regulador de voltaje integrado, encargado de asignar adecuadamente los niveles de tensión del sistema a cada componente.

### 3.1.4 Objeto de Análisis de Estudio

El tema de investigación de este estudio es la reacción estructural del concreto reforzado frente a la existencia de fisuras o grietas identificadas a través de pulsos acústicos procesados por un prototipo inspirado en los pilares industriales 4.0.

Este prototipo se centra en el análisis de emisiones acústicas y frecuencias de resonancia generadas al aplicar pulsos sobre elementos estructurales de concreto reforzado, con el fin de identificar patrones no comunes que puedan indicar deterioro estructural. El prototipo desarrollado utiliza sensores acústicos, procesamiento digital de señales, conectividad inalámbrica y análisis de datos para evaluar la salud estructural de forma no destructiva.

#### **Población objeto de investigación**

El grupo de estudio se compone de muestras de concreto reforzado, empleadas en pruebas de laboratorio, a las que se le aplican pulsos acústicos a una frecuencia establecida para analizar su comportamiento al moverse por el concreto reforzado e identificar posibles daños internos.

Estas probetas se crearon con base a las normas ASTM C31 y ASTM C143 con el fin de simular condiciones similares a las que se presentan en construcciones civiles. En una segunda etapa, la población podría extenderse a estructuras reales de pequeña escala (como columnas, vigas o losas), dependiendo del avance tecnológico y la validación funcional del prototipo desarrollado.

### 3.1.5 Tipo de estudio científico

Este análisis se categoriza como una investigación aplicada y tecnológica, pues tiene como objetivo desarrollar e instaurar un prototipo que facilite el seguimiento estructural del hormigón reforzado a través de métodos no dañinos, incorporando tecnologías relacionadas con la Industria 4.0.

El enfoque es mixto, dado que se recolectan datos medibles provenientes de sensores acústicos, se analizan mediante herramientas matemáticas como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y se interpretan con el apoyo de técnicas de lógica difusa para establecer umbrales de riesgo estructural.

Esta investigación se puede clasificar como un estudio científico aplicado por diseñar y construir un prototipo que monitoree el comportamiento estructural del concreto reforzado utilizando tecnologías no destructivas de medición, incorporando elementos de Industria 4.0.

El enfoque es cuantitativo porque se obtienen datos, procesos y datos con valor obtenidos a partir de sensores de tipo acústicos, los cuales se procesan a través de transformadas matemáticas como la FFT y se analizan con métodos de lógica difusa, ya que en estos métodos se establecen límites o muros como criterio de riesgo estructural.

Sin embargo, se incluyó un enfoque de investigación cualitativa en las fases de diseño y análisis de riesgos del sistema utilizando técnicas ingenieriles tales como el QFD y el AMEF. Estas herramientas fueron útiles para entender cómo determinar el diseño correcto al definir las necesidades del usuario o cliente, describir las características ideales para el prototipo y tratar de prever en otros pasos anticipar en qué fase se podían producir fallos.

Este tipo de estudio utiliza diseño experimental, pues se utilizan como factores controlables variables tales como la intensidad de la frecuencia del pulso acústico, el tipo de daño realizado sobre las probetas y las condiciones en las que se realiza el ensayo.

## 3.2 Metodología

La metodología empleada es una investigación mixta, ya que utiliza herramientas de ingeniería, pruebas experimentales, análisis matemático y computacional, así como tecnologías que se alinean con fundamentos de Industria 4.0 como son: Internet de las cosas (IoT), manufactura aditiva y la inteligencia artificial a través de la lógica difusa.

### 3.2.1 QFD (Despliegue de la Función de la Calidad)

Se utilizaron recursos cualitativos tales como el QFD (Despliegue de la Función de la Calidad) para convertir las demandas del usuario en especificaciones técnicas, se aplicaron encuestas para conocer la opinión del experto.

### 3.2.2 Aplicación de encuestas

Una táctica esencial en la ingeniería de diseño centrada en el usuario es el uso de encuestas QDF (Despliegue de la Función de Calidad) para un prototipo de monitorización de estructuras de hormigón armado. Este enfoque permite recopilar sistemáticamente la opinión del cliente (VoC), es decir, sus necesidades, expectativas, preferencias e inquietudes, y convertirlas en requisitos técnicos específicos que guían el desarrollo del prototipo.

El uso de encuestas es especialmente pertinente durante la fase inicial del QDF, ya que proporciona datos objetivos y reales sobre lo que los usuarios finales consideran importante en un sistema de monitorización estructural. En el contexto del concreto reforzado, entre los usuarios clave se incluyen ingenieros civiles, arquitectos, gerentes de mantenimiento de infraestructuras, supervisores de obra y académicos.

### 3.2.3 Matriz de evaluación

Para desarrollar el QFD se hace uso de la casa de la calidad. La casa de la calidad es una metodología aplicada en ingeniería en la creación de productos de acuerdo a gustos y necesidades del cliente, y de acuerdo a esas características saber cómo diseñar un producto o servicio (Mendoza Guardo *et al.*, 2019).

El desarrollo de la metodología QFD sigue una serie de pasos al llenado de las siete partes de la matriz, los cuales se muestra en la figura 1;

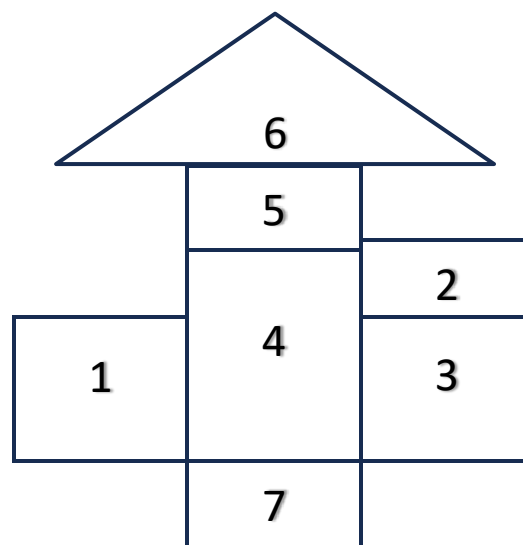


Figura 26. Matriz QFD (Quality Function Deployment). Fuente: El autor.

1. Requerimientos del cliente (Que, jerarquizados escala 1 a 5) (Cruz-Rivero et al., 2023).
2. Factor de evaluación (requerimientos técnicos, cómo) (Jiménez Rodríguez et al., 2020).
3. Matriz de evaluación (relaciones del impacto de los requerimientos técnicos sobre los requerimientos del cliente) (Jiménez Rodríguez et al., 2020).
4. Características técnicas del producto (Herrera, 2020).
5. Evaluación de criticidad (Herrera, 2020).
6. Interrelación de los como (Ruiz Arturo, 2009).
7. Puntuación de relaciones (Ruiz Arturo, 2009).

Para organizar de manera estructurada la aplicación de la metodología QFD, se elaboró un diagrama de Gantt que describe las principales etapas del proceso y su duración, (ver tabla 3). Las actividades consideradas incluyeron el diseño de encuestas, aplicación, análisis de resultados, elaboración de la matriz QFD y validación técnica del prototipo.

<b>Actividad</b>	<b>Semana 1</b>	<b>Semana 2</b>	<b>Semana 3</b>	<b>Semana 4</b>
Diseño de encuestas	*			
Aplicación de encuestas (VoC)		*		
Tabulación y análisis de resultados		*		
Identificación de requerimientos técnicos			*	
Llenado de matriz QFD			*	
Validación de características del prototipo				*

Tabla 3. Diagrama de Gantt para la aplicación de la metodología QFD. Fuente: El autor.

Para la aplicación del método QFD (Despliegue de la Función de la Calidad), se diseñaron encuestas estructuradas con el objetivo de recabar la voz del cliente y traducir sus necesidades en requerimientos técnicos específicos. El diseño del instrumento consideró tanto preguntas cerradas (tipo Likert, selección múltiple) como preguntas abiertas que permitieran captar percepciones detalladas. Las encuestas fueron aplicadas a un grupo de usuarios representativos, previamente segmentados según criterios relevantes al sistema analizado (ver figura 27). Se buscó asegurar la validez del contenido mediante una revisión por expertos y se aplicó una prueba piloto para verificar la claridad y consistencia de las preguntas. Los resultados obtenidos fueron cuantificados y priorizados para ser integrados en la matriz de la casa de la calidad (HoQ), permitiendo establecer relaciones claras entre las necesidades del usuario y las características técnicas del diseño.



**Encuesta con fines educativos a expertos y o usuarios de obra civil, con el objetivo de obtener información acerca del monitoreo de salud estructural, para realizar labor en logística humanitaria en el área de mitigación de riesgos.**

Nombre:

Ocupación:

Área:

¿Cuántos años de experiencia tiene en el mundo de obra civil o como ingeniero civil?

¿conoce algún dispositivo capaz de monitorear el estado de una estructura?

En caso afirmativo, ¿cuál?

¿Cree necesario el monitoreo de salud estructural?

En la región, sabe de alguna empresa u organización que se dedique a realizar monitoreos de salud estructural a escuelas, casas, puentes, etc., ¿que no se les ha dado mantenimiento por muchos años?

¿Como se puede identificar que alguna estructura colapsara, además del agrietamiento visible?

Si yo le presentara un prototipo/aparato el cual pueda detectar el estado de una estructura, como le gustaría que fuera ese dispositivo respecto a diseño, ¿cuáles serían las características ideales para usted que es el conocedor del área?

¿Sobre qué parte de la estructura o cimientos debe estar posicionado el dispositivo para saber con franqueza, que la estructura colapsara? vigas, columnas, muros, etc. ...

¿Cree que el precio del producto es factor para adquirirlo a pesar de la necesidad de realizar estudios de monitoreo estructural?

Si / no

Debe ser económico o su precio puede estar valorado respecto a su funcionalidad.

¿Si en el mercado local existiera un dispositivo con las características mencionadas anteriormente, usted lo compraría y por qué??

¿Usted brindaría el servicio de monitoreo de salud estructural, si contara con el dispositivo?

El uso del dispositivo debe ser fácil de usar o no considera que habría problema con que sea más técnico siempre y cuando brinde los resultados correctos,

Factor de importancia en escala del 1 al 5 donde 1 es mínimo y 5 máximo de los siguientes parámetros:

Figura 27. Encuesta aplicada a expertos del área civil. Fuente: El autor.

El grafico 2 representa los resultados obtenidos en una encuesta respecto a la ocupación de los participantes, con un total de 15 respuestas.

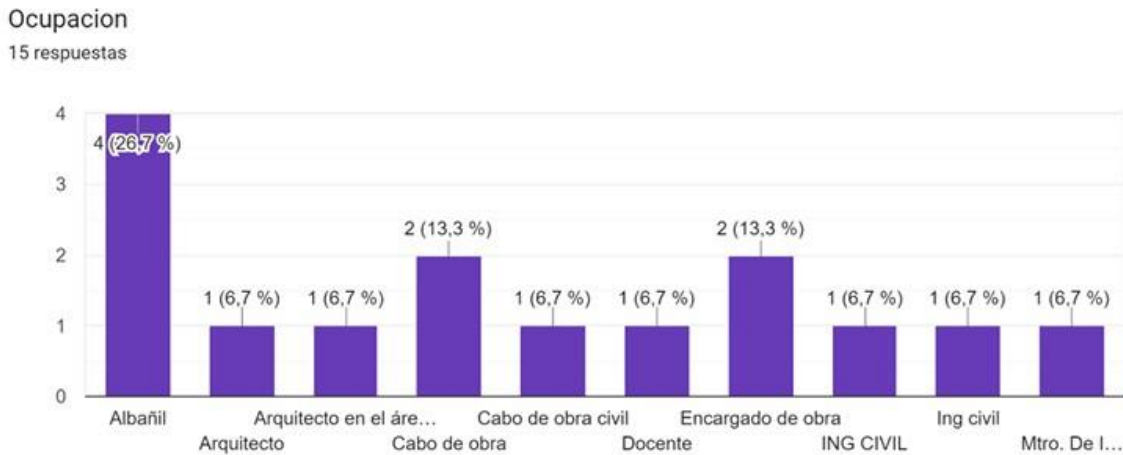


Gráfico 2. Experiencia de los entrevistados en el área civil

El grafico 3 representa la experiencia los usuarios entrevistados, la mayor parte de los participantes tiene entre 6 y 17 años de experiencia, lo cual puede indicar un grupo con sólida trayectoria profesional.

Cuantos años de experiencia tiene en el mundo de obra civil?

15 respuestas

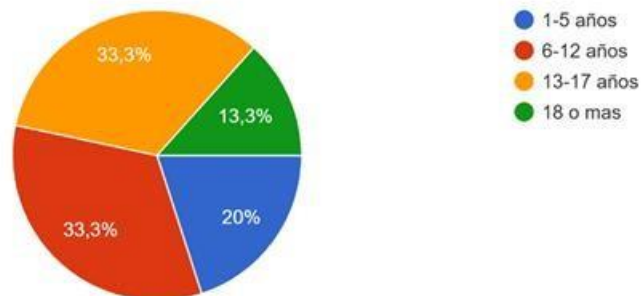


Gráfico 3. Años de experiencia de los usuarios entrevistados. Fuente: El autor

La mayoría tiene cierto conocimiento sobre dispositivos de monitoreo (ver gráfico 4), pero la diferencia es pequeña. Aún hay bastante desconocimiento que podría abordarse con formación o divulgación, así mismo existe consenso total en la importancia del monitoreo estructural (ver gráfico 5). Esto sugiere alta conciencia sobre los riesgos o beneficios que implica aplicar tecnología para supervisar las condiciones de estructuras.

Conoce algun dispositivo capaz de monitorear el estado de una estructura?

15 respuestas

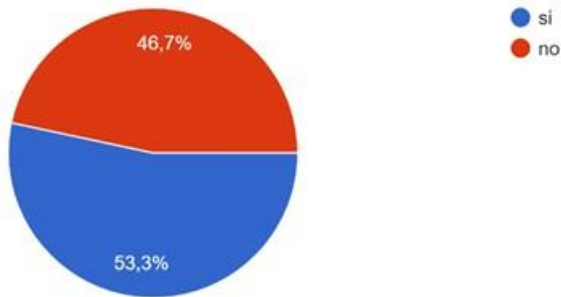


Gráfico 4. Conocimientos sobre dispositivos de monitoreo estructural. Fuente : El autor

¿ Cree necesario el monitoreo estructural en nuestra region ?

15 respuestas



Gráfico 5. Criterio de evaluar estructuras. Fuente: El autor

En la region , estado ,o municipios de estados vecinos conoce alguna empresa u organizacion que se dedique a realizar monitoreos de salud estructural ?

15 respuestas

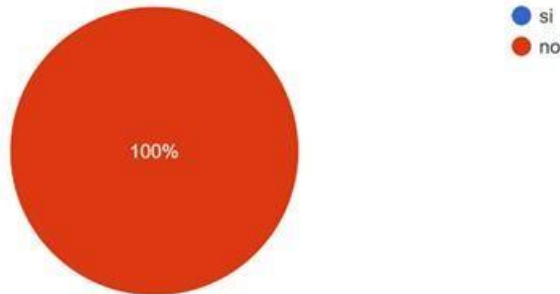


Gráfico 6. Conocimientos de empresas de la región de monitoreo estructural. Fuente: El autor.

***Voz del cliente***

Aplicadas las encuestas se obtuvieron todas las necesidades de los clientes y se procedió a realizar el análisis correspondiente para determinar las características ideales del prototipo de monitoreo de estructuras de concreto.

15 respuestas

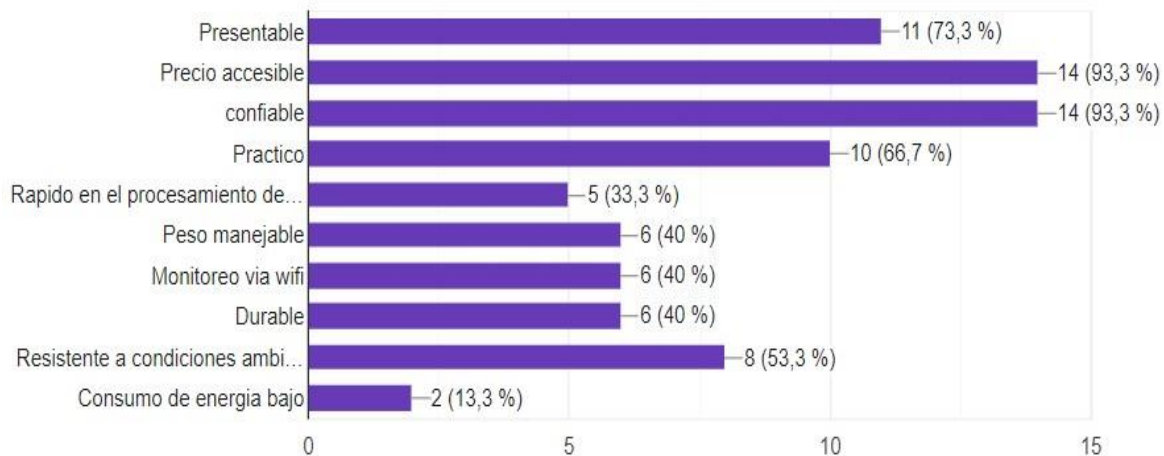


Gráfico 7. Características ideales del dispositivo de acuerdo con expertos. Fuente: El autor.

El diseño de la investigación fue mixta-exploratoria ya que existen variables cualitativas y cuantitativas, en la recopilación y análisis de datos.

Los requerimientos evaluados por los clientes se tabularon con la finalidad de conocer la importancia relativa de los requerimientos con respecto a otro.

**1.- Requerimientos de los clientes ( los que ) :** Es escuchar , analizar y traducir , las opiniones de los clientes sobre el producto o servicio (Cruz-Rivero *et al.*, 2023). En esta parte se extrajo de la opinión del cliente (ver tabla 4) la información relevante sobre como tenía que diseñarse un prototipo de monitoreo de estructuras de concreto.

