PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Plan de Trabajo de Integración Curricular

TEMA: REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE INSTRUMENTACIÓN PARA EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS

AUTOR:

JHON ALEXANDER SALAZAR CHANCUSI

TUTOR:

ING. JORGE DAVID ALBUJA SÁNCHEZ

QUITO DM, 19 DE ENERO 2024

AGRADECIMIENTO

“El camino al éxito no es recto, se pondrá intenso, te cruzaras con muchos obstáculos, sentirás que nada es perfecto y tal vez en algún momento dudes de si estás haciendo lo correcto. Te paciencia y aguanta”. Leo Pavoni

Agradezco a Dios por guiarme por este camino de la ingeniería, cuando no sabía que hacer me dio esta opción donde en el trayecto aprendí muchas cosas, conocí a grandes personas y me dio la fortaleza para poder culminar una etapa más de mi vida.

Agradezco a mis padres Fausto y Consuelo, por siempre estar presentes en los buenos y malos momentos que tuve que pasar para poder culminar esta dura etapa que sin su apoyo y ayuda no la habría conseguido, por sus consejos, sus reprimendas y por nunca dejarme solo aun en el peor momento de mi vida.

A mi hermana Karen un agradecimiento especial, que sin ella no sé dónde estaría ahora, su apoyo fue tan incondicional que cuando no podía más, fue quien me ayudo a salir del peor lugar del mundo y gracias a ella hoy estoy a casi nada de cumplir una meta más en mi vida.

A mi ñaño Carlos y a mi cuñada Estefanía que con sus consejos y amor hicieron que nuestra familia siga unida a pesar de tantas cosas, siempre se puede seguir adelante.

A mis sobrinos que fueron el mejor regalo que me pudo dar mi ñaño y mi cuñada a Nicolas y Matías, sin sus travesuras, momentos de risas, su manera de llenar mi corazón y me abrazaban al dormir, aliviaban mucho mi alma y corazón, además me dieron motivación para que un día dijeron mi ñaño Jhonsi es ingeniero con sus tantas preguntas de que hare cuando sea grande.

A todos mis profesores que gracias a sus conocimiento y experiencias con las cuales cada día me enamoraban más de mi carrera y de igual manera a mi tutor de tesis Ing. Jorge Albuja por su guía y siempre una esperanza al final de cada frase, Ing. Baquero, gracias a usted volvió mis ganas de seguir estudiando y les agradezco infinitamente a quienes no me dejaron, Ing. Patricio Castro y muchos más.

A mis buenos amigos, que amigo no se puede llamar a cualquier persona, pero ustedes lo son, además que me ayudaron a terminar mi último semestre como el mejor de todos Alexis y Jordan por ser mis compañeros y amigos desde siempre, Oscu, Cris, Sara y Diego sin ustedes no hubiera logrado estar cumpliendo este sueño, pensé que no tendría amigos en la

universidad, pero gracias a ustedes por no dejarme decaer y celebraron conmigo mi último grito “pasé”, fue el adiós a nuestra etapa universitaria pero el comienzo de otra historia, y sin desmerecer a todas las personas que tuve la dicha de conocer durante el transcurso de mi vida universitaria, mi vida amorosa que me ayudo más de lo que imagina pero siempre la llevare en mi corazón al igual que a todos.

Contenido

RESUMEN 8
1.1 Justificación 9
1.2 Planteamiento del problema 10
1.3 Objetivos 10
1.3.1 Objetivo General 10
1.3.2 Objetivos Específicos 11
1.4 Alcance 11
2. FUNDAMETACION TEORICA 11
2.1 Marco teórico y conceptual 11
2.1.1 Marco Teórico 11
2.1.2 Marco Conceptual 12
2.2 Concepto de monitoreo de la salud estructural 14
2.2.1 Integridad Estructural 14
2.2.2 Sensores de monitoreo 14
2.2.3 Respuesta dinámica de estructuras 15
2.2.4 Análisis Modal 15
2.2.5 Adquisición y procesamiento de datos 15
2.2.6 Diagnóstico y pronóstico de daños 16
2.2.7 Evaluación de riesgo y gestión de la seguridad estructural 16
2.2.8 Mantenimiento predictivo 16
2.2.9 Tecnologías de comunicación y transmisión de datos 16
2.2.10 Evaluación de la vida útil restante 17
2.2.11 Sostenibilidad y optimización de recursos en SHM 17
2.3 Definición del SHM 17
Ilustración 1 – Sistema de monitoreo de salud estructural 18
2.4 Objetivos de SHM 18
2.4.1 Detección temprana de daños 18
2.4.2 Evaluación continua de la integridad estructural 18
2.4.3 Optimización del Mantenimiento y Reducción de Costos 19

2.4.4 Extensión de la vida útil de las estructuras 19
2.4.5 Aumento de la seguridad 19
2.4.6 Monitoreo en tiempo real para la toma de decisiones 19
2.4.7 Identificación de modos de fallos y análisis de causa raíz 19
2.4.8 Reducción del impacto ambiental 20
2.4.9 Validación y optimización de modelos estructurales 20
2.4.10 Apoyo en la gestión de riesgos 20
2.4.11 Facilitación de respuesta rápida en eventos extremos 20
2.5 Proceso de datos de adquisición en SHM 20
2.5.1 Selección de sensores y ubicación 21
2.5.2 Recolección de datos 21
2.5.3 Transmisión de datos 21
2.5.4 Procesamiento de datos 21
2.5.5 Almacenamiento y gestión de datos 21
2.5.6 Análisis y diagnóstico 21
2.5.7 Visualización y reportes 22
2.6 Tecnologías de comunicación y transmisión de datos en SHM 22
2.6.1 Redes de sensores inalámbricos (WSN) 22
2.6.2 Componentes de las redes de sensores inalámbricos (WSN) en SHM 22
2.6.3 Red de comunicación 23
2.6.4 Características clave de las WSN en SHM 23
2.6.5 Beneficios de las WSN en SHM 24
2.6.6 Retos y desafíos de las WSN en SHM 24
2.6.7 Aplicaciones de las WSN en SHM 25
2.6.8 Tecnologías de comunicación en WSM para SHM 26
Ejemplo de funcionamientos de WSN en SHM 27
2.6.9 Internet de las cosas (IoT) 27
2.6.10 Ventajas del IoT en el monitoreo de la salud estructural 28
2.6.11 Tecnologías de comunicación IoT en SHM 29
2.6.12 Aplicaciones del IoT en el monitoreo de la salud estructural 30
2.6.13 Diferencia entre una WSN y un IoT frente a un SHM 31
Tabla 1 - Matriz de stakeholders 32
3. USO DE SENSORES INTELIGGENTES PARA EL SHM (STRUCTURAL HEALTH MONITORING) 32
3.1 Características de los sensores inteligentes 32
3.1.1 Capacidad de procesamiento de datos en el sensor 32

3.1.2 Comunicación y conectividad 32
3.1.3 Sensores multifuncionales 32
3.1.4 Autonomía y sostenibilidad 33
3.1.5 Durabilidad 33
3.1.6 Capacidad de autodiagnóstico 33
3.1.7 Escalabilidad y modularidad 33
3.1.8 Análisis en tiempo real 33
3.1.9 Reducción de costos operativos 33
3.2 Funcionamiento de los sensores inteligentes 34
3.2.1 Monitoreo continuo de parámetros estructurales 34
3.2.2 Captura de datos en tiempo real 34
3.2.3 Procesamiento local de datos 34
3.2.4 Comunicación de datos 35
3.2.5 Almacenamiento y análisis avanzado 35
3.2.6 Detección de anomalías 35
3.2.7 Autodiagnóstico y calibración 35
3.2.8 Energía autónoma 35
3.2.9 Función predictiva 36
3.2.10 Integración de sistemas de monitoreo 36
3.3 Teoría de la gestión de riesgos y toma de decisiones 36
3.3.1 Gestión de riesgos en SHM 36
3.3.2 Toma de decisiones en SHM 37
3.3.3 Factores que influyen en la toma de decisiones 38
3.3.4 Modelos teóricos para la gestión de riesgos y decisiones 38
3.3.5 Beneficios de integrar sensores SHM en la gestión de riesgos 40
3.4 Procesamiento de análisis de datos 40
3.4.1 Etapas del procesamiento de señales en SHM 40
3.4.2 Análisis de datos en SHM 41
3.4.3 Aplicaciones del procesamiento de señales y datos en SHM 42
3.4.4 Herramienta de sofware para el análisis de señales de datos 42
3.5 Arquitectura del IoT en SHM 43
3.5.1 Capas de la arquitectura IoT en SHM 43
3.5.2 Capa de percepción (Sensores y Actuadores) 43
3.5.3 Capa de red (Comunicación) 43
Tabla 2 - Redes inalámbricas y cableadas 44
3.5.4 Capa de procesamiento de los datos recopilados y extracción de información 44

Tabla 3 - Procesamiento y extracción de los datos recopilados 44
3.5.5 Capa de aplicación 44
3.5.6 Flujo de aplicación 45
3.5.7 Ventajas de usar IoT en SHM 45
3.6 Teoría de fiabilidad y seguridad estructural 46
4. ANALISIS Y COMPARACION DE COSTOS DE LOS CIERTOS SENSORES INTELIGENTES UTILIZADOS EN EL PAIS PARA EL SHM 47
4.1 Tipos de sensores 47
4.1.1 Sensores de deformación 47
Ilustración 2- Sensor de deformación 48
4.1.2 Acelerómetros 48
Ilustración 3- Acerelometro 48
Ilustración 4- Sistema con tensión mecánica. 48
4.1.3 Sensores de temperatura y humedad 48
Ilustración 5- Sensor de temperatura y humedad 49
4.1.4 Inclinómetros 49
Ilustración 6- Inclinómetro analógico vertical de tipo capacitivo con salida amplificada en corriente y voltaje. Encapsulado plástico robusto IP65 salida cable. 49
4.1.5 Sensores de fibra óptica (FBG) 50
Ilustración 7- Inclinómetro analógico vertical de tipo capacitivo con salida amplificada en corriente y voltaje. Encapsulado plástico robusto IP65 salida cable. 50
4.1.6 Sensores de corrosión 50
Ilustración 8- Sensor de corrosión para monitorear estructuras de hormigón armado 50
4.1.7 Sensores de desplazamiento 51
Ilustración 9- Los sensores de desplazamiento 51
4.1.8 Redes de sensores inalámbricos (WSN) 51
Ilustración 10- Redes de sensores inalambricos 52
4.2 Análisis de los costos para la utilización de sensores inteligentes en una estructura 52
4.2.1 Costos de adquisición 52
4.2.2 Costos de instalación 53
4.2.3 Costos de integración y comunicación 53
4.2.4 Costos de mantenimiento 53
4.2.5 Costos de análisis e interpretación de datos 53
Tabla 4 – Resumen de costos estimados 54
4.3 Criterio de ubicación de sensores en una estructura 54
4.3.1 Diseño inicial de la estructura 54
4.3.2 Evaluación de estructuras existentes 54

4.3.3 Frecuencia de inspección y actualización 55
4.3.4 Factores adicionales para considerar 55
4.3.5 Recomendaciones prácticas 55
4.4 Beneficios del monitoreo con sensores inteligentes 55
4.4.1 Beneficios generales de monitoreo con sensores inteligentes 55
4.4.2 Beneficios técnicos y operativos 56
4.4.3 Beneficios para diferentes tipos de estructuras 57
4.4.4 Beneficios ambientales 58
4.4.5 Beneficios económicos 58
4.4.6 Beneficio en la toma de decisiones 58
5. Conclusiones y Recomendaciones 59
5.1 Conclusiones 59
Recomendaciones 59
Bibliografía 60
Anexos 62

Índice de tablas

Tabla 1 - Matriz de stakeholders 32
Tabla 2 - Redes inalámbricas y cableadas 44
Tabla 3 - Procesamiento y extracción de los datos recopilados 44
Tabla 4 – Resumen de costos estimados 54

Índice de Imágenes

Ilustración 1 – Sistema de monitoreo de salud estructural 18
Ilustración 2- Sensor de deformación 48
Ilustración 3- Acerelometro 48
Ilustración 4- Sistema con tensión mecánica. 48
Ilustración 5- Sensor de temperatura y humedad 49

Ilustración 6- Inclinómetro analógico vertical de tipo capacitivo con salida amplificada en corriente y voltaje. Encapsulado plástico robusto IP65 salida cable. 49

Ilustración 7- Inclinómetro analógico vertical de tipo capacitivo con salida amplificada en corriente y voltaje. Encapsulado plástico robusto IP65 salida cable. 50

Ilustración 8- Sensor de corrosión para monitorear estructuras de hormigón armado 50

Ilustración 9- Los sensores de desplazamiento 51

Ilustración 10- Redes de sensores inalambricos 52

RESUMEN

El monitoreo de salud estructural (SHM) se ha consolidado como un campo innovador que permite evaluar el estado de las infraestructuras a través del análisis de su comportamiento, identificando de forma temprana defectos y deterioros tanto en obras en construcción como en funcionamiento. Durante décadas, su aplicación en diversas estructuras a nivel mundial ha impulsado el desarrollo de tecnologías eficientes y asequibles, lo que posibilita una operación segura y una gestión óptima mediante el diagnóstico precoz, focalizando los esfuerzos de mantenimiento en las áreas afectadas antes de que sean evidentes con métodos convencionales. Además, la investigación en métodos de instrumentación para evaluar y rehabilitar infraestructuras es esencial para garantizar la seguridad, sostenibilidad y eficiencia en su gestión, dado que los avances tecnológicos han permitido la implementación de sistemas SHM basados en sensores cableados e inalámbricos, capaces de recabar y transmitir datos en tiempo real en estructuras civiles como puentes, túneles y edificios. Los sensores inteligentes, que procesan, recolectan y comunican información crítica, facilitan la detección de problemas antes de que se conviertan en amenazas significativas, aunque su implementación enfrenta desafíos

tales como el elevado costo inicial, la integración en redes de monitoreo, la gestión de grandes volúmenes de datos y la durabilidad en entornos variados.

INTRODUCCION

1.1 Justificación

Llevar a cabo una investigación sobre la revisión de los métodos de instrumentación para evaluación y rehabilitación de estructuras consiste en varios factores que son parte clave que abarcan desde la seguridad pública hasta la sostenibilidad y eficiencia de los recursos.

La seguridad y estabilidad de las estructuras son las principales preocupaciones en el ámbito de la ingeniería civil. Pero gracias a la actualidad, la tecnología ha brindado herramientas que han avanzado con su desarrollo para que permitan un monitoreo más preciso de las infraestructuras, mejorando así su administración y mantenimiento.

