

MONITOREO DE CONEXIONES TORNILLO CON SIMULINK DE MATLAB Y ARDUINO

MONITORING OF CONNECTIONS SCREW WITH MATLAB AND ARDUINO SIMULINK

Filiberto Candia García

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México
filinc@hotmail.com

Gerardo Alán Benítez Cruz

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México
alan.am16490@gmail.com

Víctor Israel Gómez Romero

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México
victor.g.rom@gmail.com

Carlos Roberto Ambrosio Lázaro

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México
roberto.ambrosio@correo.buap.mx

Recepción: 29/abril/2020

Aceptación: 28/octubre/2020

Resumen

La salud estructural es un término utilizado en la evaluación y protección de las estructuras civiles o de la industria de la transformación como la automotriz, aeronáutica y aeroespacial. Con la finalidad de determinar el estado de integridad de la rigidez de estructuras con 1 grado de libertad (gdl), la cual se ve afectada por vibraciones eventuales (como los sismos) o vibraciones por fenómenos operativos permanentes (máquinas rotatorias), que se ven generalizados como vibraciones mecánicas aleatorias y no aleatorias. Como el daño puede ser catastrófico y permanente, se vuelve relevante el proponer un sistema de monitoreo de salud estructural que permita cumplir con dicha tarea a un bajo costo, en términos de la pérdida de rigidez de las conexiones tornillo a través de las mediciones de la frecuencia del sistema, que permita prevenir condiciones inseguras de operación.

Palabras Clave: Rigidez estructural, Salud Estructural, Vibraciones Mecánicas.

Abstract

Structural health is a term used in the evaluation and protection of civil structures or the transformation industry such as automotive, aeronautical and aerospace. In order to determine the integrity state of the rigidity of structures with 1 degree of freedom (gdl), which is affected by eventual vibrations (such as earthquakes) or vibrations by permanent operating phenomena (rotary machines), which are seen generalized as random and non-random mechanical vibrations. As the damage can be catastrophic and permanent, it becomes relevant to propose a structural health monitoring system that allows this task to be accomplished at a low cost, in terms of the loss of rigidity of the screw connections through measurements of the system frequency, to prevent unsafe operating conditions.

Keywords: *Mechanical Vibrations, Structural Health, Structural rigidity.*

1. Introducción

El monitoreo de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) se ocupa de la detección, identificación y evaluación en tiempo real de la evolución de la seguridad y el rendimiento de las estructuras) [Yuequan, 2019]. Esta tecnología permite detectar daños en una etapa temprana, seguir su evolución y ayudar a reducir los costos [Ocampo, 2013] y el tiempo de inactividad asociados con la reparación de condiciones peligrosas antes de una falla [Sabato, 2017]. “El daño se define como los cambios en el material y/o las propiedades geométricas de estos sistemas, que afectan negativamente el rendimiento del sistema” [Farrar, 2007]. Una técnica de detección de daños es una parte esencial de cualquier sistema SHM, su alcance consiste en la identificación de algunos parámetros estructurales y ambientales que deben ser monitoreados regularmente durante la operación de la máquina. Para este trabajo una condición de daño [Lorenzo, 2017] puede interpretarse como un cambio:

- ✓ En la rigidez del material.
- ✓ En las propiedades geométricas de una estructura.
- ✓ La variación de las condiciones de contorno.
- ✓ En las conexiones semirrígidas estructurales.

Se identificó como problemática que mantener una cultura de prevención ante los riesgos no previstos como las excitaciones aleatorias, debe ir más allá de la educación conceptual sobre actuaciones que buscan salvaguardar la vida humana, cuando ocurre un evento catastrófico. Para este fin, es necesario que se realice una vigilancia permanente del estado de la infraestructura destinada a la productividad de las empresas. El avance de la tecnología y abaratamiento de los insumos para realizar monitoreo de la SHM se encuentran asequibles y, por lo tanto, el uso de métodos no destructivos para conocer el estado de diversos equipos o instalaciones ha tomado mayor atención.