**Tabla 4**

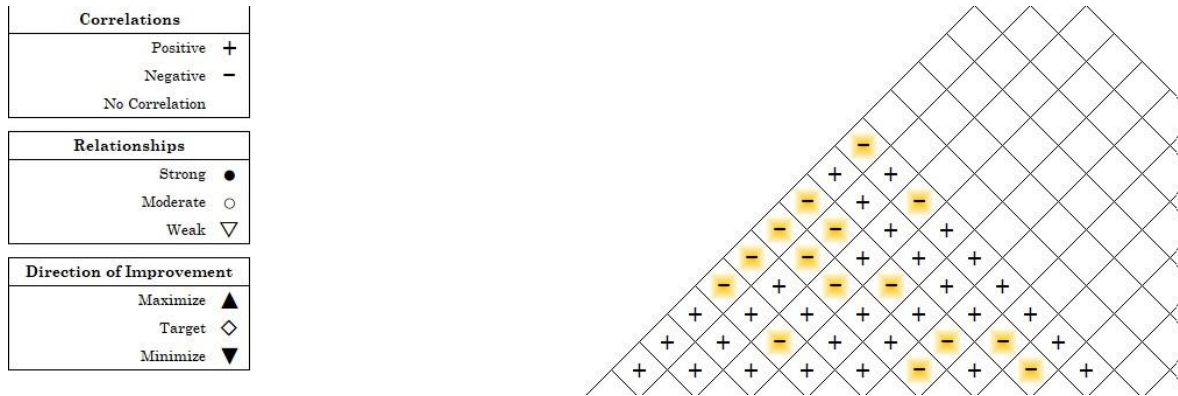
*Requerimientos del cliente.*

Requerimientos	Frecuencia	Requerimientos	Frecuencia
1.- Presentable	11	6.- Peso manejable	6
2.- Precio accesible	14	7.- Monitoreo vía wifi	6
3.-Confiable	14	8.- Durable	6
4.- Practico	10	9.-Resistente condiciones Ambientales	8
5.- Rápido en el procesamiento	5	10.- Consumo de energía bajo	2

*Expertos evaluados en la aplicación de la encuesta* Fuente: El autor.

**2.- Factores de evaluación:** Establecer los parámetros de diseño o requisitos técnicos implica organizar una reunión con los principales involucrados en la creación del producto. El objetivo es identificar las acciones o actividades necesarias en la organización para cumplir con los requisitos clave identificados. Con esta información, se elaborará una matriz de relaciones(Jiménez Rodríguez et al., 2020).

**3.- Matriz de evaluación:** La matriz de relaciones implica evaluar la influencia de los diferentes requisitos clave en la obtención de los distintos requisitos técnicos. Se utiliza una escala de relación donde cada símbolo tiene un valor específico asignado: una relación fuerte (●) equivale a 9, una relación moderada (○) equivale a 3, una relación débil o baja (s) equivale a 1, y cuando no hay relación se deja el espacio vacío, equivalente a 0.(Jiménez Rodríguez et al., 2020)



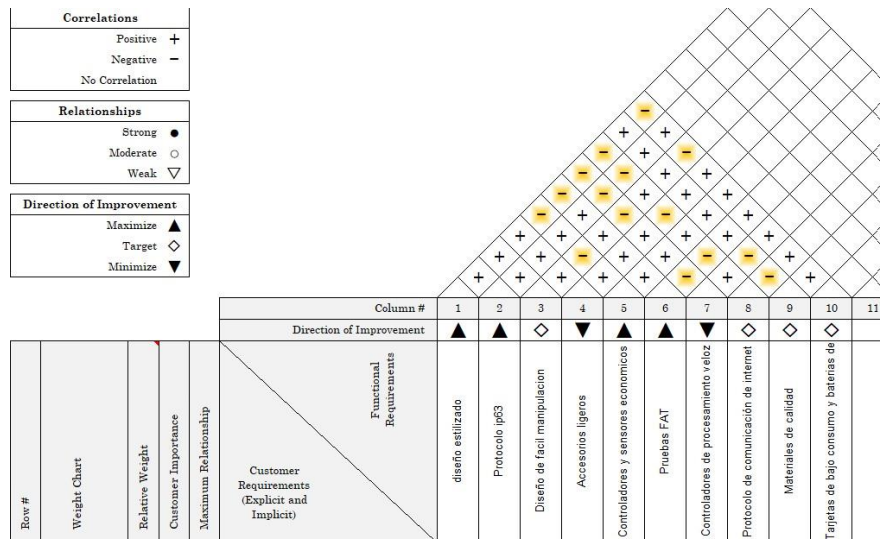
**Figura 28** Matriz de evaluación de los requisitos técnicos. Fuente : El Autor

**4.-Características técnicas del producto (los cómo):** Una vez estudiados los aspectos que debe tener nuestro producto (QUÉ), ahora hay que definir los requisitos técnicos necesarios para que se cumplan dichos QUÉ definidos antes. Para ello, elaboramos una lista de CÓMO podemos cumplir con ellos(Herrera, 2020).

Column #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Direction of Improvement	▲	▼	◇							
Functional Requirements	diseño estilizado	Protocolo ip63	Diseño de facil manipulacion	Accesorios ligeros	Controladores y sensores economicos	Pruebas FAT	Controladores de procesamiento veloz	Protocolo de comunicación de internet	Materiales de calidad	Tarjetas de bajo consumo y baterias de
Customer Requirements (Explicit and Implicit)										

**Tabla 5** Requisitos tecnicos por voz del cliente. Fuente: El autor.

**5.- Evaluación de criticidad:** donde calcularemos los objetivos técnicos que tenemos que conseguir para cumplir finalmente con las especificaciones que requiere nuestro producto (Herrera, 2020).



**Figura 28.** Evaluacion de criticidad . Fuente :Los Autores

**6.- Interrelación de los como:** En este paso se trata de valorar la influencia que tienen los distintos “Qués” en la obtención de los distintos “Cómos”. Para ello se adopta una escala de correlación (Rojas, 2009).

Customer Requirements (Explicit and Implicit)	diseño estilizado	Protocolo ip63	Diseño de fácil manipulación	Accesorios ligeros	Controladores y sensores economicos	Pruebas FAT	Controladores de procesamiento veloz	Protocolo de comunicación de internet	Materiales de calidad	Tarjetas de bajo consumo y baterías de
Presentable	●	○	○	▽					▽	
Resistente	○	●		▽	○	○			○	▽
Practico	○	▽	●	○	▽	▽	▽	○	▽	
Peso manejable	○	▽	○	●	▽		▽		○	
Precio accesible	▽		▽	▽	●	▽	○	▽	○	○
Confiable		●		▽	●	●	○	▽	○	▽
Rapido en el procesamiento de señales					○		●	▽		○
Monitoreo via wifi					○		○	●		▽
Durable	▽	●	○	▽	○	○			●	▽
Consumo de energia bajo				▽	▽		○			●

**Figura 29** Interrelacion de los como . Fuente: El Autor.

**7.- Puntuación de relaciones:** Se ha visto anteriormente que no todos los “Qués” tienen la misma importancia y que cada “Cómo” contribuye en la consecución de un “Qué” a través del coeficiente de la matriz de relaciones. Finalmente se reordenan los distintos “Como” según la puntuación relativa obtenida. Esta ordenación indica el grado de prioridad en caso de que sea preciso optar entre ellos (Rojas, 2009).

Target	diseño estilizado	Protocolo ip63	Diseño de fácil manipulación	Accesorios ligeros	Controladores y sensores economicos	Pruebas FAT	Controladores de procesamiento veloz	Protocolo de comunicación de internet	Materiales de calidad	Tarjetas de bajo consumo y baterías de litio							
Max Relationship	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9							
Technical Importance Rating	232.9	367.1	211	169.5	420.7	234.1	206.1	142.7	245.1	132.9							
Relative Weight	10%	16%	9%	7%	18%	10%	9%	6%	10%	6%							
Weight Chart																	

**Tabla 6** Puntuacion de relaciones. Fuente: Los autores

Con base a los resultados obtenidos se puede concluir que los requerimientos que más fueron declarados por los clientes fueron que el prototipo fuera de un precio accesible, ya que los pocos que existen en el mercado son muy costosos y no están al alcance de la economía local ,otra característica que marco mucho peso en el análisis fue resistente a condiciones ambientales, ya que estos dispositivos se utilizan en la intemperie y en ocasiones suelen sufrir daños por humedad , radiación , salinidad , sobrecalentamiento por la temperatura , la estrategia para resolverlo será utilizar sensores acústicos económicos pero confiables para tener veracidad en el estudio estructural del concreto , para hacerlo resistente al ambiente se utilizara el protocolo ip63 que consiste diseñar el prototipo capaz de soportar agua sin que sufra daño , la prueba se hace al someterlo al rociado de agua con un spray durante 5 minutos.

Esto no significa que los demás requerimientos no se consideran, simplemente se le dará mayor importancia a los ya antes mencionados.

A lo largo de las décadas, el QFD ha demostrado su capacidad para transformar los requisitos del cliente en características tangibles del producto, facilitando así una alineación entre la visión de la organización y las expectativas del consumidor (Vásquez Loret et al., 2019).

Respecto a la integración con otras metodologías, el enfoque del QFD no solo se limita a ser una herramienta independiente, sino que su verdadero potencial se manifiesta cuando se combina con otras metodologías de calidad, como Six Sigma, Lean Manufacturing o metodologías ágiles con el TRIZ. La integración de QFD con estas prácticas puede amplificar su efectividad, permitiendo a las organizaciones no solo captar los requerimientos del cliente, sino también implementar mejoras continuas y optimizar procesos (González Cruz et al., 2024). Por ejemplo, la combinación de QFD con Lean puede resultar en un enfoque más ágil en la identificación de los "valores" que realmente importan para el cliente, al tiempo que se minimizan los desperdicios.

La capacidad del QFD para utilizar técnicas de recopilación de datos, como encuestas y entrevistas, se presenta como un componente esencial en su implementación (Herrera De la Barrera & Narváz Zúñiga, 2017). Este enfoque centrado en el cliente permite que las organizaciones no solo escuchen, sino que también analicen y prioricen las necesidades del consumidor, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones estratégicas aunado con el uso de la metodología estructurada de VOC. La organización y el análisis de datos son, por lo tanto, fundamentales para la efectividad del QFD.

### 3.2.4. Análisis de Modo Efecto Falla

El Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEA) es una metodología que permite identificar, evaluar y priorizar fallas en un prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado. A través del Número de Prioridad de Riesgo (RPN), se analizan los modos de falla, sus efectos y causas, facilitando la toma de decisiones para mejorar la confiabilidad y desempeño del sistema. Para complementar este análisis, se utiliza el Diagrama de Ishikawa, que permite visualizar de manera estructurada las posibles causas de las fallas, clasificándolas en diferentes categorías como materiales, medición, mano de obra, maquinas, medio ambiente, método. Esta herramienta ayuda a comprender la relación causa-efecto, optimizando el diseño del prototipo y minimizando riesgos.

Se implementó el **AMEF (Análisis Modal de Efecto y Falla)** como una técnica preventiva orientada a reducir la probabilidad de fallos durante la operación del sistema. Se aplicó de manera sistemática a los componentes electrónicos (sensor, microcontrolador ESP32, conexiones, alimentación) y a los procesos de transmisión y procesamiento de señales. Se identificaron modos de fallo potenciales como: pérdida de conexión Wi-Fi, ruido en la señal acústica, errores en la lectura del sensor o fallos en la fuente de alimentación. Para cada fallo se estimaron tres factores: la severidad del efecto, la probabilidad de ocurrencia y la posibilidad de detección, calculando así el **número de prioridad de riesgo (NPR)** que permitió clasificar y mitigar los riesgos más críticos mediante rediseños o medidas correctivas.

El diagrama de Gantt elaborado para la aplicación del Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF) en el prototipo de monitoreo estructural representa la planificación de cada fase del análisis preventivo, con el objetivo de mejorar la confiabilidad del sistema (ver tabla 7). Este cronograma facilita la visualización clara del orden y duración de las actividades involucradas, permitiendo una gestión eficiente del tiempo y recursos disponibles.

Tabla 7. Diagrama de Gantt de AMEF

N.º	Actividad	Semana	Semana	Semana	Semana	Semana	Semana
		1	2	3	4	5	6
1	Recolección de información del prototipo y su funcionamiento	*					
2	Elaboración del Diagrama de Ishikawa (causas agrupadas en 6 categorías)		*				
3	Identificación de modos de falla potenciales por categoría		*				
4	Construcción de matrices AMEF por cada categoría (Materiales, etc.)			*	*		
5	Cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR)			*	*		
6	Análisis y priorización de fallos con mayor NPR				*		
7	Propuesta de acciones correctivas por cada categoría					*	
8	Implementación de mejoras: rediseños, capacitación, revisiones técnicas					*	*
9	Evaluación de mejoras implementadas.						*

El problema central del diagrama de Ishikawa (ver figura 30) son las posibles fallas del prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Para ello se clasificaron las causas en 6 categorías principales: **Materiales:** Problemas de adhesión, Fatiga del material, Degradación del material, Fallo del sensor. **Medición:** Ataques cibernéticos, errores de alineación, errores de calibración, sobrecarga de datos. **Mano de obra:** Daño físico por vandalismo, Mantenimiento inadecuado, Interpretación incorrecta de los datos, instalación incorrecta. **Maquinas:** Fallo de energía, Compatibilidad electromecánica, Vibración y ruidos mecánicos, Interferencia electromagnética. **Medio ambiente:** Exposición prolongada a radiación UV, salinidad y corrosión, humedad excesiva, Exposición a temperaturas muy altas o bajas. **Método:** Fallo de comunicación por fallo de la red, Análisis de datos deficiente, Ubicación incorrecta del sensor, Selección inadecuada del sensor.

En la siguiente figura se detalla cada uno de los aspectos mencionados anteriormente.

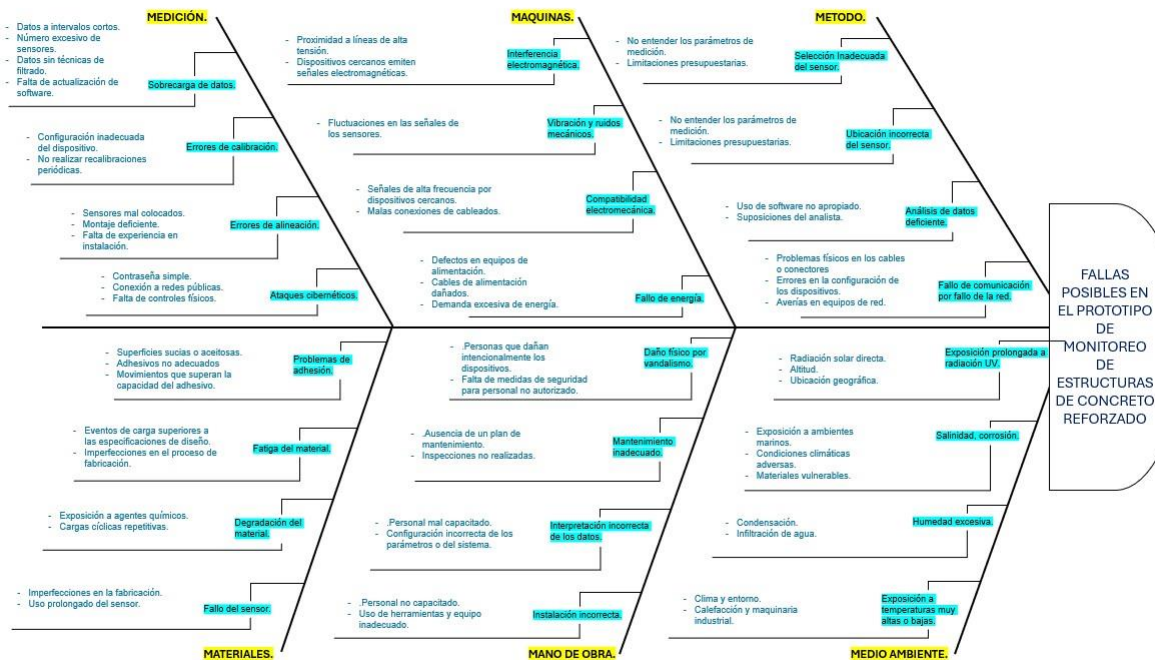


Figura 30. Diagrama de Ishikawa de posibles fallas en el prototipo de monitoreo de concreto reforzado.

Fuente: El autor.

### 3.2.5 Matriz AMEF

Al elaborar el diagrama de Ishikawa se obtiene una visión general de las posibles fallas que podría presentar el dispositivo. No obstante, esta herramienta por sí sola no permite definir con precisión las acciones necesarias para mitigar dichos problemas. Por esta razón, los factores identificados fueron trasladados a la matriz AMEF (Análisis Modal de Efectos y Fallos), donde se analizan de manera más detallada. En esta etapa, se calcula el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), resultado de la multiplicación de los valores asignados a la gravedad, la ocurrencia y la capacidad de detección de cada falla. A continuación, se presenta la matriz AMEF correspondiente a las principales fases de riesgo detectadas en el diseño del dispositivo:

En la siguiente tabla (ver Tabla 8), se detallan los resultados obtenidos específicamente para la fase Método, identificando los puntos críticos donde podrían presentarse fallos relevantes en el funcionamiento del sistema de monitoreo.