Con los avances que se han realizado en la actualidad de la tecnología, se han implementado y desarrollado sistemas de sensores para realizar monitoreos de salud estructural (SHM) en varias estructuras civiles como túneles, puentes, centrales eléctricas, presas y edificios esencialmente. (Barma, 2022). Se han desarrollado varios tipos de sensores avanzados, desde sensores cableados hasta sensores inalámbricos, los cuales sirven para tener un monitoreo constante y continuo del estado estructural obteniendo datos en tiempo real de lo que está pasando en la estructura.

El término sensores inteligentes abarca una gran variedad de dispositivos que están equipados con la capacidad de procesar, recolectar y transmitir datos relacionados con el comportamiento y el estado de las estructuras. (Palacio, 2022). Para su aplicación en el monitoreo estructural tiene la condición para localizar problemas antes de que se conviertan en graves amenazas, para así garantizar y cuidar la integridad de las construcciones y la seguridad de sus ocupantes.

Sin embargo, a pesar de las ventajas que los sensores inteligentes nos aportan, su utilización enfrenta desafíos importantes. Entre estos se incluyen el costo inicial de implementación, la integración eficiente de múltiples sensores en una red de monitoreo

confiable, la gestión y análisis de grandes volúmenes de datos, así como la durabilidad y precisión de los sensores en diferentes ambientes.

1.2 Planteamiento del problema

Para el presente proyecto de integración curricular, se reconoce que el envejecimiento y deterioro de las infraestructuras como puentes, edificios, carreteras y presas, representa una preocupación critica para la seguridad pública y la eficiencia económica.

Por los que estas estructuras a menudo están sometidas a condiciones adversas como la carga dinámica y eventos externos (sismos, huracanes, inundaciones, etc.), pueden experimentar daños que comprometan su integridad. La detección temprana de estos daños es fundamental para evitar colapsos o fallos catastróficos, que podrían provocar pérdidas humanas y materiales significativos.

El monitoreo tradicional de la salud estructural (SHM) se basa en inspecciones visuales y evaluaciones puntuales, las cuales, aunque útiles, tienen limitaciones considerables en términos de cobertura, frecuencia y precisión. (Chen, 2021). Estas inspecciones que suelen ser costosas y laboriosas pueden pasar por alto defectos ocultos y solo se realizan en intervalos de tiempo largo, lo que deja un margen considerable para la progresión del daño.

Ante esta situación, surge la necesidad de implementar sistemas más eficientes y precisos para el monitoreo continuo de las estructuras. Los sensores inteligentes se caracterizan como una solución innovadora que permite la detección y evaluación en tiempo real del estado de las infraestructuras. Estos sensores integrados con tecnologías avanzadas de Internet de las cosas (IoT) y procesamiento de datos, son capaces de medir parámetros clave como vibraciones, deformaciones, cambios en temperatura y humedad, entre otros, proporcionando datos valiosos para el análisis de la salud estructural. (Chen, 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Investigar sobre un sistema eficiente que ayude al monitoreo continuo de la salud estructural basado en sensores inteligentes, para poder detectar de manera temprana el daño o deterioro en las infraestructuras más críticas, para mejorar la seguridad y optimizar el mantenimiento preventivo, ayudando a prolongar la vida útil de las estructuras con un costo aproximado que se necesite para la utilización de sensores en una estructura.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros críticos para el monitoreo de la salud estructural como vibraciones, deformaciones, temperatura, humedad, etc. Que puedan ser detectados con la ayuda de los sensores inteligentes de manera precisa y continua.
- Proponer estrategias de fiabilidad del uso de los sensores inteligentes, abordando aspectos normativos, técnicos y de integración con las tecnologías que se encuentran en el sector de la construcción e infraestructura.
- Evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de sensores inteligentes en proyectos de infraestructura, considerando los costos de mantenimiento, implementación y el retorno de inversión mediante la optimización preventivo.

1.4 Alcance

La revisión de los métodos de instrumentación para la evaluación y rehabilitación de estructuras con la ayuda de sensores inteligentes, permiten un monitoreo en tiempo real, proporcionando datos precisos para la detección de fallos estructurales, lo que optimiza el mantenimiento y prolonga la vida útil de las estructuras. Además, abarcan tecnologías como sensores inalámbricos y el Internet de las cosas (IoT), mejorando la eficiencia y reduciendo costos operativos, la cual incluye la detección y evaluación continua de daños, deformaciones y vibraciones en edificarse e infraestructuras civiles.

2. FUNDAMETACION TEORICA

2.1 Marco teórico y conceptual

2.1.1 Marco Teórico

El monitoreo de la salud estructural implica la valoración constante o regular de la integridad de estructuras como puentes, edificaciones, torres, presas, etc. La meta es identificar daños en sus fases tempranas para evitar errores catastróficos, explicando cómo el SHM es crucial para mejorar la seguridad, reducir costos de mantenimiento y extender la vida útil de infraestructuras críticas. (Chen, 2021)

Su desarrollo inicial señala los primeros métodos de monitoreo estructural, que se basaban en inspecciones manuales y análisis visuales. Estos métodos eran limitados y dependían del juicio humano, lo que aumentaba el riesgo de errores y con las tecnologías tradicionales, antes de los sensores inteligentes, se empleaban métodos más rudimentarios

como técnicas no destructivas (ultrasonido, rayos X, vibración). Sin embargo, estos métodos requerían una intervención física periódica. (Chen, 2021)

De tal manera que los sensores tradicionales han avanzado de una manera en donde se introduce el uso de acelerómetros, sensores de vibración y sensores de desplazamiento como precursores de los sistemas actuales de monitoreo. Aunque eficaces, su capacidad era limitada y no ofrecían monitoreo continuo en tiempo real. (Jacoski, 2018)

De esta manera los sensores tradicionales con el avance y la ayuda de la tecnología se ha podido crear sensores inteligentes los cuales están diseñados para encontrar las fallas y de esta manera prevenir catástrofes en las estructuras, precautelar la seguridad de las personas y de las mismas, ahorrar costos significativos al momento de su reparación y poder prevenir una pérdida total. (Jacoski, 2018)

2.1.2 Marco Conceptual

El SHM según (Chen, 2021) es un procedimiento centrado en el análisis y valoración del estado de una estructura a través del tiempo, a través de la evaluación continua o regular de sus parámetros críticos. Esta información facilita la identificación de daños, deterioros o modificaciones estructurales que puedan poner en riesgo la seguridad y el funcionamiento. Los propósitos fundamentales del SHM comprenden:

- Identificar defectos en etapas iniciales para evitar fallas catastróficas.
- Facilitar el mantenimiento predictivo en función de la condición real de la estructura.
- Monitorear el envejecimiento de las estructuras para prevenir su deterioro acelerado.

a) Modelo conceptual de SHM

El SHM emplea diversas tecnologías para mejorar la precisión y efectividad del monitoreo estructural. (Jacoski, 2018)

- Redes de Sensores Inalámbricos (WSN): Permiten la comunicación entre sensores sin necesidad de cableado, facilitando la instalación y el monitoreo en estructuras complejas o remotas.
- Internet de las Cosas (IoT): Facilita la conexión de sensores con sistemas en la nube, permitiendo el acceso remoto a los datos y la supervisión en tiempo real.
- Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático: Los algoritmos de IA ayudan a analizar grandes cantidades de datos y detectar patrones leves de daño que pueden ser difíciles de identificar manualmente.

b) Indicadores de salud estructural

Para evaluar la condición de la estructura, se emplean indicadores clave que permiten una rápida interpretación de su salud estructural. (Chen, 2021)

- Frecuencia Natural: Cambios en la frecuencia pueden indicar pérdida de rigidez o aparición de fisuras.
- Deformación (Strain): La magnitud de la deformación en puntos específicos refleja las tensiones internas de la estructura y ayuda a detectar puntos de fatiga.
- Amortiguamiento y Energía: Los cambios en la capacidad de disipación de energía de la estructura pueden indicar la presencia de daños no visibles.

c) Integración de tecnología y sistemas en SHM

El SHM emplea diversas tecnologías para mejorar la precisión y efectividad del monitoreo estructural. (Chen, 2021)

- Redes de Sensores Inalámbricos (WSN): Permiten la comunicación entre sensores sin necesidad de cableado, facilitando la instalación y el monitoreo en estructuras complejas o remotas.
- Internet de las Cosas (IoT): Facilita la conexión de sensores con sistemas en la nube, permitiendo el acceso remoto a los datos y la supervisión en tiempo real.
- Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático: Los algoritmos de IA ayudan a analizar varios datos obtenidos y detectar patrones de daño que pueden ser difíciles de identificar manualmente.
- Modelos Basados en Física y Simulaciones: Estos modelos proporcionan una representación teórica del comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones y permiten verificar el comportamiento esperado con el observado en los datos.

d) Gestión de riesgo y toma de decisiones en SHM

El SHM también incluye un enfoque de gestión de riesgos que permite clasificar los daños y priorizar intervenciones. (Chen, 2021). Las decisiones se basan en:

- Análisis del Nivel de Severidad del Daño: Se evalúa si el daño identificado afecta de manera inmediata o progresiva la estabilidad de la estructura.

- Priorización de Intervenciones: En función del riesgo, el SHM permite definir un plan de mantenimiento que optimiza los recursos y minimiza el tiempo fuera de servicio.
- Evaluación de la Vida Útil Restante: Con base en los datos recolectados, se puede estimar el tiempo de vida restante de la estructura y programar intervenciones para prolongarla de manera segura.

e) Sostenibilidad y eficiencia económica del SHM

El SHM con sensores inteligentes no solo mejoran la seguridad de las estructuras, sino que también contribuye a la sostenibilidad y eficiencia económica en la gestión de infraestructuras. (Jacoski, 2018)

- Mantenimiento Predictivo: Reduce la necesidad de reparaciones de emergencia, disminuyendo costos y mejorando la eficiencia.
- Minimización del Impacto Ambiental: Al extender la vida útil de las estructuras, se reduce la necesidad de construir nuevas infraestructuras, lo que minimiza el impacto ambiental.
- Optimización de Recursos: Con un sistema de SHM eficiente, es posible priorizar las intervenciones en base a datos precisos, evitando gastos innecesarios.

2.2 Concepto de monitoreo de la salud estructural

2.2.1 Integridad Estructural

La integridad estructural se refiere a la capacidad de una estructura para soportar sus cargas de diseño y resistir fuerzas externas sin sufrir fallas. En el contexto de SHM, evaluar la integridad estructural significa asegurarse de que la estructura mantiene su capacidad de carga a lo largo del tiempo, considerando factores como el envejecimiento de materiales, vibraciones, fatiga, y condiciones ambientales. (CAICEDO J. M., 2000)

2.2.2 Sensores de monitoreo

Los sensores son dispositivos clave en SHM, ya que recolectan datos específicos de la estructura. (Wang, 2021). Los sensores empleados pueden ser de diferentes tipos según el parámetro que miden:

- Acelerómetros: Detectan vibraciones y aceleraciones en la estructura para analizar su respuesta dinámica.
- Sensores de Deformación (Strain Gauges): Miden la deformación en ciertos puntos, ayudando a detectar tensiones y fatiga en componentes específicos.
- Sensores de Fibra Óptica: Utilizados para medir temperatura, presión y deformación en condiciones ambientales extremas.
- Sensores de Corrosión: Monitorizan la degradación de materiales, especialmente en estructuras metálicas.
- Sensores de Desplazamiento: Miden movimientos en estructuras, esenciales para observar asentamientos o desplazamientos anómalos

2.2.3 Respuesta dinámica de estructuras

La respuesta dinámica se refiere a cómo una estructura reacciona ante excitaciones externas, como cargas de tráfico, viento, actividad sísmica o impactos. Cada estructura tiene características dinámicas únicas (como su frecuencia natural, modos de vibración y amortiguamiento), que pueden cambiar si hay daños. La detección de estos cambios en la respuesta dinámica es fundamental para el SHM, ya que puede indicar pérdida de rigidez, presencia de fisuras o cambios en las conexiones estructurales. (CAICEDO J. M., 2000)

2.2.4 Análisis Modal

El análisis modal es una técnica para determinar los modos naturales de vibración de una estructura. Estos modos representan patrones de movimiento específicos y están asociados a frecuencias naturales. Un cambio en estas frecuencias puede indicar un daño en la estructura, ya que los defectos tienden a reducir la rigidez. Este concepto es esencial en SHM, pues permite detectar cambios sutiles en el comportamiento de la estructura mediante el monitoreo de sus modos de vibración. (Wang, 2021)

2.2.5 Adquisición y procesamiento de datos

La adquisición de datos en SHM es el proceso de recopilar información de los sensores en tiempo real o en intervalos regulares, esta información generalmente requiere procesamiento para ser útil y el procesamiento de datos incluye filtrado para eliminar ruido, normalización para ajustar diferentes escalas de datos, y análisis de patrones para extraer información relevante sobre el estado de la estructura. (Wang, 2021)

2.2.6 Diagnóstico y pronóstico de daños

- Diagnóstico de daños: Es el proceso de identificar la presencia y ubicación de defectos en la estructura. Esto se basa en la comparación de datos actuales con una línea base (es decir, el comportamiento normal o saludable de la estructura). (Palacio, 2022)
- Pronóstico de Daños: Utiliza modelos predictivos para anticipar cómo evolucionarán los daños en el futuro. Esto permite prever el momento en que una estructura podría requerir mantenimiento o reparación, optimizando recursos y mejorando la seguridad. (Palacio, 2022)

2.2.7 Evaluación de riesgo y gestión de la seguridad estructural

El SHM incluye un enfoque de evaluación de riesgos que permite clasificar los niveles de daño en función de su gravedad y la probabilidad de fallo. Esto ayuda en la toma de decisiones sobre cuándo y dónde aplicar intervenciones. La gestión de la seguridad estructural incluye el establecimiento de umbral de alerta y protocolos de respuesta para prevenir situaciones de emergencia. (Palacio, 2022)

2.2.8 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es una estrategia en la que las intervenciones de mantenimiento se programan en función de la condición real de la estructura en lugar de intervalos fijos. SHM permite la implementación del mantenimiento predictivo mediante la detección temprana de defectos y la estimación de la vida útil restante, lo cual reduce costos y maximiza la eficiencia de la estructura. (Palacio, 2022)

2.2.9 Tecnologías de comunicación y transmisión de datos

Con la ayuda de SHM, es fundamental contar con sistemas de comunicación eficientes para transmitir datos en tiempo real desde los sensores hasta los centros de análisis. Las tecnologías más comunes. (Palacio, 2022)

- Redes de Sensores Inalámbricos (WSN): Facilitan la comunicación entre sensores y permiten un despliegue flexible.
- Internet de las Cosas (IoT): Conecta los sensores a la red de internet para enviar datos a sistemas de análisis y gestión en la nube.
- Computación en la Nube: Permite almacenar grandes volúmenes de datos y realizar análisis complejos a distancia, facilitando el acceso remoto.

