

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SENSOR INTELIGENTE PARA APLICACIONES DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Jose Alejandro Tovar Briceño
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, noviembre de 2023

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SENSOR INTELIGENTE PARA APLICACIONES DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL

TUTOR ACADÉMICO: MSc Jose Romero

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Jose Alejandro Tovar Briceño
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, noviembre de 2023

A quien desees dedicar este trabajo

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Autor del Trabajo de Grado

Título del Trabajo de Grado

Tutor Académico: MSc Jose Romero. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Mención Electrónica y Control. Año 2023, xvii, 144 pp.

Palabras Claves: Palabras clave.

Resumen.- Escribe acá tu resumen

ÍNDICE GENERAL

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE GENERAL	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE ACRÓNIMOS	XIII
INTRODUCCIÓN	1
MARCO REFERENCIAL	5
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Antecedentes	5
MARCO TEÓRICO	6
2.1. Estructuras civiles	6
2.1.1. Características generales	6
2.1.2. Tipos de estructuras	6
2.1.3. Comportamiento de las estructuras civiles	7

2.1.4.	Respuesta en frecuencia	11
2.1.5.	Daño en estructuras	11
2.1.6.	Principios de la Sismoresistencia	12
2.2.	Salud estructural	14
2.2.1.	Definición	14
2.2.2.	Reseña histórica	15
2.2.3.	Línea de trabajo del Monitoreo de Salud Estructural . . .	17
2.2.4.	Criterios de evaluación	19
2.2.5.	Variables de interés	22
2.3.	Sensores	25
2.3.1.	Definición	25
2.3.2.	Características de los sensores	25
2.3.3.	Sensores de interés para el Monitoreo de Salud Estructural	26
2.4.	Sensores inteligentes	26
2.4.1.	Definición:	26
2.4.2.	Características:	27
2.5.	Microcontroladores (MCU)	28
2.5.1.	Definición y características	28
2.5.2.	Placas de desarrollo	29
2.5.3.	Uso en aplicaciones de Monitoreo de Salud Estructural . .	31
2.5.4.	Placas de desarrollo	31
2.6.	Monitoreo	31
2.6.1.	Monitoreo cableado	31
2.6.2.	Monitoreo inalámbrico	31
2.7.	Sistemas de adquisición de datos (DAQ)	31

2.7.1. Definición y esquema general	31
2.7.2. Acondicionamiento de señales	31
2.7.3. DAQ basados en MCU	31
MARCO METODOLÓGICO	32
DESARROLLO	33
PRUEBAS EXPERIMENTALES	34
RESULTADOS	35
CONCLUSIONES	36
RECOMENDACIONES	37
TÍTULO DEL ANEXO	38
TÍTULO DEL ANEXO	39
TÍTULO DEL ANEXO	40
REFERENCIAS	41

LISTA DE FIGURAS

2.1. Modelo de masa concentrada de 1 grado de libertad (Hurtado, 2000).	9
2.2. Respuesta ante vibración libre en sistema Subamortiguado (Hurta- do, 2000).	11
2.3. Esquema de un sistema de SHM (Li, Deng, y Xie, 2015).	18
2.4. Diagrama general del proceso de SHM.	19

LISTA DE TABLAS

LISTA DE ACRÓNIMOS

INTRODUCCIÓN

La seguridad de las infraestructuras es un tema de gran importancia en la actualidad, especialmente cuando se trata de estructuras como edificios o puentes.

Los primeros indicios del monitoreo del estado de las infraestructuras data de nuestros comienzos como especie sedentaria. En la antigüedad, los especialistas utilizaban técnicas de inspección visual y auditiva para detectar posibles problemas en las estructuras, como grietas o ruidos inusuales. Con el tiempo, se desarrollaron técnicas más avanzadas para el monitoreo de estructuras, como la utilización de medidores de deformación, inclinación, sensores de vibración, entre otros.

La integración de la instrumentación con el análisis estructural comenzó a desarrollarse en la década de 1960 con el advenimiento de la informática y la disponibilidad de computadoras capaces de realizar cálculos estructurales complejos. En esa época, se comenzaron a utilizar sistemas de adquisición de datos para recopilar información sobre el comportamiento de las estructuras en tiempo real y utilizarla para calibrar y validar los modelos estructurales.

Actualmente, las normas sismo-resistentes apuntan a estructuras que sean capaces de mantener su integridad ante un evento de cierta magnitud. Además, el monitoreo continuo de ciertos indicadores en la estructura permiten determinar un índice de la salud estructural y ajustar el modelo a las condiciones actuales de la misma para evaluar el cumplimiento de la normativa sismorresistente. Para el monitoreo a largo plazo, el resultado de este proceso es información actualizada periódicamente sobre la capacidad de la estructura para desempeñar su función prevista a la luz del inevitable envejecimiento y degradación resultantes de los

entornos operativos.

Según Balageas, Fritzen, y Güemes (2010), el monitoreo de la salud estructural (SHM) tiene por objeto proporcionar, en cada momento de la vida de una estructura, un diagnóstico del estado de los materiales constitutivos, de las diferentes partes, y del conjunto de estas partes que constituyen la estructura en su totalidad. El estado de la estructura debe permanecer en el ámbito especificado en el diseño, aunque este puede verse alterado por el envejecimiento normal debido al uso, por la acción del medio ambiente y por sucesos accidentales. Gracias a la dimensión temporal de la supervisión, que permite tener en cuenta toda la base de datos histórica de la estructura, y con la ayuda del monitoreo del funcionamiento. También puede proporcionar un pronóstico (evolución de los daños, vida residual, entre otros).

Si consideramos solo la primera función, el diagnóstico, podríamos estimar que el monitoreo de la salud estructural es una forma nueva y mejorada de realizar una evaluación no destructiva. Esto es parcialmente cierto, pero SHM es mucho más. Implica la integración de sensores, posiblemente materiales inteligentes, transmisión de datos, potencia computacional y capacidad de procesamiento en el interior de las estructuras. Permite reconsiderar el diseño de la estructura y la gestión completa de la propia estructura y de la estructura considerada como parte de sistemas más amplios.