Fase Método								
Descripción de la fase	Modo potencial de fallo	Efecto potencial del fallo	Gravedad	Causas potenciales	Ocurrencia	Verificación / Controles actuales	Detección	NPR
Selección inadecuada del sensor	Invalidez en la obtención de datos	Pérdida de datos, imprecisiones en la interpretación	8	No conocer tipo de parámetro de medición ni limitaciones del sensor	2	Revisión anticipada del modo correcto del sensor a suministrar	1	16
Ubicación incorrecta del sensor	Mala conexión de la secuencia de circuitos	Las variables medidas no son las correctas	8	Un ambiente de trabajo en que no se manejen especificaciones correctas del sensor	2	Revisión de planos del equipo y pruebas funcionales	2	32
Análisis de datos recibido	La variable de medición no es pertinente para construcción	Diagnóstico	2	No tener referencias ni parámetros los productores	2	Registro previo de datos tipo de "aprendizaje" terminado al muestra	1	4
Falla de comunicación por fallo de red	Falla de electricidad o caída de red	Mala o nula transmisión de la señal recolectada	5	Problemas físicos en conectores, alimentación o sobrecarga	2	Comprobación del correcto estado de cables, alimentación, dirección IP	1	10

Tabla 8 Matriz AMEF con enfoque en Metodo. Fuente: El autor

Dentro de la categoría correspondiente al método, la fase que presenta el mayor Número de Prioridad de Riesgo (NPR), con un valor de 32, es la relacionada con la incorrecta ubicación del sensor. En función de este resultado, se propone como acción correctiva la implementación de capacitaciones al personal encargado, así como la reducción de distractores en las áreas de trabajo, con el fin de minimizar la probabilidad de error y garantizar una instalación adecuada del sensor.

La Tabla 9 presenta el análisis AMEF correspondiente a la fase Máquinas, donde se evaluaron los posibles modos de fallo asociados al uso, conexión y operación de los equipos involucrados. Esta evaluación permite detectar deficiencias técnicas que puedan comprometer el funcionamiento general del sistema de monitoreo.

Fase Maquinas

Descripción de la fase	Modo potencial de fallo	Efecto potencial del fallo	Gravedad	Causas potenciales	Ocurrencia	Verificación / Controles actuales	Detección	NPR
Interferencia electromagnética	Mal funcionamiento del equipo	Alteraciones en resultados	3	Por una mala colocación o diseño de los dispositivos en el equipo	2	Detectar la ubicación correcta del dispositivo	3	18
Vibraciones y ruidos mecánicos	Mal funcionamiento del equipo	Daño físico del dispositivo, alteración de datos, obstrucción de lectura	6	Las alteraciones y ruidos mecánicos afectan el funcionamiento del micrófono	2	Verificación de que no existan vibraciones en estructuras	1	12
Incompatibilidad electromecánica	Mal funcionamiento del equipo	Mala conexión o pérdida de comunicación	2	Los equipos no son compatibles o hay errores de conexión o codificación	2	Revisión de compatibilidad de conexiones	5	20
Falla de energía	Desconexión de fuente de alimentación	Monitoreo inestable. Desconexión del sistema.	2	Fallos en la fuente de energía	2	Revisión de valores de energía suministrada	1	4

Tabla 9 Matriz AMEF con enfoque en Maquinas.Fuente: El autor.

En la categoría correspondiente a máquinas, la fase que presentó un NPR más elevado fue el fallo de energía, cuyo modo potencial de falla se atribuye a la desconexión de la fuente de alimentación. Como medida correctiva, se propone la realización de revisiones periódicas que garanticen el suministro adecuado y continuo de energía al sistema.

En la Tabla 10 se muestra el resultado del análisis AMEF aplicado a la fase de Medición, enfocándose en errores relacionados con la precisión, la configuración de los parámetros de adquisición y el registro de datos. Este apartado es crucial, ya que una medición inadecuada podría invalidar la utilidad de todo el sistema.

Descripción de la fase	Modo potencial de fallo	Efecto potencial del fallo	Gravedad	Causas potenciales	Ocurrencia	Verificación / Controles actuales	Detección	NPR
Sobrecarga de datos	Generación excesiva de datos	Reducción en el rendimiento del sistema, pérdida de datos	5	Recolección de datos a alta frecuencia, número excesivo de sensores en la estructura	2	Verificar la utilidad y función de cada sensor propuesto	2	12
Errores de calibración	Mala recolección de datos	Lecturas poco confiables, generación de información incorrecta	7	Procedimientos incorrectos o configuración inadecuada por mal entrenamiento	2	Instalación con guía técnica y capacitación del personal	1	14
Errores de alineación	Mal funcionamiento	Datos inexactos y lectura inconexa	5	Uso de soportes inadecuados, instalación sin alineación, sin capacitación	3	Instalación correcta y revisión supervisada por personal capacitado	2	30
Ataques cibernéticos	Exposición de datos de sensores	Robo de información sensible	6	Uso de servidor local sin cifrado ni control de acceso	1	Uso de servidor local con restricciones de acceso y clave de nivel alto	1	6

Tabla 10 Matriz AMEF con enfoque en Medición. Fuente: El autor

En la categoría de medición, la fase que presentó el NPR más alto fue la relacionada con errores de calibración, cuyo modo potencial de falla se manifiesta en una inadecuada recolección de datos. Para minimizar este riesgo, se considera fundamental brindar capacitaciones al personal, enfocadas en la correcta instalación y configuración del equipo de medición.

A continuación, en la Tabla 11, se examinan los riesgos vinculados con la fase Materiales, especialmente aquellos derivados de componentes defectuosos, incompatibilidades técnicas o selección incorrecta de elementos críticos para el sistema. Esta revisión busca garantizar la fiabilidad y durabilidad del dispositivo.

Descripción de la fase	Modo potencial de fallo	Efecto potencial del fallo	Gravedad	Causas potenciales	Ocurrencia	Verificación / Controles actuales	Detección	NPR
Problemas de adhesión	Mal funcionamiento del equipo.	Desprendimiento de Adhesivo	7	Superficies sucias o aceitosos, movimientos que superan la capacidad del adhesivo.	2	Preparación del área donde se colocará el dispositivo.	2	28
Fatiga del material	Daño en el equipo.	Deformación y Grietas.	4	Eventos de carga superiores a las de especificaciones	2	Inspección de la estructura del dispositivo antes de su integración con los componentes.	1	8
Degradación del material.	Daño de la estructura del dispositivo.	Reducción de la Resistencia Mecánica.	5	Exposición a agentes químicos agresivos que reaccionan con el material. Mala conexión en su ensamblaje, uso excesivo, condiciones	3	Inspecciones regulares de los equipos instalados para la detección oportuna de daños.	1	15
Fallo del sensor.	Defecto de fabricación, mala conexión, mala ubicación del dispositivo, sobre exigencia.	Datos Inexactos.	9	externas extremas, un mal manejo del dispositivo (golpes, caídas, etc.).	5	Revisión de los sensores antes de su conexión (compatibilidad, alimentación)	2	90

Tabla 11 Matriz AMEF con enfoque en Materiales Fuente: El autor

La fase con el NPR más alto en el análisis general fue el fallo del sensor, asociado a múltiples modos potenciales de falla, tales como defecto de fabricación, mala conexión, ubicación inadecuada del dispositivo y sobre exigencia del componente. Para reducir el riesgo asociado a esta falla, se implementó como acción correctiva la revisión detallada del manual de funcionamiento del sensor, con el objetivo de asegurar una instalación y uso adecuados conforme a las especificaciones del fabricante.

La Tabla 12 resume los principales riesgos identificados en la fase Mano de Obra, considerando errores humanos en la instalación, configuración o manipulación del sistema. Este análisis permite establecer controles que minimicen las fallas por intervención directa del operario.

Descripción de la fase	Modo potencial de fallo	Efecto potencial del fallo	Gravedad	Causas potenciales	Ocurrencia	Verificación/ Controles actuales	Detección	NPR
Daño físico por vandalismo.	Déficit del funcionamiento optimo.	Efectos significativos y adversos en los dispositivos de monitoreo estructural, afectando su funcionalidad, la precisión de los datos, y la seguridad de la estructura.	8	Ingreso de personal no autorizado al área, malos filtros de seguridad.	3	Controles de seguridad y vigilancia de las áreas a instalar el dispositivo.	2	48
Mantenimiento inadecuado.	Reducción en la vida útil del equipo.	Riesgos para la seguridad.	8	Ausencia de un plan de mantenimiento.	3	Observaciones en el comportamiento de la transferencia de datos y la calidad de los mismos.	3	72
Interpretación incorrecta de los datos.	Deficiencia en mantenimiento de los equipos monitoreados.	evaluaciones inexactas, acciones correctivas inadecuadas, aumento de costos, riesgos para la seguridad, y daño a la reputación de la empresa.	8	Personal sin la formación adecuada para interpretar los datos recolectados. Configuración incorrecta del sistema	4	Instalación y manejo por parte del personal con el conocimiento sobre el dispositivo	2	64
Instalación incorrecta.	Baja confiabilidad en la obtención de datos por parte del dispositivo.	Uso de herramientas inadecuadas, personal no capacitado.	4	Falta de implementación de capacitaciones	4	Se realiza la instalación del equipo solo por el desarrollador del dispositivo.	3	48

Tabla 12 Matriz AMEF con enfoque en Mano de Obra. Fuente: El autor

Otra de las fases que presentó el NPR más alto fue el mantenimiento inadecuado, lo cual representa un riesgo significativo para el funcionamiento confiable del dispositivo. Como acciones correctivas, se propuso capacitar al personal en la identificación temprana de posibles fallas directamente en el sitio, así como implementar un plan de mantenimiento preventivo que permita asegurar el buen estado y operatividad del sistema a lo largo del tiempo.



Finalmente, la Tabla 13 integra el análisis AMEF enfocado en la fase Medio Ambiente, abordando las condiciones externas que podrían afectar el rendimiento del sistema, como temperatura, humedad, interferencias acústicas o eléctricas. Este análisis es esencial para prevenir comportamientos anómalos del sistema en campo real.

Descripción de la fase	Modo potencial de fallo	Efecto potencial del fallo	Gravedad	Causas potenciales	Ocurrencia	Verificación/ Controles actuales	Detección	NPR
Exposición prolongada a rayos UV.	Reducción en la vida útil del equipo.	El sobrecalentamiento daña los sensores y la batería.	8	Radiación solar directa.	2	Restricción de instalación de dispositivo en áreas expuestas o intemperies por largo tiempo	2	32
Salinidad o corrosión.	Reducción en la vida útil del equipo.	Fallo total o parcial del dispositivo.	8	Cambios climáticos o la zona o ubicación.	2	Restricción de instalación de dispositivo en áreas expuestas o intemperies por largo tiempo.	2	32
Humedad excesiva.	Reducción en la vida útil del equipo.	Fallo total o parcial del dispositivo.	8	Instalación en zonas muy húmedas o intemperies que permitan la exposición a lluvias.	2	Restricción de instalación de dispositivo en áreas expuestas o intemperies por largo plazo.	2	32
Exposición a temperaturas muy altas o bajas.	Reducción en la vida útil del equipo.	Fallo total o parcial del dispositivo.	8	Instalación en áreas con procesos de temperaturas muy elevadas o frías.	2	Restricción de instalación de dispositivo en áreas expuestas o intemperies por largo plazo.	2	32

Tabla 13 Matriz AMEF con enfoque en Medio Ambiente. Fuente: El autor.

Las cuatro fases tuvieron un NPR igual a 32 sin embargo en el resultado de las acciones, diseñar el dispositivo para instalación en zonas expuestas a las inclemencias del ambiente obtuvo un npr mayor.

Acciones correctivas:

- ✓ Implementación de capacitaciones al personal
- ✓ Revisión de manual de funcionamiento de sensor.
- ✓ Estudio de adhesivos
- ✓ Ubicar el área de la estructura a monitorear y analizar el medio que lo rodea.
- ✓ Revisiones periódicas para el adecuado suministro de energía.



- ✓ Mejora del dispositivo para su instalación en zonas expuestas a condiciones de temperaturas altas o bajas de nivel elevado.

La aplicación del AMEF en el diseño del prototipo no solo permitió detectar debilidades técnicas, sino que también impulsó una visión más integral del desarrollo de tecnologías para el monitoreo estructural. Este enfoque contribuye a la sostenibilidad de las infraestructuras, al permitir intervenciones tempranas y extender la vida útil. Además, el uso del AMEF se alinea con los enfoques de ingeniería, donde la prevención de errores es prioritaria frente a la corrección de fallas. En el contexto donde la seguridad estructural es crítica esta metodología adquiere aún mayor relevancia. Por otro lado, se observa que su integración con tecnologías inteligentes como sensores, microcontroladores y plataformas de análisis de datos permite potenciar el diseño de sistemas autónomos de monitoreo, sentando las bases para futuras aplicaciones en el campo del SHM (Structural Health Monitoring).

¿Como se midió el éxito del prototipo con la aplicación de AMEF?

Al reducir los riesgos más severos mediante controles o verificaciones, entre menor sea el NPR de los modos de fallo mayor es la confiabilidad y éxito del prototipo.

Para garantizar la confiabilidad de las mediciones en el estudio experimental, es fundamental describir detalladamente los instrumentos y componentes empleados en el sistema de monitoreo. La Tabla 14 presenta los principales dispositivos utilizados en el prototipo, incluyendo el sensor acústico, el microcontrolador, el generador de pulsos y el sistema de adquisición de datos. Cada uno de estos elementos cumple una función específica en la detección, transmisión y análisis de las señales acústicas a través del concreto. Esta documentación técnica permite asegurar la trazabilidad del experimento y contribuye a fortalecer la validez interna del estudio.

<b>Componente</b>	<b>Modelo / Especificación</b>	<b>Descripción técnica</b>
Sensor acústico	MIC-2380	Sensor de condensador electret, respuesta de 20–80 kHz, alimentado a 12 V.
Microcontrolador	ESP32 DevKit v1	MCU con conectividad WiFi/Bluetooth, entrada analógica de 12 bits.
Generador de pulso acústico	MATLAB + altavoz piezoeléctrico	Pulso sinusoidal de 2964 Hz y 22 kHz, generado por código en MATLAB.
Sistema de adquisición	MATLAB R2024a	Recolección de señal acústica, visualización en tiempo real, FFT.
Medio de prueba	Tubo de PVC con agua perforada cada 5 cm + castillos de concreto	Se simula la propagación de onda acústica a través del medio físico.

Tabla 14. Instrumentos Utilizados en el Monitoreo de estructuras de concreto Reforzado. Fuente: El autor.

La precisión en la adquisición de señales acústicas depende en gran medida de una adecuada calibración del sensor. Esta etapa asegura que los datos registrados representen fielmente el fenómeno físico observado. En este estudio, se aplicaron procedimientos de calibración que permitieron ajustar el sensor acústico a las condiciones específicas del entorno de prueba. La Tabla 15 resume los parámetros clave considerados durante la calibración, incluyendo la frecuencia de referencia, el método empleado, el umbral de sensibilidad y los valores de voltaje aceptables. Esta documentación es esencial para garantizar la repetibilidad del experimento y la validez de los datos obtenidos.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor / Método</b>
Frecuencia de calibración	22 kHz (pulso seno generado desde MATLAB)
Método	Comparación de respuesta del sensor frente a forma de onda de referencia
Fuente patrón	Señal sinusoidal ideal generada en software MATLAB
Voltaje de entrada esperado	2.5 V máximo
Umbral de sensibilidad	Nivel mínimo de 0.05 V para considerar señal útil
Verificación	Se empleó Software para verificar la forma de onda generada y recibida

Tabla 15. Parámetros de calibración en el Monitoreo de estructuras de concreto Reforzado.  
Fuente: El autor.

La Tabla 16 presenta los parámetros utilizados para validar las señales captadas por el sistema de monitoreo, incluyendo relación señal/ruido, posición temporal del pulso esperado, y repetibilidad. Aplicar estos criterios fortalece la validez interna del estudio, al reducir la influencia de factores externos o errores técnicos en el análisis de datos.

Criterio	Descripción / Justificación
Relación señal/ruido (SNR)	Se considera válida una señal cuando la SNR es mayor a <b>5 dB</b> , garantizando que la señal útil es significativamente superior al nivel de ruido de fondo. Esto asegura una interpretación confiable del espectro.
Posición temporal del pulso	El pulso acústico debe registrarse en un rango específico estimado y la frecuencia de monitoreo. Pulsos fuera de este intervalo son descartados por posible interferencia o eco con filtros pasa banda.
Repetibilidad	Se requiere la detección coherente de un patrón similar en al menos 2 repeticiones de la prueba.
Amplitud mínima aceptable	Se establece un umbral de amplitud basado en pruebas de calibración. Señales por debajo de 5 -20 Hz se consideran ruido ambiental.
Consistencia en el espectro	El contenido frecuencial debe mostrar <b>picos consistentes</b> dentro de la banda objetivo (>20 kHz para fracturas).

Tabla 16. Parámetros utilizados para validar las señales captadas por el sistema de monitoreo.

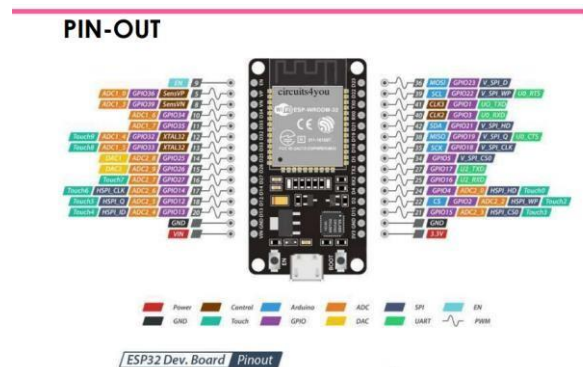
Fuente: El autor.

### 3.3 Fichas técnicas de componentes

Las fichas técnicas proporcionan información clave sobre las características, especificaciones, parámetros eléctricos, condiciones de operación y limitaciones de cada elemento que conforma el sistema. Esta documentación técnica no solo facilita el proceso de diseño e integración de los componentes, sino que también permite asegurar su compatibilidad y funcionamiento adecuado dentro del prototipo. Además, es esencial para el mantenimiento, la sustitución de piezas y la reproducción del sistema por otros investigadores.

A continuación, se presentan las fichas técnicas de los principales componentes empleados en el proyecto, tales como el microcontrolador ESP32, el sensor acústico MIC2830, el regulador de voltaje L7805CV, así como condensadores, resistencias y fuentes de alimentación utilizados en el prototipo.