2.2.10 Evaluación de la vida útil restante

La evaluación de la vida útil restante de una estructura es el proceso de calcular el tiempo que seguirá siendo seguro y funcional. Se basa en el análisis de datos de deterioro acumulado y el historial de mantenimiento. Esta evaluación es clave para decidir sobre reparaciones, refuerzos o, en última instancia, reemplazos. (Palacio, 2022).

2.2.11 Sostenibilidad y optimización de recursos en SHM

El SHM no solo mejora la seguridad estructural, sino que también promueve la sostenibilidad y la eficiencia de recursos al reducir la necesidad de reparaciones de emergencia, optimizar el uso de materiales y prolongar la vida útil de las infraestructuras. Esto también contribuye a minimizar el impacto ambiental y el consumo de recursos en el sector de la construcción. (Palacio, 2022)

2.3 Definición del SHM

El SHM se refiere a un conjunto de técnicas y tecnologías utilizadas para evaluar de manera continua el estado de integridad de una estructura. Según (Doebling, 1998), el SHM implica la recolección y análisis de datos de una estructura con el fin de detectar daños en tiempo real.

Hoy en día, el monitoreo de salud estructural (SHM) es visto como un área de investigación en expansión, que facilita la identificación del estado de salud de una estructura mediante el seguimiento del comportamiento estructural. Este sistema detecta defectos y daños en una estructura de forma precoz, independientemente de si la estructura está en fase de edificación o en funcionamiento. Desde hace décadas, SHM se ha implementado en varias estructuras a nivel global, facilitando así la investigación y el desarrollo de tecnologías eficaces y accesibles. Los hallazgos logrados mediante el uso de SHM han evidenciado que es un instrumento que facilita un funcionamiento seguro y una gestión eficaz de la estructura. Esto se debe a que, al realizar un diagnóstico temprano del estado de salud, se pueden centrar los esfuerzos de mantenimiento en los defectos y daños detectados antes de que sean perceptibles a los métodos tradicionales, optimizando así la utilización de recursos empleados en el mantenimiento y fortalecimiento de la infraestructura. Las aplicaciones más relevantes se han llevado a cabo en estructuras significativas donde su sustitución no es económicamente viable, no obstante, su uso también es factible en estructuras de tamaño reducido. (Palacio, 2022)

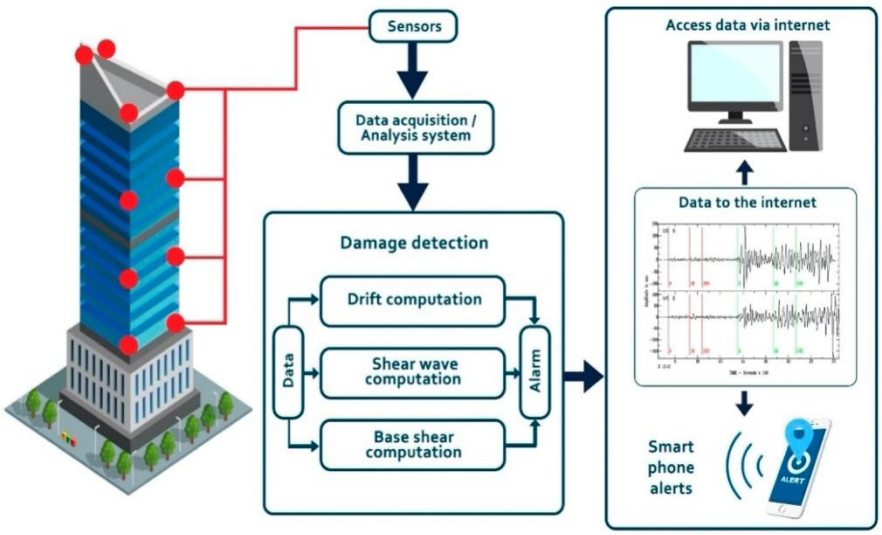


Ilustración 1 – Sistema de monitoreo de salud estructural (STRUCTURAL HEALTH MONITORING, ASSESSMENT & REHABILITATION, 2024)

2.4 Objetivos de SHM

El objetivo principal del Monitoreo de la Salud Estructural (SHM) es evaluar de manera constante o regular la integridad de una estructura para asegurar su seguridad, funcionalidad y durabilidad. Los propósitos de SHM se centran en evitar errores, mejorar el mantenimiento y potenciar la eficacia operacional de infraestructuras vitales como puentes, edificaciones, presas y otros sistemas de construcción fundamentales. (CAICEDO J. M., 2000). A continuación, se detallan las metas principales de SHM:

2.4.1 Detección temprana de daños

Uno de los propósitos fundamentales del SHM es la detección precoz de daños o imperfecciones en la estructura, tales como fisuras, corrosión, agotamiento o deformidades. La identificación temprana posibilita actuar antes de que los daños puedan poner en riesgo la seguridad o el funcionamiento de la estructura, evitando así posibles fallos catastróficos. (Jacoski, 2018)

2.4.2 Evaluación continua de la integridad estructural

El SHM posibilita llevar a cabo un monitoreo continuo de la condición estructural a través de la utilización de sensores y sistemas de vigilancia. Este propósito es esencial para valorar las modificaciones en la integridad estructural a través del tiempo, identificando variaciones que puedan señalar la emergencia de problemas. Esta evaluación constante

proporciona una perspectiva exacta de la situación verdadera de la estructura, más allá de las revisiones visuales o periódicas. (CAICEDO J. M., 2000)

2.4.3 Optimización del Mantenimiento y Reducción de Costos

El SHM al ofrecer información actualizada acerca del estado de la estructura, ayuda con las estrategias de mantenimiento predictivo. Esto implica que las acciones de mantenimiento pueden ser planificadas en función de la situación real de la infraestructura, en vez de apoyarse en un calendario establecido. Gracias a esto, se disminuyen los gastos vinculados al mantenimiento preventivo y se disminuyen las interrupciones en el funcionamiento. (CAICEDO J. M., 2000)

2.4.4 Extensión de la vida útil de las estructuras

El propósito del monitoreo estructural también es extender la durabilidad de la infraestructura a través de la prevención de daños severos. Al detectar y rectificar fallos de manera oportuna, el SHM ayuda a disminuir el deterioro acumulado y a optimizar el tiempo de servicio de la estructura, lo que resulta particularmente relevante para infraestructuras esenciales y costosas. (CAICEDO J. M., 2000)

2.4.5 Aumento de la seguridad

El SHM incrementa la seguridad de las estructuras proporcionando una valoración exhaustiva y continua de su condición. Esta información facilita la toma de decisiones fundamentadas respecto a la conservación de la infraestructura, disminuyendo los peligros para las personas y el ambiente. Este propósito es fundamental en puentes, túneles y construcciones, donde cualquier error podría amenazar vidas humanas. (Jacoski, 2018)

2.4.6 Monitoreo en tiempo real para la toma de decisiones

Los sistemas de SHM permiten obtener información en tiempo real acerca del estado de una estructura. Esto resulta especialmente útil en circunstancias de emergencia, como tras un sismo o una tormenta, cuando se necesita información instantánea para determinar si una estructura puede continuar funcionando o si requiere una intervención inmediata. (Palacio, 2022)

2.4.7 Identificación de modos de fallos y análisis de causa raíz

El SHM ayuda en la identificación de modos de fallo y en la realización de un estudio de la causa principal del deterioro estructural. Mediante la recolección de datos de sensores y el análisis de patrones de deterioro, se puede investigar el motivo y la causa de los daños en la

estructura. Esto no solo posibilita la reparación del daño presente, sino también la creación de diseños y materiales más avanzados para evitar errores futuros. (Palacio, 2022)

2.4.8 Reducción del impacto ambiental

Otro objetivo es disminuir el impacto ambiental de las infraestructuras. Al prolongar la durabilidad de las estructuras y minimizar la necesidad de edificaciones nuevas, ayuda a reducir el uso de materiales y recursos, además del impacto ambiental vinculado a la edificación y demolición.

2.4.9 Validación y optimización de modelos estructurales

Gracias a la información útil que puede emplearse para validar y perfeccionar modelos teóricos de estructura. Al comparar los datos obtenidos con los modelos de simulación y diseño, los ingenieros pueden modificar estos modelos para reflejar con mayor exactitud el comportamiento auténtico de la estructura bajo diversas circunstancias, optimizando de esta manera futuras aplicaciones en el diseño y la edificación. (Palacio, 2022)

2.4.10 Apoyo en la gestión de riesgos

El SHM simplifica la administración de riesgos a través de la valoración constante y exacta de la condición de la estructura. Los datos del SHM facilitan la categorización de los daños según su severidad, permitiendo así priorizar las intervenciones en las áreas más críticas, maximizando la optimización de recursos y reduciendo el peligro de errores. (Jacoski, 2018)

2.4.11 Facilitación de respuesta rápida en eventos extremos

Tras sucesos extremos como sismos, huracanes o explosiones, el SHM ofrece información inmediata que facilita la evaluación rápida del estado de la estructura impactada. Esto permite una reacción inmediata y la toma de decisiones fundamentadas en torno a la seguridad de la infraestructura, contribuyendo a reducir el peligro de colapsos o incidentes adicionales. (Palacio, 2022)

2.5 Proceso de datos de adquisición en SHM

El proceso de adquisición de datos en SHM consiste en recolectar, procesar y analizar la información obtenida de los sensores para evaluar la salud de una estructura. (Palacio, 2022). Este proceso implica varios pasos:

2.5.1 Selección de sensores y ubicación

La elección de los sensores y su ubicación en la estructura son fundamentales para obtener datos representativos. Los puntos de instalación deben estar en áreas críticas donde es probable que se generen tensiones o deformaciones importantes. (Wang, 2021)

2.5.2 Recolección de datos

Los sensores instalados en la estructura capturan datos de manera continua o en intervalos de tiempo programados. Los datos pueden incluir valores de aceleración, desplazamiento, temperatura, humedad y otros parámetros específicos de la salud estructural. (CAICEDO J. M., 2000)

2.5.3 Transmisión de datos

Los datos recopilados por los sensores se transmiten a través de sistemas de comunicación, que pueden incluir redes cableadas o inalámbricas (como WSN, Redes de Sensores Inalámbricos). En muchos sistemas modernos, se utiliza el Internet de las Cosas (IoT) para permitir el monitoreo remoto en tiempo real. (Wang, 2021)

2.5.4 Procesamiento de datos

Una vez recolectados, los datos suelen contener ruido o interferencias que deben ser filtradas. En esta fase se aplican métodos de procesamiento de señales, como el filtrado digital, para mejorar la calidad de los datos y hacerlos adecuados para su análisis. (CAICEDO J. M., 2000)

2.5.5 Almacenamiento y gestión de datos

Los datos limpios se almacenan en bases de datos o en sistemas en la nube, donde pueden ser organizados y archivados. Este almacenamiento es esencial para el análisis histórico y la evaluación de la evolución del estado estructural. (Wang, 2021)

2.5.6 Análisis y diagnóstico

Los datos se analizan utilizando técnicas como el análisis de frecuencias, algoritmos de aprendizaje automático o modelos predictivos. Estos análisis ayudan a detectar patrones de deterioro, predecir el desarrollo de daños y calcular la vida útil restante de la estructura. (CAICEDO J. M., 2000)

2.5.7 Visualización y reportes

Los resultados del análisis se presentan en formatos de fácil interpretación, como gráficos, alertas y reportes. Estos resultados ayudan a los ingenieros y gestores a tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento y la seguridad de la estructura. (Wang, 2021)

2.6 Tecnologías de comunicación y transmisión de datos en SHM

Las tecnologías de comunicación en SHM son cruciales para la transmisión de datos desde los sensores a los sistemas de análisis. (Chen, 2021). Las más comunes incluyen:

2.6.1 Redes de sensores inalámbricos (WSN)

Las redes de Sensores Inalámbricos (WSN) desempeñan un papel fundamental en el Monitoreo de la Salud Estructural (SHM), permitiendo la recolección y transmisión de datos de manera eficiente y flexible sin necesidad de infraestructura de cableado. Estas redes consisten en sensores autónomos distribuidos estratégicamente sobre o dentro de una estructura, que monitorean en tiempo real variables clave como vibración, temperatura, deformación y desplazamiento, entre otras. (Cheng, 2024)

2.6.2 Componentes de las redes de sensores inalámbricos (WSN) en SHM

Una red WSN para SHM está compuesta por varios elementos que trabajan de manera conjunta para capturar y transmitir datos estructurales. (Chen, 2021). Como:

Tipo de componentes	Función	Utilización
Nodos de Sensores	Los nodos son dispositivos que integran uno o varios sensores para medir parámetros específicos. También contienen un microprocesador que procesa los datos y un módulo de comunicación inalámbrica.	Utilizan baterías o energía de fuentes renovables (como energía solar) para funcionar de manera autónoma durante largos periodos.
Estación Base (Gateway)	Actúa como un centro de recolección de datos al recibir información de los	La estación base generalmente se conecta a internet para permitir el

	nodos de sensores. Luego, los datos pueden ser enviados a un servidor central o a una nube para su almacenamiento y análisis.	acceso remoto a los datos.

2.6.3 Red de comunicación

Permite que los datos recopilados por los sensores sean transmitidos a la estación base. Las WSN pueden utilizar diferentes protocolos de comunicación, como Zigbee, Wi-Fi, Bluetooth o LoRa, dependiendo de las necesidades del proyecto. (Cheng, 2024).

2.6.4 Características clave de las WSN en SHM

Las redes WSN en SHM tienen ciertas características que las hacen particularmente adecuadas para el monitoreo de estructuras. (Cheng, 2024). Como:

Tipo de característica	Función
Inalámbricas y flexibles	La ausencia de cables permite instalar nodos en ubicaciones difíciles de alcanzar y facilita su reubicación si es necesario. Esto es especialmente útil en infraestructuras complejas como puentes, torres y edificios altos.
Eficiencia energética	Dado que muchos de los nodos funcionan con baterías, las WSN están diseñadas para consumir poca energía, utilizando protocolos y técnicas de comunicación de baja potencia para extender la vida útil de las baterías.
Autonomía y escalabilidad	Los nodos de sensores pueden funcionar de manera autónoma y, si es necesario, agregar o quitar nodos en la red es relativamente sencillo, lo que permite escalar la red según las

	necesidades de monitoreo de la estructura.
Monitoreo en tiempo real	Las WSN permiten la transmisión de datos en tiempo real, lo que es crucial para detectar cambios estructurales de manera inmediata y poder tomar decisiones rápidas.