La justificación de este trabajo de aplicación tecnológica es la actual factibilidad para realizar el monitoreo de la salud estructural, que ha ido ganando relevancia en los últimos años por parte del sector de la investigación, gracias al desarrollo en la tecnología del procesamiento de las señales e instrumentación electrónica, lo cual permite planificar sistemas que permitan conocer el estado de salud de una estructura, determinando si existe la presencia de un daño.

El objetivo de este trabajo es proponer un sistema SHM de bajo costo, para las estructuras de un grado de libertad (1 gdl), evaluado en términos de pérdida de la rigidez en las conexiones por tornillo a través de las mediciones de la frecuencia del sistema estructural.

Bajo el esquema de una metodología basada en el método científico, se busca correlacionar el comportamiento de un marco de acero de 1 gdl, que sufre aflojamiento o apriete excesivo de las conexiones tornillo y con ello el posible desplazamiento de los elementos estructurales con respecto a su posición original. Parámetros que serán monitoreados y asociados a cambios en la frecuencia de operación del sistema.

El desarrollo que se presenta en este trabajo incluye el monitoreo de la salud estructural (SHM) para conocer las variaciones de estado (Confiable/No confiable) de una estructura metálica de 1 gdl. El procedimiento generado para lograrlo es analizar los cambios que se producen en la vibración de la estructura, que se modifican en función de las modificaciones de la geometría inicial. Esto da pauta a generar patrones que permitan identificar daños en la estructura, al recolectar los

valores en la vibración de la estructura mediante sensores y después aplicando técnicas de procesamiento de señales, como la transformada rápida de Fourier (FFT). Las correlaciones se almacenarán en archivos de valores separados por coma (.CSV) y presentados al usuario mediante gráficas que indican la magnitud de la aceleración contra la frecuencia.

Los resultados son una sólida correlación entre el estado de las conexiones de sujeción y la frecuencia de operación, que permitirá emitir un criterio de seguridad aceptable sobre el estado de la salud estructural del marco metálico de 1 gdl.

Se concluye que las aportaciones realizadas en cuanto al monitoreo de bajo costo, permite proponer sistemas económicos para vigilar la salud estructural de modelos de 1 gdl, evaluado en términos de pérdida de la rigidez por cambios geométricos a través de las mediciones de la frecuencia del sistema. Con este trabajo se busca lograr de manera económica y eficiente la transferencia de la tecnología relacionada a las vibraciones mecánicas para la prevención de daños estructurales.

2. Métodos

La metodología es experimental-pragmática, apoyada para su desarrollo en softwares de simulación analítica (Matlab/Simulink), en los cuales se realizarán el tratamiento de las señales y de los comportamientos límite y posibles consecuencias. Para posteriormente integrar tecnologías de hardware y software, que contribuyan al control de la vibración.

El desarrollo se divide en las siguientes etapas:

- ✓ Concepción de la idea.
- ✓ Determinación de las condiciones de riesgo.
- ✓ Selección de equipos materiales y dispositivos.
- ✓ Desarrollo de planos mecánicos y planos eléctricos.
- ✓ Programación del Arduino UNO.
- ✓ Integración de dispositivos electromecánicos mediante una aplicación como Simulink de Matlab y Arduino UNO.
- ✓ Monitoreo de prueba y asociación de fallas con eventualidades controladas.
- ✓ Instalación y puesta en marcha.