Microcontrolador:

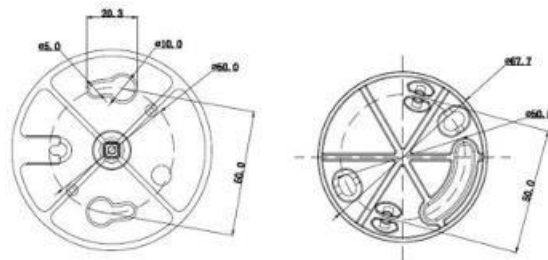


Característica	Especificación
CPU	Doble núcleo Xtensa® LX6 (32 bits)
Frecuencia del reloj	Hasta 240 MHz
Memoria RAM	~520 KB SRAM
Memoria Flash	Soporte externo hasta 16 MB (típicamente 4 MB)
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n

<b>Característica</b>	<b>Especificación</b>
<b>Bluetooth</b>	v4.2 BR/EDR y BLE
<b>GPIOs</b>	Hasta 34 pines configurables
<b>ADC (convertidor analógico-digital)</b>	12 bits, hasta 18 canales
<b>DAC (convertidor digital-analógico)</b>	2 canales de 8 bits
<b>PWM</b>	Múltiples canales
<b>Interfaces de comunicación</b>	UART, SPI, I2C, I2S, CAN, IR, RMT
<b>Voltaje de operación</b>	3.0 – 3.3 V
<b>Consumo de energía</b>	Bajo consumo, con múltiples modos de ahorro de energía (deep sleep, light sleep)

### Sensor Acústico

Medidas para instalación:



<b>Especificación</b>	<b>Valor aproximado</b>
<b>Tipo</b>	Micrófono electret de condensador
<b>Voltaje de operación</b>	9–12 V DC
<b>Consumo de corriente</b>	3–5 mA
<b>Respuesta en frecuencia</b>	~20 Hz – 20 kHz
<b>Sensibilidad típica</b>	-44 dB ±3 dB (a 1 kHz, 1 Pa)
<b>Salida</b>	Analógica (AC acoplada con capacitor)

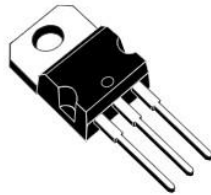
<b>Especificación</b>	<b>Valor aproximado</b>
<b>Impedancia de salida</b>	~2.2 k $\Omega$
<b>Dimensiones</b>	Varía, típicamente en módulo encapsulado
<b>Rango de temperatura</b>	-20 °C a +70 °C
<b>Orientación</b>	Unidireccional

Batería



<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
<b>Tipo de batería</b>	Ion de litio (Li-ion) o Litio-fosfato (LiFePO <sub>4</sub> )*
<b>Voltaje nominal</b>	12 V (típicamente 3 celdas en serie: 3.7V x 3 = 11.1V)
<b>Capacidad</b>	1.5 Ah (1500 mAh)
<b>Energía total</b>	~18 Wh (12V × 1.5Ah)
<b>Corriente de descarga</b>	1C típica (~1.5 A)
<b>Corriente de carga</b>	0.5–1 A recomendada (hasta 1.5 A máx.)
<b>Tiempo de carga</b>	Aproximadamente 2 a 3 horas
<b>Dimensiones</b>	Varía por fabricante (ej. 70 × 50 × 20 mm aprox.)
<b>Peso</b>	100–200 g (depende de carcasa y química)
<b>Temperatura de operación</b>	0 °C a 45 °C (carga) / -20 °C a 60 °C (descarga)
<b>Protección</b>	BMS (protección contra sobrecarga, sobre descarga y cortocircuito)

Regulador:



<b>Característica</b>	<b>Especificación</b>
<b>Voltaje de salida</b>	+5V $\pm$ 2%
<b>Voltaje de entrada (mín-máx)</b>	7V – 35V
<b>Corriente de salida</b>	Hasta 1.5 A (con disipador adecuado)
<b>Caída de tensión (dropout)</b>	~2V típicamente
<b>Protecciones internas</b>	Térmica, sobrecarga, cortocircuito
<b>Tipo de encapsulado</b>	TO-220 (tres patas, con aleta metálica)
<b>Temperatura de operación</b>	0 °C a 125 °C

Capacitores:

**Especificación Detalle**

**Capacitancia** 0.01  $\mu\text{F}$  = 10 nF

**Tipo común** Cerámico (X7R, Y5V) o de poliéster

**Tensión típica** 50V, 100V

**Tolerancia**  $\pm 10\%$  o  $\pm 5\%$

**Aplicaciones** Filtros de alta frecuencia, desacoplo, supresión de ruido



**Especificación Detalle**

**Capacitancia** 0.00047  $\mu\text{F}$  = 470 pF

**Tipo común** Cerámico (NPO/C0G o X7R)

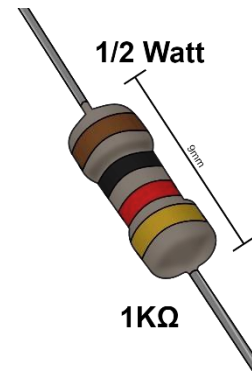
**Tensión típica** 50V – 100V

**Tolerancia**  $\pm 10\%$  o mejor

**Aplicaciones** Filtros de alta frecuencia, desacoplo de señales de RF, filtros de entrada en fuentes conmutadas

**Código EIA** "471" ( $47 \times 10^1$  pF)

Resistencia:



Especificación	Detalle
Valor	1,000 ohmios (1 kΩ)
Tolerancia	±5% (banda dorada), o ±1% si es de precisión
Potencia nominal	0.5 W (½ watt)
Tipo	Película de carbono o metálica
Código de colores	Marrón – Negro – Rojo – Dorado (±5%)
Aplicaciones	Limitación de corriente, divisores de voltaje, polarización de transistores, etc.

### 3.4 Diseño 3D

El uso de modelado en tres dimensiones (3D) representa una herramienta fundamental en el proceso de diseño y desarrollo de prototipos tecnológicos. En el caso específico del prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado, el diseño 3D permite visualizar con precisión la geometría de la carcasa antes de su fabricación, asegurando que cada componente se integre de manera funcional y eficiente.

La carcasa del prototipo para el monitoreo de estructuras de concreto reforzado fue diseñada utilizando el software profesional de diseño asistido por computadora Mastercam (ver figura 31). Este primer modelo incorpora una tapa deslizante que permite el acceso a los componentes electrónicos internos. En la parte posterior, se incluye una perforación circular destinada a la instalación del sensor acústico. Las dimensiones y cotas del diseño se encuentran señaladas en color verde para facilitar su visualización y referencia técnica.

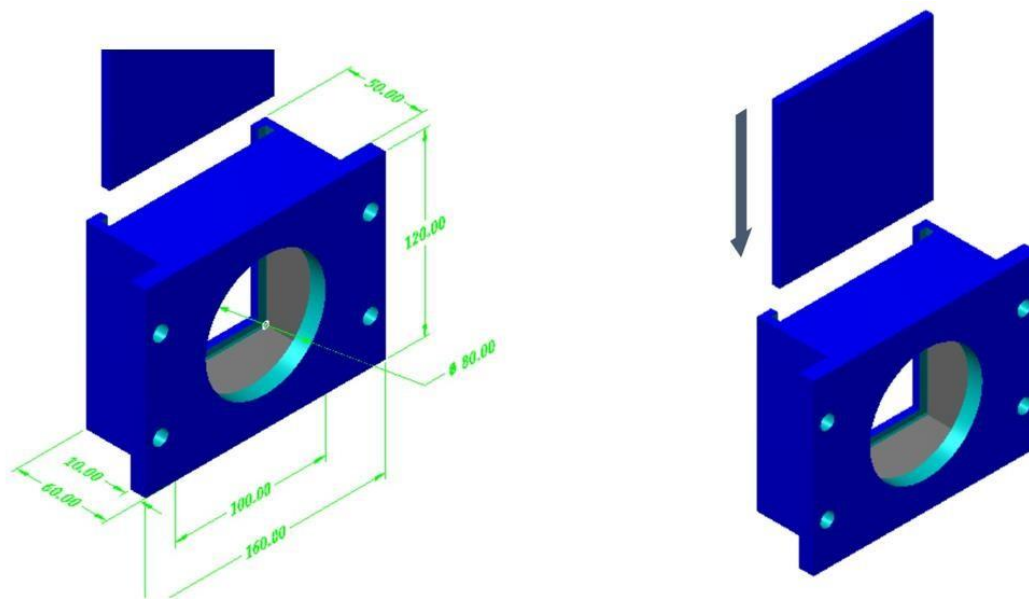


Figura 31. Diseño 3D de carcasa de prototipo de monitoreo de estructuras de concreto. Fuente: El autor.

# CAPITULO IV. MARCO OPERATIVO

## 4.1 Procedimiento operativo

De acuerdo con las entrevistas realizadas a expertos en el área de ingeniería estructural, se identificó que los puntos críticos de una edificación son las vigas y las columnas, debido a que en estos elementos se concentra y distribuye la mayor parte de las cargas estructurales. Por esta razón, el prototipo desarrollado para el monitoreo de estructuras de concreto enfoca su análisis en estos componentes (ver figura 32), ya que cualquier daño o deterioro en ellos puede comprometer significativamente la estabilidad y seguridad de toda la estructura. En la figura x se muestra la colocación del prototipo en vigas y columnas.

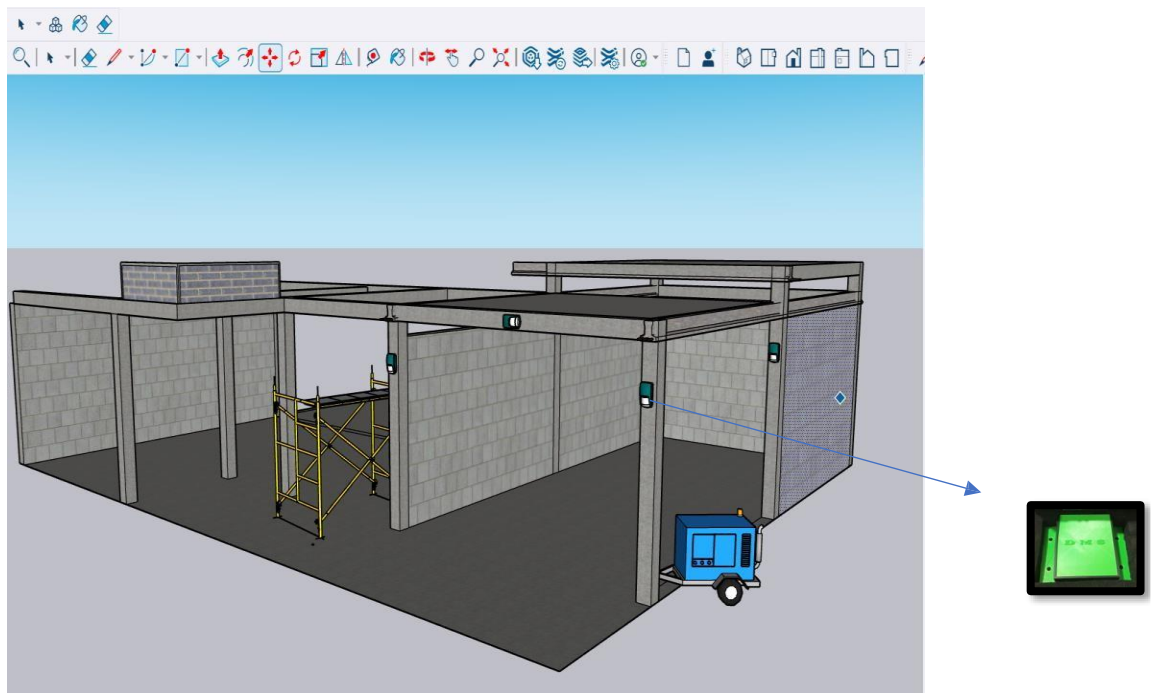


Figura 32. Colocación de prototipo en vigas y columnas. Fuente: El autor.

#### 4.1.2 Diagrama de Bloques (Unidad de análisis 1)

El diagrama de bloques del prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado se muestra en la figura 33, el cual está integrado por un microcontrolador (4) que conecta a un sensor acústico (2) un integrado de alimentación (3) una fuente de corriente directa (1) y un software (5). El microcontrolador (4) interactúa con el software (5) enlazado inalámbricamente vía bluetooth (2). El microcontrolador (4) se energiza de un sistema de alimentación de 5 volts (5) y como la alimentación DC (1) es de 12 V se utiliza un regulador para bajar el voltaje (3). El sensor acústico (2) por otro lado se energiza con 12 V. El muestreo y gráficos de los resultados pueden ser visualizados en el software (5).

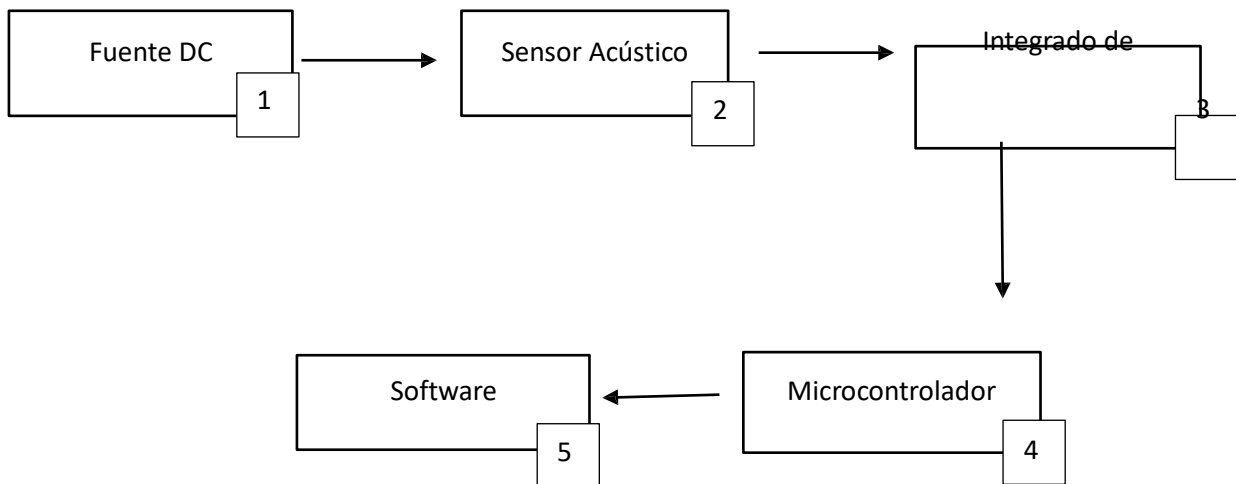


Figura 33. Diagrama de bloques del dispositivo electrónico para el monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Fuente: El autor.

La Tabla 17 presenta la lista detallada de los componentes electrónicos utilizados en el diseño y construcción del prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Esta información es fundamental para la replicación, análisis y validación del circuito, ya que especifica cada componente necesario para el ensamblaje y funcionamiento del sistema. La fuente de la información corresponde al propio autor, en función del diseño desarrollado.

#### 4.1.3 Tabla de componentes.

COMPONENTE	DESCRIPCION
Batería 12 V	Fuente de alimentación de corriente directa con 12 V / 1.5 Amp
Capacitor 1	Condensador de 0.01 UF
Capacitor 2	Condensador de 0.00047 UF
Regulador L7805CV	Regulador lineal de voltaje que entrega una salida fija de 5V DC
Resistencia 1	Resistencia de 1KΩ a 1/2W
Resistencia 2	Resistencia de 1KΩ a 1/2W
Resistencia 3	Resistencia de 1KΩ a 1/2W
Resistencia 4	Resistencia de 1KΩ a 1/2W
Microcontrolador ESP32	Chip SoC (System on a Chip) de bajo consumo y alta integración que combina Wi-Fi y Bluetooth, diseñado para aplicaciones IoT (Internet de las cosas).
Sensor Mic 2830	Micrófono omnidireccional funcional con 12V
Switch	Interruptor

Tabla 17. Lista de componentes. Fuente: El autor.

#### 4.1.4 Diseño del sistema electrónico en plataforma Proteus.

Este sistema (ver figura 34) tiene como objetivo alimentar y conectar un sensor acústico MIC-2380 con un microcontrolador ESP32, asegurando una alimentación adecuada mediante un regulador de voltaje. La fuente del sistema es una batería de 12V de corriente continua (CC). El interruptor permite el encendido o apagado manual del circuito. El regulador L7805CV convierte los 12V de entrada en una salida regulada de 5V, necesaria para alimentar el esp32, los capacitores C1 (0.001  $\mu$ F) y C2 (0.01  $\mu$ F) filtran el ruido de la entrada y salida del regulador, estabilizando el voltaje. El Sensor MIC-2380 es un sensor tipo micrófono que capta emisiones acústicas. La esp32 es el núcleo del sistema recibe la señal del sensor y la procesa. Se conecta de los pines GND: Tierra común con la fuente, VCC (3.3V), alimentación interna del ESP32. Entrada analógica (pin p2) que recibe la señal del sensor. Las resistencias R1 y R2 (1k $\Omega$  cada una) forman parte de un divisor de voltaje, las resistencias, R3 y R4 (1k $\Omega$  cada una) forman parte de acondicionamiento de señal, para protección de la entrada del ESP32.