2.6.5 Beneficios de las WSN en SHM

El uso de redes de sensores inalámbricos en SHM aporta múltiples beneficios:

- Reducción de Costos de Instalación y Mantenimiento: Al eliminar la necesidad de cables, las WSN reducen los costos de instalación y mantenimiento, especialmente en infraestructuras de gran tamaño o de difícil acceso.
- Monitoreo Continuo y a Larga Distancia: Permiten realizar un seguimiento continuo de la salud estructural, lo que mejora la seguridad y el mantenimiento predictivo.
- Mayor Cobertura: Las WSN pueden cubrir grandes áreas o estructuras extensas al interconectar múltiples nodos distribuidos, lo que proporciona una visión más completa de la salud de la estructura.
- Alertas Tempranas: Permiten programar alertas tempranas ante posibles fallos, deformaciones o daños estructurales, lo que ayuda a prevenir accidentes y mejorar la seguridad.

2.6.6 Retos y desafíos de las WSN en SHM

Tipos Retos y Desafíos	Características
Consumo de energía	-Aumentar la vida útil de las baterías es un desafío, especialmente para estructuras donde el acceso es limitado. -Para abordar esto, se buscan técnicas de ahorro energético o fuentes de energía alternativas como paneles solares.

Interferencias y Pérdida de Señal	-Las estructuras grandes o de metal pueden generar interferencias que dificultan la transmisión de datos. -Las técnicas de enrutamiento y repetidores ayudan a reducir estos problemas, pero son factores que se deben considerar en el diseño de la red.
Integridad y Precisión de los Datos	-Es crucial filtrar y validar los datos para asegurar la confiabilidad del monitoreo. -En algunos entornos, la calidad de los datos puede verse afectada por factores ambientales o interferencias electromagnéticas.
Capacidad de Almacenamiento y Análisis de Datos	Las WSN generan grandes volúmenes de datos, que requieren capacidad de almacenamiento y análisis avanzado, incluyendo el uso de inteligencia artificial para detectar patrones de daño.

2.6.7 Aplicaciones de las WSN en SHM

Las WSN se utilizan ampliamente en SHM para diversas estructuras de infraestructura crítica. (CAICEDO J. M., 2000). Como:

Tipo de Estructura	Aplicación
Puentes	Las WSN monitorean la vibración, deformación, desplazamientos y otros parámetros críticos, permitiendo una supervisión continua de la integridad estructural en respuesta al tráfico, viento y otros factores.

Edificios y Rascacielos	En los edificios altos y rascacielos, las WSN detectan vibraciones, inclinación y desplazamiento para asegurar que la estructura responda adecuadamente a cargas de viento, sismos y otros eventos.
Presas y Embalses	Las WSN monitoreas la presión, temperatura y posibles desplazamientos en las presas, detectando problemas de filtración o movimientos que podrían comprometer la estructura.
Túneles	Los túneles se benefician del monitoreo de variables como la presión y la deformación, especialmente en zonas de riesgo sísmico o de deslizamientos.
Torres de Telecomunicación	Las WSN supervisan la inclinación, vibración y tensión en las torres, facilitando la detección de anomalías en estructuras esbeltas que son vulnerables al viento y las cargas dinámicas.

2.6.8 Tecnologías de comunicación en WSM para SHM

Las WSN pueden utilizar diferentes tecnologías de comunicación, cada una con ventajas según el tipo de monitoreo requerido. (Cheng, 2024). Como:

- Zigbee: Ideal para redes de bajo consumo de energía y donde los nodos están relativamente cerca entre sí.
- Wi-Fi: Proporciona una mayor velocidad de transmisión, pero tiene un mayor consumo energético y alcance limitado.
- Bluetooth Low Energy (BLE): Funciona en aplicaciones de corto alcance y bajo consumo, aunque es menos común en SHM a gran escala.

- 5G y LTE: Estas tecnologías permiten un ancho de banda mayor y son útiles en casos donde se necesita transmitir datos de alta calidad en tiempo real, aunque tienen un consumo energético elevado.

Ejemplo de funcionamientos de WSN en SHM

En el caso de un puente, una WSN de SHM podría funcionar de la siguiente manera. (Alhadi, 2021).

- Instalación de Nodos: Se distribuyen nodos de sensores en puntos críticos del puente, como soportes, cables de suspensión y secciones de la calzada.
- Monitoreo Continuo: Los sensores capturan datos en tiempo real sobre vibraciones, deformaciones y desplazamientos.
- Transmisión de Datos: Los datos se transmiten a través de la red inalámbrica hacia una estación base ubicada en un extremo del puente.
- Análisis de Datos: En la estación base, los datos se envían a un servidor central para su procesamiento y análisis en la nube.
- Generación de Alertas: Si los datos muestran valores anormales que indican posibles daños, se emiten alertas automáticas para permitir una inspección detallada y, si es necesario, una reparación inmediata.

2.6.9 Internet de las cosas (IoT)

El internet de las cosas (IoT) ha revolucionado el Monitoreo de la Salud Estructural (SHM) al integrar sensores, dispositivos y sistemas de comunicación en una red conectada a Internet, facilitando el monitoreo continuo y en tiempo real de infraestructuras críticas. Al aprovechar el IoT, las infraestructuras, como puentes, edificios, túneles y presas, pueden supervisarse y gestionarse de manera remota, permitiendo detectar anomalías estructurales y tomar decisiones informadas para el mantenimiento y la seguridad. (Doebling, 1998)

2.6.9.1 Componentes clave del IoT en SHM

Componente del IoT	Aplicación
Sensores Conectados	Estos sensores recolectan datos críticos de la infraestructura, como vibración, inclinación, presión, deformación y temperatura, y están equipados con módulos de comunicación que les

	permiten enviar esta información en tiempo real a través de redes IoT.
Pasarelas (Gateways)	Las pasarelas IoT reciben datos de los sensores y los transmiten a servidores en la nube o sistemas locales para análisis y almacenamiento. También gestionan la comunicación entre los sensores y la red central.
Plataformas de nube y servidores	En la nube o en servidores remotos se almacenan los datos y se realizan análisis avanzados mediante modelos de procesamiento y aprendizaje automático para identificar patrones de daño y alertas tempranas, facilitando que ingenieros y gestores de infraestructura realicen monitoreo desde cualquier lugar.
Aplicaciones de Análisis y visualización	Son interfaces o dashboards que presentan los datos de forma gráfica y en tiempo real. Estas aplicaciones generan alertas automáticas ante cambios anómalos, proporcionando a los usuarios información procesada para tomar decisiones sobre mantenimiento o reparaciones.

2.6.10 Ventajas del IoT en el monitoreo de la salud estructural

El uso del IoT en SHM ofrece múltiples ventajas en términos de eficiencia, costos y seguridad. (Doebling, 1998).

Tipo de uso	Ventaja
Monitoreo en Tiempo Real y Detección Temprana de Daños	La conectividad de los dispositivos IoT permite recibir datos al instante y

	detectar cambios en los patrones de comportamiento de la estructura. Esto ayuda a identificar problemas antes de que se conviertan en fallas graves.
Reducción de Costos Operativos y de Mantenimiento	El monitoreo remoto evita inspecciones manuales frecuentes y permite programar el mantenimiento de manera predictiva, reduciendo costos de desplazamiento, mano de obra y recursos.
Acceso Remoto y Mejor Toma de Decisiones	El IoT permite a los ingenieros y administradores acceder a los datos estructurales desde cualquier ubicación, lo cual facilita la coordinación de decisiones y respuestas ante emergencias sin necesidad de estar físicamente presentes en el sitio.
Escalabilidad y Flexibilidad	Los sistemas IoT son altamente escalables, permitiendo agregar nuevos sensores y dispositivos fácilmente, adaptándose a la infraestructura monitoreada sin necesidad de una instalación compleja.

2.6.11 Tecnologías de comunicación IoT en SHM

El IoT utiliza diferentes tecnologías de comunicación según los requisitos de alcance, consumo de energía y cantidad de datos a transmitir. (Doebling, 1998). Algunas de las más utilizadas son:

- LoRaWAN (Long Range Wide Area Network): Es ideal para infraestructuras donde los sensores están distribuidos en grandes áreas y se necesita bajo consumo de energía. LoRaWAN es adecuado para aplicaciones en puentes, presas y áreas remotas.

- Zigbee: Ofrece comunicación en distancias cortas y consume poca energía, por lo que es ideal en áreas densas de sensores y estructuras relativamente pequeñas o en áreas específicas de grandes infraestructuras.
- Wifi y Bluetooth: Es útil cuando se requiere una alta velocidad de transmisión de datos, aunque con un mayor consumo de energía.
- 5G y LTE: Estas tecnologías permiten alta velocidad y baja latencia en la transmisión de datos, siendo útiles en aplicaciones de SHM donde se requiere el monitoreo de alta precisión y análisis en tiempo real.

2.6.12 Aplicaciones del IoT en el monitoreo de la salud estructural

El IoT se ha aplicado en diferentes tipos de estructuras e infraestructuras críticas. (Doebling, 1998).

Tipo de Estructura	Aplicación
Puentes	Sensores IoT pueden monitorear las cargas, la vibración y los movimientos de un puente debido al tráfico y factores climáticos. En caso de detectar vibraciones inusuales o deformaciones, el sistema emite una alerta para inspección.
Edificios Altos y Rascacielos	Sensores IoT miden la inclinación, la deformación y la vibración de los edificios, detectando cambios que puedan ser causados por movimientos sísmicos, cargas de viento o asentamientos en la fundación.
Presas y Estructuras hidráulicas	Los sensores conectados en presas y embalses detectan cambios en presión, temperatura y humedad que podrían indicar filtraciones o movimientos en la estructura. Esto permite intervenir

	antes de que ocurra una posible falla catastrófica.
Túneles	Los sensores de IoT monitorean la presión y los desplazamientos en las paredes de túneles, detectando con antelación posibles derrumbes y movimientos de tierra.
Torres de Telecomunicaciones	Los sensores IoT monitorean las condiciones de las torres, midiendo vibración, inclinación y tensión en los materiales, detectando daños estructurales por corrosión o deformación debida a condiciones meteorológicas extremas.

2.6.13 Diferencia entre una WSN y un IoT frente a un SHM

Las WSN son ideales para monitoreos localizados y autónomos en un área específica de una estructura. Son útiles cuando se busca una solución de monitoreo relativamente sencilla y sin necesidad de conexión a internet. Por otro lado, el IoT es una solución más avanzada y flexible, permitiendo la conectividad global, el acceso a plataformas de análisis avanzadas y control remoto. Esto hace que el IoT sea particularmente adecuado para aplicaciones de SHM que requieren monitoreo a gran escala, integración de datos de múltiples ubicaciones y análisis en tiempo real. (Doebling, 1998).

Característica	WSN	IoT
Alcance y Conectividad	Local (sensores en área específica)	Global (conectividad a través de internet)
Protocolos de Comunicación	Zigbee, LoRa, Bluetooth	Wi-Fi, 4G/5G, LoRaWAN
Almacenamiento de Datos	Estación base local	Nube o servidores remotos
Procesamiento de Datos	Limitado a procesamiento básico	Análisis avanzado con inteligencia artificial
Escalabilidad	Limitada a la estructura monitoreada	Altamente escalable

Interoperabilidad	Generalmente sistemas cerrados	Alta interoperabilidad con otros sistemas
Alertas y Respuesta Remota	Básico y limitado a la estación base	Alertas en tiempo real y control remoto

Tabla 1 - Matriz de stakeholders (Doebling, 1998)

3. USO DE SENSORES INTELIGGENTES PARA EL SHM (STRUCTURAL HEALTH MONITORING)

3.1 Características de los sensores inteligentes

La inteligencia en los dispositivos es una consecuencia natural de la complejidad de los sistemas que el ser humano está creando. Hoy en día, todo dispositivo posee el adjetivo de inteligente. (Monte, 2017)

3.1.1 Capacidad de procesamiento de datos en el sensor

- Procesamiento local: Los sensores inteligentes suelen estar equipados con microprocesadores o chips que permiten realizar análisis básicos de datos en el lugar de trabajo.
- Filtrado y análisis preliminar: Reducen la cantidad de datos que se deben transmitir, enviando únicamente información relevante de los eventos detectados.

3.1.2 Comunicación y conectividad

- Conectividad inalámbrica: Se usan tecnologías como wi-fi, bluetooth, ZigBee (altos niveles de comunicación inalámbrica para la utilización de redes inalámbricas).
- Interoperabilidad: Son compatibles con las redes IoT (internet de las cosas) para que su integración sea de una manera más fácil.
- Capacidad de comunicación bidireccional: Esto permite recibir instrucciones o actualizaciones del software de una forma remota y más sencillo.

3.1.3 Sensores multifuncionales

- Medición de múltiples parámetros: Los sensores inteligentes pueden medir vibraciones, deformaciones, aceleraciones, temperatura, humedad, corrosión, entre otros.
- Integración de diferentes tipos de sensores: En un solo nodo, se puede combinar sensores de diferentes tipos como piezoeléctricos, ópticos, etc.

3.1.4 Autonomía y sostenibilidad

- Bajo consumo energético: diseñados para operar durante largos periodos con baterías o energía renovable (paneles solares).
- Energía autónoma: algunos sensores integran sistemas de recolección de energía ambiental (vibraciones, calor, luz).

3.1.5 Durabilidad

- Diseño resistente: fabricados con materiales que soportan condiciones ambientales extremas con altas temperaturas, humedad, salinidad, polvo o vibraciones constantes.
- Larga vida: están diseñados para durar muchos años con un mantenimiento mínimo.

3.1.6 Capacidad de autodiagnóstico

- Auto calibración: pueden ajustarse automáticamente para garantizar mediciones precisas con el tiempo.
- Detección de fallos: informan sobre problemas en su funcionamiento para mantenimiento predictivo.

3.1.7 Escalabilidad y modularidad

- Fácil integración en redes de SHM: los sensores inteligentes pueden añadirse a sistemas existentes sin grandes modificaciones o sin mayor dificultad de conectividad.
- Capacidad de trabajo en red: funcionan de forma conjunta con otros sensores para proporcionar un monitoreo distribuida y en tiempo real.