Investigación y métodos de solución

La investigación es experimental y el método de solución es el científico-deductivo-propositivo. El estudio de referencia involucra la definición de conceptos como vibración y resonancia [Martínez, 2017a], [Martínez, 2017b]. La organización del trabajo a desarrollar se estructura en el diagrama de bloques mostrado en la figura 1. Donde el bloque del sensor envía una señal digital, que recibe el Arduino UNO quién se interconecta vía protocolo serial al software Simulink y mediante el diagrama de bloques se trata la señal, convirtiendo los valores en función del tiempo a valores en función de la frecuencia y si estos sobrepasan el valor límite determinado de manera experimental. Se envía una señal digital de retorno a la placa Arduino UNO, donde se encuentra conectada una entrada digital del PLC, por medio de una interfaz por relevador de control (figuras 2, 3 y 4). Entonces el PLC recibe la orden de apagar el motor y proteger el sistema, que ha identificado una probable falla en las conexiones tornillo.

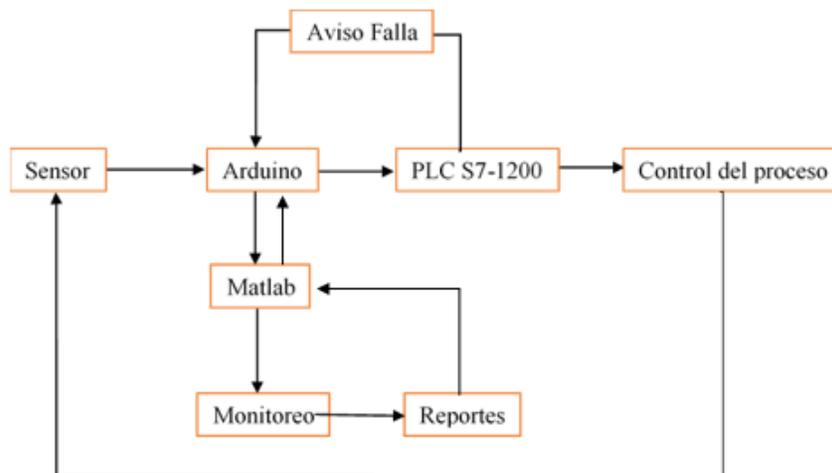


Figura 1 Diagrama de bloques del dispositivo desarrollado.

La estructura metálica fue ensamblada a partir de elementos estructurales fabricados de ángulo y solera comerciales (figura 5). Material en el cual se ha considerado un $E= 200$ GPa y un módulo de Poisson de 0.26. Características indispensables para la determinación de la rigidez y evaluación del comportamiento de la estructura de acero 1gdl.