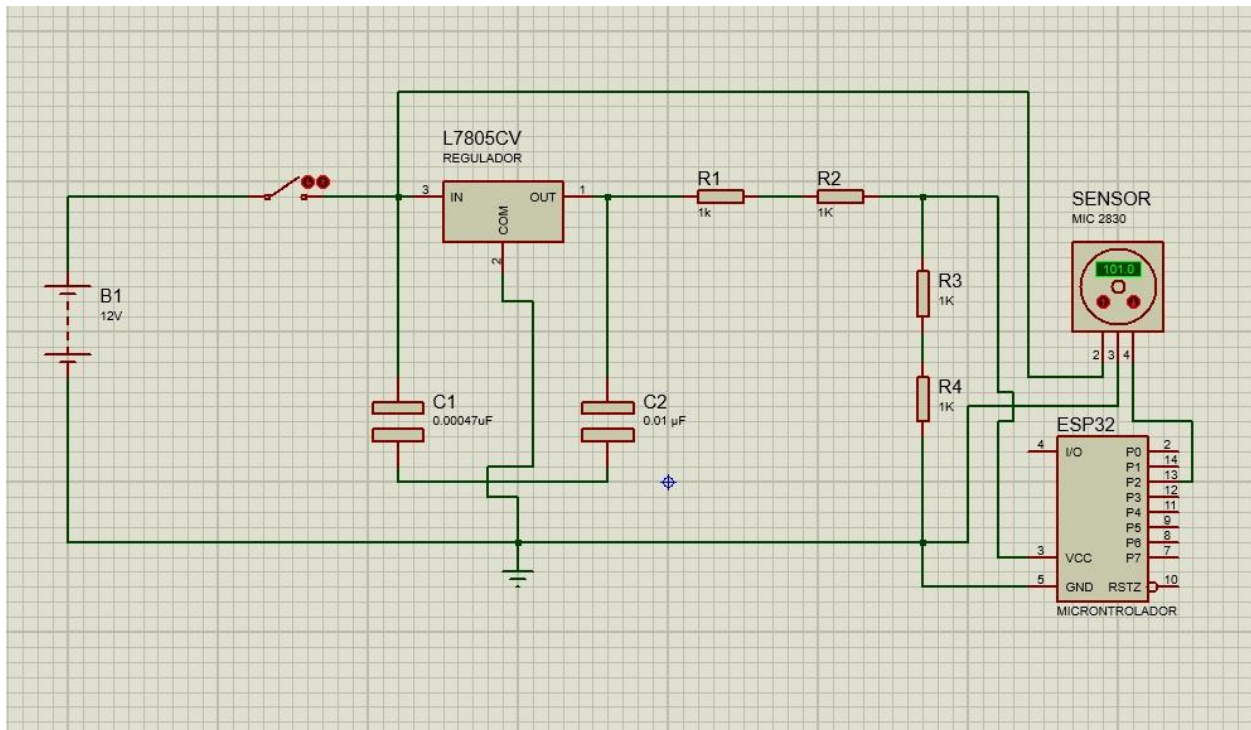


Figura 34. Diagrama esquemático del circuito electrónico del dispositivo. Fuente: El autor.

#### 4.1.5 Programación en Arduino IDE

El código mostrado corresponde a un programa desarrollado en el entorno de Arduino para una placa ESP32, el cual tiene por objetivo leer datos analógicos de un sensor (por ejemplo, un micrófono o sensor acústico) conectado al pin GPIO2 y transmitir estos valores mediante comunicación Bluetooth.

```
#include "BluetoothSerial.h"

BluetoothSerial SerialBT;
const int sensorPin=2;
int sensorValue=0;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(115200);
  pinMode(sensorPin, INPUT);
  SerialBT.begin("ESP32"); // Nombre del dispositivo Bluetooth
  Serial.println("ESP32 listo para conectar via Bluetooth");
}

void loop() {
  //put your main code here, to run repeatedly:
  sensorValue=analogRead(sensorPin);
  //sensorValue=random(10,20);
  SerialBT.println(sensorValue);
  Serial.println(sensorValue);
  delayMicroseconds(250);
}
```

#### 4.1.6 Impresión de carcasa de prototipo.

El prototipo fue fabricado mediante tecnología de impresión 3D utilizando ácido poliláctico (PLA) como material base. El PLA es un biopolímero termoplástico de origen vegetal ampliamente utilizado en prototipado rápido debido a su facilidad de impresión, bajo nivel de deformación y buena calidad superficial (ver figura 35).

La impresión se llevó a cabo con una impresora 3D de tipo FDM (Modelado por Deposición Fundida), lo que permitió obtener una carcasa con geometría precisa conforme al diseño elaborado previamente en el software CAD. El resultado es una estructura robusta, ligera y con las tolerancias necesarias para alojar los componentes electrónicos del sistema de monitoreo, incluyendo el microcontrolador, el regulador de voltaje y el sensor acústico (ver figura 36).

Esta etapa de fabricación permitió validar el diseño físico del prototipo y realizar pruebas de ensamblaje para garantizar la funcionalidad y su accesibilidad.

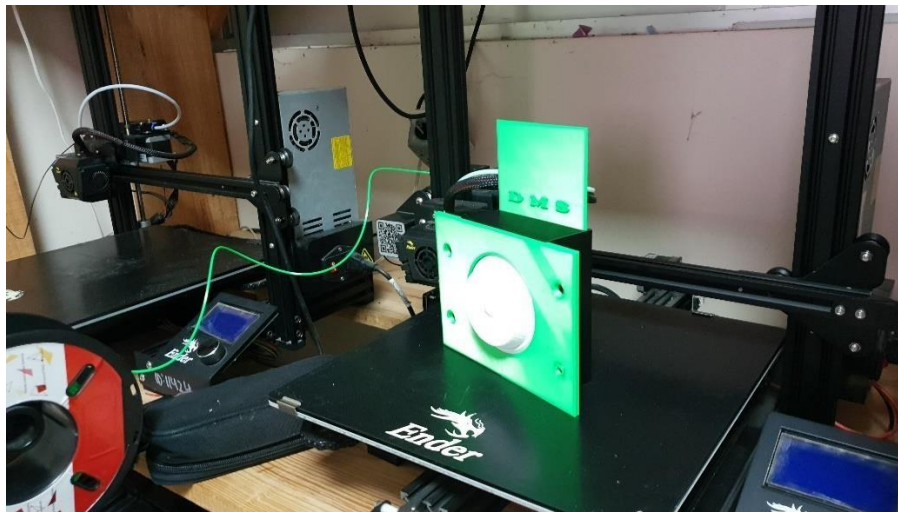


Figura 35. Diseño impreso de carcasa en PLA de prototipo. (vista trasera) Fuente: El autor



Figura 36. Diseño impreso de carcasa en PLA de prototipo. (vista frontal) Fuente: El autor



Figura 37. Logo de prototipo de monitoreo de estructuras de concreto reforzado. Fuente: El autor.

#### 4.1.7 Programación en MATLAB para el análisis de señales acústicas.

El código presentado tiene como objetivo generar, reproducir y visualizar una señal acústica senoidal de alta frecuencia (23 kHz), con el fin de analizar su comportamiento en el dominio del tiempo y del tiempo-frecuencia utilizando herramientas de MATLAB.

```
%Reproducir sonido
clf; clc; clf;
fs = 176400; % Hz
t = 0:1/fs:10; % seconds
f = 23000; % Hz
y = 2*sin(2.*pi.*f.*t);
sound(y,fs,16);
N = 4096;
spectrogram(y,256,250,256,fs,'yaxis');

figure(1)
plot(t,y)

%freq = linspace(0,fs,N);
%Fy=fft(y,N);
%maxFreq = N/5;
%figure(2)
%23plot(freq(1:maxFreq),abs(Fy(1:maxFreq)));
```

El siguiente código en MATLAB tiene como propósito establecer comunicación Bluetooth con un ESP32, adquirir una serie de datos enviados desde un sensor conectado al microcontrolador, aplicar un filtro pasa banda digital y realizar el análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), dicho algoritmo fue utilizado en la unidad de análisis 1.

```
% Configurar Bluetooth
bt = bluetooth("ESP32", 1); % Reemplaza "ESP32" con el nombre del dispositivo Bluetooth

% Parametros de adquisicion
fs = 100000; % Frecuencia de muestreo (ajusta según el delayMicroseconds en ESP32)
nSamples = 10000; % Numero de muestras a adquirir

% Inicializar vector para almacenar los datos
dataArray = zeros(1, nSamples);

disp('ConectadoESP32. Recibiendo datos...');

% Leer los datos desde el ESP32
for i = 1:nSamples
    while bt.NumBytesAvailable == 0
        % Esperar hasta que haya datos disponibles
        pause(0.001); % Pausa breve / retardo
    end

    % Leer una línea de datos desde el búfer
    newData = readline(bt);

    % Convertir a formato numérico
```

```
% Convertir a formato numérico
dataArray(i) = str2double(newData);
disp(i)
end

% Finaliza la conexión Bluetooth
clear bt;

% Aplicar filtro pasa banda
f_low = 14000; % Frecuencia de corte baja
f_high = 16000; % Frecuencia de corte alta
[b, a] = butter(4, [f_low, f_high]/(fs/2), 'bandpass'); % Filtro pasa banda de orden 4
filtered_signal = filter(b, a, dataArray); % Aplica el filtro

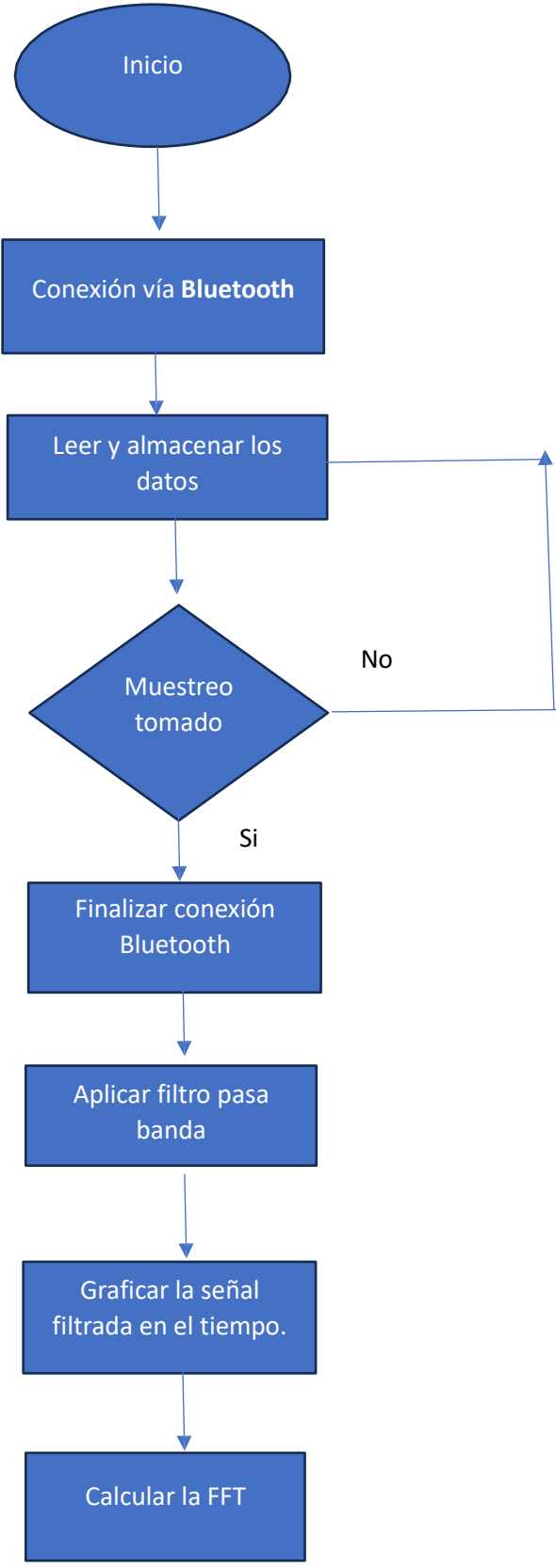
% Graficar la señal filtrada en el tiempo
t = (0:nSamples-1) / fs; % Vector de tiempo
figure(1);
plot(t, filtered_signal);
title('Señal Filtrada en el Tiempo');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Amplitud (dB)');

% Calcular la FFT
N = length(filtered_signal); % Número de puntos
```

```
% Calcular la FFT
N = length(filtered_signal); % Número de puntos
Y = fft(filtered_signal); % Transformada de Fourier
f = (0:N-1)*(fs/N); % Vector de frecuencias

% Graficar el espectro de frecuencia
figure(2);
plot(f(1:N/2), abs(Y(1:N/2))); % Tomar solo las frecuencias positivas
title('Espectro de Frecuencia Filtrado');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Amplitud espectral (dBm)');
```

Con el objetivo de facilitar la comprensión del funcionamiento del código desarrollado, a continuación, se presenta un diagrama de flujo que representa de forma visual y secuencial la lógica implementada. Este diagrama permite identificar de manera clara las etapas del proceso, las decisiones que se toman y el flujo de datos o instrucciones, brindando una visión general de cómo opera el sistema paso a paso.



La figura 38 muestra un esquema representativo del funcionamiento del sistema de monitoreo basado en emisiones acústicas para la evaluación de estructuras de concreto. En este esquema, una fuente ubicada en la parte inferior genera una perturbación que produce ondas acústicas que se propagan a través del material. Estas ondas, al viajar internamente, pueden verse afectadas por la presencia de fisuras, imperfecciones o cambios en la densidad del concreto. En la parte superior, un sensor acústico capta dichas ondas y las convierte en una señal eléctrica que es enviada a un sistema de detección y medición electrónica, donde se procesa mediante amplificación, filtrado y análisis digital. Este tipo de configuración permite monitorear en tiempo real el estado estructural del concreto sin necesidad de intervenir físicamente en la estructura, lo que lo convierte en una herramienta eficaz para la detección temprana de fallas y el mantenimiento predictivo de infraestructuras críticas como vigas, columnas, puentes o edificaciones.

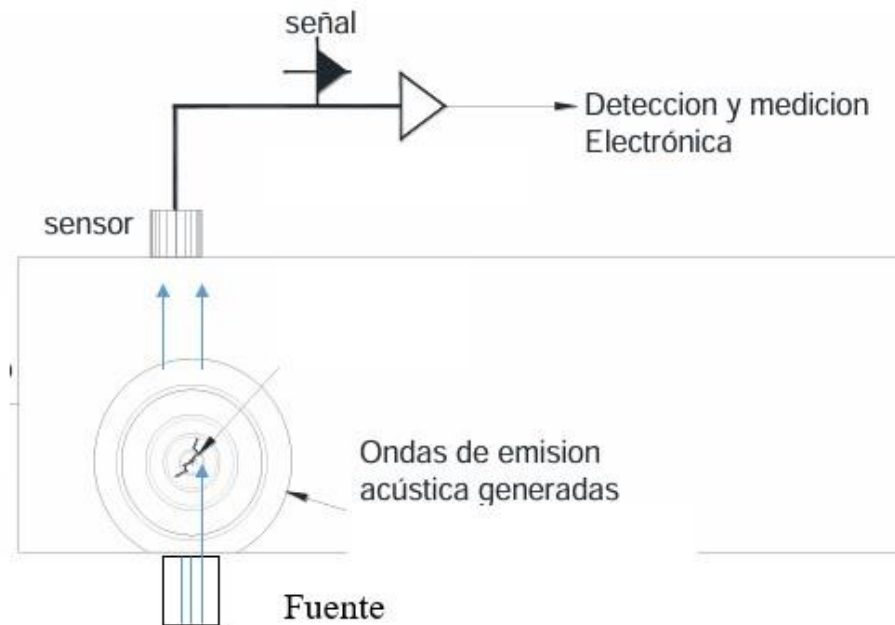


Figura 38. Funcionamiento representativo del monitoreo de estructuras de concreto. Fuente: El autor.

En esta sección se presenta el prototipo físico desarrollado para el monitoreo de estructuras, específicamente diseñado para detectar posibles fallas en elementos críticos como vigas y columnas de concreto reforzado (ver figura 39). Este prototipo integra componentes electrónicos compactos y de bajo perfil montados directamente sobre la superficie del circuito impreso, lo que permite reducir el tamaño del dispositivo y mejorar su eficiencia. El sistema cuenta con un sensor acústico encargado de captar las ondas generadas por posibles microfisuras o alteraciones internas en el material, las cuales son procesadas por el módulo electrónico principal. Gracias a su diseño optimizado, este dispositivo puede ser instalado de forma discreta en distintos puntos de la estructura, facilitando un monitoreo continuo y no invasivo, y contribuyendo a la detección temprana de deterioros que podrían comprometer la estabilidad estructural (ver figura 40).



Figura 39. Prototipo físico ensamblado. Fuente: El autor.

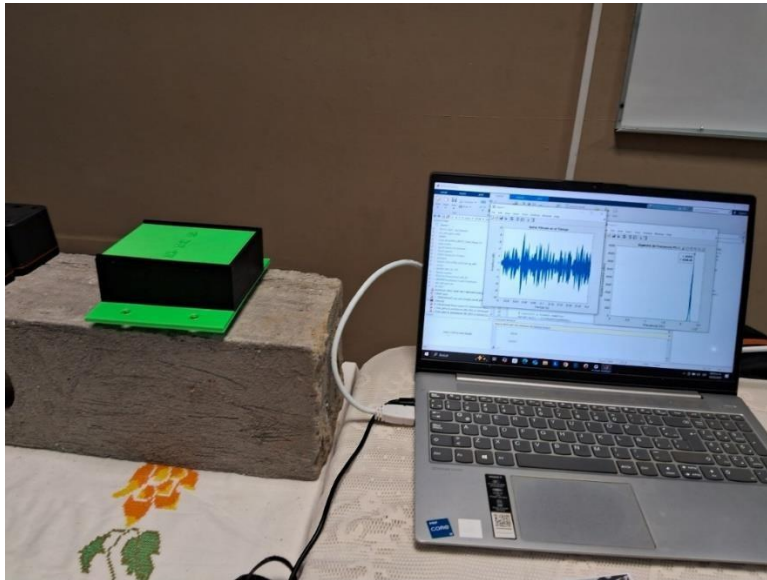


Figura 40. Análisis en las probetas de concreto reforzado. Fuente: El autor.

El espectrograma mostrado en la figura 41 representa el contenido frecuencial de un pulso acústico de ultrasonido enviado a través del concreto. En el eje vertical se presenta la frecuencia (kHz), mientras que el eje horizontal muestra el tiempo (en segundos). La intensidad de color indica la potencia de la señal en dB: los tonos en amarillo corresponden a componentes de mayor energía, y los tonos azul oscuro a componentes de menor intensidad. En este gráfico se observa claramente una concentración de energía en torno a los 20 kHz, lo cual indica que esa fue la frecuencia del pulso acústico utilizado.