3.1.8 Análisis en tiempo real

- Respuesta inmediata: Envían alertas sobre camios estructurales críticos en tiempo real, lo que permite tomar decisiones rápidas.
- Predicción basada en IA y aprendizaje automático.
- Algunos sensores incorporan algoritmos que predicen el comportamiento estructural basándose en los datos recopilados.

3.1.9 Reducción de costos operativos

- Mantenimiento predictivo: identifican problemas antes de que causen fallas catastróficas, reduciendo costos de reparación.
- Instalación simplificada: La conectividad inalámbrica y el diseño compacto reducen el esfuerzo necesario para instalarlos.

3.2 Funcionamiento de los sensores inteligentes

En general, el sensor inteligente consta de 3 componentes principales: un sensor que captura datos del entorno o del equipo; un microprocesador, el cual va a calcular la salida del sensor mediante programación; y recursos de comunicación los cuales van a informar la acción que va a tomar el microprocesador a la salida. (Monte, 2017).

3.2.1 Monitoreo continuo de parámetros estructurales

Los sensores inteligentes están diseñados para medir continuamente las variables críticas que afectan la integridad de una estructura. (Alhadi, 2021). Entre estas mediciones están:

- Vibraciones y aceleraciones: Ayudan a identificar posibles resonancias o impactos inusuales.
- Deformaciones: Detección de cambios en el comportamiento estructural, como flexión o compresión.
- Temperatura y humedad: Para evaluar las condiciones ambientales que pueden influir en la estructura.
- Fisuras y corrosión: Identificación de daños superficiales o internos.

3.2.2 Captura de datos en tiempo real

Los sensores detectan y registran cambios físicos o químicos en la estructura utilizando tecnologías específicas. (Alhadi, 2021). Como:

- Sensores piezoeléctricos: detectan vibraciones o movimientos.
- Sensores ópticos (fibra óptica): miden deformaciones con alta precisión.
- Sensores MEMS (Microelectromechanical Systems): pequeños dispositivos que monitorean aceleraciones, inclinaciones y otros parámetros.
- Sensores resistivos o capacitivos: miden tensiones y deformaciones directamente.

3.2.3 Procesamiento local de datos

- Procesamiento descentralizado: Los sensores inteligentes cuentan con microcontroladores o chips que analizan los datos recopilados en el lugar.
- Filtrado de ruido: El sensor elimina información irrelevante o perturbaciones externas para garantizar la precisión de las lecturas.

- Algoritmos de análisis: Algunos sensores usan algoritmos avanzados para identificar patrones de daño o tendencias que indican el deterioro estructural.

3.2.4 Comunicación de datos

Los sensores transmiten la información procesada a un sistema central de monitoreo mediante tecnologías de comunicación. (Alhadi, 2021). Como:

- Inalámbricas: Wi-fi, ZigBee, LoRa o redes celulares.
- Cableada: Redes Ethernet o sistemas dedicados de trasmisión por fibra óptica.

En caso de cambios significativos o eventos críticos, los sensores envían alertas inmediatas al sistema.

3.2.5 Almacenamiento y análisis avanzado

- Los datos recopilados por los sensores se almacenan en servidores locales o en la nube.
- Se utilizan sistemas de análisis avanzados basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático para interpretar los datos y detectar patrones que podrían indicar problemas estructurales.

3.2.6 Detección de anomalías

Los sensores inteligentes están configurados para identificar desviaciones respecto a los parámetros normales de la estructura. (Barma, 2022). Como:

- Cambios en la frecuencia de vibración natural.
- Deformaciones excesivas.
- Crecimiento progresivo de fisuras o grietas.
- Cuando se detecta una anomalía, el sensor genera una alerta para los aperadores.

3.2.7 Autodiagnóstico y calibración

- Los sensores inteligentes realizan autodiagnósticos periódicos para verificar su correcto funcionamiento.
- Algunos sensores tienen la capacidad de auto calibrarse para ajustar su precisión a las conficiones cambiantes del entorno.

3.2.8 Energía autónoma

Muchos sensores inteligentes están diseñados para ser autónomos energéticamente, aprovechando fuentes. (Barma, 2022). Como:

- Energía solar.
- Energía cinética: capturando energía de las vibraciones de la estructura.
- Baterías de bajo consumo.
- Esto asegura un funcionamiento continuo incluso en ubicaciones remotas o de difícil acceso.

3.2.9 Función predictiva

- Los datos recopilados y analizados por los sensores se integran en sistemas de SHM que pueden predecir el comportamiento de la estructura a lo largo del tiempo.
- Esto permite planificar el mantenimiento antes de que ocurran fallos críticos.

3.2.10 Integración de sistemas de monitoreo

Los sensores inteligentes forman parte de una red más amplia de monitoreo estructural, trabajando en conjunto para proporcionar una visión completa del estado de la infraestructura, el funcionamiento de los sensores combina mediciones precisas, análisis local y comunicación eficiente para la proporcionar datos en tiempo real sobre la integridad estructural, lo que permite prevenir fallos y extender la vida útil de las infraestructuras. (Alhadi, 2021)

3.3 Teoría de la gestión de riesgos y toma de decisiones

La teoría de la gestión de riesgos y la toma de decisiones en el contexto del monitoreo de salud estructural (SHM) se centra en evaluar y mitigar los riesgos relacionados con el deterioro de las estructuras, utilizando datos recopilados por los sensores inteligentes para garantizar la seguridad, optimizar el mantenimiento y prolongar la vida útil de las infraestructuras. (Monte, 2017)

3.3.1 Gestión de riesgos en SHM

La gestión de riesgos aplicada al SHM implica identificar, evaluar y mitigar los riesgos asociados con el comportamiento estructural mediante datos precisos y en tiempo real proporcionados por sensores. (Monte, 2017). Incluye:

- Identificación de Riesgos
- Naturaleza de los riesgos estructurales.
- Fallas por fatiga o deformaciones excesivas.
- Daños por eventos naturales, como sismos, viento, o inundaciones.
- Degradación a largo plazo debido a corrosión, humedad o cargas constantes.

- Factores Externos: Fatores como el tráfico, el ambiente y el clima que influyen en la salud estructural.
- Monitoreo y Mitigación
    - Monitoreo Continuo: Los sensores permiten supervisar en tiempo real el comportamiento estructural, identificando signos de riesgo temprano.
    - Mantenimiento predictivo: a partir de los datos, se pueden programar intervenciones antes de que ocurran fallos críticos, optimizando los costos y minimizando interrupciones.
- Evaluación de Riesgos, donde los sensores estructurales permiten recopilar datos que se usan para:
    - Calcular probabilidad de fallos, con base en patrones de daño detectados por los sensores.
    - Evaluar consecuencias: Los impactos económicos, humanos y operativos que pueden generar una falla estructural.

3.3.2 Toma de decisiones en SHM

La toma de decisiones en SHM implica seleccionar las mejores estrategias de mantenimiento, reparación o intervención basándose en los datos recopilados por los sensores. (Monte, 2017). Este proceso incluye:

- Análisis Basando en Datos
    - Análisis de confiabilidad estructural: Los datos de sensores (como deformaciones, vibraciones o temperaturas) permiten modelar el comportamiento estructural y predecir fallas futuras.
    - Evaluación costo-beneficio: Se analiza si la reparación o reemplazo de una estructura justifica la inversión en comparación con el riesgo que representa mantenerla sin intervención.
- Priorización de Intervenciones
    - Riesgo crítico: Se toman decisiones inmediatas en casos donde los sensores detectan un riesgo inminente, como grietas críticas o deformaciones graves.
    - Mantenimiento planificado: Basado en patrones detectados, las acciones se programan para minimizar interrupciones operativas y maximizar la eficiencia.
- Integración de Modelos Predictivos

- Modelos de aprendizaje automático: Algoritmos que analizan grandes volúmenes de datos de sensores para predecir tendencias de deterioro.
- Simulación numérica: Uso de software para simular el comportamiento estructural en base a los datos recopilados, ayudando en decisiones estratégicas.

3.3.3 Factores que influyen en la toma de decisiones

- Fiabilidad de los sensores
  - Sensores con mayor precisión y menor tasa de error permiten una mejor identificación de riesgos.
  - Sistemas de auto calibración y autodiagnóstico reducen incertidumbres.
- Disponibilidad de Recursos
  - Decisiones influenciadas por el presupuesto disponible para mantenimiento y reparación.
  - Priorización basada en la criticidad de las estructuras monitoreadas.
- Impacto Humana y Económico
  - Infraestructuras críticas (puentes, hospitales, aeropuertos) requieren decisiones más rápidas y efectivas para minimizar riesgos a la población y pérdidas económicas.

3.3.4 Modelos teóricos para la gestión de riesgos y decisiones

El método de evaluación de riesgos William T. Fine es un enfoque cuantitativo utilizado para analizar y priorizar riesgos. Este método combina factores de severidad, exposición y probabilidad de un evento para calcular un índice de riesgo. También permite evaluar la relación costo-beneficio de las medidas correctivas propuestas. (Doebling, 1998). Es ampliamente utilizado en diferentes áreas, incluidas las relacionadas con la ingeniería estructural y el monitoreo de salud estructural (SHM) con la siguiente formula:

$$R = S \times E \times P$$

Donde:

- S es la severidad
- E es la Exposición
- P es la probabilidad

- Componentes del Método William T. Fine
  - Severidad (S): Se refiere a la gravedad del daño o impacto que puede causar el evento de riesgo, ya sea en términos humanos, estructurales, económicos o

ambientales. Se clasifica en una escala numérica (generalmente de 1 a 10), donde 1 es un impacto mínimo y 10 es catastrófico.
    - Exposición (E): Mide la frecuencia con la que ocurre el evento o las condiciones que aumentan la probabilidad de que el evento suceda. También se clasifica en una escala numérica (por ejemplo, de 1 a 10), considerando cuántas veces al día, mes o año ocurre la exposición.
    - Probabilidad (P): Indica la posibilidad de que ocurra el evento de riesgo, basado en datos históricos, estudios o la experiencia. Se puntúa en una escala que suele ir de 1 (muy improbable) a 10 (muy probable).
- Cálculo del índice de riesgo
    - 0 a 20: Riesgo bajo (tolerable, no requiere acción inmediata).
    - 21 a 70: Riesgo moderado (requiere medidas a mediano plazo).
    - 71 a 200: Riesgo alto (requiere acción inmediata).
    - Mayor de 200: Riesgo crítico (requiere intervención urgente y medidas correctivas inmediatas).
- Aplicación en el SHM
    - Identificar riesgos estructurales específicos: Por ejemplo, evaluar el riesgo de colapso de un puente debido a fisuras detectadas por sensores.
    - Priorizar intervenciones de mantenimiento: Asignar recursos a los elementos estructurales con mayor índice de riesgo.
    - Evaluar medidas correctivas: Comparar costos de reparación o refuerzo con la reducción del riesgo estimada.
- Ventajas del método
    - Proporciona resultados numéricos que facilitan la comparación entre diferentes riesgos.
    - Puede adaptarse a diversas industrias y tipos de riesgos.
    - Su metodología es fácil de entender y aplicar.
- Análisis costo-riesgo
    - Proporciona resultados numéricos que facilitan la comparación entre diferentes riesgos.
    - Puede adaptarse a diversas industrias y tipos de riesgos.
    - Su metodología es fácil de entender y aplicar.
- Arboles de decisión

    - Usados para evaluar diferentes estrategias de intervención considerando el riesgo y costo asociado a cada una.
- Análisis de modos y efectos de fallo
    - Identifica y clasifica posibles fallos estructurales y sus efectos, priorizando aquellos con mayor impacto

3.3.5 Beneficios de integrar sensores SHM en la gestión de riesgos

- Reducción de incertidumbre: Los datos precisos de los sensores eliminan conjeturas en la toma de decisiones.
- Mayor seguridad: Al identificar riesgos a tiempo, se reducen fallos catastróficos.
- Optimización de recursos: Se priorizan acciones de mantenimiento donde más se necesitan, maximizando la eficiencia.

3.4 Procesamiento de análisis de datos

El procesamiento de señales y análisis de datos en el Monitoreo de Salud Estructural (SHM) es un conjunto de técnicas utilizadas para extraer, analizar e interpretar la información obtenida de los sensores. Esto permite evaluar el estado de las estructuras, identificar patrones de deterioro y predecir posibles fallas. (Palacio, 2022). A continuación, se detallan los aspectos más relevantes:

3.4.1 Etapas del procesamiento de señales en SHM

El procesamiento de señales en SHM consta de varias etapas según (Doebling, 1998). Desde la adquisición de datos hasta su interpretación:

- Adquisición de señales
    - Sensores: Los sensores empleados (vibración, deformación, temperatura, entre otros) generan señales en tiempo real sobre el comportamiento de la estructura.
    - Instrumentación: Los dispositivos de adquisición convierten señales analógicas (como voltajes) en datos digitales para su posterior análisis.
- Preprocesamiento
    - Filtrado: Se eliminan componentes no deseadas, como ruido ambiental o eléctrico.
    - Filtros de paso bajo: Eliminan frecuencias altas no relevantes.
    - Filtros de paso alto: Suprimen componentes de baja frecuencia, como el ruido de fondo.

    - Normalización: Ajuste de las señales para que sean comparables entre sí.
    - Interpolación: Llenado de datos faltantes para asegurar la continuidad.
- Extracción de características
    - Transformada de Fourier (FFT): Descompone señales en sus componentes de frecuencia para analizar vibraciones.
    - Transformada Wavelet: Analiza señales en el dominio tiempo-frecuencia, ideal para eventos transitorios como fisuras.
    - Análisis de picos y amplitudes: Útil para detectar daños o cambios bruscos en el comportamiento estructural.
- Comprensión y reducción de dimensionalidad
    - Compresión de datos: Reduce el tamaño de los datos manteniendo la información esencial, facilitando el almacenamiento y transmisión.
    - Análisis de componentes principales (PCA): Reduce dimensionalidad y destaca las características más relevantes para el monitoreo.

3.4.2 Análisis de datos en SHM

- Técnicas de análisis
    - Análisis Modal: Identifica las propiedades dinámicas de la estructura (frecuencia natural, modos de vibración) y detecta cambios que puedan indicar daños.
    - Análisis de Espectros de Potencia: Evalúa la distribución de la energía de la señal en el dominio de frecuencia.
    - Análisis de Fatiga: Usa datos de deformación para predecir el tiempo de vida útil de componentes estructurales.
- Métodos de detección de daños
    - Métodos Basados en Vibración: Cambios en las frecuencias naturales pueden indicar daño estructural.
    - Métodos Basados en Deformación: Analizan deformaciones medidas por sensores de fibra óptica o strain gauges.
    - Técnicas de Detección Acústica: Identifican micro fisuras a partir de señales ultrasónicas o acústicas.
- Modelos predictivos
    - Machine Learning (ML): Algoritmos que analizan patrones en los datos para predecir daños futuros.