En este sentido, el monitoreo de las estructuras se ha convertido en una herramienta esencial para garantizar la seguridad de las personas durante la vida útil de la misma, incluyendo la ocurrencia de eventos de cierta magnitud. Además, el monitoreo de las estructuras puede ayudar a mejorar la eficacia de las normas sismorresistentes, ya que permite validar y mejorar los modelos estructurales utilizados en la normativa.

Según Nagayama (2007), dado que las edificaciones suelen ser grandes y complejas, la información de unos pocos sensores es inadecuada para evaluar con precisión el estado estructural. El comportamiento dinámico de estas estructuras es complejo tanto a escala espacial como temporal. Además, los daños y/o el deterioro es intrínsecamente un fenómeno local. Por lo tanto, para comprender el comportamiento dinámico, el movimiento de las estructuras debe ser supervisado por sensores con una frecuencia de muestreo suficiente para captar las características dinámicas más destacadas. Esta información combinada con el registro del comportamiento estático de la estructura permiten tener una visión más amplia del estado actual de la estructura.

El primer paso, además de un mantenimiento adecuado, para garantizar la seguridad de estas estructuras, es contar con sistemas de monitoreo que permitan detectar posibles daños o fallas en su funcionamiento y tomar medidas preventivas. Por tanto, los sistemas de adquisición de datos y monitoreo son herramientas esenciales en la prevención de accidentes y daños.

A su vez, según Nagayama (2007), un dispositivo inteligente, es decir, con capacidad de procesamiento de datos en el caso de los sensores, es una característica esencial que permite incrementar el potencial de los sensores al ser estos inalámbricos. Los sensores inteligentes pueden procesar localmente los datos medidos y transmitir solo la información importante a través de comunicaciones inalámbricas. Cuando estos son configurados como una red, se extienden las capacidades de los mismos.

Los sensores inteligentes, con sus capacidades de cómputo y de comunicación integradas, ofrecen nuevas oportunidades para la SHM. Sin necesidad de cables de alimentación o comunicación, los costes de instalación pueden reducirse drásticamente. Los sensores inteligentes ayudarán a que el monitoreo de las estructuras con un denso conjunto de sensores sea económicamente práctico. Se espera que los

sensores inteligentes instalados en masa sean fuentes de información muy valiosa para la SHM.

En este trabajo de grado se abordará el diseño para una futura implementación de un sistema de adquisición de datos de bajo costo basado dispositivos programables con capacidad de interconexión para el monitoreo y procesamiento de variables como aceleración, inclinación, humedad y temperatura en estructuras críticas, con el objetivo de prevenir daños y accidentes.

CAPÍTULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1. Planteamiento del problema

1.2. Justificación

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

1.3.2. Objetivos específicos

1.4. Antecedentes

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definirán los conceptos o fundamentos de instrumentación estructural, sensores inteligentes y adquisición de datos, necesarios para llevar a cabo esta investigación.

2.1. Estructuras civiles

2.1.1. Características generales

Una estructura se refiere a un sistema de partes o elementos que se interconectan para cumplir una función específica. En el caso de la ingeniería civil, suelen ser miembros que se utilizan para soportar una carga. Algunos ejemplos importantes son los edificios, los puentes y las torres; y en otras ramas de la ingeniería, son importantes las corazas de barcos y aviones, los sistemas mecánicos y las estructuras que soportan las líneas de transmisión eléctrica (Hibbeler y Nolan, 1997).

2.1.2. Tipos de estructuras

Según Hibbeler y Nolan (1997), cada sistema está formado por uno o varios de los cuatro tipos básicos de estructuras:

- Celosías.
- Cables y arcos.
- Armazones.
- Estructuras de superficie.

En general, estos elementos suelen soportar cargas, pueden ser estacionarios y también estar restringidos. Sus diferencias suelen basarse en la cantidad de fuerzas a las que están sujetos estos elementos en un instante dado.

La combinación de estos elementos y los materiales que los componen es lo que se denomina un sistema estructural. Estos sistemas, aunque sean pasados por alto, son utilizados diariamente por industrias y personas, siendo elementos claves en el desarrollo y progreso de la civilización actual.

2.1.3. Comportamiento de las estructuras civiles

La gran mayoría de los sistemas cuentan con una respuesta dinámica y estática. Ambas respuestas permiten conocer el comportamiento completo del sistema en estudio ante distintas entradas o en diferentes situaciones. Al estudiar el comportamiento estructural se encuentra una extensa literatura tanto para el estudio dinámico como para el régimen estático, recopilándose lo siguiente:

- Respuesta estática: En la ingeniería civil toda estructura se diseña para que se encuentre en reposo cuando actúan sobre esta fuerzas externas, es decir, la estructura en conjunto debe cumplir con las condiciones de equilibrio, siendo la fuerza y el momento resultante sobre esta igual a cero en todo momento. Para describir estas condiciones de equilibrio se cuentan con herramientas

matemáticas que proporcionan las condiciones necesarias para su cumplimiento. Estas ecuaciones permiten la resolución estática de la estructura, la cual permite determinar el valor de todas las incógnitas estáticas de interés (Basset Salom, 2014).

Cuando las fuerzas que actúan sobre la estructura pueden calcularse a partir de las ecuaciones de equilibrio, se tiene una estructura en equilibrio y se denomina estructura estáticamente determinada. En caso de tenerse más fuerzas desconocidas que ecuaciones de equilibrio se habla de una estructura estáticamente indeterminada.