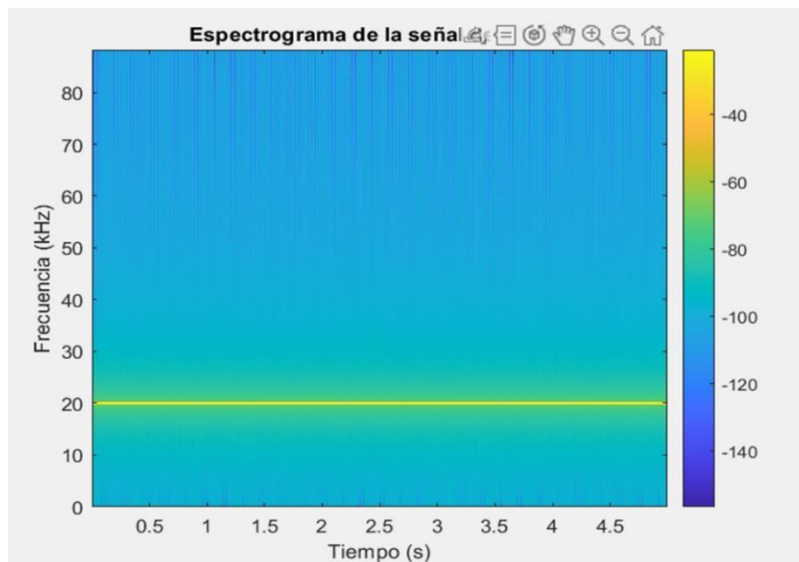


Figura 41. Representación de espectrograma de pulso acústico de ultrasonido enviado al concreto. Fuente: El autor

La Figura 42 muestra el análisis de señales acústicas en una probeta de concreto con grieta vertical, donde se presenta a la izquierda la señal filtrada en el dominio del tiempo con una amplitud que varía entre -25 y 25 dB, evidenciando eventos característicos de fracturas; mientras que a la derecha se observa el espectro de frecuencia filtrado, destacando un pico dominante a aproximadamente 21,935 Hz con una amplitud de 11,484.4 dBm, lo cual indica una frecuencia relevante asociada a la propagación de la grieta. Este análisis permite identificar patrones acústicos relacionados con el daño estructural, facilitando el diagnóstico del estado del concreto mediante técnicas de monitoreo no destructivo.

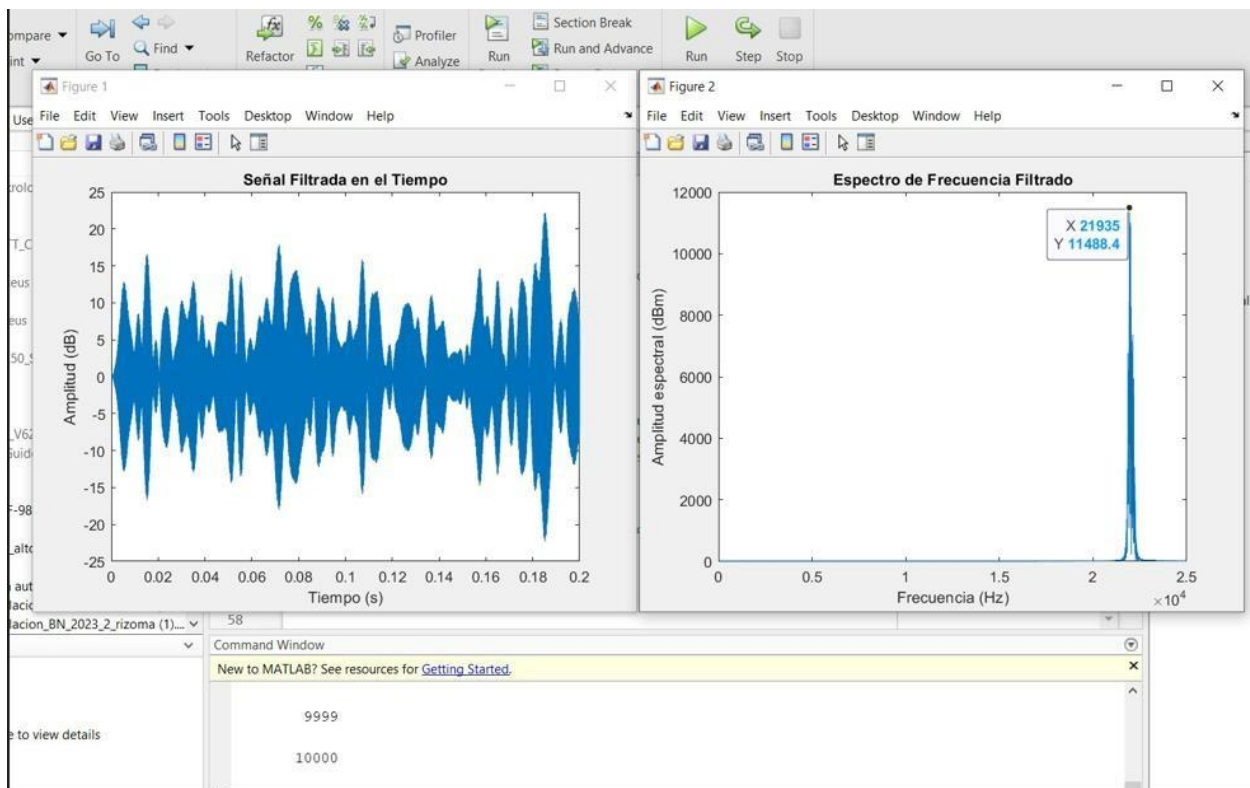


Figura 42. Análisis de señales en probeta agrietada verticalmente. Fuente: El autor.

La Figura 43 presenta el análisis de señales acústicas en una probeta de concreto con grieta horizontal, donde el gráfico temporal muestra una señal filtrada con variaciones de amplitud entre -25 y 25 dB, evidenciando actividad asociada a la fractura; mientras que el espectro de frecuencia revela un pico significativo a 22,010 Hz con una amplitud espectral de 13,949.1 dBm, indicando una frecuencia dominante en la propagación del pulso acústico. Este comportamiento sugiere una respuesta estructural distinta a la observada en grietas verticales, lo que refuerza la utilidad del análisis espectral como herramienta de monitoreo no destructivo para caracterizar el tipo y orientación del daño en el concreto.

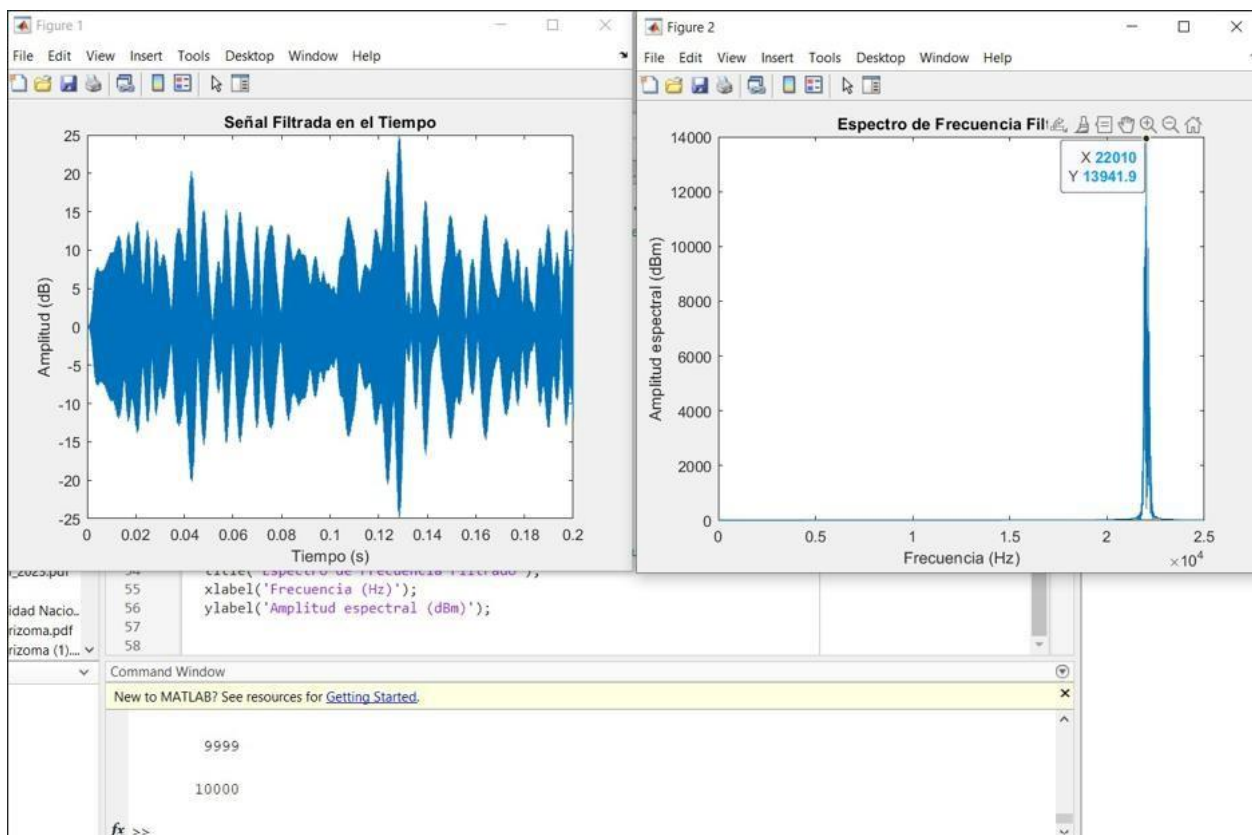


Figura 43. Análisis de señales en probeta agrietada horizontalmente. Fuente: El autor.

La Figura 44 muestra el análisis de señales acústicas en una probeta de concreto en buenas condiciones, donde la señal filtrada en el dominio del tiempo presenta una amplitud moderada, con variaciones que no superan los  $\pm 15$  dB, reflejando una propagación estable y sin indicios evidentes de fractura. En el espectro de frecuencia se observa un pico dominante a 21,890 Hz con una amplitud espectral de 7,061.22 dBm, lo cual indica una transmisión energética limpia y sin distorsiones significativas. Este comportamiento confirma la integridad estructural del material, sirviendo como referencia base para comparar con probetas dañadas y evidenciar cambios en la propagación acústica producto de defectos internos.

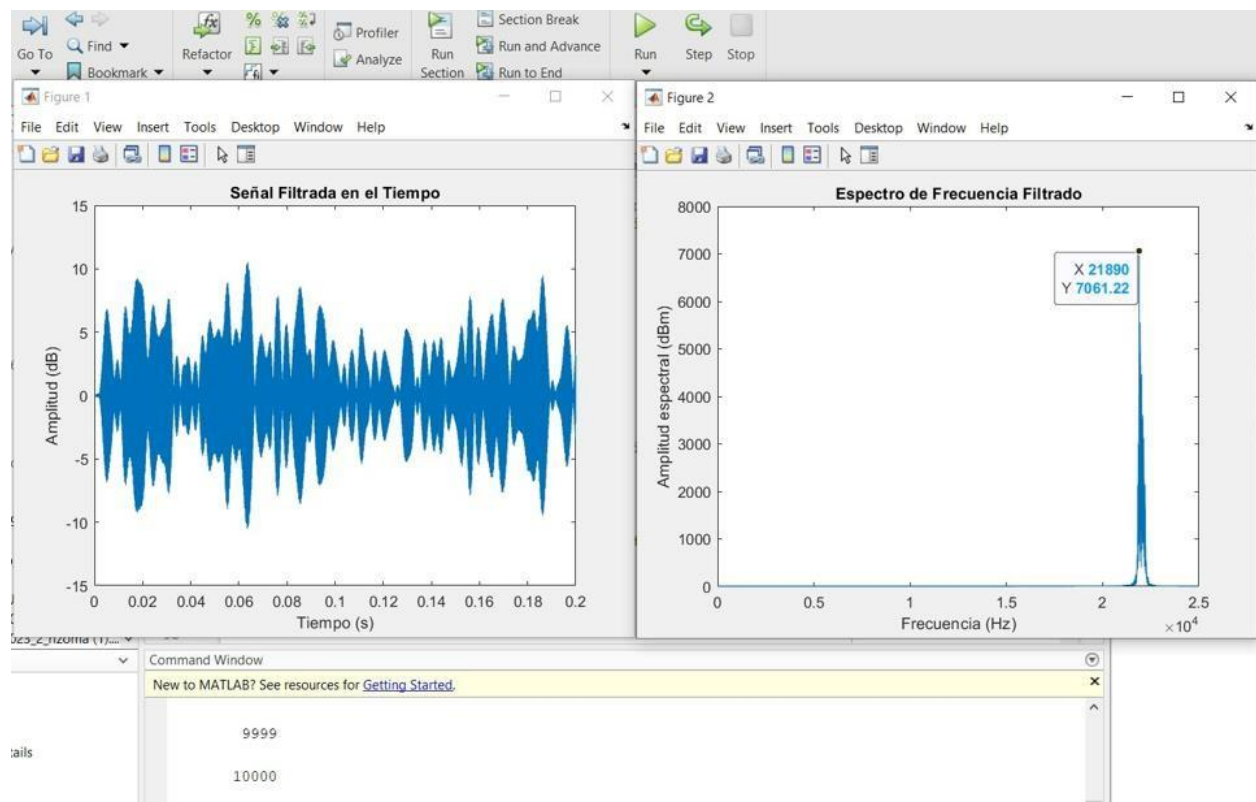


Figura 44. Análisis de señales en probeta en buenas condiciones. Fuente: El autor.

## Unidad de análisis 2

Se propone un experimento utilizando un tubo de Kundt modificado (ver figura 45) con el objetivo de analizar el comportamiento de una onda senoidal al propagarse a través de distintos medios: un tubo completamente lleno de agua y un tubo vacío con aire. El sistema está diseñado para evaluar cómo las características del medio afectan la transmisión y posible atenuación o ruptura de la señal acústica.

El prototipo consiste en un tubo cilíndrico de longitud conocida, en cuyo extremo izquierdo se coloca un altavoz que emite un pulso acústico senoidal de frecuencia controlada. Por el otro extremo, se introduce un micrófono de alta sensibilidad que se desplaza linealmente en incrementos de 5 cm a lo largo del tubo (Ver figura 46). En cada posición, el micrófono registra la potencia instantánea de la señal recibida, permitiendo un análisis detallado de la atenuación, interferencia, resonancia o ruptura de la onda en función del medio de propagación.

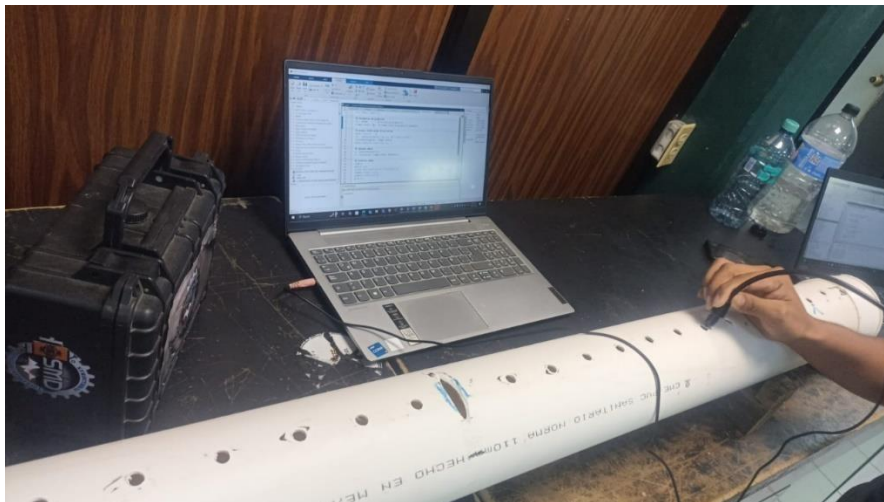


Figura 45. Tubo de Kundt. Fuente: El autor.



Figura 46. Desplazamiento de micrófono en tubo de kundt. Fuente: El autor

Para conocer la frecuencia de emisión para esta unidad de análisis se realizó un cálculo matemático:

Análisis Matemático para la determinación de la frecuencia a utilizar en el tubo con agua.

$$V = \lambda / T = \lambda * f$$

Donde:

V= Velocidad del sonido en el aire (1482 m/s)

$\lambda$  = Distancia del tubo

T= Periodo

$$= (1.5 \text{ m} / 3) * f \quad f = 3(1482 \text{ m/s}) / 1.5 \text{ m} = 4446 \text{ m/s} / 1.5 \text{ m} = 2964 \text{ Hz}$$

Por lo tanto, el pulso a utilizar para esta unidad de análisis es de 2964 Hz.

Análisis Matemático para la determinación de la frecuencia a utilizar en el tubo con aire.

$$V = \lambda / T = \lambda * f$$

Donde:

V= Velocidad del sonido en el aire (343 m/s)

$\lambda$  = Distancia del tubo

T= Periodo

$$= (1.5 \text{ m} / 3) * f \quad f = 3(343 \text{ m/s}) / 1.5 \text{ m} = 1029 \text{ m/s} / 1.5 \text{ m} = 686 \text{ Hz}$$

Por lo tanto, el pulso a utilizar para esta unidad de análisis es de 686 Hz.

A continuación, se presenta el código de recepción para el análisis 2.