- Redes Neuronales: Modelos avanzados para correlacionar datos complejos de múltiples sensores.
- Regresión Lineal y Árboles de Decisión: Métodos simples para predecir fallas basadas en variables clave.
- Modelos Físicos: Simulan el comportamiento estructural basado en datos de sensores y propiedades conocidas del material.

3.4.3 Aplicaciones del procesamiento de señales y datos en SHM

- Detección de daños
  - Identificación de fisuras, corrosión, asentamientos y otros defectos.
  - Sensores acústicos y ultrasónicos permiten detectar grietas internas no visibles.
- Evaluación de desempeño
  - Análisis de vibraciones para evaluar la estabilidad estructural bajo cargas dinámicas (sismos, tráfico, viento).
  - Monitoreo del comportamiento bajo cargas estáticas prolongadas.
- Pronóstico de la vida útil
  - Análisis de fatiga para estimar el tiempo restante antes de que ocurran fallas críticas.
  - Modelos predictivos para determinar cuándo y dónde se necesita mantenimiento.
- Optimización de mantenimiento
  - Identificación de las áreas que requieren atención prioritaria para reducir costos.
  - Mantenimiento predictivo en lugar de reactivo, basado en datos históricos y tendencias.

3.4.4 Herramienta de sofware para el análisis de señales de datos

- MATLAB: Muy utilizado para procesamiento de señales, análisis modal y desarrollo de modelos predictivos.
- Python: Con bibliotecas como SciPy, NumPy y TensorFlow para análisis de señales, aprendizaje automático y visualización.

El procesamiento de señales y análisis de datos es una parte integral del SHM que permite transformar la información bruta de los sensores en conocimiento accionable. Con el avance de las tecnologías de sensores y algoritmos de análisis, estas técnicas continúan

evolucionando, mejorando la seguridad y la eficiencia en la gestión de infraestructuras. (Monte, 2017).

3.5 Arquitectura del IoT en SHM

La arquitectura de de IoT (Internet de las Cosas) en el contexto del Monitoreo de Salud Estructural (SHM) está diseñada para integrar sensores, redes de comunicación, procesamiento de datos y sistemas de análisis para monitorear en tiempo real el estado de las estructuras. A través de IoT, es posible recopilar datos continuos, analizar patrones de deterioro y tomar decisiones basadas en información precisa. (Doebling, 1998)

3.5.1 Capas de la arquitectura IoT en SHM

La arquitectura de IoT para SHM se organiza en diferentes capas que colaboran entre sí para garantizar el flujo eficiente de datos y la generación de información útil.

3.5.2 Capa de percepción (Sensores y Actuadores)

Captura de datos físicos relacionados con la salud estructural, como deformaciones, vibraciones, temperatura, humedad o corrosión con los siguientes elementos:

- Sensores inteligentes: Incluyen sensores de vibración, fibra óptica, strain gauges, acelerómetros y sensores acústicos.
- Sensores IoT habilitados: Equipados con módulos de comunicación para enviar datos directamente.

3.5.3 Capa de red (Comunicación)

Transmite los datos recopilados por los sensores a sistemas de almacenamiento o análisis con las siguientes redes:

Redes inalámbricas	Redes cableadas
Wi-Fi (para distancias cortas)	Ethernet para conexiones locales estables y de alta velocidad
LoRaWAN (distancias largas con bajo consumo energético)	Fibra óptica para transmisión rápida y confiable
Zigbee o Z-Wave (redes de sensores en áreas locales)	
Redes celulares (3G, 4G, 5G) para grandes volúmenes de datos	

Tabla 2 - Redes inalámbricas y cableadas
(Doebling, 1998)

3.5.4 Capa de procesamiento de los datos recopilados y extracción de información

Es útil para la evaluación estructural con los siguientes tipos de procesadores:

Computación en el borde (Edge Computing)	Computación en la nube (Cloud Computing)	Plataformas IoT
Procesamiento local cerca del punto de adquisición (en sensores o gateways).	Procesamiento centralizado en servidores remotos	Frameworks como Microsoft o Google Cloud IoT que permiten integrar sensores, almacenar datos y ejecutar modelos predictivos
Reduce la latencia y el ancho de banda necesario.	Ideal para análisis complejos, almacenamiento masivo de datos y aprendizaje automático.	
Detecta deformaciones críticas en tiempo real.		

Tabla 3 - Procesamiento y extracción de los datos recopilados (Doebling, 1998)

3.5.5 Capa de aplicación

Función principal: Presentación de los resultados y análisis a los usuarios finales. (Doebling, 1998). Permitiendo la toma de decisiones con los siguientes elementos:

- Interfaces gráficas: Planes de control accesibles desde computadoras, tablets o smartphones.
- Alertas: Notificaciones automáticas (por email, SMS o aplicaciones móviles) en caso de detección de fallas críticas.
- Control remoto: Permite a los ingenieros ajustar parámetros o intervenir en los sistemas de monitoreo a distancia.

- Modelos predictivos: Sistemas basados en IA o aprendizaje automático que pronostican el deterioro y sugieren intervenciones.
- Flujo de trabajo en un sistema IoT para SHM
- Captura de datos: Los sensores recopilan información física de la estructura (vibraciones, temperaturas, deformaciones, etc.).
- Transmisión de datos: Los datos son enviados mediante redes de comunicación a un nodo central o al almacenamiento en la nube.
- Procesamiento local: Un gateway o dispositivo edge analiza datos preliminares (como detección de anomalías inmediatas).
- Almacenamiento y análisis: Los datos se procesan en la nube o en servidores locales para realizar análisis más avanzados.
- Presentación de resultados: Los resultados son accesibles a través de plataformas web o aplicaciones móviles.

3.5.6 Flujo de aplicación

- Captura de datos: Los sensores recopilan información física de la estructura (vibraciones, temperaturas, deformaciones, etc.).
- Transmisión de datos: Los datos son enviados mediante redes de comunicación a un nodo central o al almacenamiento en la nube.
- Procesamiento local: Un gateway o dispositivo edge analiza datos preliminares (como detección de anomalías inmediatas).
- Almacenamiento y análisis: Los datos se procesan en la nube o en servidores locales para realizar análisis más avanzados.
- Presentación de resultados: Los resultados son accesibles a través de plataformas web o aplicaciones móviles.
- Acción: Basado en los resultados, se ejecutan acciones, como mantenimiento preventivo o correcciones estructurales.

3.5.7 Ventajas de usar IoT en SHM

- Monitoreo en tiempo real: Detección temprana de anomalías antes de que se conviertan en fallas críticas.
- Optimización de mantenimiento: Implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, reduciendo costos y tiempo.

- Acceso remoto: Ingenieros y administradores pueden monitorear estructuras desde cualquier ubicación.
- Análisis avanzado: Integración con algoritmos de aprendizaje automático para predicciones más precisas.
- Escalabilidad: Fácil integración de nuevos sensores o nodos en el sistema existente.
- Desafíos de la arquitectura IoT en SHM
- Seguridad de datos: Los sistemas IoT son vulnerables a ciberataques, requiriendo protocolos de cifrado y autenticación robustos
- Conectividad: En ubicaciones remotas, garantizar una comunicación confiable puede ser un desafío.
- Gestión de Datos: La gran cantidad de datos generados requiere infraestructura para almacenamiento y procesamiento eficiente.
- Costo inicial: La implementación de sensores IoT y redes avanzadas puede tener un alto costo inicial.

La arquitectura de IoT en SHM permite conectar sensores, redes, sistemas de procesamiento y plataformas de visualización para crear un ecosistema eficiente y escalable. Esto resulta en un monitoreo estructural más preciso, seguro y accesible, mejorando la gestión de infraestructuras y garantizando su seguridad a largo plazo. (Monte, 2017)

3.6 Teoría de fiabilidad y seguridad estructural

El SHM contribuye directamente a la teoría de fiabilidad y seguridad al proporcionar datos actualizados y en tiempo real sobre el comportamiento estructural. (Monte, 2017). Permitiendo evaluar las siguientes áreas clave como:

- Detección de daños
    - Sensores inteligentes detectan fisuras, corrosión, deformaciones y cambios en la dinámica estructural.
    - Los datos ayudan a actualizar los modelos de fiabilidad considerando la nueva condición de la estructura.
- Monitoreo de cargas y respuestas
    - Los sistemas SHM permiten registrar cargas extremas (como sismos o viento) y medir la respuesta estructural en tiempo real.
    - Esto permite comparar la demanda real con la capacidad de diseño, en donde: R(t) = Resistencia > Demanda

        - Resistencia: Capacidad estructural frente a cargas.
        - Demanda: Cargas externas aplicadas o acciones.
        - R(t): Fiabilidad en el tiempo.
- Predicción de fallos
    - Utilizando modelos de degradación y datos históricos, el SHM permite predecir el tiempo restante antes de que se alcance un estado crítico.
    - Se aplican técnicas como análisis de fatiga y mecánica de fractura.
- Actualización de modelos de fiabilidad
    - Los datos recopilados permiten actualizar modelos probabilísticos y reducir incertidumbres, mejorando las estimaciones de fiabilidad y seguridad.

4. ANALISIS Y COMPARACION DE COSTOS DE LOS CIERTOS SENSORES INTELIGENTES UTILIZADOS EN EL PAIS PARA EL SHM

4.1 Tipos de sensores

El el Monitoreo de Salud Estructural (SHM) se ha convertido en una práctica esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de infraestructuras criticas como puentes, edificios y otras construcciones civiles. La selección de sensores adecuados es fundamental para obtener datos precisos y fiables sobre el estado de estas estructuras. (COTECNO, 2020) A continuación, los tipos de sensores más comúnmente utilizados en el SHM en Ecuador:

4.1.1 Sensores de deformación

Estos sensores miden las deformaciones o cambios en la forma de los elementos estructurales bajo carga, proporcionando información crucial sobre el comportamiento de la estructura. (Margarita Varón-Durán, 2014)



Ilustración 2- Sensor de deformación (Academic, 2023)

4.1.2 Acelerómetros

Utilizados para detectar vibraciones y movimientos dinámicos de las estructuras, los acelerómetros son esenciales para evaluar la respuesta estructural antes cargas dinámicas como sismos o tráfico vehicular. (Hertz, 2020)



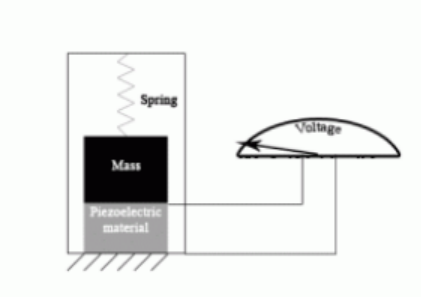


Ilustración 3- Acerelometro (Academic, 2023)

Ilustración 4- Sistema con tensión mecánica. (Hertz, 2020)

4.1.3 Sensores de temperatura y humedad

La medición de las conficiones ambientales es vital, ya que factores como la temperatura u la humedad pueden influir significativamente en el comportamiento de los materiales estructurales. La tecnología de sensores inalámbricos permite el monitoreo en tiempo real y a largo plazo de estos parámetros, facilitando su instalación y operación. (COTECNO, 2020)



Ilustración 5- Sensor de temperatura y humedad (Academic, 2023)

4.1.4 Inclinómetros

Estos dispositivos miden cambios en la inclinación o desplazamientos angulares de la estructura, siendo especialmente útiles para detectar asentamientos o movimientos anómalos en edificación y puentes. (COTECNO, 2020)



Ilustración 6- Inclinómetro analógico vertical de tipo capacitivo con salida amplificada en corriente y voltaje. Encapsulado plástico robusto IP65 salida cable. (Sensing, 2021)

4.1.5 Sensores de fibra óptica (FBG)

Los sensores basados en redes en fibra óptica, es una microestructura que típicamente tiene una longitud de unos pocos milímetros y que puede foto inscribirse en el núcleo de una fibra de telecomunicaciones estándar (FBG) ofrecen alta precisión y resistencia a condiciones ambientales adversas, siendo empleados para medir deformaciones, temperatura y otros parámetros en tiempo real. (Navarro-Henríquez, 2014)



Ilustración 7- Inclinómetro analógico vertical de tipo capacitivo con salida amplificada en corriente y voltaje. Encapsulado plástico robusto IP65 salida cable. (Navarro-Henríquez, 2014)

4.1.6 Sensores de corrosión

Estos sensores son utilizados en su mayor parte en estructuras metálicas, especialmente en ambientes húmedos o salinos, es fundamental monitorear la corrosión. Sensores específicos permiten detectar y evaluar el grado de corrosión, facilitando el mantenimiento preventivo. (Andrade, 2008)

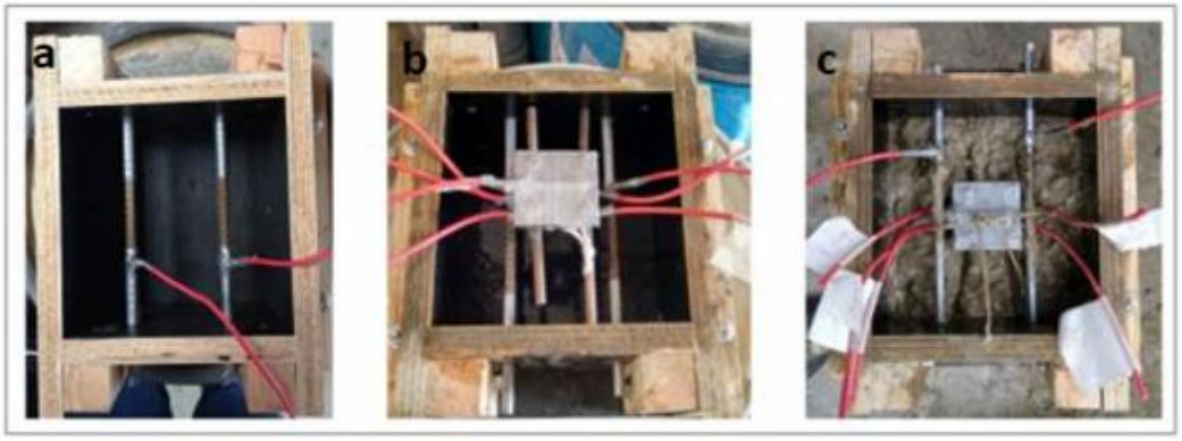


Ilustración 8- Sensor de corrosión para monitorear estructuras de hormigón armado (Andrade, 2008)

4.1.7 Sensores de desplazamiento

Estos sensores miden movimientos lineales o angulares en componentes estructurales, ayudando a identificar desplazamientos que puedan comprometer la integridad de la estructura. (COTECNO, 2020)



Ilustración 9- Los sensores de desplazamiento (medida, 2021)

4.1.8 Redes de sensores inalámbricos (WSN)

La implementación de redes de sensores inalámbricos permite un monitoreo continuo y en tiempo real de diversas variables estructurales, facilitando la detección temprana de fallas y la toma de decisiones informadas. (COTECNO, 2020). Por ejemplo, en Ecuador se ha desarrollado un prototipo de red de sensores inalámbricos para el monitoreo en tiempo real de la salud estructural de puentes, permitiendo la detección temprana de fallas.