- Rigidez: Uno de los parámetros más importantes dentro de la respuesta estática es la rigidez. Esta se define como la propiedad que tiene un elemento estructural de soportar la deformación o deflexión al estar bajo la acción de una fuerza o carga. Una medida de la rigidez viene dada por el Módulo de Young; esta es una constante del material y es independiente de la cantidad de material.
- Respuesta dinámica: La dinámica estructural se encarga de estudiar el efecto que tienen cargas dinámicas sobre el sistema. La respuesta ante estos eventos, como pueden ser sismos, vientos, equipos mecánicos, paso de vehículos o personas, se denomina respuesta dinámica (Hurtado, 2000). Además, la respuesta dinámica permite caracterizar algunos parámetros de gran interés para estudiar su comportamiento conocidos como parámetros modales. Estos parámetros surgen al estudiar las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de la estructura, partiendo de un modelo idealizado simple de masa concentrada como el de la Figura 2.1.

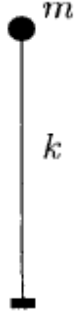


Figura 2.1. Modelo de masa concentrada de 1 grado de libertad (Hurtado, 2000).

La dinámica de este modelo puede describirse utilizando la ecuación diferencial de movimiento:

$$m\ddot{u} + f_R(t) = p(t) \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 se conoce como ecuación de vibración libre sin amortiguamiento. Donde $p(t)$ representa las cargas dinámicas y $f_R(t)$ la fuerza de restitución propia de un material elástico. Esta ecuación es una ecuación diferencial de coeficientes constantes, que consta de una solución homogénea más una solución particular. La solución homogénea será la respuesta de la estructura a la vibración libre, es decir, si la masa de la Figura 2.1 se deja oscilar libremente.

Se sabe que una ecuación de este tipo tendrá una solución como:

$$u = A.\sin\omega t + B.\cos\omega t \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 contiene información relevante para la caracterización dinámica de la estructura. Esta caracterización parte del estudio de los parámetros modales de la misma.

Entre estos parámetros modales se encuentran:

- Frecuencia natural: Toda estructura física tiene asociada una frecuencia de vibración natural. Las máquinas, los puentes, los edificios; todas estas estructuras vibran u oscilan al ser perturbadas o removidas de su estado de reposo inicial. Es una propiedad intrínseca del sistema y depende de su masa, rigidez y amortiguamiento. Todas tienen al menos una frecuencia natural y es posible que tengan múltiples frecuencias de resonancia (Irvine, 2000).

Se suele calcular la frecuencia natural de resonancia de un sistema libre usando:

$$f = \frac{1}{\sqrt{\frac{k}{m}}} \quad (2.3)$$

- Amortiguamiento: Toda estructura comienza a oscilar una vez es removida de su estado de reposo o equilibrio, sin embargo, ese movimiento no es perpetuo. El amortiguamiento se define como la capacidad de disipación de energía que posee la estructura bajo excitaciones externas. Las soluciones a la ecuación 2.1, al añadir el amortiguamiento de tipo viscoso, arrojan 3 posibles casos:

1. Sistema críticamente amortiguado: El sistema no vibra.
2. Subamortiguado o amortiguado subcrítico: Caso más común por la naturaleza de los materiales utilizados en las estructuras. La respuesta del sistema decae con el tiempo de forma exponencial, como se puede ver en la Figura 2.2.

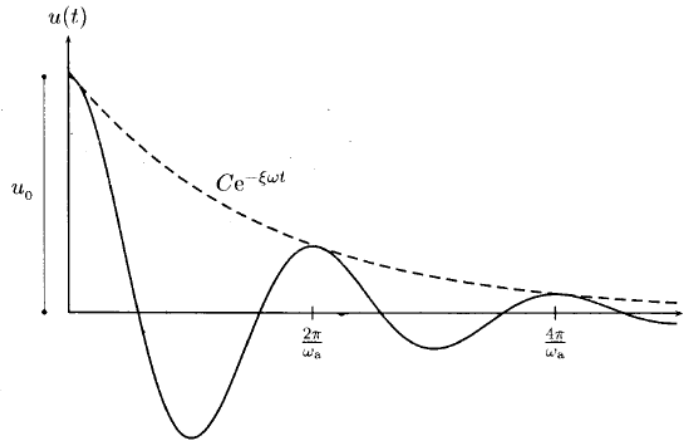


Figura 2.2. Respuesta ante vibración libre en sistema Subamortiguado (Hurtado, 2000).

3. Sobreamortiguado: Nunca se encuentra esta respuesta en sistemas estructurales por los materiales utilizados.

2.1.4. Respuesta en frecuencia

Incluir?

2.1.5. Daño en estructuras

El daño a una estructura civil o mecánica puede definirse como todo cambio en las propiedades materiales o geométricas del material que llegan a afectar de forma adversa la confiabilidad y el desempeño actual o futuro del sistema. Por tanto, el daño es una comparación entre el sistema en cuestión en 2 instantes de tiempo distintos (Farrar y Worden, 2007). Estos efectos adversos pueden ser, en el caso estructural, desplazamientos, estrés indeseado en un elemento o vibraciones estructurales indeseadas (Chen, 2018).

Toda estructura civil, como puentes y edificios, acumulan daño de forma continua a medida que están en servicio y transcurre su vida útil. Este daño puede manifestarse como fracturas, fatiga, socavaciones o desprendimiento del concreto. El daño que no sea detectado puede conducir a una falla estructural que a su vez ocasione pérdidas humanas. Por tanto, es imperativo y necesario detectar el daño en una estructura tan pronto como sea posible, (Chen, 2018).

Entre algunos de los factores que influyen del deterioro de una estructura se encuentran:

- Proceso de degradación natural de los materiales.
- Corrosión del acero de refuerzo.
- Evento sísmico, incendios o condiciones de guerra.
- Carga por encima del límite de diseño.

Las escalas de tiempo y de extensión del daño son diversas. Por ejemplo, el deterioro por el paso del tiempo bajo ciertas condiciones climáticas es muy lento comparado al daño causado por un evento catastrófico.