<pre>clc; clear; close all;</pre>	
<pre>%% Parámetros de grabación fs = 44000; % Frecuencia de muestreo tiempo_total = 0.5; % Tiempo total de grabación (segundos) R = 1; % Resistencia en Ohm f_objetivo = 8000; % Frecuencia esperada del pulso (Hz) ruido_umbral = 0.000004; % Potencia mínima para considerar señal real</pre>	
<pre>%% Grabar señal desde el micrófono disp('Grabando...'); rec = audiorecorder(fs, 16, 1); % 1 canal, 16 bits recordblocking(rec, tiempo_total); disp('Grabación finalizada.');</pre>	
<pre>%% Obtener datos y = getaudiodata(rec); t = linspace(0, tiempo_total, length(y));</pre>	
<pre>%% FILTRO PASABANDA EN TORNO A 686 Hz filtro = designfilt('bandpassiir', 'FilterOrder', 6, ...     'HalfPowerFrequency1', f_objetivo - 100, ...     'HalfPowerFrequency2', f_objetivo + 100, ...     'SampleRate', fs); y_filtrada = filtfilt(filtro, y); % Filtrado bidireccional</pre>	
<pre>%% Cálculo de potencia instantánea pot_inst = y_filtrada.^2 / R;</pre>	
<pre>%% Suavizado (ventana de 20 ms) ventana = round(0.02 * fs); % 20 ms</pre>	

```

%% Detección del pulso: buscar donde la potencia excede el ruido
indice_inicio = find(pot_suavizada > ruido_umbral, 1, 'first');

if isempty(indice_inicio)
    disp('No se detectó ningún pulso por encima del umbral de ruido.');
```

return;

```
end

% Tomar una ventana de 100 ms desde el inicio del pulso
duracion_ventana = 0.1; % segundos
num_muestras_ventana = round(duracion_ventana * fs);
fin_ventana = indice_inicio + num_muestras_ventana - 1;

% Evitar salirse del vector
if fin_ventana > length(pot_suavizada)
    fin_ventana = length(pot_suavizada);
end

% Calcular potencia máxima en ese segmento
pot_max_local = max(pot_suavizada(indice_inicio:fin_ventana));
```

```

%% Graficar señal y potencia
figure;
subplot(2,1,1);
plot(t, y_filtrada);
title('Señal Filtrada (8000 Hz)');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Voltaje [V]');
grid on;

subplot(2,1,2);
```

```

%% Graficar señal y potencia
figure;
subplot(2,1,1);
plot(t, y_filtrada);
title('Señal Filtrada (8000 Hz)');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Voltaje [V]');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(t, pot_suavizada, 'k');
hold on;
plot(t(indice_inicio:fin_ventana), pot_suavizada(indice_inicio:fin_ventana), 'r');
yline(ruido_umbral, '--b', 'Umbral de Ruido');
title('Potencia Suavizada y Detección del Pulso');
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Potencia [W]');
legend('Potencia Suavizada','Ventana Analizada','Umbral de Ruido');
grid on;
```

```

%% Mostrar resultado
fprintf('Potencia máxima detectada en la ventana de medición: %.6f W\n', pot_max_local);
```

Para una mejor comprensión del algoritmo a continuación se muestra un diagrama de flujo.



La tabla 18 presenta los valores de potencia instantánea a una distancia determinada.

Distancia (cm)	Potencia Instantánea (w)
5	0.000025
10	0.000042
15	0.000029
20	0.000027
25	0.000032
30	0.000031
35	0.00003
40	0.000026
45	0.00003
50	0.000016
55	0.00003
60	0.000024
65	0.00002
70	0.000025
75	0.000036
80	0.00002
85	0.000035
90	0.000026
95	0.000024
100	0.000016
105	0.000031
110	0.000036
115	0.000028
120	0.000016
125	0.00002
130	0.000026
135	0.000032
140	0.000028
145	0.000024
150	0.000024

Tabla 18. Resultados de la evaluación de la medición de la potencia instantánea en el tubo de 150 cm teniendo como medio agua. Fuente: El autor.

El gráfico 8 representa la variación de la intensidad de la señal acústica conforme esta se propaga a lo largo de un tubo con agua, en función de la distancia. Se observa un comportamiento oscilatorio en la señal, lo cual es característico de una onda senoidal. Sin embargo, la forma no es perfectamente regular, evidenciando picos y caídas irregulares en la intensidad, lo cual sugiere la presencia de atenuación y distorsión debidas al medio (agua) y posiblemente a reflexiones internas dentro del tubo. En las primeras mediciones (cercasas al origen), la intensidad es más alta, lo que indica una menor pérdida de energía. A medida que la distancia aumenta, la intensidad tiende a disminuir, aunque no de forma completamente uniforme.

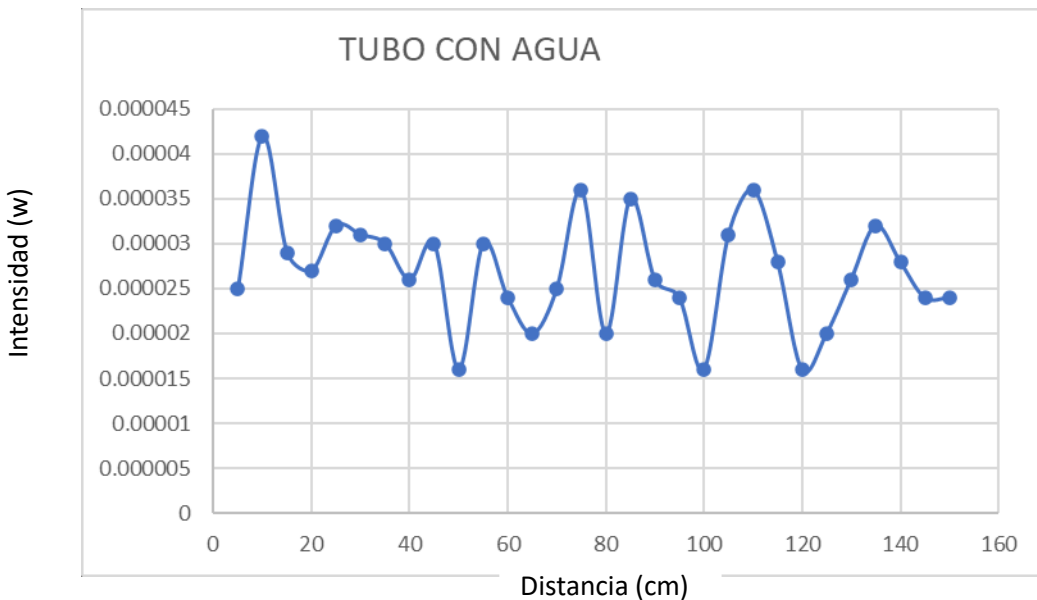


Gráfico 8. Representación de la señal senoidal en el tubo con agua. Fuente: El autor.

La tabla 19 presenta los valores de potencia instantánea a una distancia determinada ahora como medio el aire.

Distancia (cm)	Potencia Instantánea 1	Potencia Instantánea 2	Potencia Instantánea 3	Promedio
5	0.000069	0.000041	0.000039	4.96667E-05
10	0.000039	0.000041	0.00003	3.66667E-05
15	0.000032	0.000046	0.000043	4.03333E-05
20	0.000033	0.00005	0.00003	3.76667E-05
25	0.00002	0.000034	0.000023	2.56667E-05
30	0.000027	0.00003	0.000016	2.43333E-05
35	0.00003	0.000029	0.000031	0.00003
40	0.000037	0.00002	0.000027	0.000028
45	0.000029	0.000029	0.000046	3.46667E-05
50	0.00002	0.000022	0.000026	2.26667E-05
55	0.000029	0.000019	0.000019	2.23333E-05
60	0.000025	0.000021	0.000022	2.26667E-05
65	0.000033	0.000026	0.000035	3.13333E-05
70	0.000023	0.000015	0.000024	2.06667E-05
75	0.000014	0.000019	0.000013	1.53333E-05
80	0.000026	0.00002	0.000027	2.43333E-05
85	0.000022	0.000033	0.000018	2.43333E-05
90	0.000018	0.000047	0.000028	0.000031
95	0.000027	0.000036	0.000032	3.16667E-05
100	0.000015	0.00002	0.000021	1.86667E-05
105	0.000028	0.000017	0.000026	2.36667E-05
110	0.000031	0.000024	0.000021	2.53333E-05
115	0.000034	0.000023	0.000022	2.63333E-05
120	0.000035	0.000041	0.000034	3.66667E-05
125	0.000047	0.000042	0.000042	4.36667E-05
130	0.000046	0.000047	0.000052	4.83333E-05
135	0.000045	0.000037	0.00002	0.000034
140	0.000028	0.000034	0.000029	3.03333E-05
145	0.000041	0.000034	0.000041	3.86667E-05
150	0.000037	0.000042	0.000043	4.06667E-05

Tabla 19. Resultados de la evaluación de la medición de la potencia instantánea en el tubo de 150 cm teniendo como medio aire.

El gráfico 9 muestra la intensidad de una señal senoidal conforme se propaga por el aire a lo largo de una distancia de 150 cm. Se observa una tendencia inicial decreciente en la intensidad, seguida por fluctuaciones que se vuelven más marcadas a partir de los 100 cm. Este comportamiento sugiere que, aunque el aire introduce menos atenuación que el agua (como se observa en el gráfico anterior), aún existen pérdidas de energía debido a la dispersión y reflexión parcial de la onda.

A diferencia del gráfico en el agua, aquí se aprecia que la señal logra recuperar parte de su intensidad en ciertos puntos, posiblemente por interferencias constructivas o resonancias dentro del entorno de medición. La señal no presenta una pérdida uniforme ni una forma senoidal pura, por lo que se concluye que hay cierta distorsión, aunque menor que en el caso del agua.

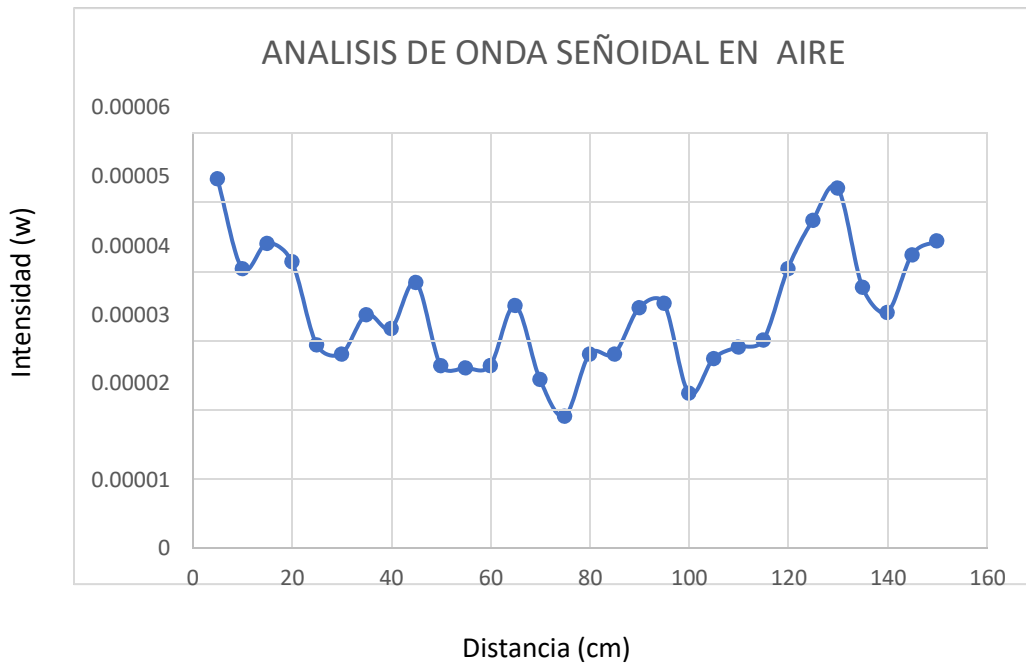


Gráfico 9. Representación de la señal senoidal en el tubo con aire. Fuente: El autor.

### Unidad de análisis 3

Ahora se utilizó un tubo con concreto y aire en diferentes secciones arrojando los siguientes valores de la potencia instantánea.

Análisis Matemático para la determinación de la frecuencia a utilizar en el tubo con aire.

$$V = \lambda / T = \lambda * f$$

Donde:

V= Velocidad del sonido en el aire (4000 m/s)

$\lambda$  = Distancia del tubo

T= Periodo

$$= (1.0 \text{ m} / 2) * f \quad f = 2(4000 \text{ m/s}) / 1.0 \text{ m} = 8000 \text{ m/s} / 1.0 \text{ m} = 8000 \text{ Hz}$$

Por lo tanto, el pulso a utilizar para esta unidad de análisis es de 8000 Hz.

Distancia (cm)	Potencia Instantánea
5	0.000017
10	0.000019
15	0.000022
20	0.000022
25	0.000017
30	0.000016
35	0.000018
40	0.000015
45	0.000018
50	0.000015
55	0.000016
60	0.000015
65	0.000016
70	0.00001
75	0.000016
80	0.000019
85	0.000015
90	0.000014
95	0.00001

Tabla 20. Valores de la potencia instantánea en el tubo de concreto y aire. Fuente: El autor.

La potencia máxima detectada para el registro en las tablas es tomada de la ventana de comandos de Matlab, que es donde se ejecuta el programa (ver figura 47).

```

1  clc; clear; close all;
2
3  %% Parámetros de grabación
4  fs = 44000; % Frecuencia de muestreo
5  tiempo_total = 0.5; % Tiempo total de grabación (segundos)
6  R = 1; % Resistencia en Ohm
7  f_objetivo = 8000; % Frecuencia esperada del pulso (Hz)
8  ruido_umbral = 0.000004; % Potencia mínima para considerar señal real
9
10 %% Grabar señal desde el micrófono
11 disp('Grabando...');
12 rec = audiorecorder(fs, 16, 1); % 1 canal, 16 bits
13 recordblocking(rec, tiempo_total);
14 disp('Grabación finalizada.');
```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

```

Grabando...
Grabación finalizada.
Potencia máxima detectada en la ventana de medición: 0.000010 W
>>
```

Figura 47. Ventana de comandos de algoritmo. Fuente: El autor

El gráfico 10 muestra el análisis de la propagación de una onda senoidal en una estructura de concreto con segmentos intermedios de aire para observar el comportamiento de esa onda en esas interrupciones, se observa una disminución progresiva de la intensidad conforme aumenta la distancia, lo cual indica la atenuación natural del material. Las variaciones y caídas abruptas en la señal pueden asociarse a irregularidades internas, como microgrietas en este caso el aire o diferencias en la densidad del concreto, que afectan la transmisión de la onda. Este comportamiento y experimento permite identificar zonas potencialmente vulnerables dentro de la estructura, aportando información valiosa para el monitoreo y diagnóstico de la misma.

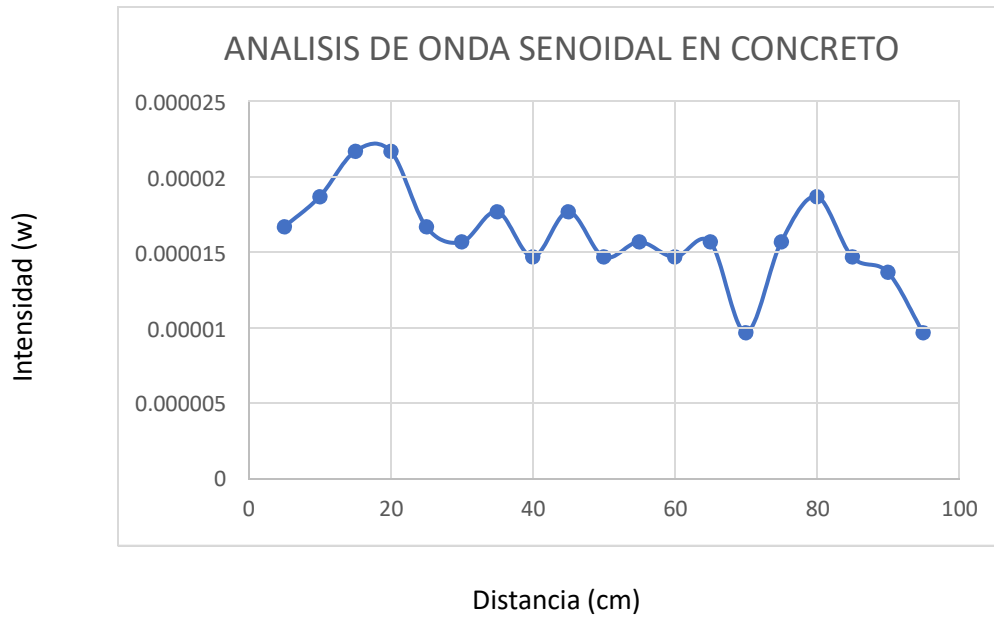


Gráfico 10. Representación de la señal senoidal en el tubo con concreto y aire. Fuente: El autor.

El siguiente gráfico representa la señal y potencia suavizada calculada a partir de la potencia instantánea, esta señal se obtiene en el código de recepción de la unidad de análisis 2 y 3 y la onda senoidal va en forma creciente en forma de cono lo cual es ocasionado por el tipo de altavoz con el que es emitido el pulso, al ser una bocina omnidireccional, la onda se propaga en varias direcciones. Para este gráfico en específico se representó 8000 Hz para el concreto, que fue calculado con el modelo matemático anteriormente explicado.

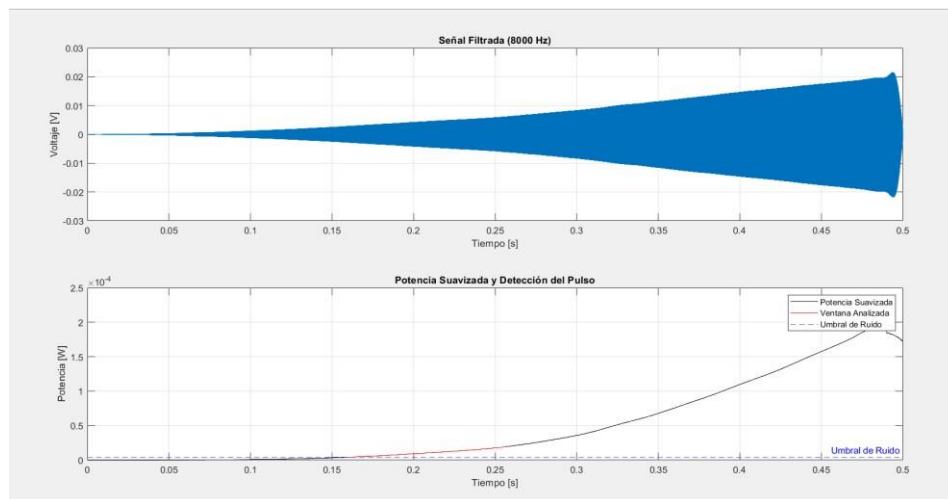


Gráfico 11. Representación de la señal senoidal en el código de recepción de la unidad de análisis 3.

Fuente: El autor.