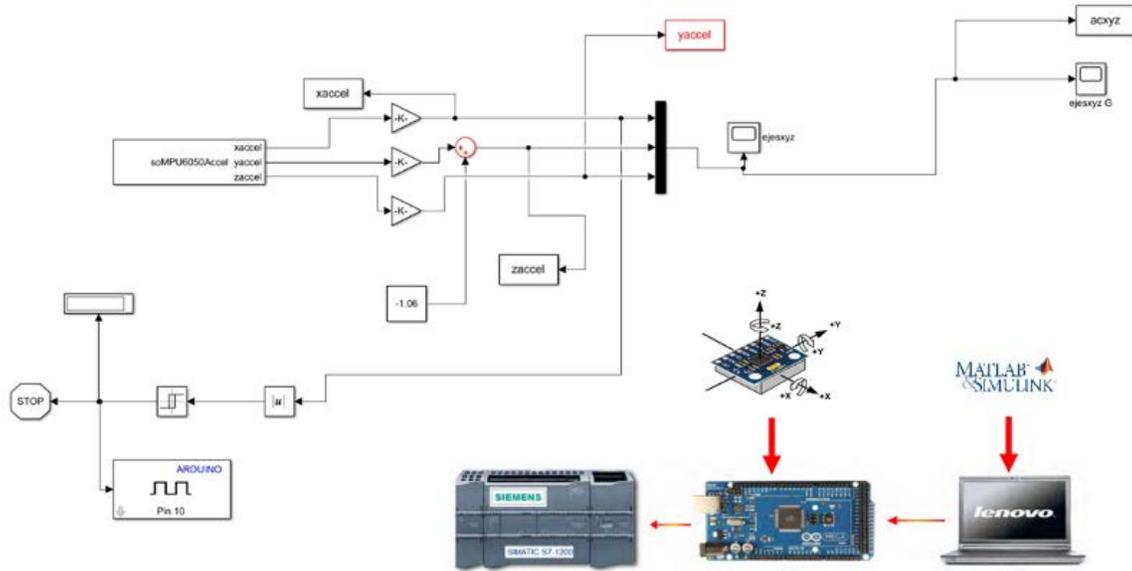


Figura 2 Interfaz elaborada en Simulink para recolección de muestras de aceleración.

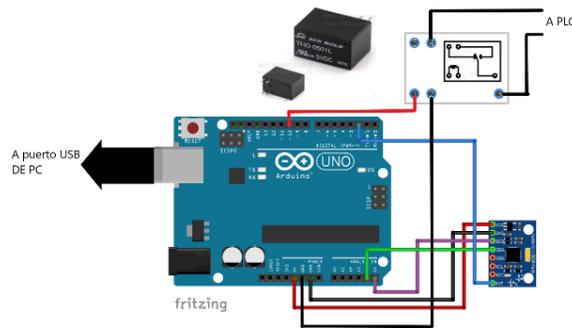


Figura 3 Esquema de control del sensor MPU6050.

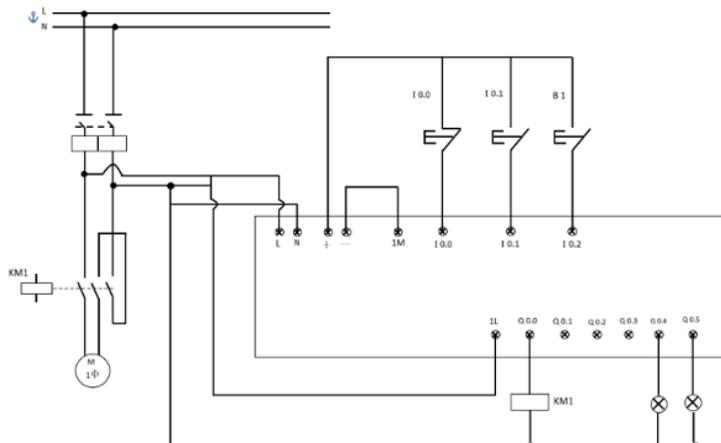


Figura 4 Diagrama de conexión del PLC S7-1200.