2.1.6. Principios de la Sismoresistencia

Una edificación sismorresistente es aquella que está diseñada y construida para soportar las fuerzas causadas por eventos sísmicos. Sin embargo, incluso las edificaciones diseñadas y construidas según las normas sismorresistentes pueden sufrir daños en caso de un terremoto muy fuerte, sin embargo, las normas establecen los requisitos mínimos para proteger la vida de las personas que ocupan la edificación

Algunas de las características de una estructura sismorresistente son:

- Forma regular.
- Bajo peso.
- Mayor rigidez.
- Buena estabilidad.
- Suelo firme y buena cimentación.
- Materiales competentes.
- Capacidad de disipación de energía.
- Fijación de acabados e instalaciones.

En Venezuela las estructuras deben cumplir con la Norma Venezolana COVENIN 1756:2001 (Edificaciones Sismorresistentes).

Se ha observado que al estudiar el comportamiento de las estructuras luego de un evento sísmico, es evidente que cuando se toman en cuenta las normas de diseño sismorresistente dispuestas en la ley y la construcción es debidamente supervisada, los daños estructurales resultan ser considerablemente menores que en las edificaciones en las cuales no se cumplen los requerimientos mínimos indispensables estipulados en la norma, (Blanco, 2012).

Importancia de la instrumentación

La instrumentación estructural permite medir y monitorear las acciones y respuestas estructurales ante distintos eventos. Esto proporciona datos en tiempo real sobre el comportamiento dinámico y estático de la estructura, como deformaciones, aceleraciones y desplazamientos, que son fundamentales para evaluar

y verificar si la estructura cumple con los criterios de diseño sismoresistente establecidos en la norma.

La instrumentación estructural ayuda a validar los modelos y suposiciones utilizados en el diseño estructural inicial. Al comparar los datos recopilados por la instrumentación durante un evento sísmico con las predicciones del modelo, es posible verificar si la estructura se comporta de acuerdo con las expectativas y si cumple con los criterios de seguridad establecidos en la norma.

Además, el monitoreo continuo de la estructura permite conocer el estado actual de la misma, tema que representa la idea principal del Monitoreo de Salud Estructural, permitiendo a los ingenieros evaluar si se sigue cumpliendo con la norma para luego tomar decisiones y actuar en pro de la seguridad de la edificación.

2.2. Salud estructural

2.2.1. Definición

El proceso de implementar una estrategia de identificación de daño para estructuras civiles, mecánicas o aeroespaciales se conoce como Monitoreo de Salud Estructural (SHM por sus siglas en inglés). Esta estrategia requiere medir las condiciones y el ambiente en el que opera la estructura, además de la respuesta de la misma durante un período de tiempo tomando muestras periódicamente espaciadas, (Farrar y Worden, 2007).

La estrategia del SHM requiere de equipos multidisciplinarios de ingeniería, ya que necesita de una red de sensores que midan las variables de interés, el procesamiento y análisis de los datos obtenidos y posteriormente una prognosis del daño para una eventual toma de decisiones. El objetivo del SHM es proveer,

en toda la vida útil de la estructura, un diagnóstico del estado de sus materiales constitutivos, de los diferentes elementos que la componen y de la estructura en sí como el conjunto de todas estas partes. Esto para garantizar que la misma se comporte dentro de los parámetros iniciales de diseño, aunque estos cambien por la acción natural del tiempo, el ambiente y accidentes, (Balageas y cols., 2010).

El resultado de este proceso es información actualizada sobre el estado de la estructura y sobre su capacidad actual para seguir desempeñado la función para la cual fue diseñada.

Según Enckell (2006), el SHM se ha convertido en una herramienta muy conocida y utilizada en ingeniería estructural en los últimos años en diferentes países.

2.2.2. Reseña histórica

Las técnicas de detección de daño basadas en vibración tienen sus primeras aplicaciones desde hace cientos de años. En la antigüedad, los constructores golpeaban las estructuras para encontrar espacios vacíos o grietas en elementos de arcilla. La utilidad de estas inspecciones tan simples indicaban que la sofisticación de estos métodos podía proveer información muy valiosa sobre el elemento de interés, sin embargo, esto requiere de instrumentos y herramientas matemáticas que se han desarrollado con el pasar de los años. El auge en el uso de SHM en años recientes es consecuencia de la evolución y miniaturización del hardware computacional actual.

El uso más exitoso del SHM ha sido el monitoreo de la condición de máquinas rotativas, las cuales actualmente han adoptado un enfoque de identificación de daño sin basarse en un modelo de forma casi exclusiva, (Farrar y Worden, 2007).

En los años 70 la industria petrolera consideró el uso de técnicas basadas en vibración para identificar daños en plataformas costa-afuera, este enfoque se diferenció de las máquinas rotativas al estudiar un sistema en donde la ubicación del daño es desconocida y difícil de instrumentar.

En esa misma época, la comunidad aeroespacial y la *National Eeronautics Space Agency* (NASA), comenzaron a estudiar esta técnica de identificación de daño en los comienzos de la era de lanzamientos espaciales. Este trabajo continúa hoy en día y el *Shuttle Modal Inspection System* (SMIS) se desarrolló para identificar fatiga en distintos componentes de cohetes espaciales reusables, los cuales representan el futuro de esta industria.

Usualmente, los enfoques de estas industrias se basan en comparar modelos analíticos de estructuras sin daño con las mediciones de estructuras con daño, observando principalmente las propiedades modales de las mismas. Se ha observado que cambios en la rigidez en ambos modelos han permitido localizar y cuantificar el daño, (Farrar y Worden, 2007).

Inicialmente, las técnicas no destructivas fueron introducidas en la ingeniería civil a mediados de los años 40, (Abdo, 2014). La necesidad principal surgió en determinar propiedades del concreto fresco *in-situ*. Estas técnicas, que buscaban evaluar la homogeneidad y la resistencia del concreto eran en su mayoría pruebas con martillo y pruebas de *pull-out*. A medida que las estructuras envejecieron, los ingenieros necesitaban idear maneras de medir o estimar las propiedades mecánicas de los elementos que consituyen las estructuras, además de detectar daños que no eran fáciles de observar por la envergadura de las estructuras civiles que se han desarrollado en los últimos 150 años. Es ahí, en los años 70, donde surgen nuevas estrategias no destructivas tales como:

- Emisión acústica.