## CONCLUSIONES

La revisión de literatura permitió establecer un panorama amplio sobre los métodos actuales de monitoreo estructural específicamente en el concreto reforzado, destacando la utilidad de tecnologías como emisiones acústicas, fibra óptica, ultrasonido y sensores de vibración. Se identificó que la aplicación de emisiones acústicas es especialmente útil para la detección no destructiva, validando el enfoque que se adoptó en este proyecto.

La aplicación del Despliegue de la Función de la Calidad (QFD) facilitó la relación entre las necesidades de los usuarios finales (ingenieros civiles, constructores y responsables de mantenimiento) y los parámetros técnicos del diseño. Este enfoque permitió priorizar características como la sensibilidad del sensor, facilidad de integración en estructuras existentes y confiabilidad en la detección de fallas.

El Análisis Modal de Efecto y Falla (AMEF) permitió identificar fallas potenciales en etapas tempranas del diseño. A través de esta metodología, se logró una puntuación alta en (Numero de Prioridad de Riesgo) optimizada en aspectos clave como la precisión del sensor y la resistencia.

Se logró la integración de un sistema electrónico basado en un microcontrolador, sensor MIC2830 y el diseño estructural impreso en 3D, resultando en un prototipo funcional con capacidades de procesamiento digital de señales en concreto reforzado. Este prototipo incorpora los principios de la Industria 4.0 mediante conectividad Bluetooth y posibilidad de análisis remoto, alcanzando un diseño replicable y escalable.

Los experimentos realizados, como la propagación de ondas acústicas en tubos con concreto, aire y agua, así como en las probetas de concreto reforzado con la Transformada Rápida de Fourier (FFT), demostraron una eficiencia del 90 % en la detección de fracturas simuladas. Además, se logró una relación señal/ruido de hasta 25 dB y repetibilidad superior al 85% en pruebas replicadas, confirmando la funcionalidad del prototipo bajo condiciones controladas de laboratorio.

## DISCUCIONES

El diseño e implementación de un prototipo para el monitoreo estructural de concreto reforzado, mediante emisiones acústicas permitió establecer un sistema que combina criterios técnicos, metodológicos y funcionales. El uso de herramientas de calidad como QFD y AMEF resultó importante no sólo para orientar el desarrollo hacia las necesidades de los usuarios o clientes, sino también para identificar riesgos y mejorar la confiabilidad del sistema desde las primeras etapas del diseño. En el campo del análisis de señales, se logró una interpretación efectiva tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Si bien la Transformada Rápida de Fourier (FFT) fue útil para identificar frecuencias dominantes relacionadas con la integridad del material, la representación temporal permitió la observación de patrones de comportamiento dinámico esencial para aplicaciones de pruebas no destructivas, especialmente cuando se buscan grietas internas o cambios en estructuras del concreto reforzado. Una de las aportaciones más significativas fue la utilización del tubo de Kundt como método experimental complementario, lo que facilitó la evaluación del comportamiento de una onda senoidal a una frecuencia conocida, al propagarse a través de diversos medios (aire, agua y concreto con aire). La metodología permitió observar fenómenos como la atenuación, reflexión y disrupción de la señal acústica, proporcionando información importante sobre la interacción de la onda con el medio. Se destacó la capacidad del sistema para distinguir entre el comportamiento activo de medios homogéneos y heterogéneos, simulando situaciones que podrían presentarse en estructuras del mundo real con daños internos. Este trabajo sirve como fundamento para futuras investigaciones en el campo del monitoreo estructural específicamente en el concreto reforzado porque no solo se desarrolló un prototipo funcional, sino que también se analizaron y clasificaron técnicas y métodos que podrían conducir a aplicaciones más complejas. Se establece un enfoque que puede servir como referencia para futuras investigaciones en los campos de la ingeniería civil y el área de sensores, así como en la ingeniería electrónica y acústica.

## RECOMENDACIONES

Para trabajo futuro se recomienda emplear micrófonos sensores MEMS especializados en emisiones acústicas de alta frecuencia para mejorar la detección de fisuras y grietas , así como integrar modelos de machine learning (como redes neuronales ) para identificar patrones acústicos en distintos tipos de fisuras y grietas , finalmente validar el prototipo en construcciones reales bajo condiciones ambientales variadas (humedad, temperatura, ruido ambiental) para comprobar su funcionamiento y funcionalidad .

## BIBLIOGRAFIA

- Abdel-Jaber, H., & Glisic, B. (2019a). Monitoring of long-term prestress losses in prestressed concrete structures using fiber optic sensors. *Structural Health Monitoring*, 18(1), 254–269. <https://doi.org/10.1177/1475921717751870>
- Abdel-Jaber, H., & Glisic, B. (2019b). Monitoring of prestressing forces in prestressed concrete structures—An overview. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(8), e2374. <https://doi.org/10.1002/stc.2374>
- Asiten, J. C. (s.f.). El sonido . Ministerio de educacion Ciencia y Tecnologia , 68. Recuperado el 2025, de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34957678/sonido-libre.pdf?1412186777=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEl\\_sonido.pdf&Expires=1745392997&Signature=Am36I4ATwejBZ~YacqRz8ICAL9rUdXXbGKS3TVLu8egolkyqrjuZeGqu3dXeLiesAlpt1w3IaeSCXgjQwPNxVS](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34957678/sonido-libre.pdf?1412186777=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEl_sonido.pdf&Expires=1745392997&Signature=Am36I4ATwejBZ~YacqRz8ICAL9rUdXXbGKS3TVLu8egolkyqrjuZeGqu3dXeLiesAlpt1w3IaeSCXgjQwPNxVS)
- Aguwa, C. C., Monplaisir, L., & Turgut, O. (2012). Voice of the customer: Customer satisfaction ratio based analysis. *Expert Systems with Applications*, 39(11), 10112-10119. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417412003156>
- Amor, T. A., Farías, M. B., Mansilla, M., Martinez, E., Brudny, V., & Ledesma, S. (2010). DISIPACIÓN EN CUERDAS VIBRANTES Y TUBOS DE KUNDT. *ANALES AFA*, 21(1), Article 1. <https://anales.fisica.org.ar/index.php/analesafa/article/view/50>
- Azuero Azuero, Á. E. (2019). Significatividad del marco metodológico en el desarrollo de proyectos de investigación. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 4(8 (Julio-Diciembre)), 110–127.

- Bartolomé, C., & Raposo, P. (2018). *ESTUDIO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN TUBO DE KUNDT*.
- Boyce, W. E. (2017). *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. 625.
- Cai, Z. (2019). Study on the orientation detection of surface cracks by electromagnetic acoustic emission. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(4), 1550147719843860. <https://doi.org/10.1177/1550147719843860>
- Carcaño, R. G. S. (2021). Evaluación de columnas de concreto con la técnica de ultrasonido. *Ingeniería y Desarrollo*, 39(1), 7–24.
- Carro Suárez, J., Flores Salazar, F., Flores Nava, I., & Hernández Hernández, R. (2019). Industria 4.0 y Manufactura Digital: Un método de diseño aplicando ingeniería inversa. *Ingeniería*, 24(1), 6–28.
- CENAPRED. (2025). *¿Por qué se dañan las construcciones?* gob.mx. <http://www.gob.mx/cenapred/articulos/por-que-se-danan-las-construcciones>
- Cisneros, E. R., Gil, J. R., & Pérez, S. M. (2023). Structural health of buildings using BIM technology: Literature review. *Ingeniería y Competitividad*, 25(1), 1–24.
- Cruz-Rivero, L., Méndez-Hernández, M. L., Mar-Orozco, C. E., Aguilar-Lasserre, A. A., Barbosa-Moreno, A., & Sánchez-Escobar, J. (2022). Functional Evaluation Using Fuzzy FMEA for a Non-Invasive Measurer for Methane and Carbone Dioxide. *Symmetry*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/sym14020421>
- Cruz-Rivero, L., Meráz-Rivera, J., & Lince-Olguín, E. (2023). El despliegue de la función de la calidad y la teoría para la solución de problemas de inventiva: Un análisis de aproximación para la satisfacción de los requerimientos del cliente. *Ingeniería Industrial*, 91–108. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2023.n45.6595>

datalyzer. (2022, abril 21). *AMEF | Introducción al Análisis Modal de Fallos y Efectos*.

<https://datalyzer.com/es/saber/que-es-amef/>

Delgado, B., Dominique, D., Panchi, C., Valeria, D., Salazar, P., Tatiana, K., Pinos, P.,

Leonardo, R., Guano, R., & Belén, M. (2021). *EL DIAGRAMA DE ISHIKAWA COMO HERRAMIENTA DE CALIDAD EN LA EDUCACIÓN: UNA REVISIÓN DE LOS ÚLTIMOS 7 AÑOS*.

Flores-Fuentes, W., Alba-Corpus, I. Y., Sergiyenko, O., & Rodríguez-Quiñonez, J. C. (2022). A

structural health monitoring method proposal based on optical scanning and computational models. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 18(8), 15501329221112606. <https://doi.org/10.1177/15501329221112606>

*FVC-MartinTomas.pdf*. (s/f). Recuperado el 22 de abril de 2025, de

<http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-MartinTomas.pdf>

Gallo Marín, J. A. (2022). *Análisis de modos y efectos de falla (FMEA) en equipos de criticidad*

*1 de la empresa H.B. Fuller Colombia S.A.S*.

<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/28320>

García, C. (2011). *LA ACÚSTICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA*.

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54709658/AcusticaFrecuencia\\_MarioE.Casado-libre.pdf?1507908573=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLa\\_Acustica\\_en\\_el\\_Dominio\\_de\\_la\\_Frecuenc.pdf&Expires=1745431162&Signature=NqIzxQzoHsVVZpyFnaTSqRPgBe8J1k5NvUL8TRXAWHtBUkMzuiwtaC3e~qS7aq1Z-KmDMiVFFLx1XoGZjSA8Atsv8v11y9nEoyA5fEvZDCET-f4h1nu91twxjlW4M2fBjTPQoIgSAV5eUrzYNpm8m1JcFUzUVkGZkN-bfy-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54709658/AcusticaFrecuencia_MarioE.Casado-libre.pdf?1507908573=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLa_Acustica_en_el_Dominio_de_la_Frecuenc.pdf&Expires=1745431162&Signature=NqIzxQzoHsVVZpyFnaTSqRPgBe8J1k5NvUL8TRXAWHtBUkMzuiwtaC3e~qS7aq1Z-KmDMiVFFLx1XoGZjSA8Atsv8v11y9nEoyA5fEvZDCET-f4h1nu91twxjlW4M2fBjTPQoIgSAV5eUrzYNpm8m1JcFUzUVkGZkN-bfy-)

44mE45LkvOGF2tDcnb3zlRaiGMUa7E4uW1TKVEaB-

XArK6HsqiqQbcLcZcO208gaGr9ygGgohThMT2qP3pqjwxdBN9P3vw4PxZYXWa0c6

MP7X4QDGKEkZVh1tXNqV~S61-zVl55x19aBbRtSevMkW-

J2175XlXg9Mv8faf1naaCUmWQ\_\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Gómez, A. M. P. (2015). La Serie de Fourier: Estimación de observaciones económicas

inexistentes. *Economía Informa*, 394, 100–105.

<https://doi.org/10.1016/j.ecin.2015.09.007>

González Cruz, E., Hernández-Pérez, G., Comas Rodriguez, R., & Clúa, M. (2024).

*DEPLOYMENT OF QUALITY AND ANALYSIS OF CRITICALITY IN SERVICES. CASE ACADEMIC PROCESSES*. 15, 55–65.

Habib Mireles, L. (2022). Presencia de los pilares de la industria 4.0 en la formación de

ingenieros en el noreste de México. *Revista Cubana de Educación Superior*, 41(2).

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0257-](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0257-43142022000200019&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

[43142022000200019&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0257-43142022000200019&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Hernandez, F., Astroza, R., Ochoa-Cornejo, F., & Pasten, C. (2019). *Razones Estructurales del*

*Colapso de Edificios debido al Terremoto de Puebla-Morelos (Mw 7.1)*.

Herrera, J. F. P. (2020, noviembre 5). *Despliegue de la función calidad (QFD): Guía de uso*.

*Para qué sirve el QFD y cómo realizarlo*. LeanConstructionMexi.

[https://www.leanconstructionmexico.com.mx/post/despliegue-de-la-función-calidad-qfd-](https://www.leanconstructionmexico.com.mx/post/despliegue-de-la-función-calidad-qfd-guía-de-uso-para-qué-sirve-el-qfd-y-cómo-realizarlo)

[guía-de-uso-para-qué-sirve-el-qfd-y-cómo-realizarlo](https://www.leanconstructionmexico.com.mx/post/despliegue-de-la-función-calidad-qfd-guía-de-uso-para-qué-sirve-el-qfd-y-cómo-realizarlo)

Illescas, M., & Chuisaca, J. (2022). Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Estructuras

Civiles: Una revisión bibliográfica. *MQRInvestigar*, 6, 1641–1667.

<https://doi.org/10.56048/MQR20225.6.3.2022.1641-1667>

- Infante Beltr, K., Forero, N., & Rodríguez, A. P. (2024). Aplicación de la serie Fourier en la eliminación de Fourier Armónicos musicales para obtener un tono puro. *Educación*.  
<https://repositorioctei.ucundinamarca.edu.co/educacion/9>
- Jaime Galiana Nieves, E. (2020). “Sobre la medición del aislamiento de barreras acústicas basadas en cristales de sonido. *ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDIA*, 18(1), 52. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>
- Jaramillo, A. M. J. (2007). *ACÚSTICA: La ciencia del sonido*. ITM.
- Jiménez Rodríguez, R., Macías Socarrás, I., & Núñez, P. (2020). Aplicación del QFD a productos de una fábrica de conservas Application of the QFD to products from a cannery. *Espacios*, 41, 225–239.
- Joel Spilsbury, M., & Euceda. (2019, septiembre 3). (PDF) *Transformada Rápida de Fourier*. ResearchGate.  
[https://www.researchgate.net/publication/336339137\\_Transformada\\_Rapida\\_de\\_Fourier](https://www.researchgate.net/publication/336339137_Transformada_Rapida_de_Fourier)
- Marulanda, J. (2000). Monitoreo de Salud Estructural. *Ingeniería y Competitividad*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.25100/iyc.v2i2.2342>
- Medina, J. (2010). *ANÁLISIS DE FOURIER PARA EL TRATAMIENTO DE SEÑALES*. 39.
- Mendoza Guardo, B., Pérez Romero, E. L., Valdes Barrios, I., Herrera, B., & Santos, J. (2019). *QFD casa calidad*.
- Miyara, F. (2003). *INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA*. 75.
- Novara, I., Matar, M., Parodi, M. A., Roatta, A., Gómez, B. J., & Repetto, C. E. (2019). SET-UP OF A KUNDT’S TUBE TO OBTAIN THE SPEED OF SOUND AT DIFFERENT TEMPERATURES. *Anales AFA*, 42–46. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2019.30.2.42>

- Ohtsu, M. (2008). Acoustic Emission Testing. En C. Grosse & M. Ohtsu (Eds.), *Acoustic Emission Testing: Basics for Research—Applications in Civil Engineering* (pp. 211–237). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9_10)
- Pacheco Cordova, E. E., Montesinos Loaiza, R. X., Sanchez Loja, R. V., Cerrada Lozada, M., Cabrera Mendieta, D. R., & Berrezueta Parra, A. A. (2022, noviembre 22). *Comparación de Señales de Vibración y Emisión Acústica para la Detección de Diente Roto Mediante la Transformada Rápida de Fourier, Transformada Hilbert y Cepstrum: XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM 2022)*. <http://espacio.uned.es/fez/view/bibliuned:congresoCIBIM-2022UPMEspana-Rvsanchez>
- Palacio Legislativo de San Lázaro. (2023). *Gaceta Parlamentaria, año XXVI, número 6377-IV-5, martes 3 de octubre de 2023*. [https://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/65/2023/oct/20231003-IV-5.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/65/2023/oct/20231003-IV-5.html?utm_source=chatgpt.com)
- Pazos, O. T., Hernandez-Alcantara, D., Guevara, A. J. V., Zarate, D. I., & Morales-Menendez, R. (s/f). *Diagnóstico de Fallas en Husillos usando la Transformada Rápida de Fourier*.
- Reyes, J. C. S. (2007). *Tubo de Kundt hecho en casa y su uso entre estudiantes de bachillerato para el aprendizaje significativo de ondas estacionarias y resonancia. Homemade Kund tube and its use among high school student for a meaningful learning of standing waves and resonance*. 14.
- Rodriguez, M. E. (2019). INTERPRETACIÓN DE LOS DAÑOS Y COLAPSOS EN EDIFICACIONES OBSERVADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO EN EL TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE 2017. *Revista Ingeniería Sísmica, 101*, Article 101. <https://doi.org/10.18867/ris.101.528>

Salazar, D. L., Mosquera, M., Muñoz, N. S., & Mendoza, P. D. J. (2020). *IMPORTANCIA DE LA HERRAMIENTA AMEF EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES*. 34.

Sánchez, L. M. B., & Angulo, E. R. (2019). Análisis de los daños en viviendas y edificios comerciales durante la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017. *Ingeniería sísmica*, 101, 19–35.

Slezak, V. (2000). AUMENTO DE LA RESOLUCIÓN EN FRECUENCIA OBTENIDA POR TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER. *ANALES AFA*, 11(1), Article 1.  
<https://anales.fisica.org.ar/index.php/analesafa/article/view/809>

SSN UNAM. (2025). *SSN - Catálogo de sismos | UNAM, México*.  
<http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

Vásquez Loret, J. E., González Quintana, L., DeVoz Del Rio, L., Castellar Jimenez, L., Figueroa Pacheco, S., & Figueroa Puello, L. E. (2019). *QFD Produccion I*.

Yan, W., Niu, S., Liu, W., Li, J., Si, S., Qi, X., Li, S., Jiang, N., Chen, S., & Wu, G. (2025). Acoustic Emission Monitoring Method for Multi-Strand Fractures in Post-Tensioned Prestressed Hollow Core Slab Bridges Using Waveguide Rods. *Buildings*, 15(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/buildings15142576>