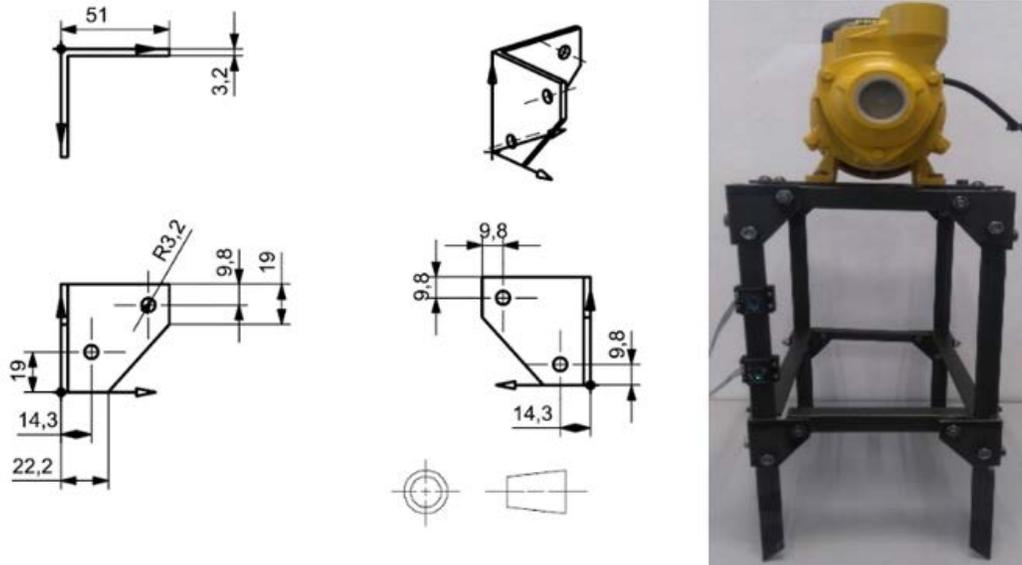


Figura 5 Plano de elementos para conexiones de estructura a monitorear.

3. Resultados

Durante la evaluación y pruebas, los siguientes parámetros se tomaron en cuenta, para las ejecuciones de simulación en Simulink en el prototipo de la estructura de 1 gdl.

- ✓ Tiempo de simulación: 30 segundos.
- ✓ Inicio de simulación: Con el motor en operación.
- ✓ Características de la carga: 3450 rpm, 120 V; 60 Hz; 5 A; 3.7 kg y 0.5 hp.
- ✓ La localización de la carga cambia por cada prueba realizada.

El eje z se normalizó a cero para las simulaciones (figuras 6, 7 y 8), si se desea conocer las magnitudes sin normalizar, se debe desconectar el bloque “Constant” para realizar las ejecuciones de la simulación sin normalizar z a cero, o en su defecto, sumar a los valores en los registros enviados al Workspace de MATLAB. Se especifican los resultados de las simulaciones realizadas en las tablas 1 y 2. En las figuras 6, 7 y 8 de acuerdo con la configuración de planta de la estructura es posible apreciar que la mayor amplitud espectral es en el eje transversal de la estructura de 1 gdl. Coincidiendo que la sección transversal del tornillo es la de mayor afectación. Es decir, el daño y posible fallo se ocasiona por cortante.

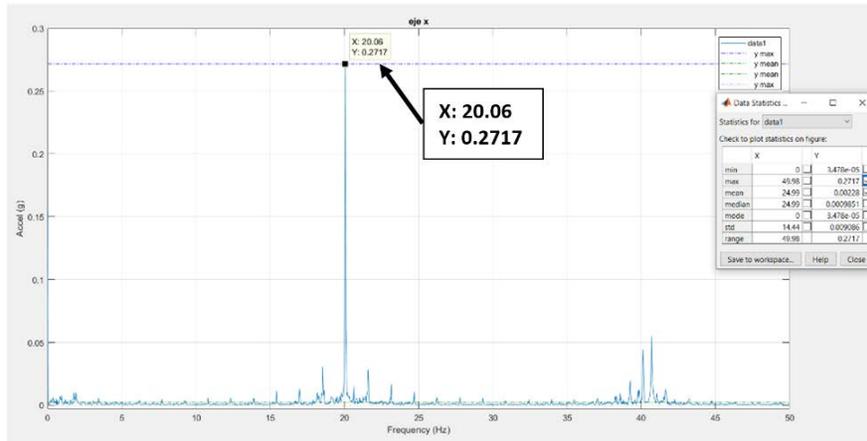


Figura 6 Espectro obtenido por la transformada rápida de Fourier (FFT) de acuerdo con las mediciones realizadas por el sensor MPU-6050 en el eje x.