- Métodos de ultrasonido y radar.
- Termografía.
- Métodos basados en vibración

La comunidad de ingeniería civil ha estudiado la identificación de daño basada en vibración en puentes y edificios desde comienzos de los años 80. Las propiedades modales han sido estudiadas por diferentes autores y son las principales características que se analizan al identificar daño. El auge del SHM es tal, que algunos países asiáticos han implementado regulaciones en donde las compañías constructoras deben verificar la salud estructural de los puentes periódicamente. Estas regulaciones han provocado que la investigación e inversión en esta área siga aumentando de forma considerable, (Chen, 2018).

2.2.3. Línea de trabajo del Monitoreo de Salud Estructural

Los sistemas de SHM consisten de varios elementos que permiten a los ingenieros tener información sobre el estado de una estructura, entre esos elementos se encuentran:

- Sensores.
- Sistemas de adquisición de datos.
- Sistema de transmisión de datos.
- Sistema de procesamiento de datos.
- Sistema de manejo y almacenamiento de datos.
- Equipo de análisis y toma de decisiones.

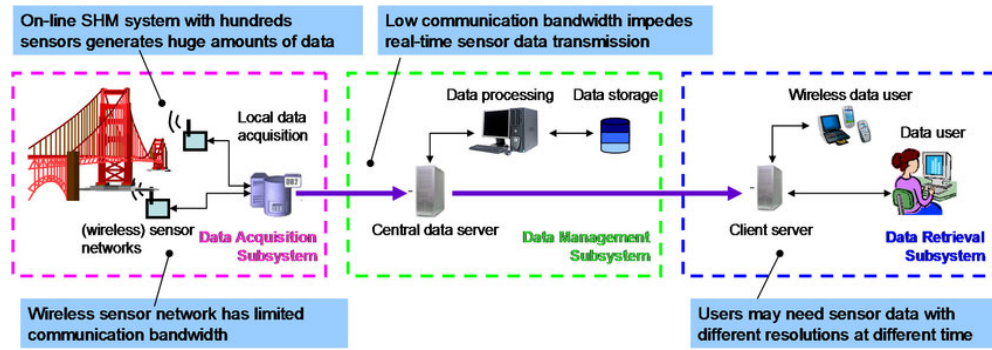


Figura 2.3. Esquema de un sistema de SHM (Li y cols., 2015).

Autores como Rytter (1993) y Farrar y Worden (2007) han esquematizado la estrategia del SHM categorizando el daño en una estructura por niveles de la siguiente forma:

1. Nivel I (detección del daño) ¿Presenta daño el sistema? Es una indicación cualitativa de que puede haber daño presente en la estructura.
2. Nivel II (localización o ubicación del daño) ¿Dónde está presente el daño? Indica la posible localización del mismo.
3. Nivel III (clasificación del daño) ¿Qué tipo de daño está presente? Da información sobre el tipo de daño.
4. Nivel IV (alcance/grado/extensión del daño) ¿Cuál es el alcance del daño? ¿Qué tan grave es? Da un estimado del alcance.
5. Nivel V (pronosis del daño) ¿Cuánta vida útil le queda a la estructura? Da un estimado de la seguridad de la estructura.

En la mayoría de los casos, para alcanzar el nivel final es necesario obtener información sobre los niveles previos. Esto indica que a medida que se sube de nivel se tiene un mayor conocimiento sobre el estado de la estructura.

De acuerdo a Chen (2018), los primeros dos niveles, detección y localización, generalmente pueden alcanzarse usando métodos de detección basados en vibración para obtener mediciones sobre la respuesta dinámica de la estructura.

Por su parte, Chen (2018) describe el proceso de SHM en general como:

1. Observación.
2. Evaluación.
3. Calificación.
4. Gestión.

La estrategia de Monitoreo de Salud Estructural podría resumirse en el siguiente diagrama:

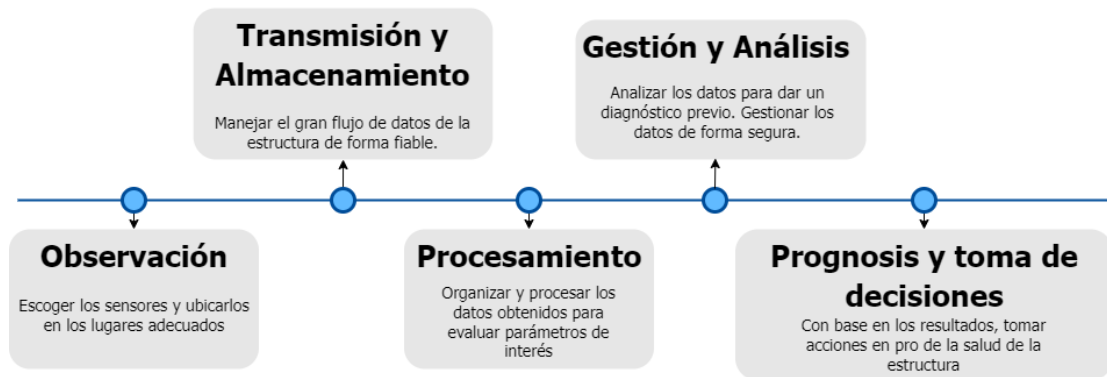


Figura 2.4. Diagrama general del proceso de SHM.

2.2.4. Criterios de evaluación

Como se definió anteriormente, el daño estructural puede tener distintas causas y formas. Lo que se sabe con certeza es que una estructura, una vez entra en

funcionamiento, análogo a los seres humanos al nacer, estará sujeta a envejecimiento natural y a condiciones adversas. Ahora bien, en el caso del SHM, surge la siguiente pregunta ¿Qué se debe medir para poder detectar este daño?.