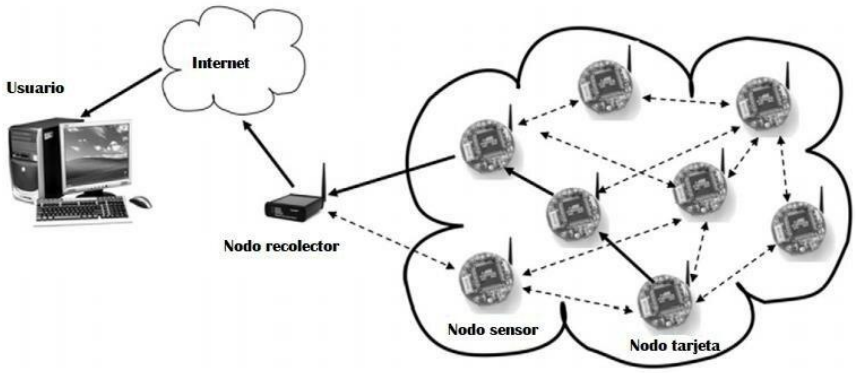


Ilustración 10- Redes de sensores inalambricos (SIMANCAS-GARCÍA, 2000)

4.2 Análisis de los costos para la utilización de sensores inteligentes en una estructura

4.2.1 Costos de adquisición

Los sensores inteligentes, utilizados en estructuras para monitoreo y control, varían en costo según su tecnología, marca, y funcionalidad. (Quispe Moran & Nuñez Avellaneda, 2023). Algunos ejemplos de costos estimados por tipo de sensor son:

- Sensores de deformación y esfuerzo (strain gauges):
    - Sensor de cuerda vibrante: $300 - $800 cada uno.
    - Sensores de fibra óptica: $1,000 - $5,000 cada uno (dependiendo de la longitud y sensibilidad).
- Acelerómetros:
    - Acelerómetro: $100 - $500 por unidad.
    - Acelerómetro piezoeléctrico (alta precisión): $1,000 - $3,000 cada uno.
- Sensores de desplazamiento y movimiento:
    - Sensores LVDT: $200 - $1,500 cada uno.
    - Sensores de inclinación: $500 - $2,000 cada uno.
- Sensores ambientales (temperatura, humedad):
    - Sensores de bajo costo: $50 - $200 por unidad.
    - Sensores industriales: $500 - $1,000 cada uno.

4.2.2 Costos de instalación

La instalación incluye la preparación de la estructura, integración de sensores y configuración del sistema. (Quispe Moran & Nuñez Avellaneda, 2023) Factores clave a considerar:

- Mano de obra especializada: Puede costar entre $20 y $50 por hora dependiendo de la región y la complejidad del trabajo.
- Equipos y herramientas auxiliares: $1,000 - $5,000 para proyectos grandes.
- Cableado y conectividad: $200 - $1,000 según la cantidad y longitud requerida.

4.2.3 Costos de integración y comunicación

Sensores inteligentes requieren integración con sistemas de monitoreo y transmisión de datos:

- Unidades de adquisición de datos: $3,000 - $10,000 por unidad.
- Redes de comunicación (inalámbrica, IoT): $1,000 - $3,000 por instalación.
- Plataformas de monitoreo en la nube: Suscripciones mensuales de $100 - $500 o desarrollos personalizados ($10,000 - $50,000).

4.2.4 Costos de mantenimiento

El mantenimiento asegura la funcionalidad y precisión de los sensores:

- Inspección regular y calibración: $1,000 - $5,000 anuales dependiendo del número de sensores.
- Reparación de dañados: $500 - $2,000 anuales.
- Actualización de software o plataformas: $1,000 - $3,000 cada pocos años.

4.2.5 Costos de análisis e interpretación de datos

- Contratar expertos para interpretar los datos generados puede costar entre $50 y $200 por hora.
- Implementación de algoritmos de análisis en tiempo real (como inteligencia artificial): $5,000 - $30,000 dependiendo de la complejidad.

Concepto	Rango de costos (USD)
Adquisición de sensores	$5,000 - $50,000
Instalación	$2,000 - $10,000

Integración y comunicación	$5,000 - $30,000
Mantenimiento y operación anual	$1,000 - $10,000
Análisis de datos	$2,000 - $10,000
Costo total inicial	$15,000 - $100,000

Tabla 4 – Resumen de costos estimados (Quispe Moran & Nuñez Avellaneda, 2023) y (Nacional, 2025)

Según datos obtenidos, para la instalación de los sensores en una estructura, se podría realizar la instalación y configuración básica con el 10% al 15% de su costo, tomando en cuenta el lugar donde se vaya a realizar el diagnóstico de la estructura y así obtener mejores resultados.

4.3 Criterio de ubicación de sensores en una estructura

La frecuencia con la que se recomienda instalar sensores inteligentes para detectar fallas críticas en una estructura depende de varios factores, como el tipo de estructura, su uso, las condiciones ambientales, los materiales de construcción, y los riesgos asociados. Sin embargo, hay algunos principios generales que pueden guiar esta decisión. (Miguel Ángel Pérez Cardozo, 2012)

4.3.1 Diseño inicial de la estructura

Edificaciones nuevas: Si la estructura es nueva, los sensores suelen instalarse como parte de un sistema de monitoreo estructural permanente (SHM). Esto permite el monitoreo en tiempo real desde el inicio de la vida útil de la estructura. (Miguel Ángel Pérez Cardozo, 2012)

4.3.2 Evaluación de estructuras existentes

- Estructuras críticas o antiguas: En puentes, presas, torres, o edificios de importancia estratégica (hospitales, plantas nucleares, etc.), se recomienda instalar sensores una vez que la estructura supere el 50-60% de su vida útil estimada o antes si hay señales de desgaste.
- Después de eventos extremos: Si la estructura ha estado expuesta a eventos como terremotos, inundaciones, fuertes vientos o sobrecargas, los sensores pueden instalarse para monitorear el impacto del daño acumulado.

4.3.3 Frecuencia de inspección y actualización

- Monitoreo continuo: En estructuras de alta criticidad (puentes grandes, plantas industriales), los sensores inteligentes se instalan de manera fija para monitoreo continuo. Esto permite detectar problemas en tiempo real y realizar mantenimiento predictivo.
- Monitoreo periódico: En estructuras de menor riesgo, los sensores pueden instalarse temporalmente durante evaluaciones cada 3-5 años o según el programa de mantenimiento estructural.

4.3.4 Factores adicionales para considerar

- Los sensores pueden medir distintos parámetros, como deformación, vibración, temperatura, humedad, corrosión, o fisuras. El tipo y número de sensores dependerá del problema específico que se quiera detectar.
- La ubicación de los sensores es más importante instalar sensores en puntos críticos de la estructura (uniones, zonas de máxima tensión, apoyos, etc.) que en intervalos fijos.
- Las condiciones ambientales agresivas la estructura (salinidad, humedad, temperaturas extremas), el monitoreo debe ser más frecuente y constante.

4.3.5 Recomendaciones prácticas

- En estructuras nuevas o críticas se debe instalar sistemas permanentes desde el diseño inicial.
- Realizar un mantenimiento periódico cada 3-5 años en estructuras menos críticas y reforzar con sensores temporales cuando sea necesario.
- Actualización tecnológica: Revisar cada 10 años los sistemas de monitoreo existentes para incorporar nuevas tecnologías o reemplazar sensores obsoletos.

4.4 Beneficios del monitoreo con sensores inteligentes

4.4.1 Beneficios generales de monitoreo con sensores inteligentes.

El uso de sensores inteligentes en el Monitoreo de Salud Estructural (SHM) ofrece múltiples beneficios al proporcionar datos en tiempo real y análisis precisos del estado de las estructuras. Estos sensores integran tecnología avanzada para medir y evaluar diversas variables estructurales, como deformaciones, vibraciones, temperatura o corrosión, optimizando el mantenimiento y la seguridad. (Barma, 2022)

Detección Temprana de Daños	- Los sensores inteligentes permiten identificar anomalías estructurales (como fisuras, corrosión o deformaciones) en sus etapas iniciales, antes de que se conviertan en fallas críticas. - Facilitan la implementación de acciones correctivas oportunas, reduciendo el riesgo de colapsos.
Monitoreo en Tiempo Real	- Proveen datos continuos sobre el estado estructural, lo que permite a los ingenieros tomar decisiones informadas en tiempo real. - Mejora la capacidad de respuesta frente a eventos extremos como terremotos o tormentas.
Reducción de Costos de Mantenimiento	- Permiten la transición de un mantenimiento reactivo o preventivo a un mantenimiento predictivo, optimizando los recursos y reduciendo gastos innecesarios. - Minimiza el tiempo de inactividad de las estructuras.
Extensión de la Vida Útil de las Estructuras	- Monitorear las condiciones estructurales y ambientales ayuda a mitigar el deterioro a largo plazo. - Los datos precisos permiten planificar reparaciones que prolonguen la vida útil de la infraestructura.
Aumento de la Seguridad	- Los sensores inteligentes mejoran la capacidad para identificar riesgos potenciales, protegiendo tanto a los usuarios como a las estructuras mismas. -Generan alertas tempranas en situaciones de emergencia, como movimientos inusuales o sobrecargas.
Optimización del Diseño y Construcción	- Los datos recopilados por los sensores pueden utilizarse para validar diseños estructurales y mejorar futuros proyectos

4.4.2 Beneficios técnicos y operativos

Precisión y Fiabilidad de los Datos	- Los sensores inteligentes recopilan datos con alta precisión, mejorando la calidad del análisis estructural.

	- Reducen la dependencia de inspecciones visuales y técnicas manuales, que pueden ser menos confiables.
Automatización y Conectividad	- Integran tecnologías de IoT (Internet de las Cosas) para transmitir datos de manera automática a plataformas de análisis y visualización. - Facilitan la automatización de procesos de monitoreo y generación de reportes.
Compatibilidad con Análisis Avanzados	Los datos obtenidos por sensores inteligentes se pueden integrar con: - Modelos predictivos: Para estimar la evolución del daño. - Gemelos digitales: Para simular el comportamiento de la estructura en tiempo real. - Aprendizaje automático: Para identificar patrones de deterioro.
Adaptabilidad y Escalabilidad	-Los sistemas de sensores inteligentes son modulares, permitiendo su expansión o adaptación a nuevas necesidades. - Son compatibles con diversas estructuras, desde puentes y edificios hasta plantas industriales y presas.

4.4.3 Beneficios para diferentes tipos de estructuras

Puentes y Viaductos	-Monitoreo continuo de deformaciones y vibraciones debido a cargas dinámicas (tráfico, viento). -Prevención de fallos por fatiga o corrosión en componentes críticos.
Edificios	-Detección de movimientos estructurales durante sismos, ayudando a evaluar su estabilidad inmediatamente después del evento. -Monitoreo de la calidad del concreto y conexiones estructurales.
Presas y Estructuras Hidráulicas	-Supervisión de filtraciones, asentamientos y movimientos diferenciales.

	-Evaluación del impacto de cambios ambientales en la estabilidad de la estructura.
Plantas Industriales	-Monitoreo de vibraciones y fatiga en equipos críticos. -Detección de corrosión o degradación en ambientes agresivos.

4.4.4 Beneficios ambientales

Minimización del Impacto Ambienta	-Detectar fallas estructurales a tiempo evita desastres que puedan tener consecuencias ambientales significativas. -Reduce la necesidad de intervenciones frecuentes que generan residuos.
Optimización del Uso de Materiales	Permite un diseño estructural más eficiente, disminuyendo el consumo excesivo de materiales gracias a datos precisos.
Ahorro Energético	La implementación de sensores inteligentes puede integrar monitoreo de eficiencia energética en sistemas estructurales.

4.4.5 Beneficios económicos

Reducción de Costos de Emergencias	Al prevenir fallos catastróficos, se evita incurrir en los altos costos de reparaciones de emergencia y responsabilidades legales.
Optimización de Recursos Humanos	Disminuye la necesidad de inspecciones manuales frecuentes, liberando recursos para tareas más críticas.
Aumento de la Rentabilidad de las Infraestructuras	Infraestructuras más seguras y duraderas generan confianza en su uso, maximizando su rentabilidad.

4.4.6 Beneficio en la toma de decisiones

Base para Decisiones Fundamentadas	Los datos recopilados proporcionan información detallada y actualizada para priorizar inversiones y planificar intervenciones.

Evaluación de Riesgos en Tiempo Real	Contribuyen al análisis de riesgos y a la gestión proactiva de fallos.
Cumplimiento Normativo	Facilitan el cumplimiento de normativas de seguridad y mantenimiento, al documentar el estado estructural con datos fiables.

Los beneficios que se mostraron fueron elaborados con información obtenida de (SensorGO, 2023)

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Los sensores detectan daños tempranos, agilizan decisiones y reducen costos de reparaciones y colapsos estructurales.
- La integración de sensores mejora la seguridad estructural, permitiendo evaluación precisa y constante, optimizando respuestas ante sismos, cargas excesivas y fatiga estructural.
- Los sistemas de sensores se adaptan a diversas estructuras y entornos, incluyendo puentes, edificios, presas e infraestructuras críticas. Los datos proporcionados por los sensores permiten implementar estrategias de mantenimiento predictivo y preventivo, para así reducir los mantenimientos y optimizar recursos.
- México, Chile y Colombia cuentan con normativas para sensores de monitoreo estructural, que están enfocados mitigar riesgos y garantizar seguridad.

Recomendaciones

- Adaptar el diseño del sistema de sensores a las necesidades específicas de la estructura, considerando factores como el tipo de material, la ubicación geográfica, las condiciones ambientales y el tipo de carga que soporta.
- Elegir sensores adecuados en función del parámetro a monitorear, como deformación, vibración, temperatura, humedad o corrosión.
- Incorporar plataformas avanzadas de análisis de datos como inteligencia artificial y aprendizaje automático, para interpretar los datos de los sensores y proporcionar predicciones más precisas sobre el comportamiento estructural.