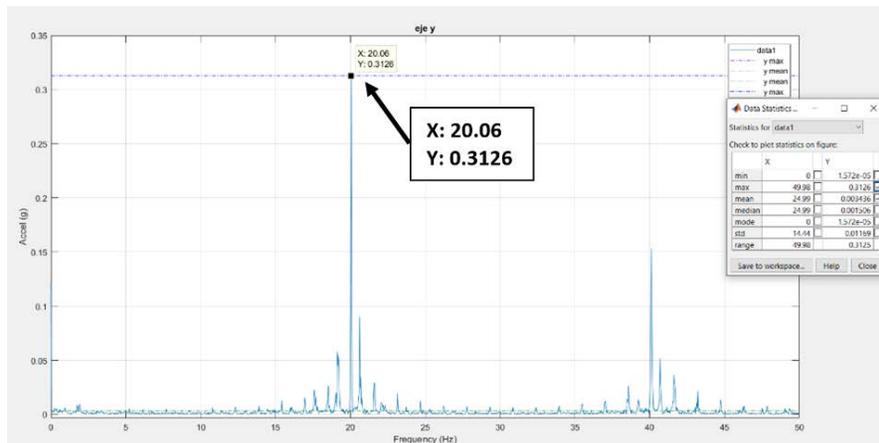


Figura 7 Espectro obtenido por la transformada rápida de Fourier (FFT) de acuerdo con las mediciones realizadas por el sensor MPU-6050 en el eje y.

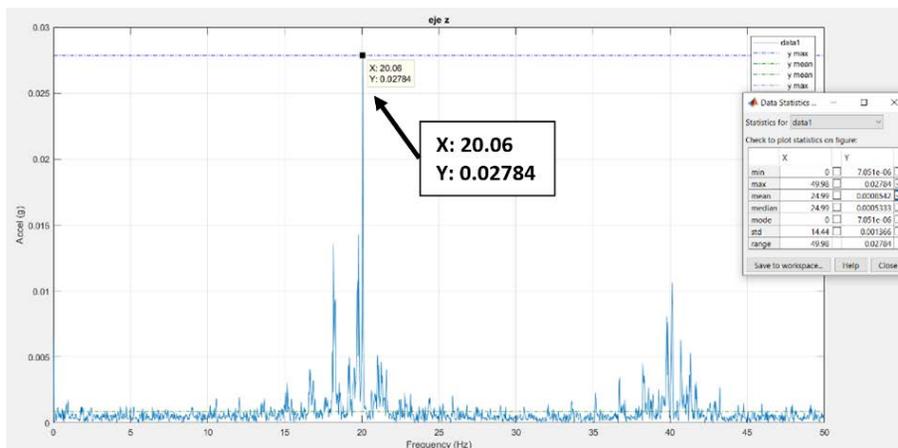


Figura 8 Espectro obtenido por la transformada rápida de Fourier (FFT) de acuerdo con las mediciones realizadas por el sensor MPU-6050 en el eje z.

Tabla 1 Resultados de simulaciones sin precarga en conexiones de la estructura.

Localización de la carga estructura	Torque conexiones estructura	Valor promedio amplitud eje x (G)	Valor promedio amplitud eje y (G)	Valor promedio amplitud eje z (G)	Valor máximo amplitud eje x		Valor máximo amplitud eje y		Valor máximo amplitud eje z	
					G	Hz	G	Hz	G	Hz
Frontal-izquierda	0	0.002765	0.001571	0.000594	0.5442	19.99	0.07055	40.72	0.04975	19.99
Frontal-derecha	0	0.002837	0.001274	0.0006024	0.4759	19.99	0.04448	40.75	0.04229	19.99
Frontal-centro	0	0.004086	0.001105	.0007738	0.04115	20.07	0.0333	40.75	0.05125	20.07
Centro	0	0.002433	0.001753	0.001349	0.363	19.96	0.06861	40.75	0.0635	40.09
Posterior-izquierda	0	0.00228	0.003436	0.0008542	0.2717	20.06	0.3126	20.06	0.02784	20.06
Posterior-derecha	0	0.001262	0.00117	0.0004689	0.07643	20.03	0.037	20.03	0.006053	38.89
Posterior-centro	0	0.001572	0.001315	0.001086	0.1533	20.03	0.1042	20.03	0.02834	0.6664

Tabla 2 Resultados de simulaciones con precarga en conexiones de la estructura.