Numerosos autores concluyen que uno de los indicativos de daño de una estructura viene dado por los parámetros modales definidos anteriormente, frecuencia y amortiguamiento. Esta relación entre los parámetros modales y el daño viene dada por la premisa de que todo daño presente en la estructura se reflejará en un cambio en las propiedades dinámicas de la misma. Worden y Friswell (2009), comprobó la relación entre el cambio progresivo en todas las frecuencias naturales de 15 vigas estudiadas a las cuales se les introdujo un daño relacionado con un cambio del Módulo de Young, el cual, como fue mencionado anteriormente, provee un indicativo de la rigidez de un elemento.

Anteriormente en la ecuación 2.1 se definió un sistema con un grado de libertad (DOF por sus siglas en ingles), sin embargo, en la realidad las estructuras tienen múltiples grados de libertad, por lo que es conveniente modelarlas de esta forma para obtener resultados más precisos. En el caso de los sistemas *n-degrees of freedom* (DOF por sus siglas en ingles), la ecuación de movimiento que describe la dinámica del sistema en vibración libre vendrá dada por:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (2.4)$$

Donde M, C y K representan las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura, respectivamente.

Si se asume un sistema sin amortiguamiento, a fines de estudiar el efecto que tiene sobre la rigidez un cambio en los parámetros modales, de la ecuación 2.4 se obtiene:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (2.5)$$

Si se asume una solución oscilatoria pura, por ser un sistema sin amortiguamiento:

$$u = ve^{j\omega t} \quad (2.6)$$

Al derivar, sustituir y despejar en la ecuación 2.5 se obtiene:

$$(K - \lambda M)\phi = 0 \quad (2.7)$$

Esta ecuación 2.7 representa claramente un problema de autovalores, donde λ representa los autovalores asociados a las frecuencias naturales del sistema y ϕ representa el autovector de desplazamiento.

Si se introduce un pequeño cambio ΔK con perturbaciones similares en los otros parámetros:

$$[(K - \Delta K) - (\lambda - \Delta\lambda)(M - \Delta M)](\phi - \Delta\phi) = 0 \quad (2.8)$$

El daño estructural suele venir asociado a un cambio en la rigidez, más no a cambios en la masa de la estructura, por lo que se asume $\Delta M = 0$, (Hearn y Testa, 1991). A su vez, se tiene que $(K - \lambda M)\phi = 0$. Abdo (2014), Shi, Law, y Zhang (1998) y Hearn y Testa (1991) desarrollan estas ecuaciones obteniendo la siguiente relación:

$$\Delta\lambda = \phi^T \Delta K \phi \quad (2.9)$$

De la ecuación 2.9 se observa que cambios en los autovalores λ que representan las frecuencias naturales, y en los autovectores ϕ (formas modales) están directamente relacionados con cambios en la matriz de rigidez (K) del sistema. De aquí surge el interés en monitorear los parámetros modales como indicadores de daño estructural. Es importante recalcar que estos cambios son indicativos de daño global, más no de la localización del mismo, para lo que se necesitan otras técnicas, (Abdo, 2014).

2.2.5. Variables de interés

Tomando en cuenta la relación entre los parámetros modales y el daño presente en una estructura, es preciso definir las variables de interés para el monitoreo de la salud estructural de una estructura. Si bien existen distintas variables que permiten obtener información valiosa sobre la estructura en estudio, algunas de estas no proporcionan información global del daño, como es el caso de las formas modales y la deflexión local (Rytter, 1993). Sin embargo, estas mediciones proveen indicativos de la ubicación del daño, por lo que pueden constituir parte del sistema de monitoreo en una etapa más avanzada, es decir, una vez el daño fue detectado. A continuación se presentan las más relevantes para el daño global:

- Frecuencias naturales y amortiguamiento: Los parámetros modales de la estructura están ligados de forma directa al estado de la misma. El deterioro en una edificación induce cambios en la rigidez estructural, como se observa claramente en la ecuación 2.9. El daño puede tener efectos distintos en cada modo o cada frecuencia de vibración, por lo que es importante no ubicar

los sensores sobre los nodos modales, ya que experimentos han demostrado la ineficacia en las mediciones. Usualmente, el daño se refleja como una disminución en las frecuencias naturales afectadas, aunque se han observado casos de aumento en las frecuencias de vibración en estructuras de concreto pretensado, (Rytter, 1993).

A su vez, el amortiguamiento varía al introducir daño en la estructura, puesto que su capacidad de disipar energía se ve afectada. Usualmente, los investigadores observan un aumento en el amortiguamiento a medida que el daño aumenta, como se ha demostrado experimentalmente por autores como Hearn y Testa (1991) y Rytter (1993).

- Temperatura y humedad: En los sistemas de monitoreo, la detección del daño estructural puede tomar períodos de tiempo considerables, durante los cuales las características sujetas a temperatura y humedad, sufren cambios que afectan la respuesta estructural.

Es evidente que las condiciones climáticas contribuyen con el deterioro de las edificaciones. A pesar de esta conclusión, relacionar las condiciones climáticas con el daño introducido usando mediciones ambientales es difícil. La medición de estas variables suele tomarse en cuenta para poder cuantificar el cambio que producen estas condiciones en los demás indicadores de daño. Rytter (1993) observó que la humedad y temperatura afectaban las mediciones de amortiguamiento. Por su parte, Abdo (2014), observó que las frecuencias naturales de barras y vigas disminuían a medida que aumentaba la temperatura. A su vez, Sohn (2007) determinó que cuando hay humedad presente en el ambiente, los puentes de hormigón absorben una cantidad considerable de esta, lo que aumenta sus masas y altera sus frecuencias naturales.

- Inclinación y desplazamiento: Una de las variables más comunes en Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural es el desplazamiento lineal, que refleja de

forma directa el comportamiento de un elemento o estructura. Esta podría considerarse una variable de tipo estático, ya que a pesar de variar con el tiempo, es decir, depender de un componente dinámico como el viento o la carga vehicular, su interacción con el medio suele ser quasi-estática, causada por la carga estática de la estructura, efectos térmicos y asentamiento.