- Realizar chequeos regulares para calibrar y verificar el funcionamiento de los sensores, asegurando la precisión y confiabilidad de los datos recolectados.
- Capacitar personal encargados del monitoreo estructural en el manejo de los sensores y la interpretación de los resultados para maximizar el rendimiento del sistema.
- Asegurarse de que los sistemas de sensores cumplen con las normativas locales e internacionales sobre monitoreo estructural, garantizando su validez y aceptación en proyectos de ingeniería civil.
- Considerar el monitoreo estructural con sensores como una inversión a largo plazo, ya que los costos iniciales pueden ser elevados y los beneficios de seguridad y ahorro por reparaciones compensan los gastos iniciales.

Bibliografía

Academic, G. (2023). Tipos de sensores.

Alhadi, A. Y. (2021). Mejorar la gestión de activos: integración de gemelos digitales para la obtención continua de permisos y el cumplimiento normativo: una revisión sistemática de la literatura. *Revista de ingeniería de la construcción*.

Andrade, C. F. (8 de Novuembre de 2008). Sensor de corrosión para monitorear estructuras de hormigón armado: Ensayos en especímenes de hormigón armado.

Barma, N. T. (2022). Structural damage identification through variations in modal quantities using modal strain energy and mode shape curvature methods. *Innovative Infrastructure Solutions*.

CAICEDO J. M., D. S. (2000). *Health Monitoring Based on Component Transfer Engineering Mechanics Conference*. Texas: Proceedings of the 14th ASCE .

Chen, Y. Y. (2021). The metamaterial sensors for multi-parameter measurement in structural health monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*.

Cheng, Y. Y. (2024). Performance investigation on strain sensors with wavy structures for direction perception. *Sensors and Actuators A: Physical*.

China, M. i. (05 de Febrero de 2025). *Made in china*. Obtenido de https://sunmoonchina.en.made-in-china.com/product/NAhrTnYKatVF/China-Sm47-Yb1-Micro-Strain-Force-Sensor-1.html

ciudadanos, P. u. (5 de Febrero de 2025). *Autorización de ingreso de mercancías mediante Mensajería Acelerada o Courier de importación*. Obtenido de https://www.gob.ec/senae/tramites/autorizacion-ingreso-mercancias-mediante-mensajeria-acelerada-courier-importacion?utm_source=chatgpt.com

COTECNO. (2020). *Sensores para monitoreo de salud estructural.* Obtenido de F PRIME C SOLUTIONS, VIGILANCIA DE SALUD ESTRUCTURAL.

Doebling, A. (1998). Structural Healthy Monitoring in structural members.

Hertz. (02 de Abril de 2020). ABC del acelerometro Porgranas digitales. Maexico.

Instruments, P. (5 de Febrero de 2025). *PCE Instruments*. Obtenido de https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/aceler_metro-pce-instruments-aceler_metro-pce-vm-40c-det_5929702.htm

Jacoski, C. S. (2018). Perception about the use of monitoring systems in civil construction structures | Percepción sobre el uso de Sistemas de monitoreo en estructuras de construcción civil. *Revista Facultad de Ingenieria*.

Margarita Varón-Durán, C. A.-I. (01 de Marzo de 2014). Fiber bragg grating sensors' validation for strain and temperature. Bogota, Colombia.

medida, S. S. (11 de Junio de 2021). Sensores de desplazamiento. Bogota, Colombia.

Miguel Ángel Pérez Cardozo, J. A. (Agosto de 2012). Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras. Mexico.

Monte, G. (2017). Sensores inteligentes: características,evolución e impacto en la sociedad. *REVISTA ARGENTINA DE INGENIERÍA. CONSEJO FEDERAL DE DECANOS DE INGENIERÍA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA*. Argentina: Temas de Ingenieria.

Nacional, E. P. (4 de febrero de 2025). cotizacion de un estudio con acerelometros. Quito, Pichincha, Ecuador.

Navarro-Henríquez, F. (2014). *Structural Health Monitoring of Bridges with Fiber Bragg Grating Sensors*.

Palacio, J. C. (2022). *Monitoreo de salud estructural de edificios*. Obtenido de Innovación EAFIT / Transferencia de Tecnología y Conocimiento: https://www.eafit.edu.co/innovacion/transferencia/Paginas/monitoreo-de-edificios.aspx#:~:text=El%20monitoreo%20y%20salud%20estructural,en%20la%20disminuci%C3%B3n%20de%20resistencia.

Quispe Moran, M., & Nuñez Avellaneda, I. R. (01 de Diciembre de 2023). Análisis de costos para implementar un sistema de Monitoreo de la Salud Estructural del edificio multifamiliar Los Cerezos en Arequipa. Lima, Perú.

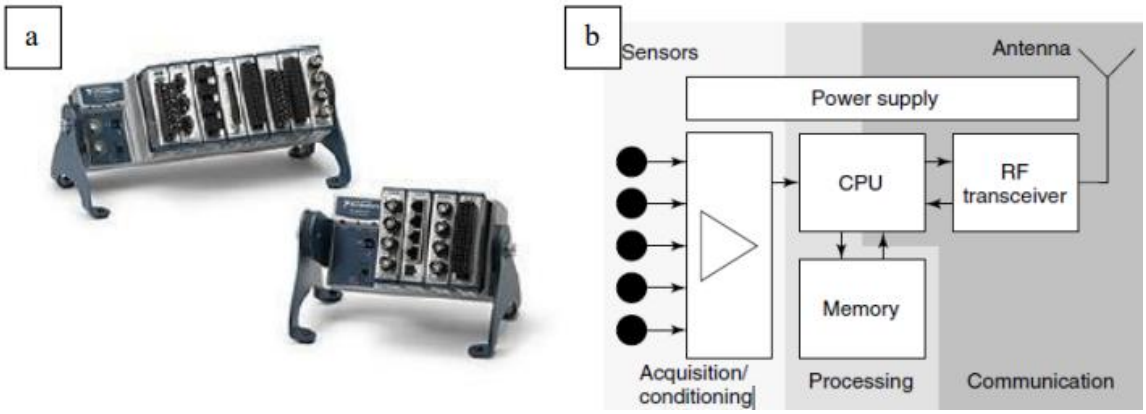
Sensing. (2021). *Sensores de medida Inclinometros capacitivos*.

SensorGO. (24 de Agosto de 2023). *SensorGO*. Obtenido de SensorGO.

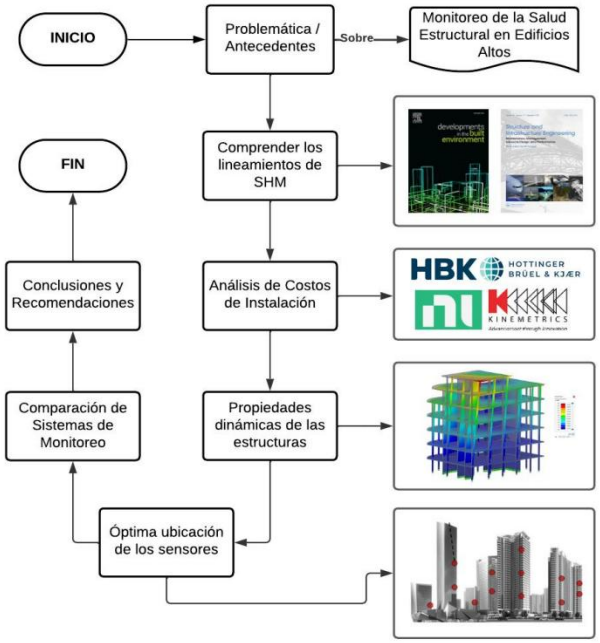
SIMANCAS-GARCÍA, J. (2000). Redes inalambricas de sensores para la teoria y aplicacion en estructuras.

Wang, Y. (2021). Aplicación del algoritmo de flujo óptico SURF mejorado en el sistema de monitoreo de seguridad de soporte sísmico. *Revista internacional de computación cognitiva en ingeniería*.

Anexos



Sistema de adquisición de datos: izquierda) plataforma convencional de adquisición de datos y derecha) hardware de medición inalámbrico



Flujograma de SHM (Quispe Moran & Nuñez Avellaneda, 2023)

Costos

1. Sensor Piezométrico

En la página Made in China el sensor piezométrico que se utiliza para medir la presión de aguas subterráneas, detalla el precio de $1000 - $10000, de tal manera que se puede adquirir como categoría 4x4, pero si no entra en esta categoría de 4x4 se debe cancelar los impuestos Corresponde al 15% sobre: Base imponible + ADVALOREM + FODINFA + ICE.

El costo de envío variara entre los $150 – 300$. (China, 2025)



Información básica.

Modelo NO.	KYZ	El tiempo de entrega	2-3 días laborables
Solicitud	Estudio geotécnico	Modo de instalación	Enterrado en el lugar
Tipo	Cuerda vibrante	Paquete de transporte	Caja de madera
Especificación	KYZ	Marca	SERVIDOR REAL
Origen	Porcelana	Código HS	9031809090
Capacidad de producción	5000 juegos/año		

Descripción del Producto

La celda de presión de agua intersticial de cuerda vibrante de la serie KYZ se utiliza para medir la presión de agua intersticial (permeación) en hormigón o cimientos a largo plazo, y puede medir simultáneamente la temperatura del punto enterrado. También se puede utilizar en la perforación piezométrica de tubos y cimientos añadiendo accesorios de apoyo.

Especificaciones

Rango de medición: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,6, 2,5, 4,0, 6,0 MPa

Resolución: ≤ 0,08 % FS

Error integral: ≤ 1,5 % FS

Temperatura de trabajo: -25 ºC -+60 ºC

2. Sensor de deformación o Deformímetro

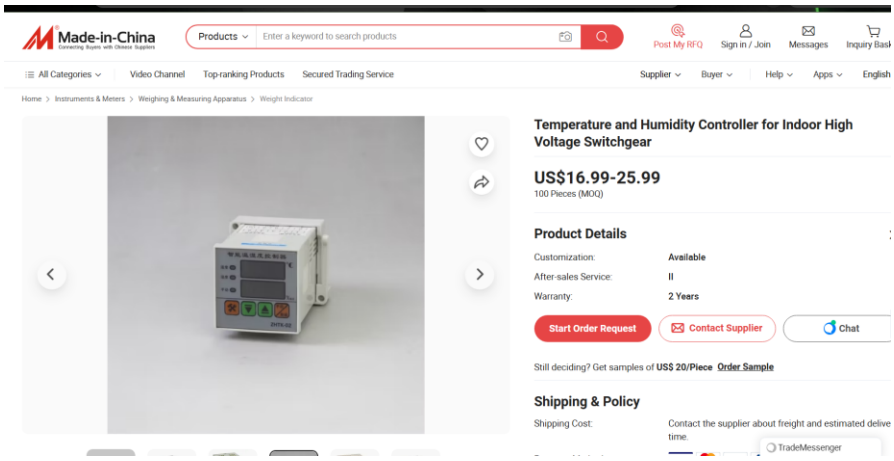
En una página Made in China el sensor de deformación detalla el precio de 10-99 unidades en un total de $391 y si son más de 100 unidades el precio sería de $299, como los sensores son pequeños se pueden importar de una manera 4x4 para no pagar impuestos, pero si no entra en esta categoría de 4x4 se debe cancelar los impuestos Corresponde al 15% sobre: Base imponible + ADVALOREM + FODINFA + ICE.

El costo de envío variara entre los $150 – 300$ dependiendo el número de sensores que se pida. (China, 2025)



3. Sensor de temperatura y humedad

En la página Made in China nos indica que el sensor de temperatura y humedad para cuadros eléctricos de alta tensión en interiores, su precio por unidad varía entre $16.99 – $25.99, pero el pedido mínimo es de 100 unidades lo que costaría $16000 - $25000 la compra total de estos sensores. (China, 2025)



4. Sensor de aceleración o acelerómetro

Un sensor de aceleración o acelerómetro se puede adquirir en e importar desde el país de España-Madrid el cual tendría un costo de importación dependiendo su tamaño, su peso y los impuestos, puede variar el costo de entre 150$ a 300$ más el valor de los impuestos, pero como el sensor no es de un tamaño grande se lo puede importar como entrega 4x4 y no se pagaría de impuestos, de tal manera que se pagaría solo el costo de envío.

El precio del sensor que tiene disponibilidad PCE Instruments es de 4000 euros y más IVA = 4840 euros, que en dólares tendría un costo de $4158,20 sin IVA, y más IVA sería un total de $4989,84. (Instruments, 2025)

Mientras que con la cotización que realice en la Escuela Politécnica Nacional me información que ellos no venden ni alquilan, solo realizan el estudio que tendría un costo de $1500 (Nacional, 2025). Y adicional dependería del lugar en donde se vaya a realizar el estudio.





5. FlatMesh 3 Nodo Distanciómetro con Clinómetro Triaxial, ODS

Adjunto la cotización realizada al final



Tabla de resumen de costos de los siguientes tipos de sensores

Tipo de sensor	Costo	Costo de importación	Otros
Piezométrico	$1000 - $10000	$150 - $300	
Deformímetro	10-99 unidades total = $391, más de 100 unidades total = de $299	$150 - $300	
Sensor de temperatura y humedad	recio por unidad varía entre $16.99 – $25.99, pedido mínimo es de 100 unidades total $16000 - $25000	$150 - $300	
Acelerómetro	$4158,20 sin IVA, y más IVA sería un total de $4989,84	$150 - $300	Para un estudio realizado por el IG de la EPN tendría un valor de $1500 dependiendo el sector en donde se vaya a realizar
FlatMesh 3 Nodo Distanciómetro con	$857	$150 - $300	

Clinómetro Triaxial, ODS (Sensor Laser)			

La categoría 4x4, también conocida como Categoría B, es un régimen de importación simplificada en Ecuador que permite a personas naturales traer al país paquetes cuyo peso no exceda los 4 kilogramos y cuyo valor FOB (valor en el puerto de origen) sea igual o inferior a $400. Este sistema está diseñado para facilitar la importación de mercancías sin fines comerciales y está exento del pago de impuestos, siempre que se respeten los límites establecidos. (ciudadanos, 2025)

Características principales de la categoría 4x4:

- Peso máximo: 4 kilogramos por paquete.
- Valor máximo: $400 por paquete.
- Cupo anual: Cada persona puede importar hasta $1,600 bajo esta categoría en un año fiscal.