Localización de la carga en la estructura	Torque conexiones de la estructura (kg-cm)	Valor promedio amplitud eje x (G)	Valor promedio amplitud eje y (G)	Valor promedio amplitud eje z (G)	Valor máximo de amplitud eje x		Valor máximo de amplitud eje y		Valor máximo de amplitud eje z	
					G	Hz	G	Hz	G	Hz
Frontal Izquierda	23.03	0.005578	0.003749	0.001974	0.291	40.7	0.1446	20.07	0.04496	20.07
Frontal Derecha	23.03	0.002769	0.001676	0.001154	0.2258	20.03	0.1707	40.69	0.02582	40.09
Frontal centro	23.03	0.004675	0.002549	0.00235	0.4907	20.03	0.09626	20.03	0.05102	20.03
Centro	23.03	0.00412	0.00335	0.001497	0.3116	19.99	0.1647	20.73	0.06316	19.99
Posterior derecha	23.03	0.004933	0.005282	0.006117	0.2754	19.93	0.3372	19.93	0.6496	19.96
Posterior izquierda	23.03	0.002822	0.002487	0.002377	0.1255	40.72	0.1248	40.72	0.02552	20.66
Posterior centro	23.03	0.004508	0.006862	0.008587	0.256	40.69	0.1546	19.89	0.08914	2.233

Debido a la naturaleza de la operación de las estructuras, las vibraciones pueden cambiar de acuerdo con el propósito que deban cumplir dichas estructuras (turbinas eólicas, torres de distribución eléctrica, puentes, represas, edificios, túneles, almacenes de combustibles, ductos, integridad perimetral, etc.), las condiciones para el sistema de monitoreo pueden cambiar en las condiciones de amplitudes de aceleración y frecuencia permisibles. El sistema propuesto permite adecuar los parámetros necesarios para ajustarse a los requerimientos del usuario, estableciendo un rango de operación específico donde evitar falsos positivos de condiciones inseguras de operación. Se observa en tablas 1 y 2, que los valores de aceleración detectados por el sensor MPU-6050 varían de acuerdo con la posición que tenga la carga en la estructura, así como del torque que tengan las conexiones.

4. Conclusiones

Se concluye que el dispositivo desarrollado aporta elementos para diagnosticar un nivel de seguridad apropiado, el cual permite predecir daños significativos a los equipos y mantener la continuidad de los procesos de producción, mediante desarrollos tecnológicos a bajo costo.

Construcción de prototipos de bajo costo que permitan cumplir satisfactoriamente con el monitoreo de salud estructural otorga la posibilidad de ser implementados de forma rápida en donde se requiera asegurar el estado de la rigidez en una estructura y, en consecuencia, incrementar la confiabilidad en la operación normal y maximizar el tiempo de vida útil del sistema donde sea aplicado.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Farrar, C., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *An introduction to structural health monitoring*, 303-315. DOI: 10.1098 / rsta.2006.1928.
- [2] Lorenzo, E., Manzato, S., & Peeters, B. (2017). Structural Health Monitoring strategies based on the estimation of modal parameters. *Procedia Engineering*, 199(1), 3182-3187.
- [3] Martínez, B. R. Pino, T. J. Terán H. H. y Arteaga L. O., *Vibraciones Mecánicas I*, Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2017a.
- [4] Martínez, B. R. Pino, T. J. Terán H. H. y Arteaga L. O., *Vibraciones Mecánicas II*, Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2017b.
- [5] Ocampo, J. O. (2013). Sistema de bajo costo para monitoreo de disturbios de vibración en máquinas rotatorias. *Innovare*, 14-30.
- [6] Sabato, A., & Niezrecki, C. (2017). Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 17(2), 226-235.
- [7] Yuequan, B., & Zhicheng, C. (2019). The State Of the Art Data Science and Engineering in Structrual Health Monitoring. *Engineering*, 5(2), 234-242.