Los inclinómetros son utilizados en elementos estructurales para medir el desplazamiento lineal de un elemento respecto a una referencia. Suelen ser utilizados para dar una idea de la fijación que presentan los puentes en sus soportes o para monitorear a largo plazo el movimiento de estructuras sobre superficies propensas a deslizamientos.

La deflección, que puede medirse haciendo uso de inclinómetros los cuales han generado un gran interés en la industria por su sensibilidad y bajo costo, es una variable muy importante a medirse en una estructura. La deflección puede ser consecuencia de la corrosión de los elementos de soporte, pérdida del pretensado o el crecimiento de grietas en el concreto. Es decir, a medida que la deflección aumenta se acelera la acumulación de daño, por tanto, medir esta variable puede proveer alertas tempranas sobre posibles cambios estructurales o deterioro (Zhang, Sun, y Sun, 2017).

Autores como Komarizadehasl (2022) destacan la medición de la inclinación en las últimas décadas en el sector de la Ingeniería Estructural, inicialmente con propósitos geotécnicos. Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos en los sensores, se comenzó a emplear su uso en otras áreas, sobre todo en el monitoreo de salud estructural.

2.3. Sensores

2.3.1. Definición

Los sensores son dispositivos capaces de detectar un parámetro físico y responder a la entrada de este fenómeno físico con una señal, usualmente eléctrica, que puede ser medida y transmitida. Usualmente se clasifican según la variable a medir, por el tipo de señal que emiten (digital o analógica, en el caso de señales eléctricas) y por su interacción con la variable a medir, siendo los activos los que generan una señal para obtener la medición y los pasivos los que responden a los cambios del medio físico. Son la base principal de todo sistema de instrumentación al representar el vínculo entre los variables físicas que se desean medir y el ser humano, cuyas capacidades sensoriales no están diseñadas para medir ciertas variables y mucho menos tomar valores y registros de las mismas.

2.3.2. Características de los sensores

- Sensibilidad: Razón entre el incremento en la señal de salida del sensor y la variación en la variable medida.
- Resolución: Representa la variación mínima de la variable a medir que puede ser detectada por el sensor.
- Rango: Representa el conjunto de valores comprendidos entre el límite superior e inferior de la capacidad del instrumento de medición. Este espectro suele representarse mediante los valores extremos.
- Temperatura de operación: Rango de temperaturas dentro del cual el comportamiento del sensor es el esperado dentro de un límite de error.
- Frecuencia de respuesta o ancho de banda: Rango de valores en el espectro de

frecuencia dentro de los cuales los sensores son capaces de obtener mediciones de la variable de interés. Esta característica es particularmente importante en ensayos de vibración y ensayos dinámicos.

2.3.3. Sensores de interés para el Monitoreo de Salud Estructural

En el campo de la monitorización de salud estructural (SHM), existen varios tipos de sensores que se utilizan comúnmente. Algunos de los sensores más utilizados en SHM son los siguientes:

- Acelerómetros e Inclinómetros.
- Desplazamiento o deformación.
- Temperatura
- Humedad.

2.4. Sensores inteligentes

2.4.1. Definición:

Si bien los sensores por sí mismos han permitido un rápido y sostenido desarrollo en todos los ámbitos de la instrumentación en distintas áreas de la industria, el advenimiento de la era digital y la miniaturización de los componentes ha impulsado cambios en la manera en la que se mide hoy en día. Con el poder de cómputo actual, los sensores aumentan sus capacidades cuando son parte de un sistema más grande capaz de procesar la información que estos proveen.

Un sensor inteligente es un sistema en donde uno o varios sensores y una interfaz electrónica dedicada trabajan en conjunto. La tecnología empleada para llevar a cabo estos sistemas ha avanzado rápidamente en años recientes, lográndose obtener sistemas de un solo chip para medir temperatura o campo magnético (Nagayama, 2007).

El término sensor inteligente o "*smart sensor*" surgió a mediados de los años 80. La "inteligencia" de estos dispositivos viene dada por un microcontrolador (MCU), un procesador de señales digitales (DSP) y circuitos de aplicación específica (Frank, 2002). Posteriormente, en el año 1998, la *IEEE* en su estándar *Networked smart transducer interface standard 1451* definió un "*smart sensor*" como un transductor que provee funciones más allá de las necesarias para generar y representar una cantidad medida.

2.4.2. Características:

Un sensor inteligente suele tener 5 características esenciales, las cuales se resumen a continuación:

- **Microprocesador integrado:** El microprocesador es lo que diferencia un sensor común de un sensor inteligente, siendo este el encargado de hacer los cálculos necesarios, guardar los datos de forma local, enviar resultados y coordinar las tareas a ejecutarse.
- **Capacidades de medición:** La principal característica de un sensor es su capacidad de convertir una variable física en algún tipo de señal que pueda ser posteriormente procesada, en este caso por el microprocesador integrado, siendo el sensor el vínculo entre el procesador y los fenómenos físicos de interés. Un sensor inteligente, también llamado nodo, puede constar de varios

sensores que miden distintas variables.

- Comunicación inalámbrica: en gran medida, se busca que los sensores inteligentes sean capaces de reemplazar los actuales sistemas de medición cableados, permitiendo esto la expansión del sistema de medición a un bajo costo, además de las capacidades de transmisión que ofrecen alternativas como laser, infrarrojo, o incluso ondas de radio y telefonía.
- Alimentación autónoma: Con frecuencia los sensores inteligentes son alimentados de forma autónoma como baterías, en particular en aplicaciones de difícil acceso, como es el caso de algunas estructuras civiles. Si bien esto representa un desafío, la logística y los requerimientos asociados a conectar todo un sistema mallado de sensores a la red eléctrica atenta en contra de la facilidad de instalación y mantenimiento de un sistema inteligente.
- Bajo costo: Una de las características más importantes que se busca obtener al hacer uso de sistemas basados en sensores inteligentes es reducir los distintos costos generados por un sistema basado en sensores comunes. Tecnologías como MEMS (*Micro electro-mechanical systems*) han logrado reducir de forma considerable el tamaño y el costo por su producción en masa basada en semiconductores. Esta característica permite que redes densas de sensores sean implementadas en estructuras civiles.

2.5. Microcontroladores (MCU)

2.5.1. Definición y características

Un microcontrolador es un dispositivo diseñado para controlar tareas específicas en sistemas electrónicos. Usualmente se fabrican utilizando técnicas de miniaturización como VLSI (*Very Large Scale Integration*). Varios tipos de mi-

microcontroladores están disponibles en el mercado con diferentes características, clasificándose generalmente por su tamaño en bits (2, 4, 8, 64 y 128 bits). Los microcontroladores encapsulan en un solo chip un microprocesador, memoria, periféricos de entrada/salida y otros componentes necesarios para controlar y ejecutar tareas específicas. Esencialmente, es un pequeño ordenador en un solo circuito integrado.

Los microcontroladores se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones donde se requiere control y procesamiento de datos en tiempo real. Pueden encontrarse en dispositivos electrónicos como electrodomésticos, automóviles, equipos médicos, sistemas de seguridad, robots, entre otros.

Entre los elementos que componen un microcontrolador se encuentran:

- Unidad Central de Procesamiento.
- Memoria.
- Periféricos.
- Convertidores ADC y DAC.
- Temporizadores.
- Interfaces de comunicación.

2.5.2. Placas de desarrollo

Actualmente existen numerosas formas de hacer uso de las bondades que ofrecen los microcontroladores, especialmente al utilizar las distintas placas de desarrollo que se han diseñado para facilitar su programación e interfaz, ofreciendo la capacidad de comunicarse con un computador de forma sencilla a través del

puerto USB, brindando distintas funcionalidades a los periféricos y facilitando la alimentación al microcontrolador. Estas tarjetas han logrado disminuir el costo del uso de los microcontroladores, especialmente para la creación de prototipos que permiten evaluar la factibilidad de un proyecto antes de diseñar la placa de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés) con un microcontrolador pre-programado.

Las placas de desarrollo se pueden subdividir en:

- *System-on-Chip* (SoC).
- Basadas en microcontrolador (MCU-based).
- *Single-Board-Computer* (SBC).

Algunas de los fabricantes de tarjetas de desarrollo más reconocidos que cuentan con comunidades y soporte técnico son:

- STMicroelectronics:
- Espressif:
- Texas Instruments:
- Arduino:
- Raspberry Pi:
-

2.5.3. Uso en aplicaciones de Monitoreo de Salud Estructural

Características relevantes

2.5.4. Placas de desarrollo

2.6. Monitoreo

2.6.1. Monitoreo cableado

2.6.2. Monitoreo inalámbrico

2.7. Sistemas de adquisición de datos (DAQ)

2.7.1. Definición y esquema general

2.7.2. Acondicionamiento de señales

2.7.3. DAQ basados en MCU

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

CAPÍTULO IV

DESARROLLO

CAPÍTULO V

PRUEBAS EXPERIMENTALES

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

Apéndice I

TÍTULO DEL ANEXO

Apéndice II

TÍTULO DEL ANEXO

Apéndice III

TÍTULO DEL ANEXO

REFERENCIAS

- Abdo, M. (2014). *Structural health monitoring, history, applications and future. a review book*. Open Science Publishers.
- Balageas, D., Fritzen, C.-P., y Güemes, A. (2010). *Structural health monitoring* (Vol. 90). John Wiley & Sons.
- Basset Salom, L. (2014). Análisis estático de estructuras planas. *Universitat Politècnica de València*. oai:riunet.upv.es:10251/38538.
- Blanco, M. (2012). Criterios fundamentales para el diseño sismorresistente. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 27(3), 071–084.
- Chen, H.-P. (2018). *Structural health monitoring of large civil engineering structures* (Vol. 1). John Wiley & Sons Ltd.
- Enckell, M. (2006). *Structural health monitoring using modern sensor technology: long-term monitoring of the new årsta railway bridge* (Tesis Doctoral no publicada). KTH.
- Farrar, C. R., y Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303–315.
- Frank, R. (2002). Understanding smart sensors 2nd edn. *Measurement Science and Technology*, 13(9), 1501–1502.
- Hearn, G., y Testa, R. B. (1991). Modal analysis for damage detection in structures. *Journal of structural engineering*, 117(10), 3042–3063.
- Hibbeler, R. C., y Nolan, G. (1997). *Structural analysis*. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey New Jersey.
- Hurtado, J. E. (2000). Introducción a la dinámica de estructuras. *Universidad*

Nacional de Colombia SEDE Manizales.

- Irvine, T. (2000). An introduction to frequency response functions. *Rapport, College of Engineering and Computer Science, 2000.*
- Komarizadehasl, S. (2022). Development of low-cost sensors for structural health monitoring applications. *Sensors*. Descargado de <http://hdl.handle.net/2117/379464>
- Li, J., Deng, J., y Xie, W. (2015, 04). Damage detection with streamlined structural health monitoring data. *Sensors, 15*, 8832-8851. doi: 10.3390/s150408832
- Nagayama, B. F., Tomonori y Spencer Jr. (2007). Structural health monitoring using smart sensors. *Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series 001.*
- Rytter, A. (1993). Vibration based inspection of civil engineering structures ph. d. *Aalborg University, Aalborg, Denmark.*
- Shi, Z., Law, S., y Zhang, L. (1998). Structural damage localization from modal strain energy change. *Journal of sound and vibration, 218*(5), 825–844.
- Sohn, H. (2007). Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365*(1851), 539–560.
- Worden, K., y Friswell, M. I. (2009). Modal-vibration-based damage identification. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring.*
- Zhang, W., Sun, L., y Sun, S. (2017). Bridge-deflection estimation through inclinometer data considering structural damages. *Journal of Bridge Engineering, 22*(2), 04016117.